



การสร้างชุดทดสอบความคงทนได้อิเล็กทริกต่อไฟฟ้าแรงดันสูงของฉนวนไฟฟ้า  
Design of High Voltage insulation dielectric strength testing

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว



งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กทริกต่อไฟฟ้าแรงดันสูงของฉนวนไฟฟ้า

ผู้วิจัย : ผศ.ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. : 2561

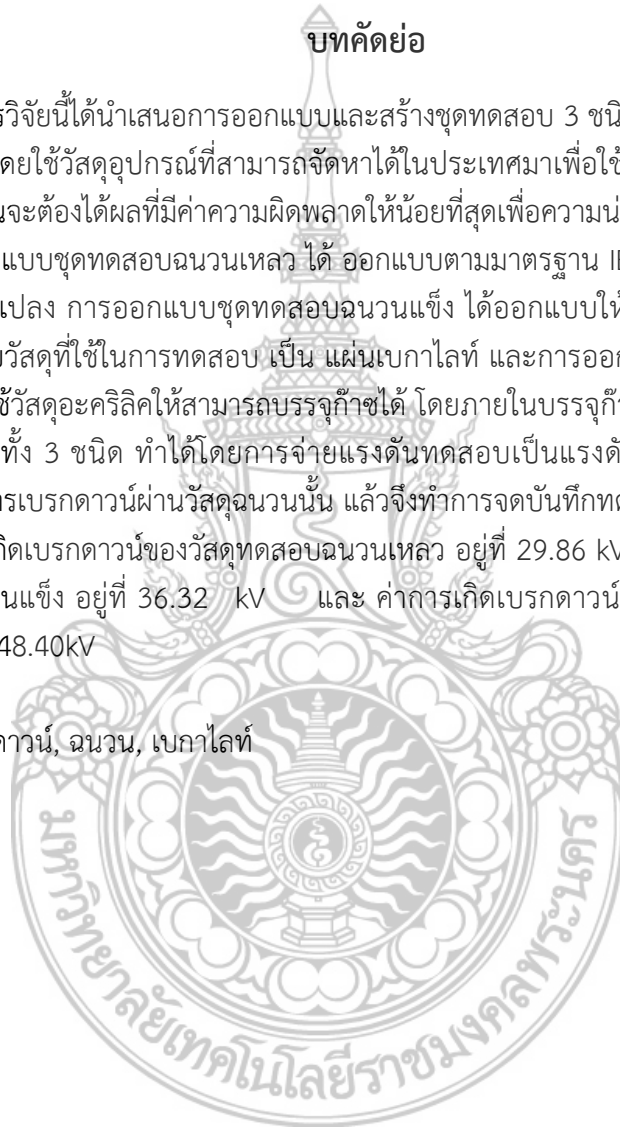
### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ในประเทศมาเพื่อใช้ในการสร้างชุดทดสอบ โดยในการทดสอบนั้นจะต้องได้ผลที่มีค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุดเพื่อความน่าเชื่อถือและแม่นยำ

การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเหลว ได้ ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 156 โดยใช้วัสดุทดสอบเป็น น้ำมันหม้อแปลง การออกแบบชุดทดสอบฉนวนแข็ง ได้ออกแบบให้มีระยะในการจับวัตถุแบบปรับระยะได้ โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เป็น แผ่นเบกาไลท์ และการออกแบบชุดทดสอบฉนวนก๊าซ ได้ออกแบบโดยใช้วัสดุอะคริลิกให้สามารถบรรจุก๊าซได้ โดยภายในบรรจุก๊าซออกซิเจนความดัน 2Bar การทดสอบวัสดุทั้ง 3 ชนิด ทำได้โดยการจ่ายแรงดันทดสอบเป็นแรงดันสูงกระแสสลับ ให้กับชุดทดสอบจนเกิดการเบรกดาวนผ่านวัสดุฉนวนนั้น แล้วจึงทำการจดบันทึกทดสอบ

ค่าการเกิดเบรกดาวนของวัสดุทดสอบฉนวนเหลว อยู่ที่ 29.86 kV ค่าการเกิดเบรกดาวนของวัสดุทดสอบฉนวนแข็ง อยู่ที่ 36.32 kV และ ค่าการเกิดเบรกดาวนของวัสดุทดสอบฉนวนก๊าซ (ออกซิเจน)อยู่ที่ 48.40kV

คำสำคัญ: เบรกดาวน, ฉนวน, เบกาไลท์



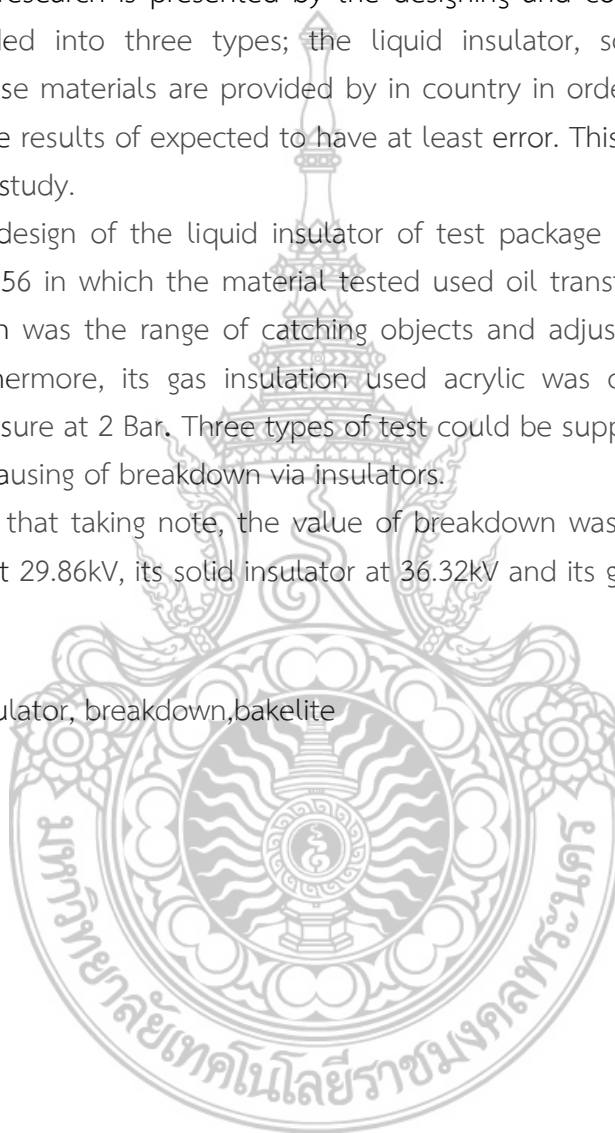
Title : Design of high voltage insulation dielectric strength testing  
Researcher: Assistant Professor Dr.Supawud Nedphokaew  
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP  
Year : 2018

This research is presented by the designing and constructing test package that are divided into three types; the liquid insulator, solid insulator and gas insulator. These materials are provided by in country in order to construct the test package for the results of expected to have at least error. This leads to reliability and validity in this study.

The design of the liquid insulator of test package was conducted by the standard IEC 156 in which the material tested used oil transformer. Additionally, its solid insulation was the range of catching objects and adjusting using the sheet of bakelite. Furthermore, its gas insulation used acrylic was consisted of gas inside oxygen of pressure at 2 Bar. Three types of test could be supplied AC high voltage to test package causing of breakdown via insulators.

After that taking note, the value of breakdown was the liquid insulator of test material at 29.86kV, its solid insulator at 36.32kV and its gas insulator (oxygen) at 48.40 kV

**Keywords:** insulator, breakdown, bakelite



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการงานวิจัยเรื่องการสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กทริกต่อไฟฟ้าแรงดันสูงของฉนวนไฟฟ้านี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่ครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว  
ผู้วิจัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 ระยะเวลาดำเนินงาน	3
1.7 นิยามศัพท์	4
2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	5
2.2 คุณสมบัติของฉนวนแข็ง	6
2.3 คุณสมบัติของฉนวนเหลว	14
2.4 คุณสมบัติของฉนวนก๊าซ	21
3. วิธีดำเนินการ	
3.1 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเหลว	32
3.2 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนแข็ง	36
3.3 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนก๊าซ	38
3.4 โต้ะวางชุดทดสอบ	39
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง	42
4.2 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว	43
4.3 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซออกซิเจน	44
4.4 อภิปรายผล	45
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ	46
5.3 ข้อเสนอแนะในการดำเนินโครงการ	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก ก ข้อมูลเกี่ยวกับมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงในการทดสอบ	49
ภาคผนวก ข รูปภาพการทำงาน	81
ภาคผนวก ค ใบงานปฏิบัติการทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	85
ภาคผนวก ง การใช้งานชุดทดสอบฉนวน	89
ภาคผนวก จ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ ระดับชาติ	94
ประวัติผู้วิจัย	101



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินโครงการ	3
1.2	นิยามศัพท์	4
2.1	คุณสมบัติของวัสดุฉนวน	13
2.2	ศักย์ไฟฟ้า Breakdown ต่ำสุดของก๊าซชนิดต่างๆ	19
4.1	ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง	42
4.2	ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว	43
4.3	ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซออกซิเจน	44



## สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ที่ผันแปรไปตามช่วงเวลา	7
2.2	ลักษณะดิสชาร์จเบรกดาวน์แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ	9
2.3	แสดงการเกิด Streamer ในฉนวนแข็ง	11
2.4	แสดงศักย์ไฟฟ้า และกระแสที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง	11
2.5	แสดงขนาดของโพรงอากาศและขนาดของ Specimen	12
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ Electric Field ในฉนวนเหลว	16
2.7	แสดงขบวนการเบรกดาวน์ของหยดน้ำมันภายในฉนวน	18
2.8	แสดงการเรียงตัวของอนุภาคของแข็งในน้ำมันก่อนป้อน High Voltage และหลังป้อน High Voltage	18
2.9	แสดงความสัมพันธ์ของระยะแกปกับแรงดัน Breakdown ของน้ำมันหม้อแปลง	20
2.10	ตัวอย่างความสัมพันธ์กระแสแรงดันของแกปดิสชาร์จน็อน	23
2.11	ลักษณะดิสชาร์จเบรกดาวน์ในแกป	24
2.12	Graph แสดงการเบรกดาวน์ของก๊าซ	24
2.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้า Breakdown Vs กับผลคูณของความดันและระยะห่าง ( $P_d$ ) ของการ $CO_2$ , Air และ $H_2$	26
2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log/Log/lo$ กับระยะแกป	28
2.15	แสดงระยะแกประหว่างเพลท	31
3.1	รูปทรงอิเล็กโทรดตามมาตรฐาน IEC 156	32
3.2	แป้นยึดกับภาชนะใส่น้ำมันเพื่อฟิกส์ศูนย์กลาง	34
3.3	ชุดแกนอิเล็กโทรดปรับระยะได้	34
3.4	การออกแบบภาชนะใส่น้ำมัน	35
3.5	ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงมาตรฐาน IEC 156	35
3.6	ชุดมอเตอร์กวนน้ำมัน 24Vdc	36
3.7	ชุดทดสอบฉนวนแข็ง	37
3.8	รายละเอียดโดยรวมชุดทดสอบฉนวนแข็ง	37
3.9	วงจรสมมูลชุดทดสอบฉนวนฉนวนแข็ง	38
3.10	รายละเอียดโดยรวมชุดทดสอบฉนวนก๊าซ	38
3.11	วงจรสมมูลชุดทดสอบฉนวนก๊าซ	39



## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.12	โต๊ะวางชุดทดสอบ	39
3.13	วงจรป้องกันแหล่งจ่าย	40
3.14	วงจรควบคุมการทำงาน	41
4.1	กราฟแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนแข็ง	43
4.2	กราฟแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนเหลว	44
4.3	กราฟแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนก๊าซ	45



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้ากำลังเริ่มตั้งแต่ระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดเป็นระบบที่ใช้ระดับแรงดันสูงเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ปัญหาสำคัญยิ่งประการหนึ่งของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูงก็คือการฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าความผิดพลาดที่เกิดในระบบส่งจ่ายส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน หรือการใช้ฉนวนที่ไม่ได้คุณภาพ หรือการใช้งานกับระดับแรงดันที่สูงเกินกว่าที่ฉนวนสามารถคำนวณได้ฉนวนไฟฟ้าจึงมีความสำคัญยิ่งในงานวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญที่ใช้มากในหม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์สายส่ง อุปกรณ์ต่างๆ ในสถานีไฟฟ้า

ฉนวนที่ใช้กับงานไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่ ฉนวนก๊าซ เป็นฉนวนแทรกซึม และเป็นตัวระบายความร้อนเป็นฉนวนที่กลับคืนสู่สภาพฉนวนได้เร็ว ฉนวนเหลว โดยทั่วไปคือน้ำมันหม้อแปลง เป็นฉนวนที่สามารถคืนสภาพฉนวนได้หลังเบรกดาวน์ ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงจะลดลงเมื่อมีความชื้น หรือตะกอนของอนุภาคเจือปนสิ่งเจือปนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นเวลานานๆ ฉนวนแข็ง มีความเป็นฉนวนสูงกว่าฉนวนสองชนิดแรกแต่จะสามารถเสียสภาพฉนวนอย่างถาวรหลังเกิดเบรกดาวน์ และถ้าหากฉนวนมีความบกพร่องหรือไม่มีคุณภาพย่อมก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบไฟฟ้าได้ ความบกพร่องของฉนวนอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ หลายสาเหตุ สาเหตุที่สำคัญสาเหตุหนึ่งก็คือความบกพร่องอันเนื่องจากการผลิต อย่างเช่น ลูกถ้วยพอร์ซเลนที่มีการผลิตที่ไม่ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดทำให้ได้ลูกถ้วยฉนวนที่มีความบกพร่องในเนื้อพอร์ซเลนดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันข้อผิดพลาดจากการนำวัสดุฉนวนที่มีข้อบกพร่องดังกล่าวมาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบฉนวนก่อนนำไปใช้งานจริงที่ในการทดลองทดสอบวัสดุฉนวนมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบค่าความคงทนฉนวนเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการฉนวนโดยทั่วไปหากให้อุปกรณ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศหรือทดสอบจากตามหน่วยงานต่างๆ อาจจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในราคาที่ค่อนข้างสูงในการทดสอบฉนวนที่ได้จากผู้ผลิต หรือฉนวนที่ได้จากการใช้งานมาระยะหนึ่งแล้วสามารถที่ประดิษฐ์ที่ได้คิดค้นขึ้นมาเองได้โดยอาศัยความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ในประเทศมาเพื่อใช้ในการ

สร้างชุดทดสอบโดยในการทดสอบนั้นจะต้องได้ผลที่มีค่าความผิดพลาดและคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด เพื่อความน่าเชื่อถือและแม่นยำของชิ้นงานที่จะสามารถนำไปใช้จริงได้อย่างถูกต้อง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างเครื่องมือทดสอบความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและใช้ประกอบการเรียนการสอนใน วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 1.2.2 เพื่อทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุฉนวน 3 ชนิด ได้แก่ ชุดฉนวนแข็งชุดฉนวน น้ำมัน และชุดฉนวนก๊าซ
- 1.2.3 เพื่อรองรับการทดสอบและงานวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ในอนาคต

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เป็นเครื่องมือวัดแรงดันสูงกระแสสลับขนาดพิกัดวัดแรงดัน 50kV
- 1.3.2 วัสดุฉนวนทดสอบ 3 สถานะประกอบไปด้วย
  - ฉนวนแข็ง คือแผ่นเบกาไลต์ขนาด $50 \times 200 \times 3$ mm.
  - ฉนวนเหลว คือน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC 602066:2012 และ IEC 61125:1992 แบบOxidation Stabilityปริมาณ 500ml.
  - ฉนวนก๊าซ คือ ก๊าซ  $O_2$ แรงดัน 2bar
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์โดยมีส่วนประกอบดังนี้
  - ชุดทดสอบฉนวนแข็ง
  - ชุดหัวอิเล็กโทรดน้ำมันอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 156
  - ชุดกระบอกอิเล็กโทรดก๊าซขนาดความหนา 5mm. ทนแรงดันได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้อุปกรณ์ทดสอบความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่สามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนใน วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- 1.4.2 สามารถนำไปใช้ทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุฉนวน 3 ชนิด ได้แก่ชุด ฉนวน แข็ง ฉนวนน้ำมันและฉนวนก๊าซ
- 1.4.3 สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในอนาคต

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาสาเหตุและที่มาของปัญหา
- 1.5.2 ศึกษาเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 ออกแบบชุดทดสอบฉนวนทั้ง 3 สถานะ
- 1.5.4 ดำเนินการจัดทำชุดทดสอบฉนวนตามที่ได้ออกแบบไว้
- 1.5.5 แก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องของชิ้นงาน
- 1.5.6 ทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนทั้ง 3 สถานะและจดบันทึกผล
- 1.5.7 จัดทำข้อมูลเสนอและจัดทำเล่มปริยญาานิพนธ์

## 1.6 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

หัวข้องาน	เดือนที่ 1	เดือนที่ 2	เดือนที่ 3	เดือนที่ 4
1.ศึกษาสาเหตุและที่มาของปัญหา				
2.ศึกษาเอกสาร และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง				
3.ออกแบบชุดทดสอบฉนวนทั้ง 3 สถานะ				
4.ดำเนินการจัดทำชุดทดสอบฉนวนตามที่ได้ออกแบบไว้				
5.แก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องของชิ้นงาน				
6.ทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนทั้ง 3 สถานะและจดบันทึกผล				
7.จัดทำข้อมูลเสนอและจัดทำเล่มปริยญาานิพนธ์				

## 1.7 นิยามศัพท์

### ตารางที่ 1.2 นิยามศัพท์

คำศัพท์	ความหมาย
แผ่นเบกาไลต์	เป็นฉนวนกันไฟฟ้าที่ีระดับหนึ่งซึ่งจะมีคุณสมบัติแข็ง แต่ไม่มีความเหนียวจะใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทางด้านไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ใช้ประกอบในตู้คอนโทรลไฟฟ้าใช้งานในด้านไฟฟ้าแรงสูงใช้เป็นฐานรองหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นต้น สีที่มีได้แก่ สีส้ม สีน้ำตาล และสีดำ
ออกซิเจน	ออกซิเจนเป็นแก๊สชนิดหนึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ O <sub>2</sub> ออกซิเจนไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และอยู่ในบรรยากาศประมาณ 21% ของปริมาตรอากาศช่วยในการเผาไหม้ และช่วยให้มนุษย์ชาติดำรงชีวิตอยู่ได้ ออกซิเจนสามารถบรรจุลงในท่อ หรือภาชนะที่หุ้มฉนวนในรูปของก๊าซ ที่ความดัน 2,200psi
น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	น้ำมันที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมันดิบ ใช้สำหรับเป็นฉนวน และระบายความร้อนให้กับขดลวดภายในหม้อแปลงมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันหล่อลื่น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

ฉนวนของไฟฟ้าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติต่อการกีดกันการนำของกระแสไฟฟ้า และสามารถทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าทั้งจากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า หรือจากการทำงานผิดพลาดของระบบไฟฟ้าที่เรียกว่า ระบบแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตช์ซึ่ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคนิคการออกแบบฉนวนในส่วนของฉนวนทางไฟฟ้าโดยหลักการของฉนวนนั้นต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ฉนวนได้รับ และตัดการนำของกระแสไฟฟ้าได้เป็นหลัก ทั้งนี้ยังต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่นๆ อีก เช่น พลังงานแพกเตอร์ที่สูญเสียไปในหม้อแปลงที่จะมีผลกระทบต่อความร้อนของหม้อแปลงทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นดังนั้นฉนวนจะต้องเป็นวัสดุที่ระบายความร้อนได้เป็นคุณสมบัติต่อมา การระบายความร้อนของฉนวนจะต้องมีค่ารีแอกแตนซ์ และแรงทางกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะระบบไฟฟ้าเกิดทำงานลัดวงจร โดยสรุปคุณสมบัติของฉนวนทั้ง 3 สถานะที่จะทำการทดสอบได้ดังนี้ ทนต่อความร้อน แรงกล ค่าใช้จ่ายในการทำฉนวน สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม และหากใช้ระยะแกปมากก็ยิ่งจะทำให้สิ้นเปลืองในการใช้ฉนวนทดสอบตรงกันข้ามหากใช้ฉนวนเยอะเกินไปก็จะทำให้เกิดปัญหาด้านระบายความร้อน ฉะนั้นฉนวนที่ดีจะต้องมีความพอดีไม่มากไม่น้อยเกินไป และอยู่ในสถานการณ์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานฉนวน

ความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในฉนวนของฉนวนไฟฟ้าอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น เกิดวาบไฟผ่านฉนวนในน้ำมันสาเหตุจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินเป็นผลให้เกิดเบรกดาวนในฉนวนแข็ง หรือดิสชาร์จบางส่วนซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่มักจะพบได้ในกรณีฉนวนขัดข้องอาจทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลง หรือเกิดการเสื่อมสภาพไปยังตัวอุปกรณ์ได้ ค่าความคงทนของฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันใช้งาน หรือแรงดันเกินอาจทดสอบได้ด้วยวิธีการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ หรือความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ ทั้งกรณีทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น และรูปคลื่นตัด หรือทดสอบด้วยการวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้

ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจจะเป็น ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เช่น ระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบสายชิงอากาศ ใช้ลูกถ้วยเซรามิกเป็นฉนวนกั้นระหว่างตัวนำกับเสาส่งฉนวนเหลวอย่าง เช่นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้เป็นตัวกั้นระหว่างขดลวดในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า และฉนวนก๊าซ (SF<sub>6</sub>) ซึ่งใช้ในระบบ Gas Insulated Switchgear (GIS) เป็นฉนวนกั้นระหว่างเฟสเป็นต้น ฉนวนที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะต้องเป็นฉนวนที่มีคุณสมบัติทางฉนวนที่ดีในสภาพการเปลี่ยนแปลงที่กว้าง เช่น ใช้ได้กับอุณหภูมิในช่วงกว้างตั้งแต่อุณหภูมิน้ำแข็งถึงอุณหภูมิน้ำเดือดใช้กับความถี่ในช่วงกว้างตั้งแต่ไฟฟ้ากระแสตรงจนถึงความถี่วิทยุ เป็นต้น ฉนวนที่ประกอบเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงแล้วอาจจะมีปัญหายุ่งยากที่จะทดสอบคุณภาพของฉนวนจึงต้องเลือกวิธีทดสอบที่เหมาะสมซึ่งเมื่อทดสอบแล้วต้องไม่ทำลายสภาพ

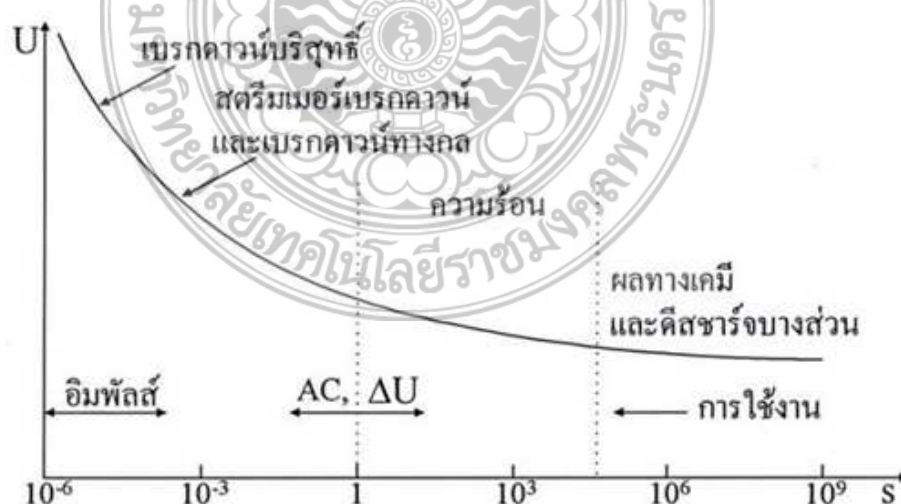
การเป็นฉนวนโดยวัสดุทดสอบต้องสามารถทนได้ต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่มีค่าสูงกว่าแรงดันใช้งานได้หลายๆ เท่า และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กทริกต้องมีค่าต่ำความต้านทานการฉนวนต้องมีค่าสูงเพื่อมิให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นเนื่องจากความร้อน การฉนวนควรปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในอันเป็นต้นเหตุให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพเร็ว

## 2.2 คุณสมบัติของฉนวนแข็ง

คุณลักษณะ และสมบัติของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วย ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เฟอร์มิตติวิตี้ แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ความคงทนต่อแรงกล ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อน การเบรกดาวน์ในของแข็งนั้นมีลักษณะแตกต่างจากของเหลว และก๊าซ คือ ของแข็ง เมื่อเกิดการเบรกดาวน์จะแตกสลายทันทีที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกแต่ของเหลว หรือก๊าซเมื่อเบรกดาวน์แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ดังนั้นฉนวนแข็ง เช่น ลูกล้วน จะต้องมีคุณสมบัติที่ดีดังนี้

- (ก) มีค่าสูญเสียใน Dielectric ต่ำ (Low Dielectric Loss)
- (ข) ไม่มีรูพรุน หรือความชื้น (Gaseous Cavity and Moisture)
- (ค) ทนต่อแรงดึงทางกลได้สูง (High Mechanical Strength)
- (ง) ทนทานต่ออุณหภูมิ (Thermal Resistance)
- (จ) ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของระบบ
- (ฉ) ทนต่อสารเคมี (Chemical Deterioration)

กลไกการเบรกดาวน์ลักษณะต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ผันแปรไปตามช่วงเวลา

การเบรกดาวนของของแข็งมีขบวนการกลไกการเบรกดาวนอยู่ 8 ลักษณะ

### 2.2.1 ขบวนการเบรกดาวนเนื่องจากเนื้อสาร (Intrinsic Breakdown)

การเบรกดาวนแบบนี้เมื่อดูจากกราฟจะเห็นว่าจะต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงมาก วัสดุใดที่มีเนื้อสารที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน และทนต่อแรงทางกลได้มากกว่า  $100 \text{ Kg/cm}$  มีความนำไฟฟ้าต่ำ และไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง และเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ การเบรกดาวนไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเราเรียกการเบรกดาวนนี้ว่า เป็นการเบรกดาวนแบบ Intrinsic จากการทดลองฉนวนของแข็งที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมจะมีค่า Intrinsic Breakdown สูงสุดประมาณ  $0.2 \text{ MV/cm}$

### 2.2.2 ขบวนการเบรกดาวนจากแรงกลไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)

ฉนวนแข็งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของฉนวนด้านสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างด้านผิวของฉนวนดังกล่าว ทำให้เนื้อฉนวนได้รับแรงอัดบีบตัวได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะทำให้เกิดแตกสลายก โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนจากสนามไฟฟ้ารวม  $1 \text{ MV/cm}$  จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เงื่อนไขของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงกลไฟฟ้าวิกฤตอาจคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

แรงอัดที่เกิดจากสนามไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพสมดุลได้ถ้า

$$\frac{\epsilon E^2}{2} = Y \ln \frac{d_0}{d} \quad (2.1)$$

โดยที่  $E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า  $\frac{U}{d}$

$U$  คือ แรงดันที่ป้อน

$D$  คือ ความหนาของฉนวนขณะที่ได้รับแรงอัด

$d_0$  คือ ความหนาเริ่มต้นของฉนวน

$Y$  คือ ยังก์โมดูลัส

$\epsilon$  คือ  $\epsilon_r, \epsilon_0$

แรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความหนาจะลดลง ฉะนั้น ค่าสูงสุด  $d^2 \ln(d_0 / d)$  โดยดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ  $d$  ได้เมื่อ

$$\frac{d_0}{d} = e^{0.5} = 1.67 \quad (2.2)$$



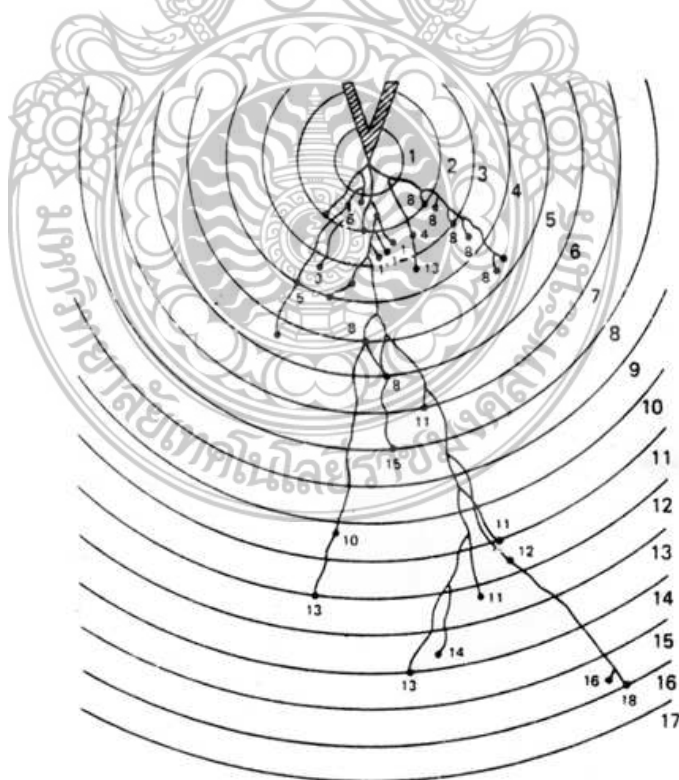
ซึ่งแสดงว่าจะเกิดความไม่สมดุลระหว่างความคงทนของฉนวนต่อแรงดันของฉนวนกับแรงกลไฟฟ้า ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า เมื่อ  $d_0 / d \geq 1.67$  นั่นคือฉนวนแข็งเริ่มแตกสลายเมื่อเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

$$E_{\max} = \frac{U}{d_0} \frac{1}{1.67} \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon}} \quad (2.3)$$

### 2.2.3 ขบวนการเบรกดาวนแบบ Streamer

ในสนามฟ้าสมอที่ได้อากอิเล็กโตรดฟ้าเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง เบรกดาวนอาจเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอน ที่เป็นไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสตรีมเมอร์ที่อธิบายการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ

ในทางปฏิบัติเบรกดาวน มักจะไม่เกิดทีละครั้งเดียว หรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการดีสชาร์จหลายครั้ง ดังในรูป 2.2 ที่ได้จากการทดลอง ป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างปลายแหลมรัศมี 0.254mm. กับแผ่นระนาบ โดยฝังปลายอิเล็กโตรด เข้าไปในเนื้อฉนวนโปร่งใสหนา 4.8mm. แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนมีรูปคลื่น  $1/30 \mu s$  จำนวน 190 ครั้ง สังเกตร่องรอยของดีสชาร์จแต่ละครั้ง ไม่เกิดแนวดีสชาร์จทุกครั้งทีป้อนแรงดัน ร่องรอยจะเกิดขยายตัวออกไปเป็นชั้นๆ จนกระทั่ง รอยดีสชาร์จ เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด เบรกดาวนก็เกิดขึ้นในกรณีของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับการเบรกดาวนจะเกิดขึ้นใช้เวลาป้อนแรงดันตั้งแต่หลายๆ วินาทีไปจนถึงเป็นนาาที



รูปที่ 2.2 ลักษณะดีสชาร์จเบรกดาวนแบบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ

## 2.2.4 ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน (Thermal Breakdown)

ค่าเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวน แต่ข้อนี้จะเป็นจริงจนถึงความหนาค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากฉนวนแข็งหนามากกว่านั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นได้อิเล็กทริก เนื่องจากกระแสไหลผ่าน จะเป็นผลให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา

เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวน แต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทแผ่กระจายออกไปสู่ตัวกลางรอบๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถระบายออกไปสู่ในตัวกลางๆ รอบๆ ได้ทัน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไป ก็จะทำให้เสียความสมดุล และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์แบบเทอร์มัลขึ้นได้ อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงาน ความสมดุลจะยังคงรักษาอยู่ได้ เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวน จะต้องเท่ากับความร้อนที่แผ่กระจายออกไป รวมกับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วย อุณหภูมิ

$$W_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(k \text{ grad } T) \quad (W / \text{cm}^3) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $C_v$  = สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน

$T$  = อุณหภูมิฉนวน (K)

$K$  = สภาพนำความร้อนของฉนวน

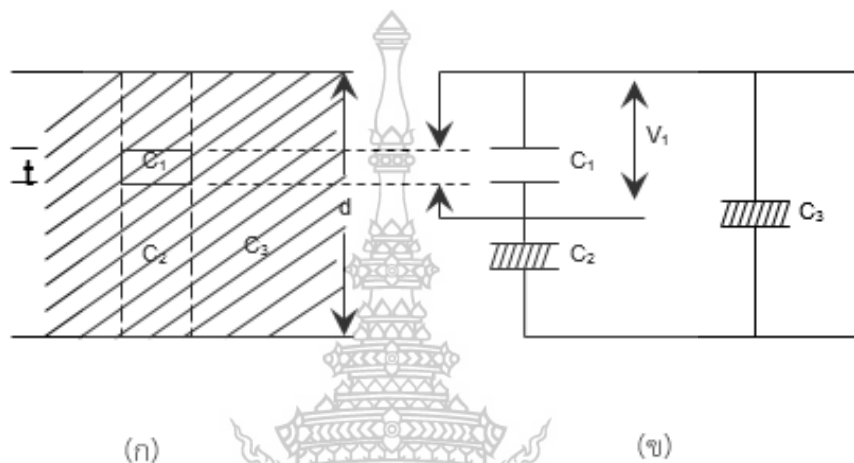
กำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อิเล็กทริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่ามากกว่าในสนามกระแสตรง เพราะในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีกำลังสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน ซึ่งโมเลกุลของได้อิเล็กทริกจะกลับขั้วไปมาตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงดันเทอร์มัลเบรกดาวน์ของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยิ่งลดลงตามความถี่เพิ่มขึ้น

## 2.2.5 ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจาก Tracking

Tracking คือ การสร้างทางเดินบนผิวฉนวนให้เป็นตัวนำอย่างถาวร (Permanent Conducting Path) การเกิด Tracking นั้นเกิดจากการที่ฉนวนเสื่อมคุณสมบัติลงในการเกิด Tracking จะมีปรากฏการณ์เกิดขึ้นดังนี้เกิด Conducting Film บนผิวของฉนวนทำให้เกิดกระแส Leakage ไหลผ่านได้ และในที่สุดกระแสรั่วจะหยุด และเกิดการ Spark ทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมคุณสมบัติ Degradation จากผลของการ Spark Conducting Film นี้เกิดจากความชื้นของบรรยากาศถูกดูดไว้ด้วยสารที่เกาะยึดบนผิวของฉนวน เช่น ฝุ่นเกลือ ผงถ่าน หยดน้ำ เป็นต้น ดังนั้นวิธีป้องกันการเกิด Tracking จะต้องทำให้ฉนวนสะอาดไม่เกิดความชื้น

## 2.2.6 ขบวนการเบรกดาวน์เนื่องจากโพรงภายในฉนวนแข็ง (Cavitation Breakdown)

ฉนวนไฟฟ้าที่มีในการผลิตฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยนั้นจะต้องไม่ให้เกิดโพรงอากาศภายใน เนื่องจากอากาศภายในมีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่า การเบรกดาวน์จึงเกิดขึ้นได้ง่ายขณะเกิดเบรกดาวน์จะทำให้ฉนวนแข็งบริเวณรอบโพรงอากาศเสียหายการเป็นฉนวนทำให้เกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้น และเกิด Punching ในที่สุด



รูปที่ 2.3 ก) แสดงโพรงอากาศภายในฉนวนแข็ง

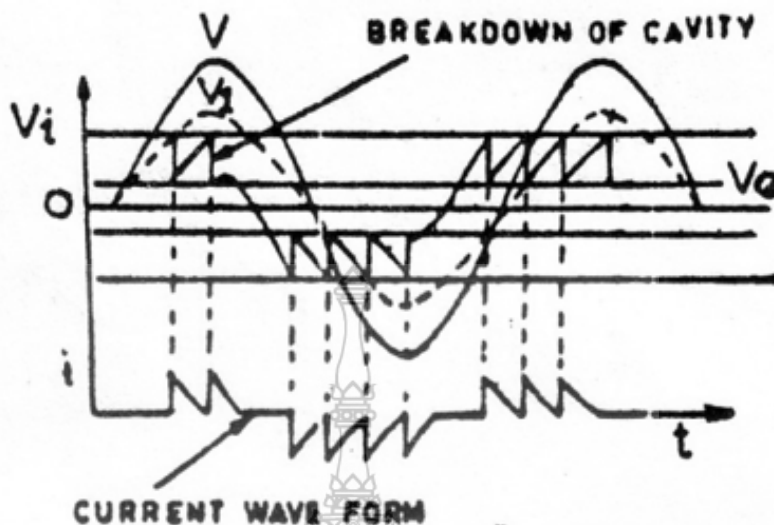
ข) วงจรเทียบเคียงวงจรรูป ก.

$$V_1 = \frac{vd_1}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}\right)d_2} \quad (kV) \quad (2.5)$$

โดยที่  $d_1$  และ  $d_2$  เป็นระยะห่างของความหนาโพรงซึ่งทำให้เกิดค่าไดอิเล็กทริก

ถ้า  $d_1 \leq d_2$  และโพรงถูกเติมด้วยก๊าซจะได้สมการ

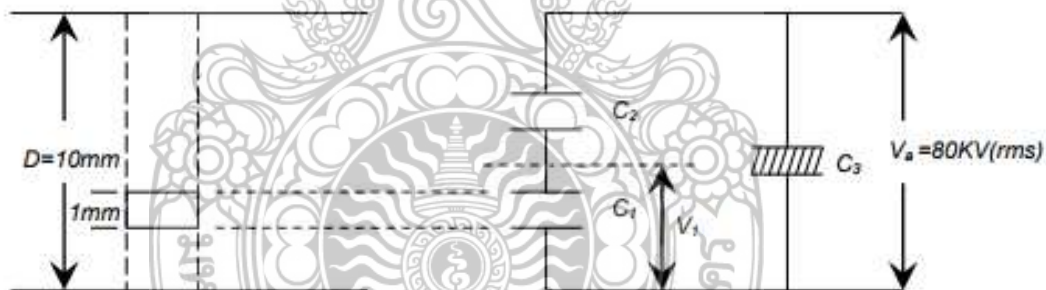
$$V_1 = v\epsilon_r \left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (kV) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.4 แสดงศักย์ไฟฟ้า และกระแสที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง

ตัวอย่าง

Specimen ซึ่งเป็นของแข็งมีค่า Dielectric Constant ดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงขนาดของโพรงอากาศ และขนาดของ Specimen

รูปที่ 2.5 มีโพรงอากาศหนา 1mm แต่ Specimen มีความหนา 1cm ถ้าเราใส่แรงดันระหว่าง Specimen ที่มีขนาด 80kV(rms) และสมมติให้โพรงอากาศมีอากาศอยู่ภายใน โดยกำหนดให้อากาศภายในโพรงมีค่า Breakdown Strength 30kVpeak/cm ให้คำนวณหาแรงดันที่ทำให้การดีสชาร์จเกิดขึ้นภายใน

วิธีทำ

จาก

$$V_1 = \frac{Vd_1}{\left(d_1 + \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}\right]d_2\right)} \quad (kV) \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$d_1 = 1 \quad (mm.)$$

$$d_2 = 9 \quad (mm.)$$

$$\epsilon_o = 8.89 \times 10^{-12} \quad F/m$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_r \epsilon_o = 4.0 \epsilon_o \quad F/m$$

$$V_1 = \frac{V \times 1}{(1+9/4)} = \frac{4V}{13} \quad (2.8)$$

ค่าแรงดันที่โพรงอากาศหนา 1mm. มีแรงดันเบรกดาวน์  $3(kV/mm) \times 1mm = 3kV$

$$V = \frac{13V_1}{4} = \frac{13 \times 3}{4} = \frac{39}{4} = 9.75 kV \text{ (peak)} \quad (2.9)$$

ค่า Internal Discharge จะปรากฏขึ้นเมื่อใส่แรงดัน Sinusoidal  $80 \sin \omega t \text{ kV}$  จนมีค่าถึง 9.75kV

ตัวอย่างคุณสมบัติของฉนวนแข็งที่ใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มีอยู่หลายชนิดได้แก่ กระดาษไฟเบอร์ไมก้า แก้วเหนียว ยาง พลาสติก สารสังเคราะห์ คุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ ค่าเปอร์มิตติวิตี แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ความต้านทานจำเพาะ และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุฉนวน

Insulating material	Dielectric constant $\epsilon_r$ at 50 Hz	Loss factor $\tan \delta \times 10^{-4}$		Specific resistance at 20°C $\Omega \cdot \text{cm.}$	Breakdown strength kV/mm
		at 50 Hz	at 1 MHz		
Glass	3.5-9	5-100	5-100	$> 10^{10}$	10-40
Ceramic insulators					
Glazed	6	170-250	10-120	$> 10^{11}$	35
Steatite	6	10-30	3-20	$10^{12}-10^{13}$	30-45
Sinterkorund	11	15	10	$10^{15}$	25-45
Mica-foil (made from mica, paper and shellac or asphalt)	4	200-400		$10^{13}$	17
Mineral oil (transformer oil)	2-2.5	1-5	1-5	$10^{13}-10^{14}$	10-25
Paper (insulating paper)					
dry	2-2.5	25-40	200-400	$10^{15}$	10-20
soaked in oil	3-4	10-30		$10^{15}$	40-50
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	$10^{16}$	~40
Epoxy casting resin EP	3.2-3.9	35-50	100-200	$10^{15}-10^{16}$	20-45

## ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุฉนวน (ต่อ)

Insulating material	Dielectric constant $\epsilon_r$ at 50 Hz	Loss factor $\tan \delta \times 10^{-4}$		Specific resistance at 20°C $\Omega \cdot \text{cm}$	Breakdown strength kV/mm
		at 50 Hz	at 1 MHz		
Phenolic resin moulding	5-15	100-300	50-700	$10^9-10^{14}$	10-40
Polyamide PA	3.5-4	300-1000	230-270	$10^8-10^{11}$	50
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	$10^{16}$	$\approx 40$
Polyethylene terephthalate PETP	3.2	20	190	$> 10^{15}$	160
Polycarbonate PC	3	7	110	$\geq 10^{16}$	$> 100$
Polyester casting resin UP	3-7	30-300	60-400	$10^{13}-10^{15}$	25-45
Polyacetal POM	4	10-15	55	$10^{15}$	70
Polymethylmethacrylate PMMA	3.5-4.5	500-600	150-300	$10_{16}$	$\approx 35$
Polypropylene PP	2.3-2.5		5-6	$10^{16}$	75
Polystyrene PS	2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	$10^{17}$	$\approx 55$
Polytetrafluorethylene TPFE	2.0	$< 2$	$< 2$	$10^{17}$	$\approx 25$
Polyvinyl chloride hard PVC	3.8-4.3	120-1500	60-1000	$10^{15}-10^{16}$	40
Silicone rubber Si	2.5 - 5	5-500	5-500	$10^{13}-10^{16}$	20-30

## 2.3 คุณสมบัติของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวจะมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลพอๆ กับขนาดของโมเลกุลซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซแล้วจะสั้นกว่ามากดังนั้นระยะทางอิสระที่อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้จึงสั้นมากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อยในการที่จะเกิดแตกตัวเป็นไอออนโดยการชนจึงต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากๆ

ฉนวนเหลวจะแตกต่างจากฉนวนแข็งที่โมเลกุล หรืออะตอมของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างแน่นหนาเหมือนกับโมเลกุล หรืออะตอมของฉนวนแข็งโมเลกุลของฉนวนเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระพอสมควรจึงทำให้อนุภาคไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายตามไปด้วย ฉนวนเหลวบริสุทธิ์นั้นหายาก เช่นเดียวกับก๊าซบริสุทธิ์ส่วนใหญ่แล้วในฉนวนจะมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ไม่มากนักน้อย เช่น ฝุ่นละออง หยดน้ำ เส้นใย ซึ่งจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับผลของสิ่งเจือปนเป็นอย่างมาก

หากเปรียบเทียบข้อดีของฉนวนเหลวโดยหลักการแล้วฉนวนเหลวจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนแข็ง และฉนวนก๊าซซึ่งสามารถสรุปถึงข้อดีของฉนวนเหลวได้ดังนี้

1. ฉนวนเหลวมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนก๊าซคือ ความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนก๊าซย่อมจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ
2. ฉนวนเหลวมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนแข็งคือ ฉนวนเหลวจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างได้ง่ายกว่าฉนวนแข็งจึงมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับฉนวนของแข็ง และฉนวนก๊าซ
3. ฉนวนเหลวสามารถถ่ายเทระบายความร้อนได้ดี
4. ฉนวนเหลวกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนเองได้หลังจากเกิดการดีสชาร์จผ่านพ้นไปแล้ว

แม้ว่าฉนวนเหลวจะมีคุณสมบัติที่ดีแล้วแต่โดยหลักการความเป็นจริงเชิงการค้าแล้วฉนวนเหลวจะไม่มี ความบริสุทธิ์ตั้งนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของ

### 2.3.1 ลักษณะคุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลวอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ

1. ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
  2. จุดติดไฟสูงย่อมหมายถึงโอกาสเกิดเพลิงไหม้ย่อมมีอากาศน้อย
  3. ความหนืดต่ำยิ่งความหนืดต่ำยิ่งระบายความร้อนได้ดี
  4. ความเป็นกรดจะแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว
  5. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าจะเป็นตัวชี้ให้ทราบว่าเกิดพลังงานสูญเสียเปล่ามากน้อยเพียงใด
- ถ้าพิจารณาจากโครงสร้าง และองค์ประกอบอาจแบ่งฉนวนเหลวได้ 2 ประเภทได้คือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวทางการค้า

ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ คือฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุลต่างๆ ปราศจากสิ่งเจือปน หรือมีแต่น้อยกว่าค่าที่กำหนด

ฉนวนเหลวเชิงการค้าคือ ฉนวนเหลวที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่บริสุทธิ์มีโครงสร้างหรือส่วนผสมของโมเลกุลต่างๆและอาจมีฟองอากาศผสมอยู่เนื่องจากจากฉนวนไฟฟ้าที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมันปกติจะเป็นสารประกอบของ Hydrocarbon และเป็นสารที่ทำให้เกิด Polarized น้อยมาก จึงทำให้มีค่าไดอิเล็กทริกสูง และคุณสมบัติของน้ำมันบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นฉนวนนั้นการเบรกดาวนนั้นไม่ขึ้นกับสารที่นำมาใช้ทำเป็นอิเล็คโทรดมากนักแต่ถ้าฉนวนน้ำมันปนเปื้อน ความชื้น หรือสาร Oxidized Elementแล้วจะทำให้ค่าไดอิเล็กทริกของฉนวนนั้นๆ ลดลง ตัวอย่าง เช่น Insulating Oil เมื่อมีน้ำปนเปื้อน หรือเจือปนในปริมาณ 0.01% ของปริมาณทั้งหมดจะทำให้ไดอิเล็กทริกลดลงจากค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดถึง 20% ของน้ำ

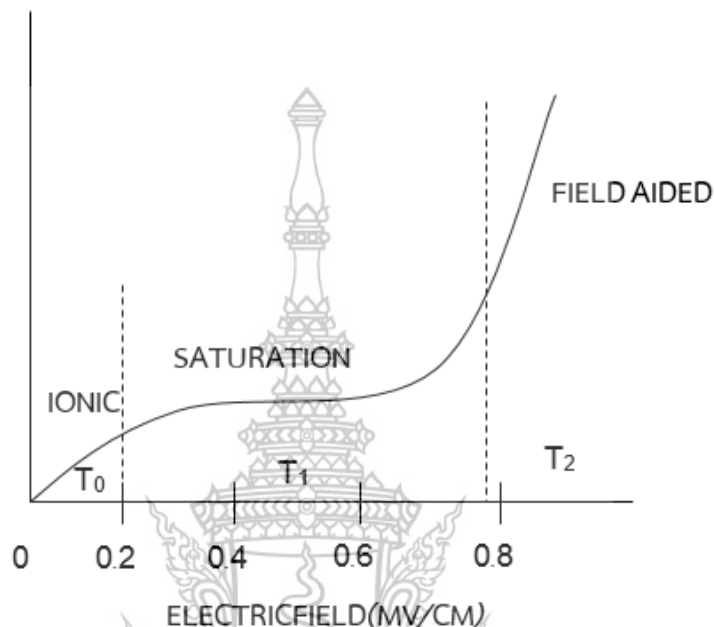
กลไกที่ใช้เบรกดาวนของของเหลวแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ

1. การเบรกดาวนแบบเดียวกับในการเบรกดาวนของก๊าซ
2. การเบรกดาวนโดยอาศัยหลักการของสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities) เจือปน หรือมีฟองอากาศเจือปนในของเหลว

### 2.3.2 ทฤษฎีการเบรกดาวนแบบเดียวกับการเบรกดาวนก๊าซ

จะเกิดการไอออไนเซชันของ Atom ภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งทฤษฎีนี้ใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดในทางปฏิบัติได้แต่ไม่แพร่หลาย ทฤษฎีนี้ส่วนใหญ่จะใช้อธิบายการเบรกดาวนของๆ เหลวบริสุทธิ์ การเบรกดาวนของของเหลวบริสุทธิ์นี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ กรณีที่สนามไฟฟ้าของอิเล็คโทรดที่อยู่ในของเหลวบริสุทธิ์มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากกว่า 100kV/cm กระแสที่ไหล

ผ่านฉนวนเหลวจะไม่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วแต่จะเกิดเบรกดาวนเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าถึงจุดๆหนึ่งในเวลาต่อมาดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และ Electric field ในฉนวนเหลว

จากรูปที่ 2.6 การเบรกดาวนในฉนวนเหลวบริสุทธิ์จะมีกระแสไหลแบ่งได้เป็น 3 ระยะเวลาคือ ระยะเวลา Ionic ในระยะนี้กระแสมีค่าสูงขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับ Dissociation ของ Ion ระยะอิ่มตัว Saturation นั้นกระแสจะมีค่าคงที่เนื่องจากเกิดการสมดุลกันระหว่างขบวนการไอออไนเซชันกับ Recombination ของประจุระยะสุดท้ายกระแสจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมากมายจนกระทั่งเบรกดาวนเนื่องจากประจุส่วนเกิน ถูกเร่งให้เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าจนเกิดไอออไนเซชันไปในที่สุด

### 2.3.3 ทฤษฎีการเบรกดาวนโดยอาศัยหลักการของสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities)

มีสารเจือปน หรือมีฟองอากาศเจือในของเหลวทำให้เกิดการเบรกดาวนซึ่งทฤษฎีนี้ไม่สามารถอธิบายการเบรกดาวนเนื่องจากของเหลวให้ชัดเจนเลยแต่อย่างไรก็ตามเบรกดาวนในสารไม่บริสุทธิ์นี้ พอสรุปได้คือ เกิดจาก Electron , ฟองก๊าซ, จากหยดของเหลวอื่นจาก Molecule ของๆ แข็ง , ผลจากความชื้น, อุณหภูมิ, ความดัน, การแปรเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าการเบรกดาวนเนื่องจาก Electron Schottky ได้ทำการทดลองโดยปล่อยศักย์ไฟฟ้าเข้าระหว่างอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในของเหลว แล้วเกิดกระแสไหลเนื่องจากขบวนการปล่อย Electron ออกจากผลของสนามไฟฟ้า และความดันซึ่งเขียนเห็นสมการได้ดังนี้

$$J = J_1 \varepsilon \left( \frac{4.4 \sqrt{ME}}{T} \right) \quad (A/cm^2) \quad (2.10)$$



$$J_t = AT^2 e^{(-\phi/KT)} \quad (A/cm^2) \quad (2.11)$$

$$J = \text{ความหนาแน่นของกระแส} \quad (A/cm^2)$$

$M$  = ค่าคงที่สำหรับผิวอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ กัน

$$E = \text{สนามไฟฟ้าที่ป้อน} \quad (N/C)$$

$J_t$  = ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากความดัน

$A$  = ค่าคงที่

$$T = \text{อุณหภูมิ} \quad (K^\circ)$$

$\phi$  = Work Function

$$KT = \text{พลังงานความร้อน} \quad (K)$$

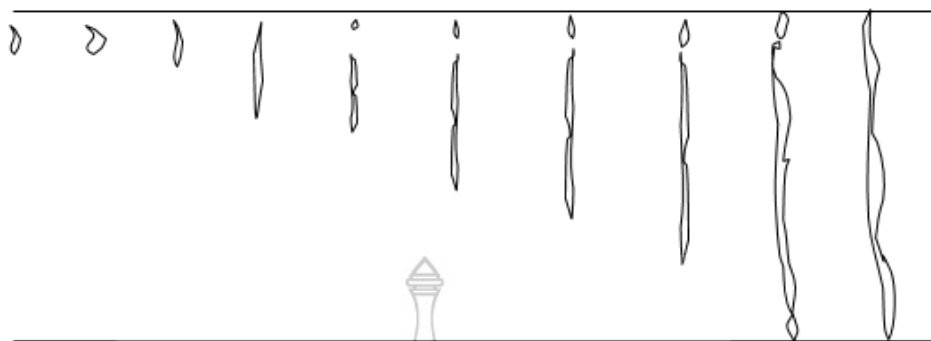
จะเห็นว่ากระแสจะขึ้นอยู่กัอุณหภูมิในสมการแต่การเบรกดาวนจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ ดังนั้นการเบรกดาวนจึงเกิดจากขบวนการ Thermonic Emission คือ เมื่อเกิด Electron ขึ้นโดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเมื่อ Electron มีพลังงานสูงพอ และไปชนกับ Molecule ของของเหลวจะเกิดไอออนเซชันและเกิด Avalanche และเกิดเบรกดาวนขึ้นในที่สุด

### 2.3.4 การเบรกดาวนเนื่องจากฟองก๊าซ

ปกติแล้วฉนวนเหลวจะมีก๊าซชนิดอื่นปนอยู่ด้วยแต่ไม่ได้อยู่ในรูปของฟองก๊าซแต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นได้ในรูปต่างๆ คือ เกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันของ Electron กับ Molecule เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จทำให้เกิดการระเหยของของเหลวเกิดจาก Space Charge ผลักกันจนมากพอที่จะชนะแรงดึงของผิวน้ำมันฟองก๊าซที่ผิวของอิเล็กทรอนิกส์

### 2.3.5 การเบรกดาวนเนื่องจากของเหลวอื่นๆ

เมื่อฉนวนเหลวถูกหยดของเหลวอื่นเจือปน และอยู่ใต้สนามไฟฟ้าจึงทำให้รูปร่างของหยดของเหลวที่ถูกเจือปนเปลี่ยนไปจากรูปทรงกลมเป็นรูปทรงกลมยาวตามแนวของสนามไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน ดังรูป



รูปที่ 2.7 แสดงขบวนการเบรกดาว์นของหยดน้ำมันภายในฉนวน

2.3.6 การเบรกดาว์นเนื่องจากอนุภาคของแข็ง

ฉนวนเหลวไม่บริสุทธิ์อาจมีอนุภาคของแข็งเล็กๆ กระจายอยู่เมื่อใส่สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเข้าไปจะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคดังนี้

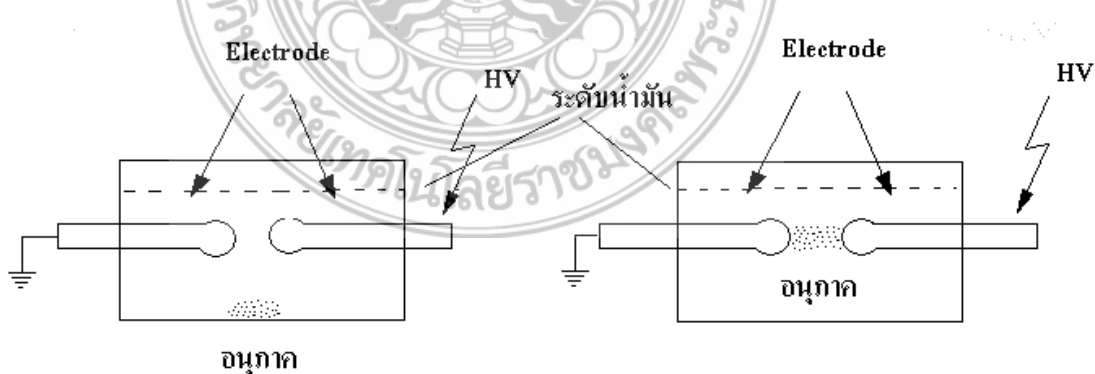
$$F = \gamma^3 K_0 \left[ \frac{K_1 - K_0}{K + 2K_0} \right] \text{ (EgradE) } \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\gamma$  = รัศมีของทรงกลม

$K$  = Permittivity ของของเหลว

$K_0$  = Permittivity ของอนุภาคเมื่ออยู่ในฉนวนเหลว

ถ้า  $K > K_0$  จะเกิดแรงขึ้นมีทิศทางไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง และ  $K < K_0$  จะเกิดทิศทางตรงข้ามกันกับ  $K > K_0$



รูปที่ 2.8 แสดงการเรียงตัวของอนุภาคของแข็งในน้ำมันก่อนป้อน High Voltage และหลังป้อน High Voltage

เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าถ้ำอนุภาคมีเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าของน้ำมันทำให้เกิดความเข้มของฟลักซ์ที่ผิวของอนุภาคจึงดึงอนุภาคอื่นๆ เข้าไปยังบริเวณที่มีฟลักซ์สูงเกิดเป็นลูกโซ่เรียงกันระหว่างผิวของ อิเล็กโทรดเมื่อสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของอนุภาคมีค่ามากกว่าอนุภาคของแข็งจึงเกิดการเบรกดาวนขึ้น

ตัวอย่าง จากการทดสอบเพื่อที่จะหาค่า Breakdown Strength ของน้ำมันหม้อแปลงซึ่งมีข้อมูลต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 การทดสอบเพื่อที่จะหาค่า Breakdown Strength ของน้ำมันหม้อแปลง

แกป(mm)	4	6	10	12
เบรกดาวน(kV)	90	140	210	255

ให้คำนวณหาค่าคงที่ และ Slope ของสมการแรงดันเบรกดาวนกับระยะแกปจากสมการ  $V = Kd^n$

เมื่อ V เป็นแรงดันเบรกดาวน

$K$  = ค่าคงที่

$n$  = Slope

$d$  = ช่องว่างอากาศ (mm)

วิธีทำ

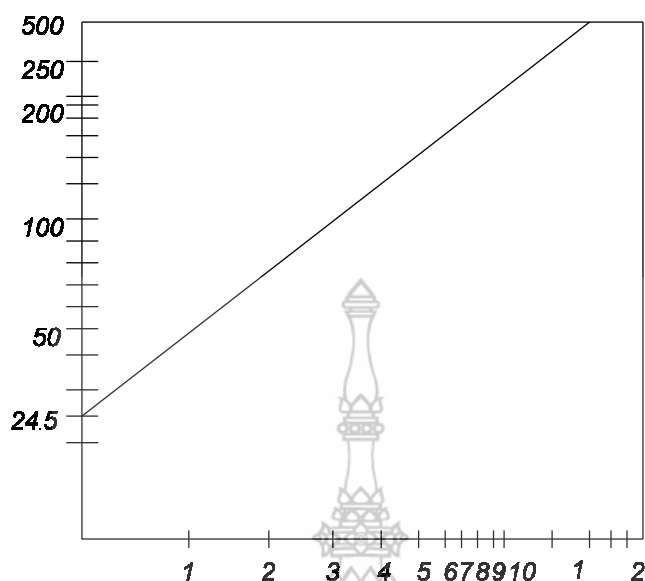
จากสมการ

$$V = Kd^n \quad (kV) \quad (2.13)$$

$$\log V = \log K + n \log d \quad (2.14)$$

$$\log V - \log K = n \log d \quad (2.15)$$

$$n = \frac{\log V - \log K}{\log d} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของระยะแกปกับแรงดันเบรกตาวนของน้ำมันหม้อแปลง

จากรูปได้ค่า

$$K = 24.5 \quad (2.17)$$

$$V = 24.5 d^{0.947} \quad (2.18)$$

ตรวจที่ระยะแกปเท่ากับ 4mm. ได้

$$V = 24.5(4)^{0.947} = 91kV \quad (2.19)$$

### 2.3.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลว

การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวสามารถแบ่งพิจารณาออกกว้างๆ ได้ 2 ลักษณะคือ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรง และปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยทางอ้อมซึ่งทั้งสองปัจจัยถือเป็นปัจจัยขั้นพื้นฐาน

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อฉนวนเหลวก็คือ ฉนวนเหลวที่ใช้ซึ่งฉนวนเหลวแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกัน เช่น ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลปริมาณสิ่งเจือปนที่ผสมอยู่ เป็นต้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้จัดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลว

ส่วนปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยอ้อมต่อการเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวก็คือ สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระยะแกปรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ทดสอบวัสดุที่ใช้ทำอิเล็คโทรด รูปร่างอิเล็คโทรด พื้นผิวของอิเล็คโทรด ซึ่งสามารถแบ่งแยกปัจจัยขั้นพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดเบรกตาวนในฉนวนเหลวได้ดังนี้

ปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดเบรกตาวนมีดังนี้

- ผลของอุณหภูมิ
- ผลของความดัน
- ผลของระยะแกป
- ผลของรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ทดสอบ
- ผลของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด
- ผลของรูปร่างอิเล็กโทรด
- ผลของพื้นที่ผิวอิเล็กโทรด

ปัจจัยจากฉนวนเหลวที่ใช้ที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาเบรกดาวน์มีดังนี้

- ผลจากสิ่งเจือปนของแข็ง
- ผลจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุล
- ผลจากโพรง และฟองก๊าซ

## 2.4 คุณสมบัติของฉนวนก๊าซ

ก๊าซเป็นฉนวนที่ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อนอากาศที่ใช้เป็นฉนวนของสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้เป็นฉนวนในระบบ Gas Insulated Substation ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซก็สามารถเสียได้เช่นกันเมื่อมีดีสชาร์จเกิดขึ้น ดีสชาร์จในก๊าซเป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุคือ อิเล็กตรอน และไอออนที่เกิดขึ้นที่จุดจลาจลจากระบวนการไอออไนเซชัน

ลักษณะธรรมชาติของก๊าซ ก๊าซที่สมบูรณ์ประกอบด้วยโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ที่ไม่มีรูปแบบ ก๊าซหนึ่งสถานะปกติโมเลกุลจะมีขนาด และน้ำหนักเท่ากันหมดมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระยะเคลื่อนที่ระหว่างที่ชน

### 2.4.1 กฎทั่วไปของก๊าซ

ข้อสมมติฐานของ Avogadro ก๊าซในสถานะเดียวกันมีจำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเท่ากัน

#### 2.4.1.1 ทฤษฎีจลน์เบื้องต้นของก๊าซ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซอธิบายได้ด้วยทฤษฎีกลไกของทาวน์เซนต์กลไกเบรกดาวน์แบบ Streamer กลไกทั้งสองอาศัยทฤษฎีจลน์เป็นพื้นฐานเกี่ยวกับระยะอิสระ การถ่ายทอด

พลังงาน การเกิดประจุอิสระโดยการไอออไนเซชันการเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุที่นำไปสู่การเกิด ดิสชาร์จเบรกดาว์ระยะอิสระเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda = \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} \quad (m) \quad (2.20)$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนโมเลกุลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$r_1$  และ  $r_2$  คือรัศมีของสองอนุภาคความยาวของระยะอิสระเฉลี่ยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ  $T$  และความดัน  $P$  ความหนาแน่น คือ

$$N = \frac{P}{kT} \quad (2.21)$$

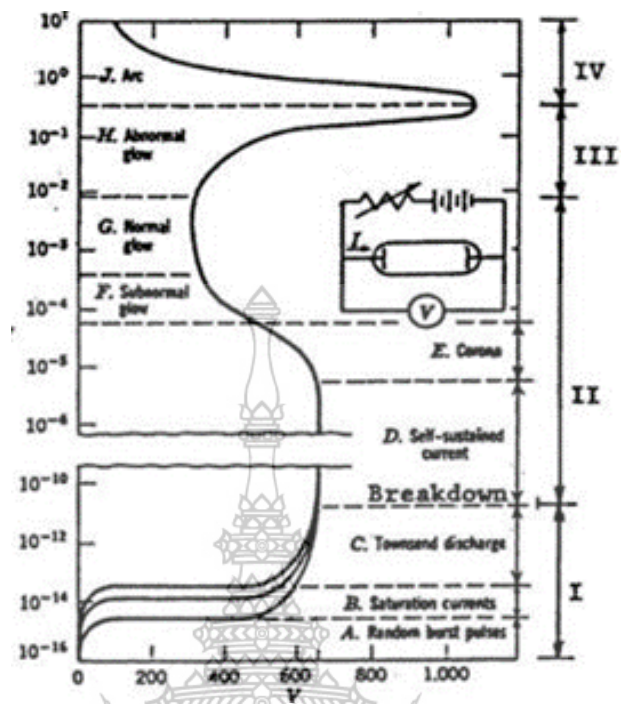
ฉะนั้น

$$\lambda_g = \frac{kT}{4\sqrt{2}\pi r_1^2 p} \quad (2.22)$$

อนุภาคประจุในก๊าซในก๊าซมักจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) ในบรรยากาศจำนวนไอออนที่มีอยู่จะเปลี่ยนไปตามสถานที่จะมีมากที่สุด ระดับสูงๆ และจะมีน้อยลงที่ระดับน้ำทะเลเมื่อมีฝนตก หรือมีหมอกจำนวนไอออนจะมีมากขึ้น และจะมีมากที่สุดเมื่อเกิดพายุฝนฟ้าคะนองแต่จำนวนอิเล็กตรอนจะมีน้อย  $N_e \approx 10$  ต่อ  $\text{cm}^3$  เพราะอิเล็กตรอนมักจะเกาะตัวบนโมเลกุลได้ง่าย

#### 2.4.1.2 ลักษณะดิสชาร์จในก๊าซ

ไฟฟ้า การเกิดดิสชาร์จเป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพนำ



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างความสัมพันธ์กระแสแรงดันของแก๊ปดิสชาร์จนีออน

I = ดิสชาร์จแบบทาวนด์ซึ่งจะเป็นกระบวนการนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนของฉนวนก๊าซ

II = ดิสชาร์จเรืองแสงปกติเกิดต่อจากเบรกดาวน

III = ดิสชาร์จเรืองแสงไม่ปกติ

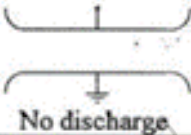
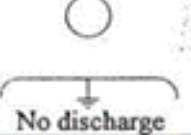


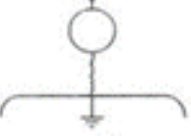
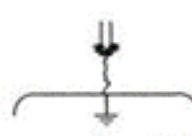
IV = ดิสชาร์จแบบอาร์กจะเกิดแสงจ้าจากลำแสงอาร์ก

#### 2.4.1.3 ชนิดดิสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ป

ดิสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ปอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

เบรกดาวนสมบูรณ์หมายถึง การเกิดเบรกดาวนตลอดแก๊ปเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรดเกิดได้ 2 แบบ

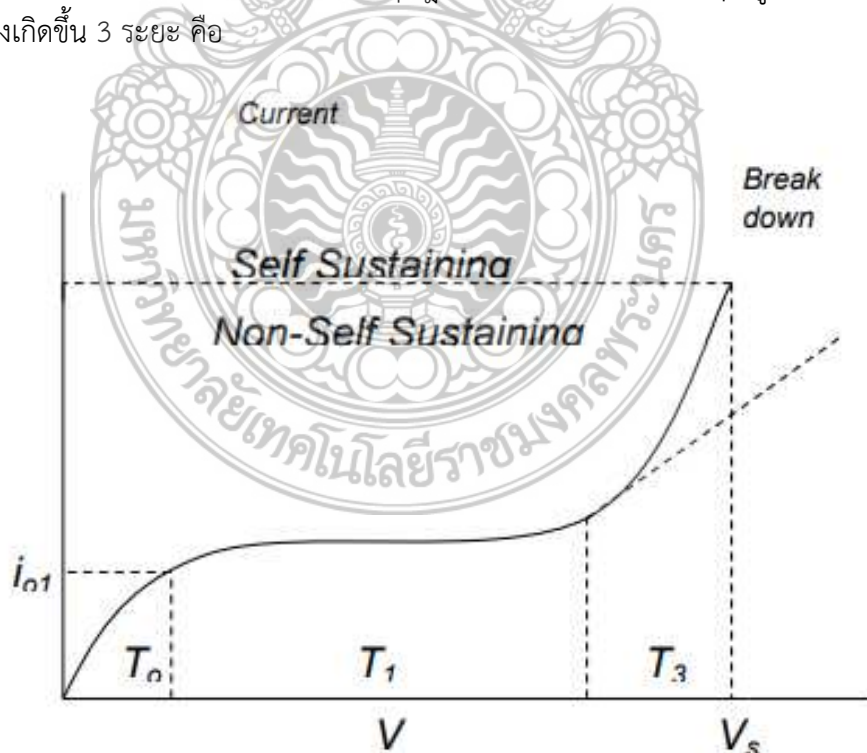
เบรกดาวนเพียงบางส่วน หรือเบรกดาวนไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในระบบการฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเบรกดาวนที่ไม่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะ ในแก๊ป	สนามไฟฟ้า สม่ำเสมอ	สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอเล็กน้อย	สนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอสูง
ลักษณะดีสชาร์จที่ $U_i$	 No discharge	 No discharge	 PD
ลักษณะเบรกดาวน์ สมบูรณ์ $U_b$	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์แบบโคโรนา
ค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b$ หรือ โคโรนาเริ่มเกิด $U_i$	$U_b = E_b \times d$	$U_b = E_b \times d \times \eta^*$	$U_i = E_i \times d \times \eta^*$ $U_b > U_i$

รูปที่ 2.11 ลักษณะดีสชาร์จเบรกดาวน์ในแก๊ป

2.4.1.4 การเบรกดาวน์ในแก๊ซ (Breakdown in Gas)

การเบรกดาวน์ของแก๊ปที่แก๊ซความดันต่ำ และแคบนั้นศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ของ Townsend ที่ได้จากการทดลอง และทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันจาก Graphรูปเป็นการเบรกดาวน์ของแก๊ซซึ่งเกิดขึ้น 3 ระยะ คือ



รูปที่ 2.12 Graph แสดงการเบรกดาวน์ของแก๊ซระยะเริ่มต้น, ระยะปานกลาง และระยะสุดท้าย



- ที่ระยะเริ่มต้น ( $T_0$ ) จะเห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เพราะว่าเกิดกระแสรั่วไหล
- ที่ระยะปานกลาง ( $T_1$ ) กระแสที่ไหลค่อนข้างคงที่ เพราะว่าเกิดขบวนการไอออไนเซชันกับขบวนการรวมตัวของ Electron ( $T_2$ ) สมดุลกัน
- ที่ระยะสุดท้ายกระแสจะไหลอย่างรวดเร็ว, มากมาย และในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ (Completely Breakdown) เพื่อให้เข้าใจขบวนการเบรกดาวน์ของ Townsend ระยะ  $T_1$  และ  $T_2$  ( $1^{st}$  และ  $2^{nd}$ ) Coefficient Townsend Mechanism เราจะอธิบายโดยใช้สมการ เฉพาะเทอม  $\gamma(e^{\alpha x} - 1) = 1$  หรือเขียนใหม่เป็น

$$\gamma e^{\alpha x} = 1 \text{ เทอม } e^{\alpha x} \gg 1 \quad (2.23)$$

จากความสัมพันธ์ของ  $\alpha, \gamma$  และ  $E/P$  สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\alpha/p = \frac{f(E)}{p} \quad (2.24)$$

$$\gamma = \frac{g(E)}{p} \quad (2.25)$$

และ Gradient  $E$  มีค่า

$$E = v/d \quad (2.26)$$

จากสมการใช้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  มีระยะช่องว่าง  $d$  ทำการแทนค่า  $E$  จากสมการ  $\alpha/p$  และ  $\gamma$

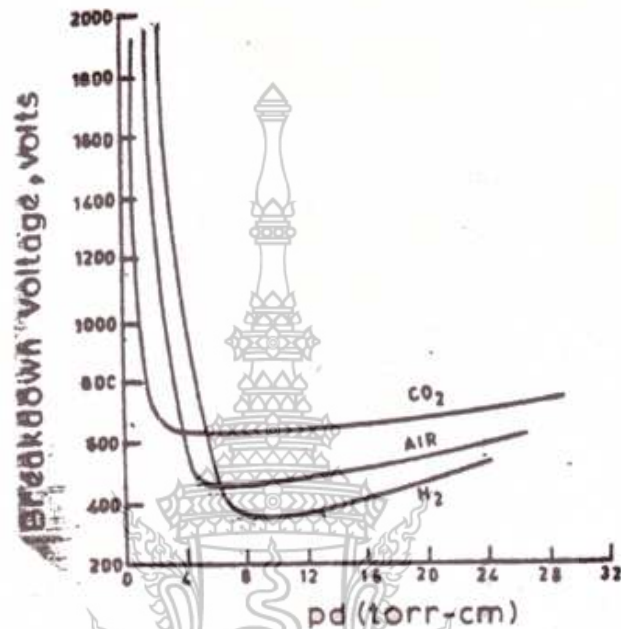
$$g \left[ \frac{V}{pd} \right] e^{(f(V/p.d), pd)} = 1 \quad (2.27)$$

สมการจะได้

$$V_s = f(P_d) \quad (2.28)$$

จากสมการแสดงถึง ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์เป็น Function ของความดัน  $P$  และระยะช่องว่าง  $d$  สมการนี้เราเรียกว่า (Porcelain's law)

จากกฎของ Porcelain's law การหาคักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนสำหรับช่วงที่มีสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอในก๊าซที่มีผลคูณของความดัน และระยะห่าง ( $P_d$ ) สำหรับอากาศ (Air) และ Carbon dioxide ( $CO_2$ ) และ Hydrogen ( $H_2$ ) แสดงไว้ดังรูป



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน  $V_B$  กับผลคูณของความดัน และระยะห่าง ( $P_d$ ) ของการ  $CO_2$ , Air และ  $H_2$

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าคักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม  $P_d$  จนกระทั่งได้คักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุด  $V_{s,min}$  และคักย์ไฟฟ้าก็กลับเพิ่มขึ้นอีกเมื่อทำการเพิ่ม  $P_d$  ให้มากขึ้นไปอีก

ตารางที่ 2.4 คักย์ไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุดของก๊าซชนิดต่างๆ

Gas	$V_B$ (min) volt	$Pd$ at $V_B$ (min) (Toir-cm)
Air	327	0.567
Argon	137	0.9
$H_2$	273	1.15
Helium	156	4.0
$CO_2$	420	0.51
$N_3$	251	0.67
$N_2O$	418	0.5
$O_2$	450	0.7
$SO_2$	457	0.33
$H_2S$	414	0.6

กฎของพอร์ชเลนนี้ใช้ได้สำหรับอุณหภูมิสูงจนถึง 1100 °C แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่านี้แล้ว การเบรกดาว์นจะไม่เป็นไปตามกฎของพอร์ชเลนเนื่องจากการเบรกดาว์นจะเกิดไอออไนเซชันจากความร้อนที่มีอุณหภูมิมากกว่า 2000°k หรืออาจเกิดจากผลของ Thermonic Emission พอร์ชเลน ได้ทดลองช่องว่างที่กว้างกว่า 0.01cm ที่ Normal Temperature Pressure (NTP) มีค่า  $P_d$  ไปทางขวามือของจุดต่ำสุดของพอร์ชเลน และศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์นจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ  $P_d$  ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V = 24.22 \left[ \frac{293(pd)}{760T} \right] + 6.08 \sqrt{\frac{293(pd)}{760T}} \quad (\text{kV}) \quad (2.29)$$

$$\text{หรือ } E = V/d = 24.22 \left[ \frac{293 \left[ \frac{P}{T} \right]}{760} \right] + 6.08 \left[ \frac{293 \left[ \frac{P}{T} \right]^{\frac{1}{2}}}{760} \frac{1}{\sqrt{d}} \right] \quad (2.30)$$

เมื่อ  $P$  = ความดันของอากาศ ( $\text{mmHg}$ )

$T$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{K}$ )

$d$  = ระยะแกป ( $\text{mm.}$ )

จากสมการ ถ้าที่ความดัน 1 บรรยากาศ คือ 760 mmHg อุณหภูมิ 293°K

$$E = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}} \quad (\text{kV/cm}) \quad (2.31)$$

จากสมการ ถ้าแกปมีค่ามากๆ สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 24.22kV/cm สำหรับอากาศทุกๆ ไปที่ระยะแกป 1cm ความดัน 760mmHg ที่อุณหภูมิ 20°C จะมีศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์น 30kV/cm ซึ่งหมายความว่า

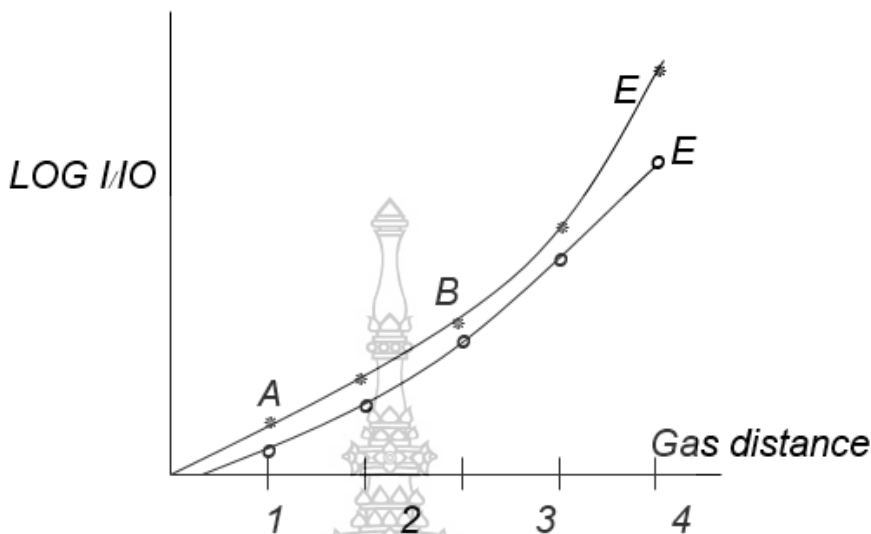
$$\frac{293 \left[ \frac{P}{T} \right]}{760} \cdot d = 1 \quad (2.32)$$

ตัวอย่าง จากรูปที่ 2.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log} I_0$  กับระยะแกป (mm) จากการศึกษารากฐานการณของ Townsend ให้คำนวณหาค่า

Townsend's Primary Coefficient

Townsend's Secondary Coefficient

เมื่อกำหนดศักย์ไฟฟ้า  $E_1 = 20\text{kV/cm}$   $E_2 = 10\text{kV/cm}$  และ  $I_0$  เป็นกระแสต่ำสุดมีค่า  $5 \times 10^{-14}\text{ A}$



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log}I/I_0$  กับระยะแกป

วิธีทำ

คำนวณหาค่า  $\alpha_1$  ที่  $E_1 = 20\text{ kV/cm} = \text{slope}$  ของ  $E_1$

$$\therefore \alpha_1 = \frac{2.9}{2.5 \times 10^{-1}} = 11.6\text{ cm} \tag{2.33}$$

ค่า  $\alpha_2$  ที่  $E_2 = 10\text{ kV/cm} = \text{slope}$  ของ  $E_2$

$$\therefore \alpha_2 = \frac{1.3}{2 \times 10^{-1}} = 6.5\text{ cm} \tag{2.34}$$

ขณะที่เกิดศักย์ไฟฟ้า Spark (Sparking Potential) ระยะ Critical แกปมีค่าเท่าใดแต่จากการสังเกตเพื่อที่จะทำให้การหาค่าของ  $\gamma$  สำหรับระยะแกป 5mm.ที่ 20 kV/cm

จากสมการ

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha x}}{1 - (e^{\alpha x} - 1)} \quad \text{หรือ} \quad \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha x}}{1 - (e^{\alpha x} - 1)} \tag{A} \tag{2.35}$$

แทนค่า

$$\alpha_1 = 11.6 / \text{cm} , d = 0.5\text{ cm} \quad \text{และ} \quad \frac{I}{I_0} = 5 \times 10^7 \tag{2.36}$$

$$5 \times 10^7 = \frac{e^{5.8}}{1 - \gamma(e^{5.8} - 1)} \quad (2.37)$$

$$5 \times 10^7 = \frac{330.29}{1 - \gamma(330.29 - 1)} \quad (2.38)$$

$$\gamma = 3.0367 \times 10^{-3} \text{ cm ที่ } E_1 = 20 \text{ kv / cm} \quad (2.39)$$

ตรวจสอบค่านี้จากการสังเกตเมื่อ

$$E_2 = 10 \text{ kV cm} \quad (2.40)$$

$$\alpha_2 = 605 \text{ cm} \quad (2.41)$$

$$\frac{I}{I_0} = 2 \times 10^5 \quad (2.42)$$

$$2 \times 10^5 = \frac{e^{3.25}}{1 - \gamma(e^{3.25} - 1)} \quad (2.43)$$

$$2 \times 10^5 = \frac{25.79}{1 - \gamma(25.79 - 1)} \quad (2.44)$$

$$\gamma = 4.03 \times 10^{-2} \text{ cm ที่ } E_2 = 10 \text{ kV / cm} \quad (2.45)$$

**ตัวอย่าง** หลอดเรืองรอง ถูกออกแบบให้เบรกดาวนเกิดขึ้นที่ค่าต่ำสุดของ แรงดันพอร์ชเลน จากรูปที่ 2.18 ให้คำนวณหาระยะแกป และแรงดันที่เหมาะสมที่จะใช้หลอดเรืองรองเมื่อในหลอดบรรจุด้วย Hydrogen Air

**วิธีทำ** จากรูปที่ 2.18 ค่าผลคูณของ  $P_d$  ต่ำสุดของ

$$(P_d)_{Air} = 4.5 \text{ torr / cm} \quad (2.46)$$

$$(P_d)_{H_2} = 7.5 \text{ torr / cm} \quad (2.47)$$

แต่เนื่องจากแกปที่ใช้สำหรับหลอดเรืองรองนั้นปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 3mm จะต้องเลือกแรงดันของก๊าซในหลอดดังนี้

$$(P) \text{ ของ Air} = \frac{4.5}{0.3} = 15 \text{ torr} \quad (2.48)$$

$$(P) \text{ ของ } H_2 = \frac{7.5}{0.3} = 25 \text{ torr} \quad (2.49)$$

ตัวอย่าง ให้คำนวณหาค่า Breakdown Strength ของอากาศ (Air) สำหรับช่องว่างแกปขนาด 1mm. และ 20mm. ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และอยู่ใน Standard atmosphere

วิธีทำจากสมการ

$$E = V/d = 24.22 \left[ \frac{293 P}{760 T} \right] + 6.08 \left[ \left[ \frac{293 P}{760 T} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{d}} \right] \quad (\text{kV/cm}) \quad (2.50)$$

ที่ Standard Atmosphere คือที่ความดัน 1 บรรยากาศ 760mmHg อุณหภูมิ 293°k

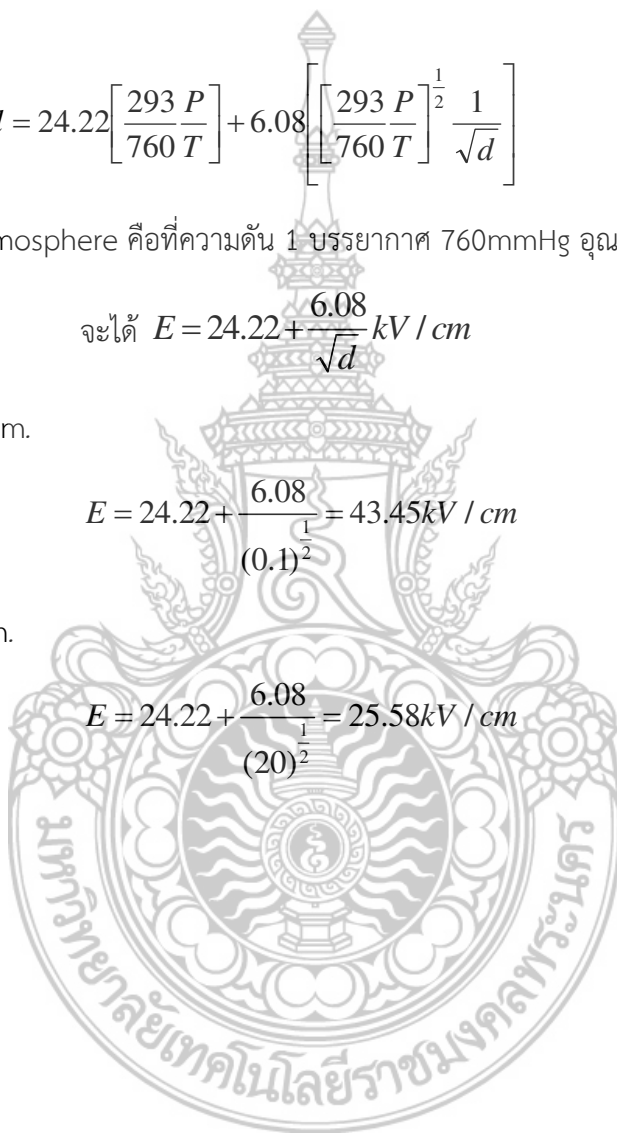
$$\text{จะได้ } E = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}} \text{ kV/cm} \quad (2.51)$$

สำหรับแกป 1 mm.

$$E = 24.22 + \frac{6.08}{(0.1)^{\frac{1}{2}}} = 43.45 \text{ kV/cm} \quad (2.52)$$

และแกป 20 mm.

$$E = 24.22 + \frac{6.08}{(20)^{\frac{1}{2}}} = 25.58 \text{ kV/cm} \quad (2.53)$$



ตัวอย่าง ในการทดลองเกี่ยวกับก๊าซอย่างหนึ่งที่มีระยะห่างระหว่าง Plane อิเล็กโทรด 4mm. ในกรณีของ Steady State วัดกระแสได้  $5.5 \times 10^{-8}$  A ที่ 8 kV ถ้าหากเราให้ Field มีค่าคงที่แต่ทำการลดระยะแกปลงเหลือ 0.1 cm จะทำให้กระแสลดลงเป็น  $5.5 \times 10^{-9}$  A ให้คำนวณหาค่าของ Townsend's Primary Ionization Coefficient จำนวน Electron ที่ถูกปล่อยออกจาก Cathode ต่อวินาทีเมื่อกระแส  $I_1$  มีค่าเท่ากับ  $3.8 \times 10^{-8}$  A

### วิธีทำ

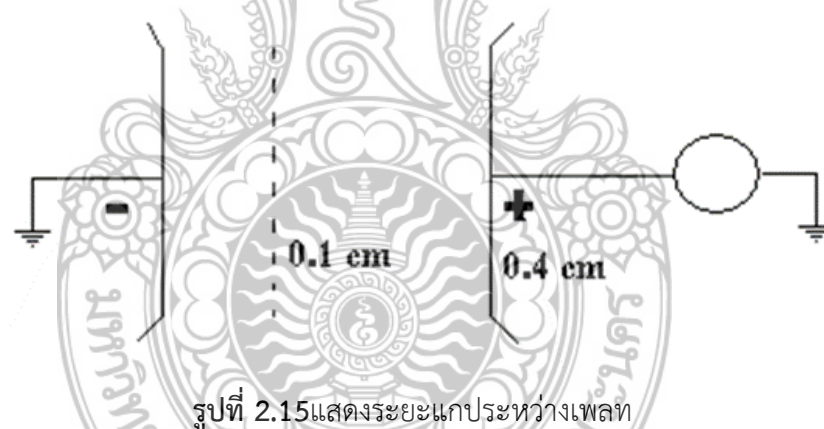
กระแสที่ Anode หาได้จาก

$$I = I_0 e^{\alpha x} \quad (2.54)$$

เมื่อ

$$I_0 = \text{กระแสเริ่มต้น (A)} \quad (2.55)$$

$$x = \text{ระยะห่างของแกป (mm)} \quad (2.56)$$



รูปที่ 2.15 แสดงระยะแกประหว่างเพลต

โจทย์กำหนดให้

$$X_1 = 0.4 \text{ cm}, X_2 \text{ cm} \quad I_1 = 5.5 \times 10^{-8} \text{ A}, I_2 = 5.5 \times 10^{-9} \text{ A} \quad \underline{I_1} = e^{\alpha(X_1 - X_2)} \quad \underline{A} \quad \underline{I_2} = e^{(\alpha \times 0.3)} \quad (2.57)$$

$$0.32 \alpha = \ln 10 \quad \alpha = 7.676 \quad (\text{cm}) \quad (2.58)$$

จาก

$$I_1 = I_0 e^{\alpha x_1} \quad (\text{A}) \quad (2.59)$$

$$I_0 = I_1 / e^{\alpha x_1} = 3.8 \times 10^{-8} / e^{7.67 \times 0.4} = 1.76 \times 10^{-9} \quad (\text{A}) \quad (2.60)$$

จาก  $I_o = n_o e$  จำนวน Electron ที่ปล่อยออกจาก Cathode ต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ

$$n_o = I_o / e \quad (2.61)$$

$$n_o = 1.76 \times 10^{-9} / 1.6 \times 10^{-19} = 1.1 \times 10^{10} \text{ (A)} \quad (2.62)$$





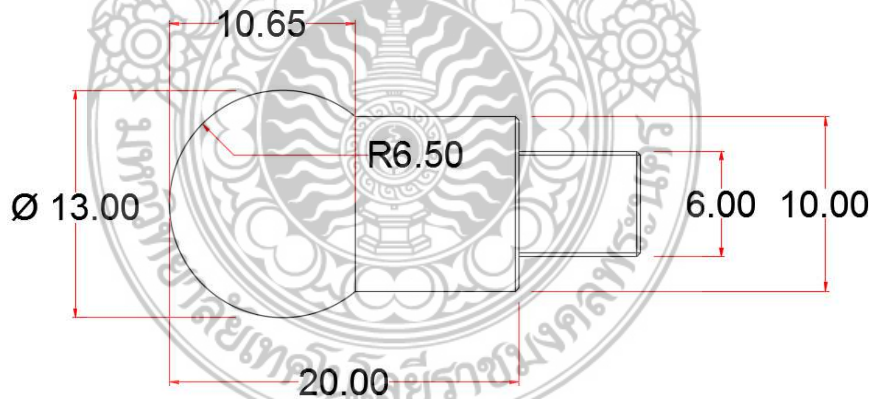
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการ

ชุดทดสอบทางไฟฟ้า 3 สถานะได้ทำการอ้างอิงข้อมูลบางส่วนจากมาตรฐาน IEC 156 ซึ่งการออกแบบนั้นจะแบ่งเป็นชุดฉนวนทางไฟฟ้าของเหลวชุดทดสอบประกอบด้วยชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับระยะได้ ภาชนะใส่น้ำมัน วงจรป้องกันแหล่งจ่าย และวงจรควบคุมการทำงานของชุดทดสอบทางไฟฟ้า ฉนวนก๊าซชุดทดสอบประกอบด้วยชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์ และภาชนะใส่น้ำมันออกซิเจน วงจรป้องกันแหล่งจ่าย และวงจรควบคุมการทำงานของชุดทดสอบทางไฟฟ้าทางฉนวนแข็งชุดทดสอบประกอบด้วยชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์แทนวางลูกถ้วยเซรามิก วงจรป้องกันแหล่งจ่าย และวงจรควบคุมการทำงาน โดยได้มีการออกแบบดังต่อไปนี้

#### 3.1 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนเหลว

3.1.1 หัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบความคงทนฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงของแต่ละมาตรฐานจะมีขนาด และรูปทรงที่ไม่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 3.1 และการการเลือกวัสดุที่จะใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีคุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวถึงเป็นลำดับต่อไป



Drawing units (mm.)

รูปที่ 3.1 รูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ตามมาตรฐาน IEC156

ในการสร้างอิเล็กทรอนิกส์นั้นโลหะที่จะเลือกนำมาใช้ต้องเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น ทนต่อแรงดึง และแรงบิดได้ดีซึ่งโลหะที่นำมาใช้ทางด้านไฟฟ้าก็มีหลายชนิดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป การนำไปใช้งานก็ต้องพิจารณาคุณสมบัติว่าเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้หรือไม่ซึ่งพอจะสรุปคุณสมบัติของโลหะที่สำคัญๆ ได้ดังนี้

เหล็ก เป็นโลหะที่มีความแข็งแรง และเหนียวมากจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุ โครงสร้างต่างๆ ข้อเสียของเหล็ก คือเป็นโลหะที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีดังนั้นจึงกลายเป็นสนิม สีน้ำตาลได้ง่าย

ทองแดง เป็นโลหะที่ค่อนข้างอ่อน สีน้ำตาลแดง สามารถตีแผ่ และดึงให้เป็นเส้นได้ และเป็นโลหะที่นำความร้อน และไฟฟ้าได้ดีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูงในทางไฟฟ้าทองแดงถูกนำมาใช้เป็นสายไฟ

สังกะสีในทางไฟฟ้าไม่ค่อยนำมาใช้เพราะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าค่อนข้างต่ำส่วนมากจะใช้เป็นส่วนผสมของโลหะอื่น เช่น ผสมกับทองแดงเป็นทองเหลือง เป็นต้น

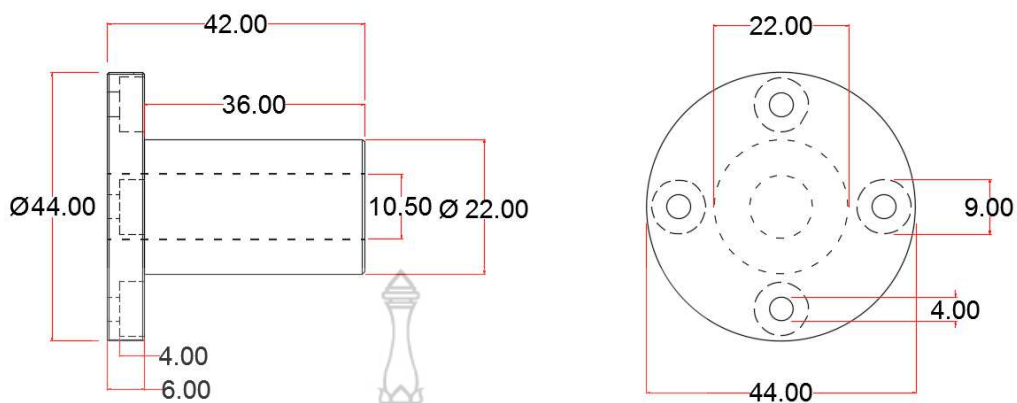
อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำค่อนข้างอ่อนหลอมเหลวง่าย การนำไฟฟ้าอยู่ในระดับปานกลาง นำความร้อนได้ดี ไม่ทนต่อการกัดกร่อน

เงิน เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหมดแต่ไม่นิยมนำมาใช้ในทางไฟฟ้าเพราะเงินนั้นมีราคาค่อนข้างสูงจึงไม่คุ้มค่าที่จะนำมาใช้

ทองเหลือง เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสีโดยทั่วไปทองเหลืองจะมีส่วนประกอบของทองแดง 60% และสังกะสี 40% สังกะสีผสมกับทองเหลืองทำให้ทองเหลืองมีคุณสมบัติทางด้านแรงดึง และความเหนียวสูงขึ้นความแข็งแรงสูงกว่าทองแดงมาก

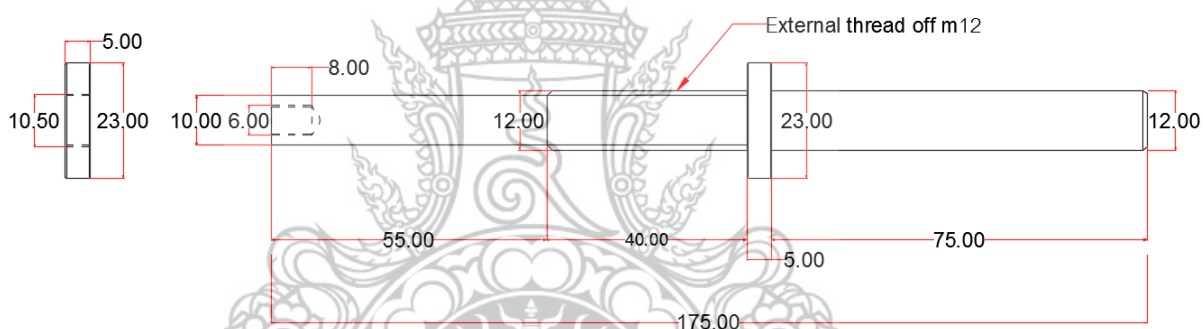
จากคุณสมบัติของโลหะต่างๆ ข้างต้นจะเห็นว่าทองเหลืองมีคุณสมบัติเหมาะสมตามที่ต้องการคือมีความแข็งแรงสูงกว่าทองแดง การนำไฟฟ้าจัดว่าค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับเงิน ทองเหลืองจะมีราคาถูกกว่าเงินมากจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เลือกทองเหลืองทำหัวอิเล็กทรอนิกส์

3.1.2 ชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับระยะได้การออกแบบชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับระยะได้ออกแบบให้สามารถปรับได้ทั้ง 2 ข้างเพื่อให้สามารถปรับระยะแกนที่ใช้ในการทดสอบมาตรฐาน มีแป้นยึดกับภาชนะใส่น้ำมันเพื่อตรึงศูนย์กลาง (center) ของหัวอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีแกนอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้สวมอยู่ภายในแป้นอีกทีหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.3



Drawing units (mm.)

รูปที่ 3.2 แป้นยึดกับภาชนะใส่น้ำมันเพื่อกำหนดศูนย์กลาง

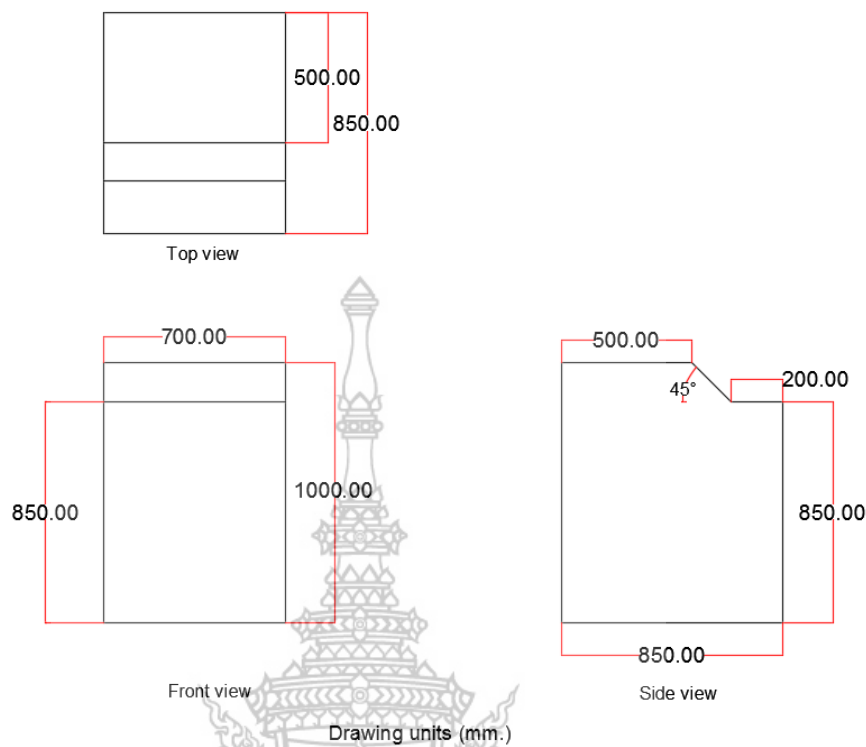


Drawing units (mm.)

รูปที่ 3.3 ชุดแกนอเล็กโทรดปรับระยะได้

3.1.3 ภาชนะบรรจุน้ำมัน การออกแบบชุดทดสอบจะแบ่งเป็นชุดแกนอเล็กโทรดที่ปรับระยะได้ และภาชนะใส่น้ำมันโดยชุดที่แกนอเล็กโทรดที่ปรับระยะได้จะถูกยึดติดอยู่กับภาชนะใส่น้ำมันที่ถูกเจาะ และมีซีลสักรันน้ำมันรั่วทำให้แกนอเล็กโทรดสามารถปรับได้ทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้สามารถปรับระยะ แกบที่ใช้ในการทดสอบตรงตามมาตรฐาน การวัดระยะแกบจะมีแผ่นอะคริลิกเซ็คที่เป็นลักษณะที่ 2mm. และ 3mm. เวลาใช้งานนำแผ่นเซ็คแกบไปคั่นที่หัวอเล็กโทรดแล้วปรับแกนอเล็กโทรดให้ชนกับแผ่นเซ็คแกบก็จะได้ระยะแกบที่ต้องการ

ออกแบบภาชนะรองน้ำมันการออกแบบภาชนะรองน้ำมันก็ต้องออกแบบให้มีความจุได้ตรงตามมาตรฐานกำหนด ความจุของน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบของมาตรฐาน IEC ใช้น้ำมันในการทดสอบ 300ml. – 500ml.แสดงดัง รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การออกแบบภาชนะใส่น้ำมัน

ในการออกแบบภาชนะใส่น้ำมันนั้นได้ทำการออกแบบให้มีความจุ 500ml. ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อให้ใช้ได้ทั้งตามมาตรฐาน ภาชนะที่ใส่น้ำมันมาตรฐานจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันหม้อแปลงเพราะอาจจะทำให้น้ำมันมีสิ่งเจือปนเพิ่มขึ้นอีก ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ก็จะเปลี่ยนไป ในการทำโครงการชุดนี้ได้ใช้อะคริลิคซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมันหม้อแปลงในการออกแบบนั้นได้ออกแบบให้สามารถปรับหัวอิเล็กทรอนิกส์ได้ทั้ง 2 ด้าน โดยเจาะข้างภาชนะที่ใส่น้ำมันหม้อแปลงขาเข้าเพื่อใส่ชุดแกนอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับระยะได้เข้าไปมีซีลส์กันน้ำมันรั่วดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบน้ำมันหม้อแปลงมาตรฐาน IEC 156

3.1.4 เครื่องมือวัดระยะห่างของหัวอิเล็กทรอนิกส์ ได้ทำการออกแบบให้มีความสะดวกในการใช้งานโดยสามารถนำมาใช้วัดระยะห่างของหัวอิเล็กทรอนิกส์ได้ 2 ระยะมาตรฐานการทดสอบ คือ 2mm และ 3mm.

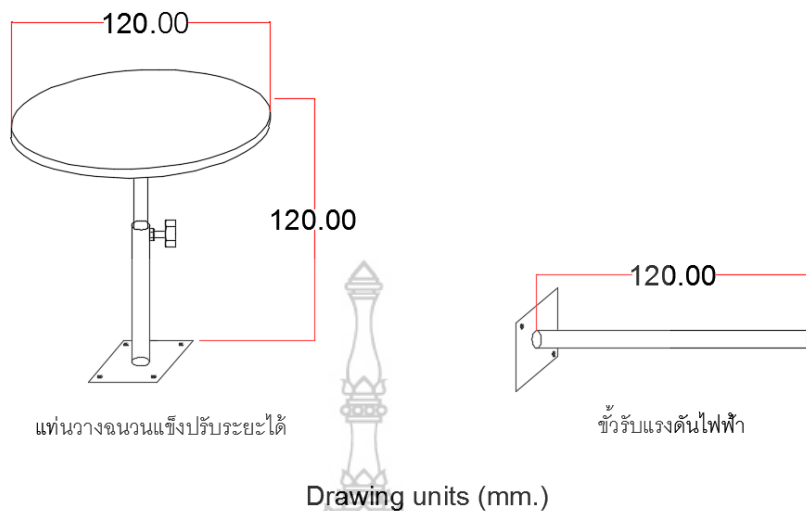
3.1.5 ชุดมอเตอร์กวนน้ำมัน 24Vdc ภายในชุดมอเตอร์ประกอบด้วยมอเตอร์ 24Vdc ที่ปลายแกนโรเตอร์ได้ติดตั้งแม่เหล็กถาวรช่วยในการที่จะทำให้แคปซูลแห้งเหล็กหมุนตาม และช่วยกวนน้ำมันขณะที่มอเตอร์หมุน ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้เร็กกูเลเตอร์ที่ปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 0-24Vdc ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อที่จะทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ด้วยแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดมอเตอร์กวนน้ำมัน 24Vdc

## 3.2 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนแข็ง

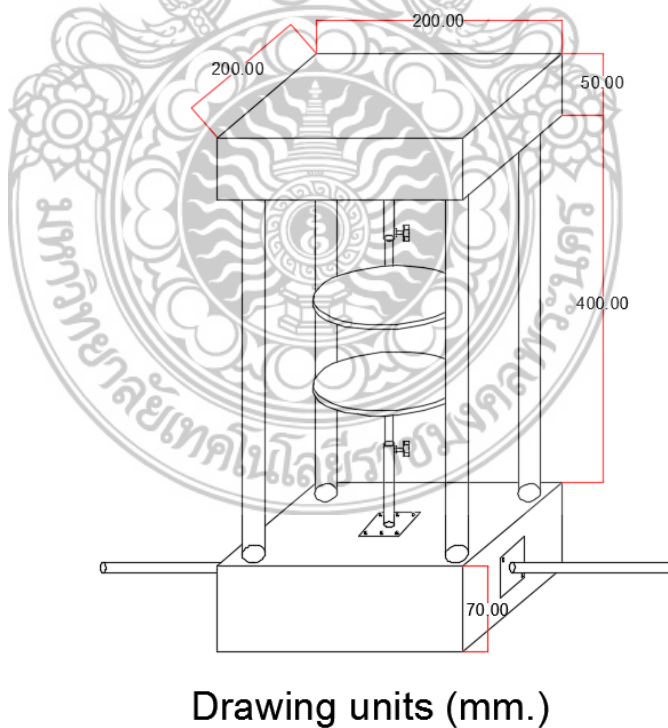
3.2.1 ชุดทดสอบฉนวนแข็งที่ใช้ในการทดสอบความคงทนฉนวนได้ การออกแบบได้ออกแบบให้มีระยะในการจับวัตถุทดสอบแบบปรับระยะได้วัสดุที่นำมาใช้เป็น สแตนเลสลักษณะวงกลมแบนไม่มีรอยหยักดังแสดงในรูปที่ 3.7



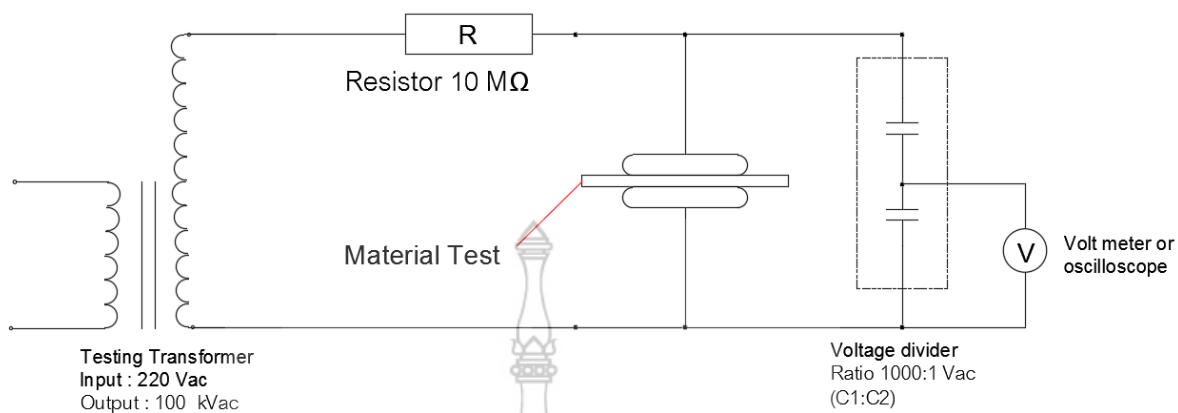
รูปที่ 3.7 ชุดทดสอบจนวนแข็ง

3.2.2 ลักษณะเคสที่ออกแบบสำหรับจับจนวนแข็งจะมีเสาแกนค้ำตามุมอยู่ 4 มุม แล้วด้านจับ ชุดอิเล็กทรอนิกส์จะอยู่ที่ด้านบน และด้านล่างโดยเคสที่ออกแบบจะเป็นอะคริลิกเพราะอะคริลิกมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า ทำให้เคสที่ออกแบบไม่มีผลกระทบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ของแข็ง

3.2.3 ข้อมูลรายละเอียดความยาวของชุดทดสอบดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รายละเอียดโดยรวมชุดทดสอบจนวนแข็ง



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลชุดทดสอบฉนวนฉนวนแข็ง

### 3.3 การออกแบบชุดทดสอบฉนวนก๊าศ

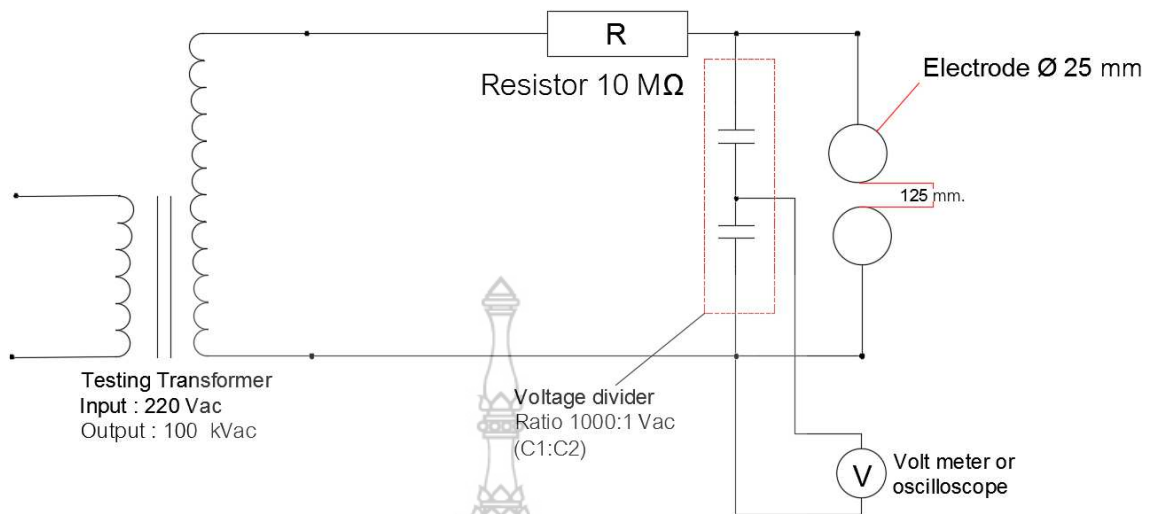
3.3.1 ในการออกแบบเคสฉนวนก๊าศตัวชุดทดสอบฉนวนต้องไม่มีรอยร้าวของอากาศ และมีการซีลส์ที่ดีไม่มีอากาศรั่วไหลจึงจะสามารถทดสอบได้โดยลักษณะของฉนวนก๊าศจะเป็นทรงกระบอก

3.3.2 ด้านอิเล็กทรอนิกส์ของฉนวนก๊าศจะเป็นทรงกลมหันหน้าเข้าหากัน และไม่สามารถปรับระดับได้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าศ

3.3.3 ข้อมูลรายละเอียดขนาดของฉนวนก๊าศดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รายละเอียดโดยรวมชุดทดสอบฉนวนก๊าศ



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลชุดทดสอบฉนวนก๊าซ

### 3.4 โต้ะวางชุดทดสอบและวงจรควบคุม

3.4.1 โต้ะวางชุดทดสอบได้ทำการออกแบบให้มีความสะดวกในการวางชุดทดสอบ เคลื่อนย้ายสะดวกเพราะมีลูกถ้วยยึดติดอยู่ด้านล่างขนาดสัดส่วนแสดงดังรูปที่ 3.12

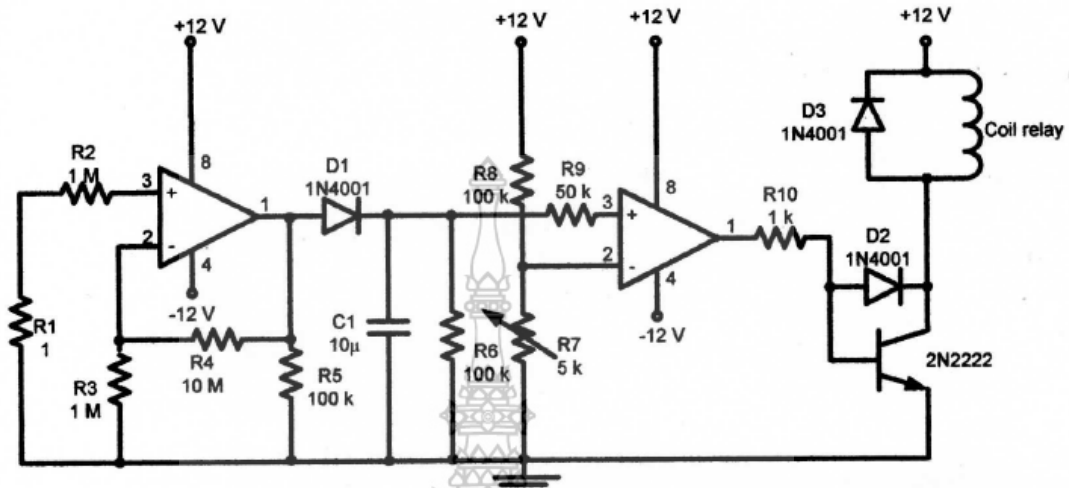


รูปที่ 3.12 โต้ะวางชุดทดสอบ

3.4.2 วงจรป้องกันแหล่งจ่าย วงจรป้องกันแหล่งจ่ายเป็นวงจรที่มีความจำเป็นสำหรับชุดทดสอบ น้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากว่าเมื่อทำการทดสอบนั้นจะป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงแรงสูง และปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าถึงค่าวิกฤตแล้วเกิดการเบรกดาวนขึ้นที่หัวอิเล็กทรอนิกส์ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มขึ้นเป็นหลายเท่าของกระแสปกติ ถ้าไม่มีวงจรป้องกัน



แหล่งจ่ายหม้อแปลงแรงดันสูงอาจเกิดความเสียหายแก่ชุดปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงได้



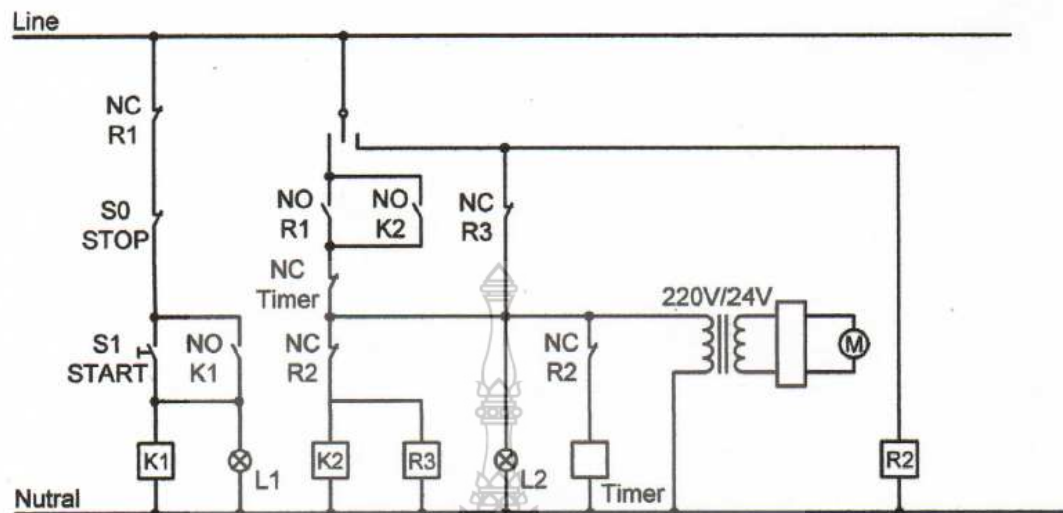
รูปที่ 3.13 วงจรป้องกันแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการเบรกตัวแปรกระแสที่ค่าสูงหลายเท่าจากปกติ กระแสที่สูงนั้นจะถูกลดทอนลงมาจาก Current Transformers (CT) ผ่าน  $R_2$  เข้าขา 3 ของ ออปแอมป์ตัวแรก จากกฎของโอห์ม  $E = IR$  จะเห็นได้ว่ากระแสที่ถูกลดทอนลงมามีค่าน้อยค่าความต้านทานมีค่าคงเดิม ค่าแรงดันก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย จำเป็นต้องมีการขยายแรงดันด้วยออปแอมป์ตัวแรกโดยค่า  $V_0$  ที่ได้จะแปรไปตาม  $\frac{R_f}{R_{in}}$  ค่าสมการต่อไปนี้

$$V = \left[ 1 + \frac{R_f}{R_{in}} \right] V_{in} \quad (V) \quad (3.1)$$

แรงดันที่ขยายแล้วจะผ่านไดโอด  $D_1$  เพื่อแปลงเป็นกระแสตรงผ่าน  $R_{in1}$  เข้าที่ขา 3 ของ ออปแอมป์ ตัวที่ 2 ที่เป็นวงจรคอมพารามิเตอร์ หรือวงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยออปแอมป์จะทำการ เปรียบเทียบแรงดันกระแสตรงที่มาจากไดโอด  $D_1$  ( $V_{in1}$ ) กับแรงคนที่ขา 2 ( $V_{in2}$ ) ถ้าเกิดแรงดันที่ขา 3 น้อยกว่าแรงดันที่ขา 2 เอาท์พุทที่ได้จะมีสถานะเป็น Low แต่ถ้าเกิดแรงดันที่ขา 3 มากกว่าแรงดันที่ขา 2 เอาท์พุทที่ได้จะมีสถานะเป็น High ซึ่งเราจะนำสถานะที่เป็น High นี้ใช้งาน เมื่อ  $V_{in1} - V_{in2}$  เป็นบวกค่าของ  $V_0$  จะเข้าใกล้  $V_s$  ทำให้ออปแอมป์ให้ที่ 2 ทำงานมีกระแสไหลผ่าน  $R_{10}$  เข้าขาเบส(B) ของทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานพร้อมกับรีเลย์ทำงานด้วยทำให้คอนแทคเตอร์ปกติ ปิด และปกติเปิดของรีเลย์ที่อยู่ภายในวงจรคอนโทรลทำงานต่อไป

### 3.4.3 วงจรควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.14 วงจรควบคุมการทำงาน

วงจรควบคุมการทำงาน (Control Circuit) จากวงจรคอนโทรลจะเห็นได้ว่าเมื่อเรากดสวิตช์ S1 คอยล์ K1 ทำงาน เมื่อเราต้องการที่จะทดสอบมาตรฐาน ASTM D 877 และ IEC 156 นั้นให้เราปรับสวิตช์มาทางซ้ายก่อน แล้วปรับเพิ่มระดับแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนรีเลย์ R1 ที่อยู่ในวงจรป้องกันแหล่งจ่ายทำงานส่งผลให้ K2 และชุดมอเตอร์กวนน้ำมันทำงาน เมื่อมอเตอร์ทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้หน้า คอนแทค NC ของ Timer จากออกชุดมอเตอร์กวนน้ำมันที่จะหยุดทำงานตามไปด้วย หากเราต้องการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1816 ให้เราปรับสวิตช์ไปทางขวามือ ชุดมอเตอร์กวนน้ำมันจะทำงานตลอดเวลาทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

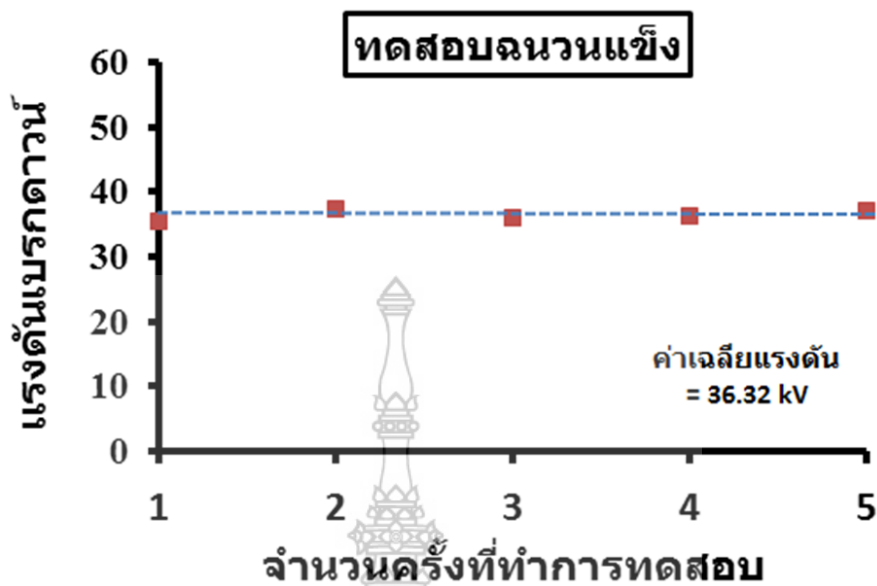
ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันเหลว ฉนวนแข็ง และฉนวนก๊าซโดยใช้ชุดทดสอบที่ได้ออกแบบสร้างไว้ตามรายละเอียดดังบทที่ 3 การทดสอบทำโดยการป้อนแรงสูงกระแสสลับให้กับวัสดุทดสอบจนเกิดการเบรกดาวน์ โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการบันทึกผล

#### 4.1 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง

ตารางที่ 4.1 ตารางผลการทดสอบฉนวนแข็ง

ประเภทฉนวน : ฉนวนแข็ง	
ตัวอย่างฉนวนที่ใช้ทดสอบ : แผ่นเบกาไลต์	
ประเภทของอิเล็กโทรด : แผ่นวงกลมแบน	
อุณหภูมิห้อง : 23 องศา	
ความชื้นสัมพัทธ์ : 51%	
การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
1	35.41
2	37.22
3	35.84
4	36.12
5	37.01
ค่าเฉลี่ย	36.32

\*หมายเหตุ ค่าที่ทดลองใช้ได้เฉพาะกับสภาวะแวดล้อมดังตารางทดลองที่ 4.1 เท่านั้น



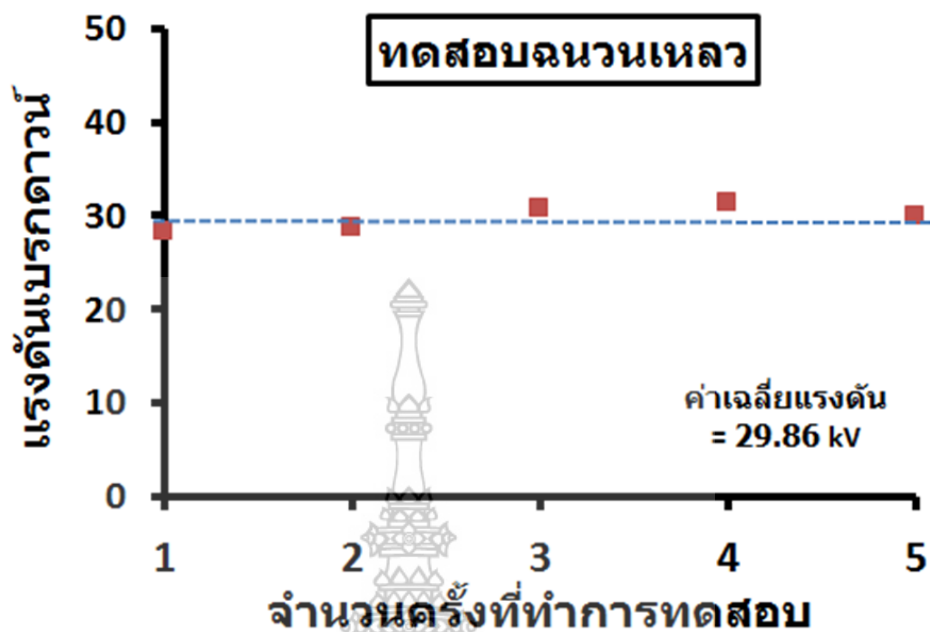
รูปที่ 4.1 กราฟแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแห้ง

#### 4.2 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว

ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดสอบฉนวนเหลว

ประเภทฉนวนที่ทดสอบ : น้ำมันหม้อแปลง		
มาตรฐานการทดสอบ : IEC 156		
ประเภทของอิเล็กโทรด : Spheres		
อุณหภูมิห้อง : 23 องศา		ความชื้นสัมพัทธ์ : 51%
ระยะ แกป(mm)	การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
2	1	28.4
	2	28.7
	3	30.8
	4	31.5
	5	29.9
	ค่าเฉลี่ย	29.86

\*หมายเหตุ ค่าที่ทดลองใช้ได้เฉพาะกับสภาวะแวดล้อมดังตารางทดลองที่ 4.2 เท่านั้น



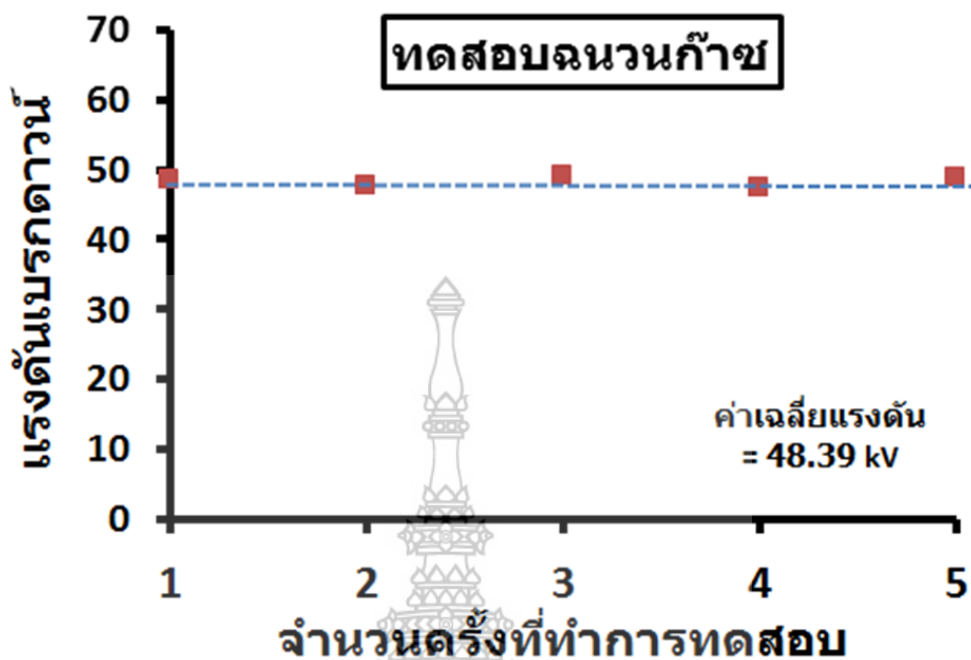
รูปที่ 4.2 กราฟแรงดันเบรกดาวนของจนวนเหลว

#### 4.3 ผลการทดสอบวัดแรงดันเบรกดาวนของจนวนก๊าซ

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดสอบจนวนก๊าซ

ประเภทจนวนที่ทดสอบ : ก๊าซ ออกซิเจน			
ประเภทของอิเล็กโทรด : Spheres			
อุณหภูมิห้อง : 23 องศา		ความชื้นสัมพัทธ์ : 51%	
ระยะ แกป (mm)	แรงดัน (bar)	การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน(kV)
2.5	2	1	48.96
		2	47.75
		3	49.12
		4	47.43
		5	48.72
		ค่าเฉลี่ย	48.396

\*หมายเหตุ ค่าที่ทดลองใช้ได้เฉพาะกับสภาวะแวดล้อมดังตารางทดลองที่ 4.3 เท่านั้น



รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

#### 4.4 อภิปรายผล

จากการทดสอบค่าความคงทนต่อฉนวนทั้ง 3 ชนิดได้ผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งซึ่งใช้แผ่นเบกาไลต์หนา 3mm. อยู่ที่ 36.32kV ฉนวนเหลวที่ระยะห่างหัวอิเล็กโทรด 2mm. อยู่ที่ 29.86kV และฉนวนก๊าซที่ระยะห่างหัวอิเล็กโทรด 20mm. อยู่ที่ 48.39kV ซึ่งการทดสอบวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ทำในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง 23°C และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของห้อง : 51%

\*หมายเหตุในส่วนของการทดสอบฉนวนก๊าซมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นขณะบรรจุออกซิเจนเข้าไปในกระบอกเก็บความดันโดยมีละอองน้ำมัน(น้ำยาแอร์)ปะปนเข้าไปในกระบอก และค่าที่ได้เป็นค่าที่ทดสอบจากกระบอกเก็บก๊าซที่เกิดข้อผิดพลาดนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการจัดสร้างชุดทดสอบความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และฉนวนก๊าซ ซึ่งขอบเขตของโครงการวิจัยนี้เป็นการทดสอบวัสดุฉนวนทั้ง 3 ได้แก่ แผ่นเบกาไลท์ น้ำมันหม้อแปลง และก๊าซออกซิเจนเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ว่ามีความบริสุทธิ์ หรือมีสิ่งเจือปนอยู่หรือไม่ โดยการทดสอบนั้นจะเป็นตัววัดเกณฑ์ว่าฉนวนที่ได้ใช้มีค่าความคงทนแรงดันมากเท่าใดโดยเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้งาน ตัวอย่างเช่น น้ำมันหม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดน้อยกว่า หรือเท่ากับ 69 kV นำมาทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน IEC 156 ที่ระยะแกบ 2 mm. ค่าแรงดันที่ทดสอบได้ไม่ควรต่ำกว่า 30 kV

จากการทดสอบตัวอย่าง ค่าความเป็นฉนวนทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ออกซิเจนทำให้เราสามารถทราบได้ว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มากน้อยเพียงใด

ในการทดสอบผลที่ได้จากการทดสอบจะขึ้นอยู่กับ ค่าแพกเตอร์ อุณหภูมิห้อง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของห้อง ซึ่งจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนทดสอบทั้ง 3 ชนิดแต่ในการทดสอบครั้งนี้ทางผู้วิจัยทำไม่ได้นำส่วนนี้มาคิดค่าเนื่องจากไม่มีผลมากนัก

#### 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการวิจัย

ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

5.2.1 ปัญหาทางด้านการออกแบบ และดีไซน์ชุดอุปกรณ์ทดสอบที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ทำให้มีปัญหาด้านการขนส่ง และส่วนที่เป็นอะคริลิกหุ้มโต๊ะวางชุดทดสอบอุปกรณ์มีความบางเกินไปทำให้ขาดความแข็งแรง

5.2.2 ปัญหาทางด้าน ฉนวนที่ใช้ทดสอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองด้านของฉนวนก๊าซนั้น มีความคลาดเคลื่อนกันทำให้ประกบไม่ตรงกันอาจส่งผลคลาดเคลื่อนต่อค่าเบรกดาวน์

5.2.3 ปัญหาทางด้านสถานที่ใช้ทดสอบซึ่งเกิดจากการที่มหาวิทยาลัยไม่มีห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงทำให้ต้องจัดหาสถานที่ทดสอบฉนวนไฟฟ้าเพิ่มเติม

### 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัย

ในการออกแบบชุดทดสอบค่าความคงทนฉนวนทั้ง 3 สถานะจะเห็นว่าค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันยังไม่ตรงตามที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นในการพัฒนาโครงการควรมีอัตราการเพิ่มของแรงดันที่ได้มาตรฐาน เช่น การจัดทำฉนวนช่วงบริเวณอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องมีความแม่นยำ และชำนาญในการจัดวางอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 ข้างให้มีความตรงกันเพื่อระยะการเกิดเบรกดาวน์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น






## บรรณานุกรม

1. สำรวย สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร:  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. จิตติพงษ์ จันทรบุญเป็ง. (2557). คาปาซิทีฟโวลเตจดีไวเดอร์พิกัดแรงดัน 50 กิโลโวลต์ 50  
เฮิร์ตซ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. เชียงใหม่.
3. ธนากร บาดาล. (2550). ชุดทดสอบแรงดันเบรตาว์นของฉนวนเหลว. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. กรุงเทพฯ.
4. IEC Standard Publ.No 156 (1995-07)





ภาคผนวก ก

ข้อมูลเกี่ยวกับมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงในการทดสอบ

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC  
156**

Deuxième édition  
Second edition  
1995-07

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

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

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

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

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 2, rue de Varembe, Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

Pour plus de détails sur les normes  
de la CEI, voir l'annuaire des normes

### Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- Bulletin de la CEI
- Annuaire de la CEI  
Publié annuellement
- Catalogue des publications de la CEI  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

### Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

### Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux.

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

### Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

### Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- IEC Bulletin
- IEC Yearbook  
Published yearly
- Catalogue of IEC publications  
Published yearly with regular updates

### Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

### Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

### IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

## CONTENTS

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

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

## TEST METHOD

## FOREWORD

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

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

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

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

DIS	Report on voting
10/334/DIS	10/346/RVD

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



158 © IEC:1995

- 7 -



## INTRODUCTION

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

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

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

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

## TEST METHOD

### 1 Scope

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

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

### 2 Normative references

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

IEC 52: 1980, *Recommendations for voltage measurement by means of sphere-gaps (one sphere earthed)*

IEC 60, *High-voltage test techniques*

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

### 3 Electrical apparatus

The electrical apparatus consists of the following units:

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

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

#### 3.1 Voltage regulator

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



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

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

### 3.2 Step-up transformer

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

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

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

### 3.3 Current-limiting resistors

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

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

### 3.4 Switching system

#### 3.4.1 Basic requirements

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

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

#### 3.4.2 Special requirements for silicone liquids

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

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

### 3.5 Measuring device

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

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

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

## 4 Test assembly

### 4.1 Test cell

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

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

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

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

### 4.2 Electrodes

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

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

#### 4.3 *Stirring (optional)*

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

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

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

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

#### 5 Preparation of electrodes

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

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

#### 6 Test assembly preparation

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

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

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

## **7 Sampling**

### **7.1 Sample containers**

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

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

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

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

### **7.2 Sampling technique**

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

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

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

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

## **8 Condition of the sample**

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

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

## **9 Test procedure**

### **9.1 Sample preparation**

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

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

### 9.2 Filling of the cell

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

Measure and record the temperature of the liquid.

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

### 9.3 Application of voltage

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

Apply voltage to the electrodes and uniformly increase voltage from zero at the rate of  $2.0 \text{ kV s}^{-1} \pm 0.2 \text{ kV s}^{-1}$  until breakdown occurs. The breakdown voltage is the maximum voltage reached at the time the circuit is opened either automatically (established arc) or manually (visible or audible discharge detected).

Record the value.

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

Calculate the mean value of the six breakdowns in kilovolts.

## 10 Report

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

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

## 11 Test data dispersion

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

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

## **7 Sampling**

### **7.1 Sample containers**

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

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

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

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

### **7.2 Sampling technique**

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

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

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

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

## **8 Condition of the sample**

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

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

## **9 Test procedure**

### **9.1 Sample preparation**

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

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

### 9.2 Filling of the cell

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

Measure and record the temperature of the liquid.

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

### 9.3 Application of voltage

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

Apply voltage to the electrodes and uniformly increase voltage from zero at the rate of  $2.0 \text{ kV s}^{-1} \pm 0.2 \text{ kV s}^{-1}$  until breakdown occurs. The breakdown voltage is the maximum voltage reached at the time the circuit is opened either automatically (established arc) or manually (visible or audible discharge detected).

Record the value.

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

Calculate the mean value of the six breakdowns in kilovolts.

## 10 Report

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

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

## 11 Test data dispersion

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

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

## **7 Sampling**

### **7.1 Sample containers**

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

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

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

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

### **7.2 Sampling technique**

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

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

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

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

## **8 Condition of the sample**

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

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

## **9 Test procedure**

### **9.1 Sample preparation**

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

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



### 9.2 Filling of the cell

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

Measure and record the temperature of the liquid.

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

### 9.3 Application of voltage

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

Apply voltage to the electrodes and uniformly increase voltage from zero at the rate of  $2.0 \text{ kV s}^{-1} \pm 0.2 \text{ kV s}^{-1}$  until breakdown occurs. The breakdown voltage is the maximum voltage reached at the time the circuit is opened either automatically (established arc) or manually (visible or audible discharge detected).

Record the value.

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

Calculate the mean value of the six breakdowns in kilovolts.

## 10 Report

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

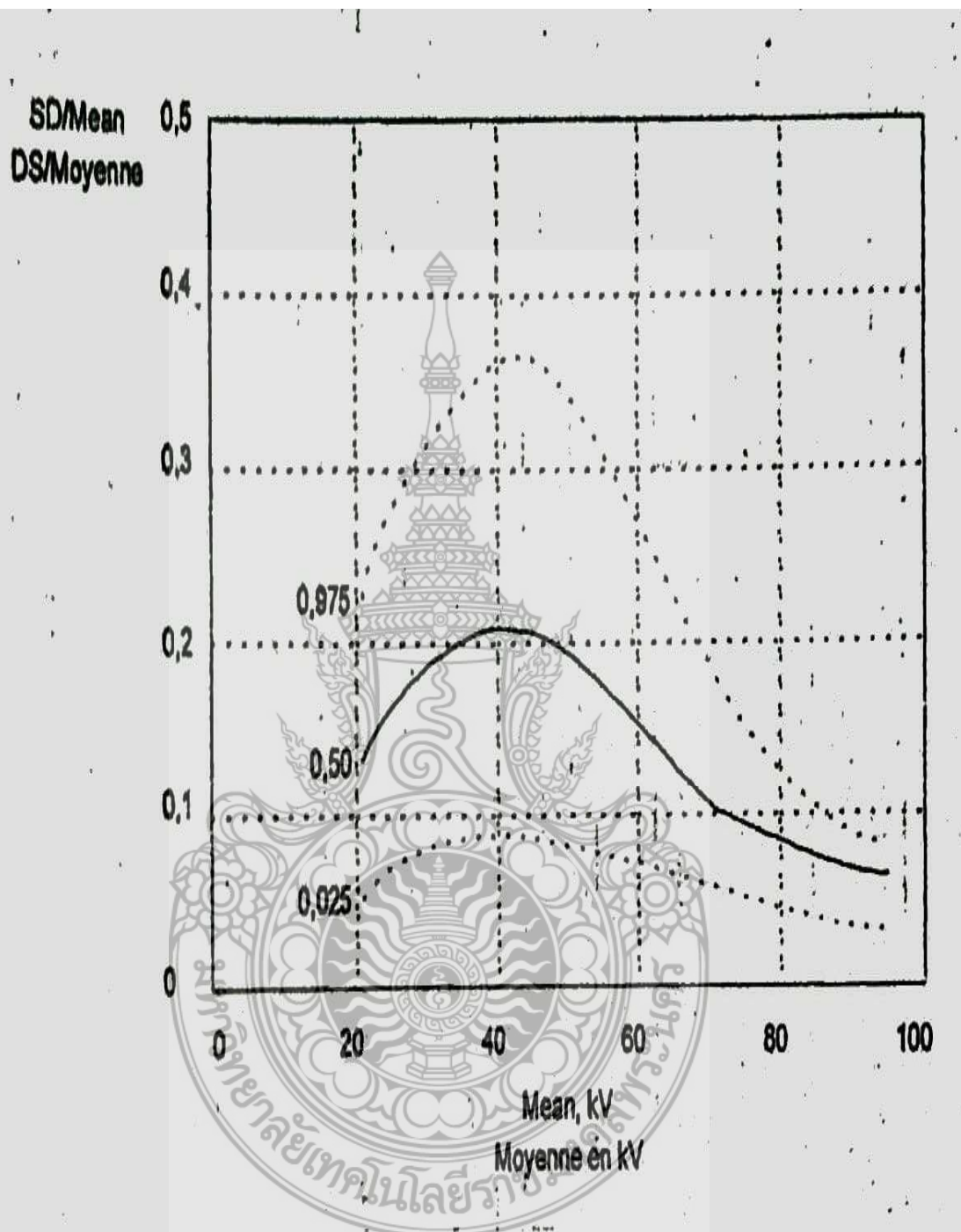
The report shall also include: the sample identification; the value of each individual breakdown, the type of electrodes used, the frequency of the test voltage, the temperature of the liquid, the use of a stirrer (if any).

## 11 Test data dispersion

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

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





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



## Standards Survey

We at the IEC want to know how our standards are used once they are published.  
The answers to this survey will help us to improve IEC standards and standard related information to meet your future needs.

Would you please take a minute to answer the survey on the other side and mail or fax to:

Customer Service Centre (CSC)  
International Electrotechnical Commission  
3, rue de Varembe  
Case postale 131  
1211 Geneva 20  
Switzerland

or

Fax to: CSC at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards making process.



Nicht frankieren  
Ne pas affranchir



Non affrancare  
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE  
SUISSE

Customer Service Centre (CSC)  
International Electrotechnical Commission  
3, rue de Varembe  
Case postale 131  
1211 Geneva 20  
Switzerland

1. No. of IEC standard: .....

2. Tell us why you have the standard. (check as many as apply). I am:

the buyer  
 the user  
 a librarian  
 a researcher  
 an engineer  
 a safety expert  
 involved in testing  
 with a government agency  
 in industry  
 other .....

3. This standard was purchased from: .....

4. This standard will be used (check as many as apply):

for reference  
 in a standards library  
 to develop a new product  
 to write specifications  
 to use in a tender  
 for educational purposes  
 for a lawsuit  
 for quality assessment  
 for certification  
 for general information  
 for design purposes  
 for testing  
 other .....

5. This standard will be used in conjunction with (check as many as apply):

IEC  
 ISO  
 corporate  
 other (published by .....)  
 other (published by .....)  
 other (published by .....)

6. This standard meets my needs (check one):

not at all  
 almost  
 fairly well  
 exactly

7. Please rate the standard in the following areas as (1) bad, (2) below average, (3) average, (4) above average, (5) exceptional (0) not applicable:

clearly written  
 logically arranged  
 information given by tables  
 illustrations  
 technical information

8. I would like to know how I can legally reproduce this standard for:

internal use  
 sales information  
 product demonstration  
 other .....

9. In what medium of standard does your organization maintain most of its standards (check one):

paper  
 microfilm/microfiche  
 mag tape  
 CD ROM  
 floppy disk  
 on line

9A. If your organization currently maintains part or all of its standards collection in electronic media please indicate the format(s):

raster image  
 full text

10. In what medium does your organization intend to maintain its standards collection in the future (check all that apply):

paper  
 microfilm/microfiche  
 mag tape  
 CD ROM  
 floppy disk  
 on line

10A. For electronic media which format will be chosen (check one):

raster image  
 full text

11. My organization is in the following sector (e.g. engineering, manufacturing) .....

12. Does your organization have a standards library:

Yes  
 No

12. If you said yes to 12 then how many volumes: .....

14. Which standards organizations published the standards in your library (e.g. ISO, DIN, ANSI, BSI, etc.): .....

15. My organization supports the standards-making process by (check as many as apply):

buying standards  
 using standards  
 membership in standards organizations  
 serving on standards development committees  
 other .....

16. My organization uses (check one):

French text only  
 English text only  
 Both English/French text

17. Other comments: .....

18. Please give us information about you and your company

name: .....  
 job title: .....  
 company: .....  
 address: .....

No. employees at your location: .....  
 turnover/sales: .....



## Enquête sur les normes

La CEI se préoccupe de savoir comment ses normes sont accueillies et utilisées. Les réponses que nous procurera cette enquête nous aideront tout à la fois à améliorer nos normes et les informations qui les concernent afin de toujours mieux répondre à votre attente.

Nous aimerions que vous nous consacriez une petite minute pour remplir le questionnaire joint que nous vous invitons à retourner au:

Centre du Service Clientèle (CSC)  
Commission Electrotechnique Internationale  
3, rue de Varembe  
Case postale 131  
CH1211 - Genève 20  
Suisse

Télécopie: IEC/CSC +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.



Nicht frankieren  
Ne pas affranchir



Non affrancare  
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)  
Commission Electrotechnique Internationale  
3, rue de Varembe  
Case postale 131  
CH1211 - Genève 20  
Suisse

1. No. of IEC standard:  
.....

2. Tell us why you have the standard. (check as many as apply). I am:

the buyer  
 the user  
 a librarian  
 a researcher  
 an engineer  
 a safety expert  
 involved in testing  
 with a government agency  
 in industry  
 other .....

3. This standard was purchased from:  
.....

4. This standard will be used (check as many as apply):

for reference  
 in a standards library  
 to develop a new product  
 to write specifications  
 to use in a tender  
 for educational purposes  
 for a lawsuit  
 for quality assessment  
 for certification  
 for general information  
 for design purposes  
 for testing  
 other .....

5. This standard will be used in conjunction with (check as many as apply):

IEC  
 ISO  
 corporate  
 other (published by .....)  
 other (published by .....)  
 other (published by .....)

6. This standard meets my needs (check one):

not at all  
 almost  
 fairly well  
 exactly

7. Please rate the standard in the following areas as (1) bad, (2) below average, (3) average, (4) above average, (5) exceptional (0) not applicable:

clearly written  
 logically arranged  
 information given by tables  
 illustrations  
 technical information

8. I would like to know how I can legally reproduce this standard for:

internal use  
 sales information  
 product demonstration  
 other .....

9. In what medium of standard does your organization maintain most of its standards (check one):

paper  
 microfilm/microfiche  
 mag tape  
 CD ROM  
 floppy disk  
 on line

9A. If your organization currently maintains part or all of its standards collection in electronic media please indicate the format(s).

raster image  
 full text

10. In what medium does your organization intend to maintain its standards collection in the future (check all that apply):

paper  
 microfilm/microfiche  
 mag tape  
 CD ROM  
 floppy disk  
 on line

10A. For electronic media which format will be chosen (check one):

raster image  
 full text

11. My organization is in the following sector (e.g. engineering, manufacturing)  
.....

12. Does your organization have a standards library:

Yes  
 No

13. If you said yes to 12 then how many volumes:  
.....

14. Which standards organizations published the standards in your library (e.g. ISO, DIN, ANSI, BSI, etc.):  
.....

15. My organization supports the standards-making process by (check as many as apply):

buying standards  
 using standards  
 membership in standards organizations  
 serving on standards development committees  
 other .....

16. My organization uses (check one):

French text only  
 English text only  
 Both English/French text

17. Other comments:  
.....  
.....  
.....

18. Please give us information about you and your company

name: .....

job title: .....

company: .....

address: .....

.....

No. employees at your location: .....

turnover/sales: .....

**Publications de la CEI préparées  
par le Comité d'Etudes n° 10**

- 136 (1995) Méthode pour la détermination de la rigidité électrique des huiles isolantes.
- 247 (1978) Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique et de la résistivité (en courant continu) des liquides isolants.
- 296 (1982) Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion. Modification n° 1 (1986).
- 376 (1971) Spécifications et réception de l'hexafluorure de soufre neuf.
- 376A (1973) Premier complément: Section treize: Taux d'huile minérale.
- 376B (1974) Deuxième complément: Article 26.
- 422 (1989) Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques.
- 463 (1988) Spécification pour huiles minérales isolantes neuves pour câbles à circulation d'huile.
- 475 (1974) Méthode d'échantillonnage des diélectriques liquides.
- 480 (1974) Guide relatif au contrôle de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) prélevé sur le matériel électrique.
- 567 (1992) Guide d'échantillonnage de gaz et d'huile dans les matériels électriques immergés, pour l'analyse des gaz libres et dissous.
- 588 — Askarels pour transformateurs et condensateurs.
- 588-1 (1977) Première partie: Généralités.
- 588-2 (1978) Deuxième partie: Méthodes d'essai.
- 588-3 (1977) Troisième partie: Spécifications pour askarels neufs.
- 588-4 (1979) Quatrième partie: Guide pour la maintenance des askarels dans les transformateurs.
- 588-5 (1979) Cinquième partie: Essai éliminatoire pour déterminer la compatibilité des matériaux avec les askarels pour transformateurs.
- 588-6 (1979) Sixième partie: Essai éliminatoire pour déterminer les effets des matériaux sur les askarels pour condensateurs.
- 590 (1977) Détermination de la teneur en hydrocarbures aromatiques des huiles isolantes minérales neuves.
- 599 (1978) Interprétation de l'analyse des gaz dans les transformateurs et autres matériels électriques remplis d'huile, en service.
- 628 (1985) Gassing des isolants liquides sous contrainte électrique et ionisation.
- 666 (1979) Détection et dosage d'additifs antioxydants spécifiques présents dans les huiles isolantes.
- 735 (1982) Dosage de l'eau dans les huiles isolantes, dans les papiers et cartons imprégnés d'huile.
- 814 (1985) Dosage de l'eau dans les diélectriques liquides par titration coulométrique de Karl Fischer automatique.
- 836 (1988) Spécifications pour liquides silicones pour usages électriques.
- 867 (1993) Isolants liquides — Spécifications pour liquides neufs à base d'hydrocarbures aromatiques de synthèse.
- 897 (1987) Méthodes de détermination de la tension de claquage au choc de foudre des liquides isolants

(Suite)

**IEC publications prepared  
by Technical Committee No. 10**

- 136 (1995) Method for the determination of the electric strength of insulating oils.
- 247 (1978) Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and d.c. resistivity of insulating liquids.
- 296 (1982) Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. Amendment No. 1 (1986).
- 376 (1971) Specification and acceptance of new sulphur hexafluoride.
- 376A (1973) First supplement: Section Thirteen: Mineral oil content.
- 376B (1974) Second supplement: Clause 26.
- 422 (1989) Supervision and maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment.
- 463 (1988) Specification for unused insulating mineral oils for cables with oil ducts.
- 475 (1974) Method of sampling liquid dielectrics.
- 480 (1974) Guide to the checking of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment.
- 567 (1992) Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases.
- 588 — Askarels for transformers and capacitors.
- 588-1 (1977) Part 1: General.
- 588-2 (1978) Part 2: Test methods.
- 588-3 (1977) Part 3: Specifications for new askarels.
- 588-4 (1979) Part 4: Guide for maintenance of transformer askarels in equipment.
- 588-5 (1979) Part 5: Screening test for compatibility of materials and transformer askarels.
- 588-6 (1979) Part 6: Screening test for effects of materials on capacitor askarels.
- 590 (1977) Determination of the aromatic hydrocarbon content of new mineral insulating oils.
- 599 (1978) Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service.
- 628 (1985) Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization.
- 666 (1979) Detection and determination of specified anti-oxidant additives in insulating oils.
- 735 (1982) Determination of water in insulating oils, and in oil-impregnated paper and pressboard.
- 814 (1985) Determination of water in insulating liquids by automatic coulometric Karl Fischer titration.
- 836 (1988) Specifications for silicone liquids for electrical purposes.
- 867 (1993) Insulating liquids — Specifications for unused liquids based on synthetic aromatic hydrocarbons.
- 897 (1987) Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids.

(Continued)



**Publications de la CEI préparées  
par le Comité d'Etudes n° 10 (Suite)**

- 944 (1988) Guide de maintenance des liquides silicones pour transformateurs.
- 962 (1988) Guide de maintenance et d'emploi des huiles lubrifiantes de pétrole pour turbines à vapeur.
- 963 (1988) Spécification pour polybutènes neufs.
- 970 (1989) Méthodes de détermination du nombre et de la taille des particules dans les isolants liquides.
- 978 (1989) Guide de maintenance et d'emploi des fluides de régulation esters phosphates de triaryle pour turbine.
- 997 (1989) Détermination des polychlorobiphényles (PCB) dans les huiles minérales isolantes par chromatographie en phase gazeuse (CPG) sur colonnes remplies.
- 1039 (1990) Classification générale des isolants liquides.
- 1065 (1991) Méthode d'évaluation des propriétés d'écoulement à basse température des huiles minérales isolantes après vieillissement.
- 1099 (1992) Spécifications pour esters organiques de synthèse à usages électriques.
- 1100 (1992) Classification des isolants liquides selon le point de feu et le pouvoir calorifique inférieur.
- 1125 (1992) Isolants liquides neufs à base d'hydrocarbures - Méthodes d'essai pour évaluer la stabilité à l'oxydation.
- 1144 (1992) Méthode d'essai pour la détermination de l'indice d'oxygène des isolants liquides.
- 1181 (1993) Matériaux isolants imprégnés - Application de l'analyse des gaz dissous (DGA) lors d'essais en usine de matériels électriques.
- 1197 (1993) Isolants liquides - Propagation linéaire de la flamme - Méthode d'essai utilisant un ruban en fibres de verre.
- 1198 (1993) Huiles minérales isolantes - Méthodes pour la détermination de 2-furfural et ses dérivés.
- 1203 (1992) Esters organiques de synthèse à usages électriques - Guide de maintenance des esters pour transformateurs dans les matériels.
- 1221 (1993) Produits pétroliers et lubrifiants - Fluides de régulation pour turbines, esters phosphates de triaryle (catégorie ISO-L-TCD) - Spécifications.
- 1294 (1993) Isolants liquides - Détermination de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) - Méthode d'essai.

**IEC publications prepared  
by Technical Committee No. 10 (Continued)**

- 944 (1988) Guide for the maintenance of silicone transformer liquids.
- 962 (1988) Maintenance and use guide for petroleum lubricating oils for steam turbines.
- 963 (1988) Specification for unused polybutenes.
- 970 (1989) Methods for counting and sizing particles in insulating liquids.
- 978 (1989) Maintenance and use guide for triaryl phosphate ester turbine control fluids.
- 997 (1989) Determination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in mineral insulating oils by packed column gas chromatography (GC).
- 1039 (1990) General classification of insulating liquids.
- 1065 (1991) Method for evaluating the low temperature flow properties of mineral insulating oils after ageing.
- 1099 (1992) Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes.
- 1100 (1992) Classification of insulating liquids according to fire-point and net calorific value.
- 1125 (1992) Unused hydrocarbon-based insulating liquids. Test methods for evaluating the oxidative stability.
- 1144 (1992) Test method for the determination of oxygen content of insulating liquids.
- 1181 (1993) Impregnated insulating materials - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests of electrical equipment.
- 1197 (1993) Insulating liquids - Linear flame propagation. Test method using a glass-fibre tape.
- 1198 (1993) Mineral insulating oils - Methods for the determination of 2-furfural and related compounds.
- 1203 (1992) Synthetic organic esters for electrical purposes - Guide for maintenance of transformer ester-filled equipment.
- 1221 (1993) Petroleum products and lubricants - Triaryl phosphate ester turbine control fluids (category ISO-L-TCD) - Specifications.
- 1294 (1993) Insulating liquids - Determination of the partial discharge inception voltage (PDIV) - Test procedure.



Designation: D 877 - 87 (Reapproved 1995)

Method 5000—Federal Test  
Method Standard No. 7909

## Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 877; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been cataloged by the Department of Defense.

### 1. Scope

1.1 This test method covers a referee and a routine procedure for determining the dielectric breakdown voltage of insulating liquids. These procedures are applicable to liquid petroleum oils, hydrocarbons, and askarels commonly used as insulating and cooling mediums in cables, transformers, oil circuit breakers, and similar apparatus. The referee procedure, with modifications, is suitable for testing silicone fluids (see Test Methods D 2225). The referee procedure is also suitable for testing alkylbenzenes. The suitability of either the referee or the routine procedure for testing liquids having viscosities exceeding 900 cSt (mm<sup>2</sup>/s) (5000 SUS) at 40°C (104°F) has not been determined.

1.2 This test method is recommended for acceptance tests on unprocessed insulating liquids received from vendors in tank cars, tank trucks, and drums. It may also be used for the routine testing of liquids from power systems apparatus rated 230 kV and below.

1.3 This test method is not recommended for testing filtered, degassed, and dehydrated oil prior to and during the filling of power systems apparatus rated above 230 kV, or for testing samples of such oil from apparatus after filling. Test Method D 1816 is more suitable for, and is recommended for, testing such oils.

1.4 Both the SI and inch-pound units are equally acceptable.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 484 Specification for Hydrocarbon Drycleaning Solvents<sup>2</sup>

D 923 Test Method for Sampling Electrical Insulating Liquids<sup>3</sup>

D 1816 Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes<sup>3</sup>

D 2225 Test Methods of Testing Silicone Fluids Used for Electrical Insulation<sup>3</sup>

2.2 Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard:

No. 4 Measurement of Voltage in Dielectric Test<sup>4</sup>

### 3. Significance and Use

3.1 The dielectric breakdown voltage of an insulating liquid is of importance as a measure of the liquid's ability to withstand electric stress without failure. It serves to indicate the presence of contaminating agents, such as water, dirt, moist cellulosic fibers, or conducting particles in the liquid, one or more of which may be present in significant concentrations when low dielectric breakdown values are found by test. However, a high dielectric breakdown voltage does not indicate the absence of all contaminants; it may merely indicate that the concentrations of contaminants that are present in the liquid between the electrodes are not large enough to deleteriously affect the average breakdown voltage of the liquid when tested by this method. See Appendix X1.

### 4. Apparatus

4.1 *Transformer*—The desired test voltage may be most readily obtained by a step-up transformer energized from a variable low-voltage commercial power frequency source. The transformer and controlling element shall be of such size and design that, with the test specimen in the circuit, the crest factor (ratio of maximum to mean effective) of the 60-Hz test voltage shall not differ by more than  $\pm 5\%$  from that of a sinusoidal wave over the upper half of the range of test voltage. The crest factor may be checked by means of an oscilloscope, a sphere-gap, or a peak-reading voltmeter in conjunction with a root-mean-square voltmeter. Where the wave form cannot be determined conveniently, a transformer having a rating of not less than  $\frac{1}{2}$  kVA at the usual breakdown voltage shall be used. Transformers of larger kilovolt-ampere capacity may be used, but in no case should the short-circuit current in the specimen circuit be outside the range of 1 to 10 mA/kV of applied voltage. This limitation of current may be accomplished by the use of a

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved Feb. 27, 1987. Published April 1987. Originally published as D 877 - 46 T. Last previous edition D 877 - 84a.

<sup>2</sup> Discontinued; see 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.03.

<sup>4</sup> Available from The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 E. 47th St. New York, NY 10017.

## D 877

suitable external series resistor or by the designed reactance of the transformer.

**4.2 Circuit-Interrupting Equipment**—The test transformer primary circuit shall be protected by an automatic circuit-breaking device capable of opening in 3 cycles or less on the current produced by breakdown of the test specimen. A 5-cycle breaker may be used if the short-circuit current as described in 4.1 does not exceed 0.2 A. The current-sensing element that trips the circuit breaker should operate when the specimen-circuit current is in the range of 2 to 20 mA. A prolonged flow of current at the time of breakdown causes carbonization of the liquid and pitting and heating of the electrodes, and thereby increases the electrode and test cup maintenance and time of testing.

**4.3 Voltage-Control Equipment**—The rate of voltage rise shall be  $3 \text{ kV/s} \pm 20\%$ . Voltage control may be secured by a motor-driven variable-ratio-autotransformer. Preference should be given to equipment having an approximately straight-line voltage-time curve over the desired operating range. Motor drive is preferred to manual drive because of the difficulty of maintaining a reasonably uniform rate-of-voltage rise with the latter. The rate-of-voltage rise may be calculated from measurements of the time required to raise the voltage between two prescribed values. When motor-driven equipment is used, the speed control rheostat should be calibrated in terms of rate-of-voltage rise for the test transformer used.

**4.4 Voltmeter**—The voltage shall be measured by a method that fulfills the requirements of IEEE Standard No. 4, giving rms values, preferably by means of:

4.4.1 A voltmeter connected to the secondary of a separate potential transformer, or

4.4.2 A voltmeter connected to a well-designed tertiary coil in the test transformer, or

4.4.3 A voltmeter connected to the low-voltage side of the testing transformer if the measurement error can be maintained within the limit specified in 4.5.

**4.5 Accuracy**—The combined accuracy of the voltmeter and voltage divider circuit should be such that measurement error does not exceed 5% at the rate-of-voltage rise specified in 4.3.

## 5. Electrodes

5.1 The electrodes shall be polished brass disks 25 mm or 1 in. in diameter, and at least 3 mm or  $\frac{1}{8}$  in. thick, with square edges.

## 6. Test Cup

6.1 A test cup having rigidly mounted electrodes with parallel faces and axes in a coincident horizontal line shall be used. The cup shall be constructed so that no part of it is less than 13 mm or  $\frac{1}{2}$  in. from any part of the test electrode disk. The total leakage and charging current of the cup, when filled with a good grade of oil, shall be less than  $200 \mu\text{A}$  at 20 kV, 60 Hz. It shall be made of a material of high dielectric strength, and shall not be attacked by any of the cleaning or test liquids. It shall not absorb moisture or the cleaning and test liquids. The top of the cup should be at least 25 mm or 1 in. above the top of the electrodes. The cup shall be designed to permit easy removal of the electrodes for cleaning and polishing, and to permit easy adjustment of the gap spacing.

## 7. Adjustment and Care of Electrodes and Test Cup

**7.1 Electrode Spacing**—The spacing of the electrodes during tests shall be 2.5 mm or 0.100 in. This shall be determined with a standard round gage of  $2.5 \pm 0.01 \text{ mm}$  or  $0.100 \pm 0.0005 \text{ in.}$  or flat steel "go" and "no-go" gages having thicknesses of 2.49 and 2.51 mm or  $0.0995 \pm 0.0005 \text{ in.}$ , respectively. The spacing shall be rechecked following any polishing, wiping, or cleaning operation in which the cup is disassembled or the electrodes disturbed, and at the beginning of each day's testing.

**7.2 Cleaning**—The electrodes and the cup shall be washed clean with dry, lint-free tissue paper or a clean dry chamois. It is important to avoid touching the electrodes or the cleaned gage with the fingers or with portions of the tissue paper or chamois that have been in contact with the hardware. After adjustment of the gap spacing, the cup shall be flushed with a dry hydrocarbon solvent, such as kerosene or Stoddard solvent.<sup>1</sup> A low-boiling solvent should not be used as rapid evaporation may cool the cup, causing moisture condensation. If this occurs, the cup should be warmed slightly to evaporate the moisture before using it. Care shall be taken to avoid touching the electrodes or the inside of the cup after cleaning. After thorough cleaning, the cup shall be flushed with new, dry, filtered liquid of the type being tested (preferably degassed oil if the cup is being used for test oils). A voltage breakdown test shall be made on a sample of this liquid in the manner specified in this method. If the breakdown voltage is in the proper range for liquid in good condition, the test cup shall be considered as properly prepared for testing other samples. If a lower value is obtained, the cup shall again be thoroughly cleaned and the test repeated with a clean dry liquid.

**7.3 Daily Use**—At the beginning of each day's testing, the electrodes shall be examined for pitting and contamination. They should be repolished if pitting is severe. Carbon or other deposits should be wiped off, and the gap setting checked. The cup shall be flushed, and tested with a clean dry liquid as described in 7.2.

**7.4 Polishing of Electrodes**—When examination of the electrodes shows minor scratching or pitting, the electrodes should be removed from the test cup and polished by buffing with jeweler's rouge using a soft cloth or soft buffing wheel. (Resurfacing may be necessary in order to remove deep marks or edge damage.) Care must be taken in resurfacing in polishing to ensure that the electrode faces remain perpendicular to the axis and that the edges do not become rounded. All residue from the buffing must be removed before the electrodes are reinstalled in the test cup. This shall be accomplished by repeated wiping with lint-free tissue paper saturated with a suitable solvent (such as petroleum ether), followed by solvent rinsing or ultrasonic cleaning. After the electrodes have been reinstalled in the test cup, clean and adjust spacing in accordance with 7.1 and 7.2.

**7.5 Storage of Test Cup**—When not in use, the cup used for referee tests, shall be stored filled with a new, clean

<sup>1</sup> See ASTM Specification D 484, for Hydrocarbon Drycleaning Solvent. Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.01.

## D 877

filtered liquid of the type being tested, and tightly covered.

### 8. Sampling

8.1 A sample of the liquid to be tested shall be obtained with the sampling apparatus applicable to the type of liquid as specified in accordance with Methods D 923. The sample shall be taken in a dry, clean bottle that shall be tightly sealed and shielded from light until ready to be tested (Note 1). Prior to starting the test, the sample shall be inspected for the presence of moisture, sludge, metallic particles, or other foreign matter. If the sample shows evidence of free water, the dielectric breakdown test may be waived, and the sample shall be reported as unsatisfactory.

NOTE 1—It is suggested that 2 L of sample be made available when referee tests are to be made, and 1 L of sample be made available when routine tests are to be made.

8.2 The dielectric breakdown voltage of liquids may be seriously impaired by the migration of impurities through the liquid. In order that a representative test specimen containing the impurities may be obtained, the sample container shall be gently inverted and swirled several times before filling the test cup. Rapid agitation is undesirable, since an excessive amount of air may be introduced into the liquid. Immediately after agitation, a small portion of the sample shall be used to rinse the test cup. The cup shall then be filled slowly with the liquid to be tested in a manner that will avoid entrapment of air. It should be filled to a level not less than 20 mm or 0.8 in. above the top of the electrodes. In order to permit the escape of air, the liquid shall be allowed to stand in the cup for not less than 2 min and not more than 3 min before voltage is applied.

NOTE 2—It is impractical to handle liquids having viscosities ranging between 10 and 22 cSt (mm<sup>2</sup>/s) (60 and 100 SUS) at 100°C (212°F) in the manner outlined in 8.2. When testing high-viscosity liquids in this range, the sample should be allowed to stand until it reaches room temperature, which should not be less than 20°C (68°F). The sample container should not be swirled as prescribed in 8.2, but should be inverted for at least 30 min before the test, and then re-inverted and opened just prior to filling the test cup.

### 9. Test Temperature

9.1 The temperature of the specimen when tested shall be the same as that of the room, but the room temperature shall in no case be less than 20°C (68°F). Testing liquids at temperatures lower than that of the room will give variable and unsatisfactory results.

### 10. Rate of Rise of Voltage

10.1 Voltage shall be applied and increased from zero at the rate of 3 kV/s  $\pm$  20% until breakdown occurs as indicated by operation of the circuit-interrupting equipment, and the value recorded. Occasional momentary discharges may occur which do not result in operation of the interrupting equipment, and shall be disregarded.

### 11. Procedure

11.1 *Referee Testing*—When it is desired to determine the dielectric breakdown voltage of a new liquid for referee purposes, one breakdown shall be made on each of five successive fillings of the test cup. The breakdown voltage thus obtained shall be subjected to the criterion for statistical

consistency as specified in 11.3. If the five values meet this criterion, their average shall be reported as the dielectric breakdown voltage of the sample. If they do not meet this criterion, one breakdown on each of five additional cup fillings shall be made, and the average of the ten breakdowns shall be reported as the dielectric breakdown voltage of the sample. No breakdown shall be discarded.

11.2 *Routine Testing*—When it is desired to determine the dielectric breakdown voltage of a liquid on a routine basis, five breakdowns may be made on one cup filling with 1-min intervals between breakdowns. The average of the five breakdowns shall be considered the dielectric breakdown voltage of the sample, provided the breakdown values meet the criterion for statistical consistency as specified in 11.3. If the breakdown voltages do not meet this criterion, the contents of the cup shall be discarded, the sample container again gently inverted and swirled, the cup again filled, and five breakdowns made on this second cup filling. The average of the 10 breakdowns shall be considered as the dielectric breakdown voltage of the sample. No breakdown shall be discarded.

### 11.3 Criterion for Statistical Consistency—

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

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i \text{ and } s = \sqrt{\frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^5 x_i^2 - 5\bar{x}^2 \right)}$$

where:

$\bar{x}$  = mean of the five individual values,  
 $x_i$  =  $i$ th breakdown voltage, and  
 $s$  = standard deviation.

If the ratio  $s/\bar{x}$  exceeds 0.1, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is excessive, and therefore that the probable error of their average is also excessive.

11.3.2 *Alternative Criterion*—Calculate the range of the five breakdowns (maximum breakdown voltage minus minimum breakdown voltage), and multiply this range by three. If the value so obtained is greater than the next to the lowest breakdown voltage, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is excessive, and therefore the probable error of their average is also excessive.

### 12. Report

12.1 The report shall include the following:

12.1.1 ASTM designation of the test method used (D 877),

12.1.2 Procedure used, that is, referee test or routine test.

12.1.3 Approximate viscosity of the liquid tested,

12.1.4 Temperature of the liquid and the room at time of test, and

12.1.5 Individual breakdown values and the average breakdown value in any of the following ways that may apply:

12.1.5.1 Five breakdowns, one on each of five cup fillings that meet the criterion of statistical consistency,

12.1.5.2 Ten breakdowns, one on each of ten cup fillings when the first five breakdowns do not meet the criterion for statistical consistency,

12.1.5.3 In routine testing, five breakdowns on one cup filling that meet the criterion of statistical consistency, or



D 877

12.1.5.4 When the routine test is employed, five breakdowns on each of two cup fillings when the breakdowns on the first cup filling do not meet the criterion of statistical consistency.

12.1.6 If the sample was observed to contain free water or other contaminants, the report should so indicate, with a statement that the test was not made.

### 13. Precision and Bias

13.1 The precision of this test method has not been determined. No statement can be made about the bias of this test method because a standard reference material is not available.

## APPENDIX

(Nonmandatory Information)

### X1. OTHER FACTORS THAT AFFECT THE DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE OF INSULATING LIQUIDS AT COMMERCIAL POWER FREQUENCIES

X1.1 The dielectric breakdown voltage of a liquid at commercial power frequencies is also affected by the degree of uniformity of the electric field, the area of the electrodes or volume of the liquid under maximum stress, the length of time for which the liquid is under stress, the temperature of the liquid (especially insofar as it affects the relative saturation level of moisture in solution), gassing tendencies of the liquid under the influence of electric stress, concentration of dissolved gases (especially if saturation levels are exceeded as a result of sudden cooling or decrease in pressure, which may cause the formation of gas bubbles), incompatibility with materials of construction, and velocity of flow. A decrease in

dielectric strength of the liquid can have an accentuated effect on the electric creepage strength of solid insulating materials immersed in the liquid.

X1.2 Because of the separate, cumulative, and in some cases, interacting effects of the influences listed above, the average breakdown voltage of a liquid as determined by this test method cannot be used for design purposes. Alternative test procedures that may yield more meaningful indications of the functional dielectric strength of a liquid are under consideration (for example, a step-by-step method of applying voltage, and using the lowest rather than the average value of breakdown voltage obtained in the prescribed number of tests).

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19380.*



Designation: D 877 - 87 (Reapproved 1995)

Method 5000—Federal Test  
Method Standard No. 7909

## Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 877; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been cataloged by the Department of Defense.

### 1. Scope

1.1 This test method covers a referee and a routine procedure for determining the dielectric breakdown voltage of insulating liquids. These procedures are applicable to liquid petroleum oils, hydrocarbons, and askarels commonly used as insulating and cooling mediums in cables, transformers, oil circuit breakers, and similar apparatus. The referee procedure, with modifications, is suitable for testing silicone fluids (see Test Methods D 2225). The referee procedure is also suitable for testing alkylbenzenes. The suitability of either the referee or the routine procedure for testing liquids having viscosities exceeding 900 cSt (mm<sup>2</sup>/s) (5000 SUS) at 40°C (104°F) has not been determined.

1.2 This test method is recommended for acceptance tests on unprocessed insulating liquids received from vendors in tank cars, tank trucks, and drums. It may also be used for the routine testing of liquids from power systems apparatus rated 230 kV and below.

1.3 This test method is not recommended for testing filtered, degassed, and dehydrated oil prior to and during the filling of power systems apparatus rated above 230 kV, or for testing samples of such oil from apparatus after filling. Test Method D 1816 is more suitable for, and is recommended for, testing such oils.

1.4 Both the SI and inch-pound units are equally acceptable.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 484 Specification for Hydrocarbon Drycleaning Solvents<sup>2</sup>

D 923 Test Method for Sampling Electrical Insulating Liquids<sup>3</sup>

D 1816 Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes<sup>3</sup>

D 2225 Test Methods of Testing Silicone Fluids Used for Electrical Insulation<sup>3</sup>

2.2 Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard:

No. 4 Measurement of Voltage in Dielectric Test<sup>4</sup>

### 3. Significance and Use

3.1 The dielectric breakdown voltage of an insulating liquid is of importance as a measure of the liquid's ability to withstand electric stress without failure. It serves to indicate the presence of contaminating agents, such as water, dirt, moist cellulosic fibers, or conducting particles in the liquid, one or more of which may be present in significant concentrations when low dielectric breakdown values are found by test. However, a high dielectric breakdown voltage does not indicate the absence of all contaminants; it may merely indicate that the concentrations of contaminants that are present in the liquid between the electrodes are not large enough to deleteriously affect the average breakdown voltage of the liquid when tested by this method. See Appendix X1.

### 4. Apparatus

4.1 *Transformer*—The desired test voltage may be most readily obtained by a step-up transformer energized from a variable low-voltage commercial power frequency source. The transformer and controlling element shall be of such size and design that, with the test specimen in the circuit, the crest factor (ratio of maximum to mean effective) of the 60-Hz test voltage shall not differ by more than  $\pm 5\%$  from that of a sinusoidal wave over the upper half of the range of test voltage. The crest factor may be checked by means of an oscilloscope, a sphere-gap, or a peak-reading voltmeter in conjunction with a root-mean-square voltmeter. Where the wave form cannot be determined conveniently, a transformer having a rating of not less than  $\frac{1}{2}$  kVA at the usual breakdown voltage shall be used. Transformers of larger kilovolt-ampere capacity may be used, but in no case should the short-circuit current in the specimen circuit be outside the range of 1 to 10 mA/kV of applied voltage. This limitation of current may be accomplished by the use of a

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-27 on Electrical Insulating Liquids and Gases and is the direct responsibility of Subcommittee D27.05 on Electrical Test.

Current edition approved Feb. 27, 1987. Published April 1987. Originally published as D 877 - 46 T. Last previous edition D 877 - 84a.

<sup>2</sup> Discontinued; see 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.03.

<sup>4</sup> Available from The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 E. 47th St. New York, NY 10017.

prolonged flow of current at the time of breakdown causes carbonization of the liquid and pitting and heating of the electrodes, and thereby increases the electrode and test cell maintenance, and time of testing.

**4.3 Voltage-Control Equipment**—The rate of voltage rise shall be  $\frac{1}{2}$  kV/s  $\pm$  20%. The rate-of-rise may be calculated from measurements of the time required to raise the voltage between two prescribed values. Voltage control may be secured by a motor-driven variable-ratio-autotransformer. Preference should be given to equipment having an approximate straight-line voltage-time curve over the desired operating range. Motor drive is preferred to manual drive because of the ease of maintaining a reasonably uniform rate-of-voltage rise with this test method. When motor driven equipment is used, the speed control rheostat should be calibrated in terms of rate-of-voltage rise for the test transformer used.

**4.4 Voltmeter**—The voltage shall be measured by a method that fulfills the requirements of IEEE Standard No. 4, giving rms values, preferably by means of:

4.4.1 A voltmeter connected to the secondary of a separate potential transformer, or

4.4.2 A voltmeter connected to a well-designed tertiary coil in the test transformer, or

4.4.3 A voltmeter connected to the low-voltage side of the testing transformer if the measurement error can be maintained within the limit specified in 4.5.

**4.5 Accuracy**—The combined accuracy of the voltmeter and voltage divider circuit should be such that measurement error does not exceed 5% at the rate-of-voltage rise specified in 4.3.

## 5. Electrodes

**5.1** The electrodes shall be polished brass spherically-capped electrodes of the VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker, Specification 0570) type having the dimensions shown in Fig. 1. They shall be mounted with axes horizontal and coincident.

**5.2** The test cell shall be designed to permit easy removal of the electrodes for cleaning and polishing.

## 6. Test Cell

**6.1** The test cell shall be approximately cubical. A cell having a capacity of approximately 0.95 L. has been found to be satisfactory for an electrode spacing of 2 mm or 0.080 in. A cell having a capacity of approximately 0.5 L. has been found to be satisfactory for an electrode spacing of 1 mm or 0.040 in. Electrodes shall be mounted rigidly from opposite sides with the gap approximately centered. Clearance from all other sides and any part of the stirring device shall be at least 13 mm (1/2 in.). The test cell shall be provided with a motor-driven two-bladed impeller measuring approximately 35 mm (1 1/4 in.) between the blade extremities, having a pitch of approximately 40 mm or 1.57 in. (blade angle of approximately 20°), operating at a speed between 200 and 300 rpm. The impeller, located below the lower edge of the electrodes, shall rotate in such a direction that the resulting liquid flow is directed downward against the bottom of the test cell. The test cell shall be made of a material of high dielectric strength, shall be insoluble in and unattacked by any of the cleaning or test liquids used, and shall be

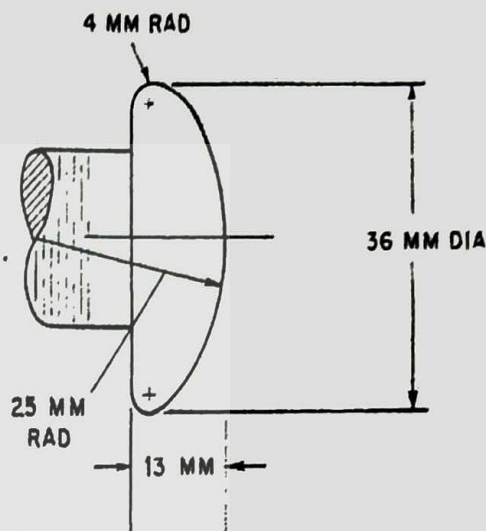


FIG. 1 VDE Electrode

nonabsorbent to moisture and the cleaning and test liquids. So that the breakdown may be observed, transparent materials are desirable, but not essential. In order to preclude stirring air with the sample, the cell should be provided with a cover or baffle that will effectively prevent air from contacting the circulating liquid.

## 7. Adjustment and Care of Electrodes and Test Cell

**7.1 Spacing**—With the electrodes firmly locked in position, the electrodes shall be checked with a standard round gage for 2-mm or 0.080-in. spacing, when a voltage source of a suitable range is available, or for 1-mm or 0.040-in. spacing when the test transformer voltage limit is restricted to approximately 50 kV. Flat "go" and "no-go" gages may be substituted having thicknesses of the specified value  $\pm$  0.03 mm for electrode spacings of 1 or 2 mm, or thicknesses of the specified value  $\pm$  0.001 in. for spacings of 0.040 or 0.080 in. If it is necessary to readjust the electrodes, they shall be relocked, and the spacing again checked.

**7.2 Cleaning**—The electrodes and the cell shall be wiped clean with dry, lint-free tissue paper, or a clean dry chamois. It is important to avoid touching the electrodes or the cleaned gage with the fingers or with portions of the tissue paper or chamois that have been in contact with the hands. After adjustment of the gap spacing, the cell shall be rinsed with a dry hydrocarbon solvent, such as kerosine or solvents of Specification D 235. A low-boiling solvent should not be used, as its rapid evaporation may cool the cell, causing moisture condensation. If this occurs, before using, the cell should be slightly warmed to evaporate the moisture. Care shall be taken to avoid touching the electrodes or the inside of the cell after cleaning. After thorough cleaning, the cell shall be flushed with new, dry, filtered oil of the type to be tested (preferably degassed oil). A voltage breakdown test shall be made on a sample of this oil in the manner specified in this test method. If the breakdown voltage is in the proper

## D 1816

range for this conditioned oil, the cell shall be considered as properly prepared for testing other samples. A lower than anticipated value shall be considered as evidence of cell contamination, and it shall again be thoroughly cleaned, and the breakdown test repeated with a clean dry oil.

**7.3 Daily Use**—At the beginning of each day's testing, the electrodes shall be examined for pitting and carbon accumulation, and the spacing checked. If the test of any sample is below the breakdown value being used by the operator as a minimum satisfactory value, the cell shall be drained and flushed with a good quality oil of the type being tested before testing the next sample. When not in use, the cell shall be kept filled with good quality oil of the type normally tested.

**7.4 Polishing of Electrodes**—When electrodes show slight etching, scratching, pitting, or carbon accumulation, they should be removed from the test cup and polished by buffing with jeweler's rouge using a soft cloth or soft buffing wheel. The residue from the buffing should be removed by repeated wiping with lint-free tissue paper saturated with a suitable solvent (such as petroleum ether), followed by solvent rinsing or ultrasonic cleaning. After careful inspection, any electrodes from which pitting cannot be removed by light buffing should be discarded or refinished to the original contour and finish, as more severe refinishing would destroy the electrode contour and dimensions shown in Fig. 1. Reinstall the electrodes in the test cup and adjust spacing and clean in accordance with 7.1 and 7.2.

### 8. Sampling

**8.1** A sample of the oil to be tested shall be obtained with appropriate ASTM sampling apparatus. Oil sampling procedures are detailed in Methods D 923. Particular reference should be made to the general precaution statement of this test method. The sample shall be taken in a dry, clean bottle which shall be tightly sealed and shielded from light until ready to be tested.

**8.2** The dielectric breakdown voltage of liquids may be seriously impaired by the migration of impurities through the liquid. In order that a representative test specimen containing the impurities may be obtained, the sample container shall be gently inverted and swirled several times before filling the test cell. Rapid agitation is undesirable, since an excessive amount of air may be introduced into the liquid. Immediately after agitation, a small portion of the sample shall be used to rinse the test cell. The cell shall then be filled slowly with the remaining portion of the sample. There shall be an interval of at least 3 min between filling and application of voltage for the first breakdown, and at least 1-min intervals before applications of voltage for successive breakdowns. During these intervals and at the time voltage is being applied, the propeller shall be circulating the oil.

### 9. Test Temperature

**9.1** The temperature of the sample when tested shall be the same as that of the room, but the room temperature shall in no case be less than 20°C (68°F). Testing liquids at temperatures lower than that of the room may give variable and unsatisfactory results.

### 10. Procedure

**10.1 Rate-of-Rise of Voltage**—Apply the voltage and in-

crease from zero at the rate of approximately ½ kV/s until breakdown occurs, as indicated by operation of the circuit-interrupting equipment; record the value. Occasional momentary discharges may occur which do not result in operation of the interrupting equipment; these shall be disregarded.

**10.2** When it is desired to determine the value of the dielectric breakdown voltage of an oil, make five breakdowns on one filling of the cup. Examine the five breakdowns for statistical consistency, and if they meet the criterion described in 10.3, use their average to determine the dielectric breakdown voltage of the sample. If they do not meet this criterion, make five additional breakdowns on the sample, and use the average of all ten breakdowns as the dielectric breakdown voltage of the sample.

**10.3 Criterion for Statistical Consistency**

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

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i \quad \text{and} \quad s = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]}$$

where:

$\bar{X}$  = mean of the five individual values,

$X_i$  =  $i$ th breakdown voltage, and

$s$  = standard deviation.

If the ratio  $s/\bar{X}$  exceeds 0.1, it is probable that the standard deviation of the five breakdowns is excessive and therefore that the probable error of their average is also excessive.

**10.3.2 Alternative Criterion**—Calculate the range of the five breakdowns (maximum breakdown voltage minus minimum breakdown voltage), and multiply this range by three. If the value so obtained is greater than the next to the lowest breakdown, it indicates that the standard deviation of the five breakdowns, and, therefore, the probable error of their average value, is excessive.

**10.4** When it is desired merely to determine if the dielectric strength is above or below a specified level, only five breakdowns are required, provided the five values are all above or all below this level. Otherwise, follow the procedure described in 10.2.

### 11. Report

**11.1** The report shall include the following:

**11.1.1** The test method used,

**11.1.2** If the number of tests are as specified in 10.2, the volts (rms value) at each breakdown, and the average of all breakdowns reported to the nearest 1 kV,

**11.1.3** If the test is made in accordance with 10.4, the report shall be made in one of the following ways:

**11.1.3.1** "Passed" if all of the five breakdowns were above a previously established value,

**11.1.3.2** "Failed" if all of the five breakdowns were below a previously established value,

**11.1.3.3** "Not less than the minimum of the five breakdowns" if all were above a previously established value, or

**11.1.3.4** "Not greater than the maximum of the five breakdowns" if all were below a previously established value.

**11.1.4** The approximate temperature of the oil at the time of the test, and

**11.1.5** The electrode spacing.





D 1816

## 12. Precision and Bias

12.1 The precision of this test method has not been deter-

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

## APPENDIX

(Nonmandatory Information)

### X1. OTHER FACTORS THAT AFFECT THE DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE OF INSULATING LIQUIDS AT COMMERCIAL POWER FREQUENCIES

X1.1 The dielectric breakdown voltage of a liquid at commercial power frequencies is also affected by the degree of uniformity of the electric field, the area of the electrodes or volume of the liquid under maximum stress, the length of time for which the liquid is under stress, the temperature of the liquid (especially as it affects the relative saturation level of moisture in solution), gassing tendencies of the liquid under the influence of electric stress, concentration of dissolved gases (especially if saturation levels are exceeded as a result of sudden cooling or decrease in pressure, which may cause the formation of gas bubbles), incompatibility with materials of construction, and velocity of flow. A decrease in

dielectric strength of the liquid can have an accentuated effect on the electric creepage strength of solid insulating materials immersed in the liquid.

X1.2 Because of the separate, cumulative, and in some cases, interacting effects of the influences listed above, the average breakdown voltage of a liquid as determined by this test method cannot be used for design purposes. Alternative test procedures that may yield more meaningful indications of the functional dielectric strength of a liquid are under consideration (for example, a step-by-step method of applying voltage, and using the lowest rather than the average value of breakdown voltage obtained in the prescribed number of tests).

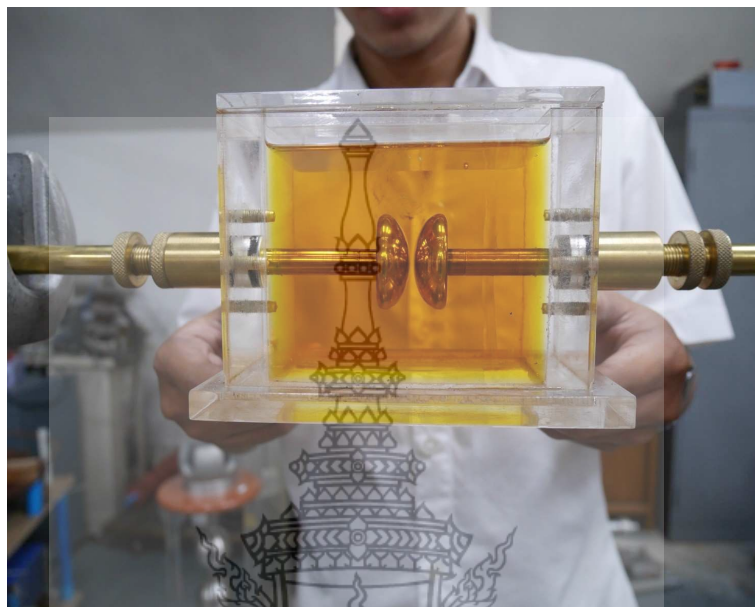
*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.*



ภาคผนวก ข

รูปภาพการทำการทดสอบงานวิจัย



การทดสอบจนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง)



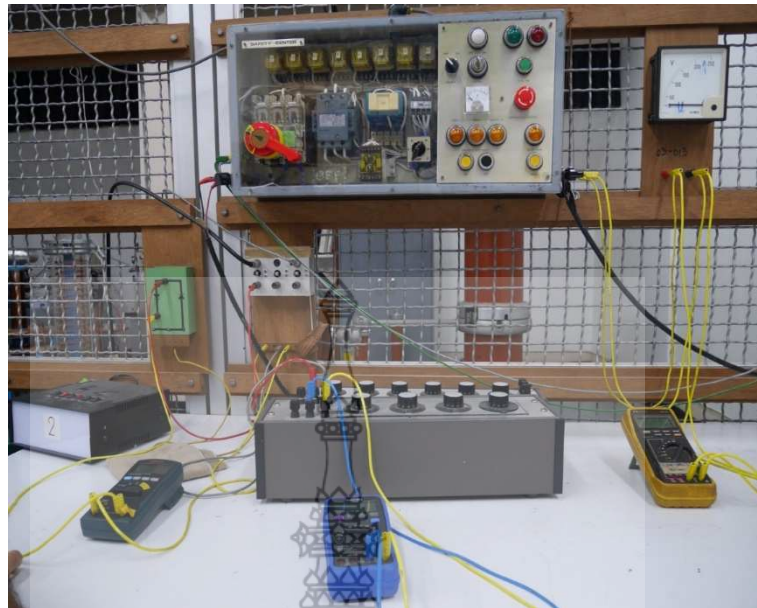
การทดสอบจนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง)



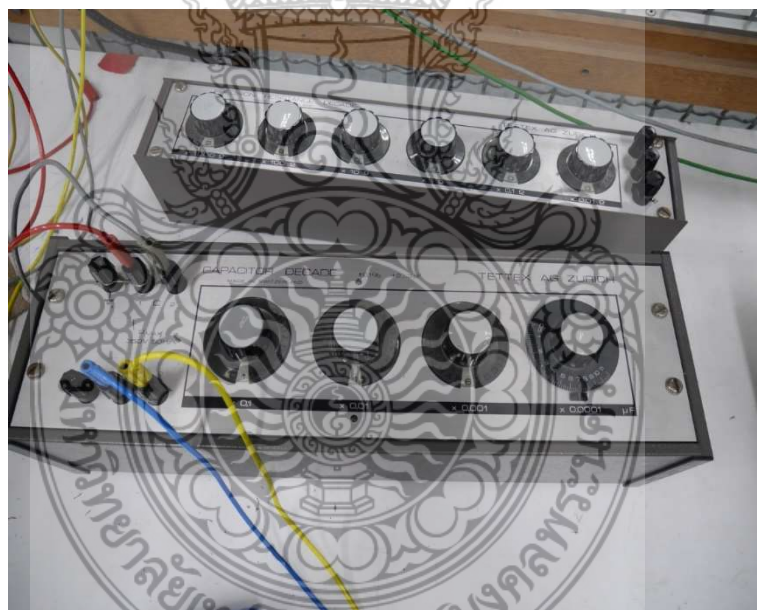
การทดสอบฉนวนก๊าซ (ออกซิเจน)



การทดสอบฉนวนแข็ง (เบกาไลต์) ฉนวนแข็ง



ห้องควบคุมเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ทดสอบ



ห้องควบคุมเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ทดสอบ

ภาคผนวก ค

ใบงานปฏิบัติการ ทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง



## ใบงานการทดลอง

### เรื่อง การเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวทางไฟฟ้า

#### วัตถุประสงค์

1. เข้าใจคุณลักษณะของการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้า
2. เข้าใจคุณลักษณะการเกิดสภาพการฉนวนเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า
3. ปฏิบัติการทดลองได้อย่างปลอดภัย และเป็นไปตามขั้นตอน

#### การใช้งานชุดควบคุมการทดสอบฉนวน

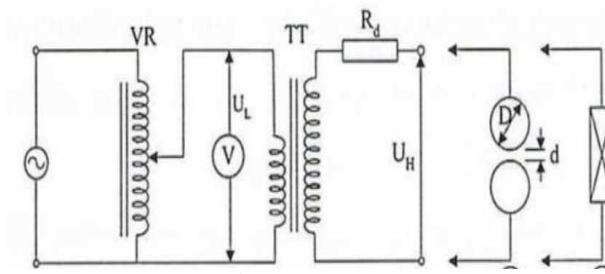
กด สวิตช์ S1 คอิลย์K1 ทำงาน เมื่อเราต้องการ ที่จะทดสอบมาตรฐาน ASTM D 877 และ IEC 156 นั้นให้เราปรับสวิตช์มาทางซ้ายก่อน แล้วปรับ เพิ่มระดับแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน รีเลย์ R1 ที่อยู่ในวงจรป้องกันแหล่งจ่าย ทำงานส่งผลให้ K2 และ ชุดมอเตอร์กวนน้ำมัน ทำงาน เมื่อมอเตอร์ทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้หน้า คอนแทคNC ของ Timer จากออก ชุดมอเตอร์กวนน้ำมันที่จะหยุดทำงานตามไปด้วย

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |                           |   |         |
|---------------------------|---|---------|
| 1. มัลติมิเตอร์           | 2 | เครื่อง |
| 2. ชุดทดลอง ฉนวน          | 1 | เครื่อง |
| 3. ออสซิลโลสโคป           | 1 | เครื่อง |
| 4. สายตัวนำสัญญาณ         | 1 | ชุด     |
| 5. โวลเตจดีไวเดอร์        | 1 | เครื่อง |
| 6. ชุดปรับแรงดันภาคแรงต่ำ | 1 | เครื่อง |
| 7. ฉนวน                   |   |         |
| 7.1 ฉนวนแข็ง              |   |         |
| 7.2 ฉนวนเหลว              |   |         |
| 7.3 ฉนวนก๊าซ              |   |         |

#### วิธีการทดลอง ความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าต่อความคงทนฉนวน

1. ต่อดวงจรไฟฟ้าตามรูป ยังไม่ต้องต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า



2. เพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆจนเกิดเบรกดาวน์จากนั้นให้ทำการบันทึกค่า

ข้อควรระวังในระหว่างการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงต้องมีอาจารย์ควบคุมดูแลตลอดเวลา

ตารางการทดสอบฉนวนแข็ง

ประเภทฉนวน :	
ตัวอย่างฉนวนที่ใช้ทดสอบ :	
ประเภทของอิเล็กทรอนิกส์ :	
อุณหภูมิห้อง :	
ความชื้นสัมพัทธ์ :	
การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์(kV)
1	
2	
3	
4	
5	
ค่าเฉลี่ย	

ตารางการทดสอบฉนวนเหลว

ประเภทฉนวน :
มาตรฐานการทดสอบ :
ประเภทของอิเล็กทรอนิกส์ :



อุณหภูมิห้อง :		
ความชื้นสัมพัทธ์ :		
ระยะ gap (mm.)	การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกตาว์น(kV)
2	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	ค่าเฉลี่ย	

ตารางการทดสอบฉนวนก๊าส

ประเภทฉนวน :			
ประเภทของอิเล็กทรอนิกส์ :			
อุณหภูมิห้อง :			
ความชื้นสัมพัทธ์ :			
ระยะ gap (mm.)	แรงดัน (bar)	การทดสอบครั้งที่	แรงดันเบรกตาว์น(kV)
2	2	1	
		2	
		3	
		4	
		5	
		ค่าเฉลี่ย	

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

ภาคผนวก ง

การใช้งานชุดทดสอบนวน



## วิธีการใช้งานเครื่องทดสอบ

### 1. ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ

#### 1.1 ฉนวนก๊าซ

อัดก๊าซเข้าไปในชุดฉนวนก๊าซที่ระดับแรงดัน 2 bar จากนั้นวางตัวฉนวนทดสอบไว้บนชุดทดสอบ



## 1.2 ฉนวนเหลว

ล้างชุดทดสอบตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่จะนำมาทดสอบและเททิ้ง จากนั้นเทตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบเข้าไปในภาชนะทดสอบอย่างช้าๆ และระมัดระวัง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองก๊าซ เสร็จแล้วทิ้งระยะเวลาไว้อย่างน้อย 2 นาที เพื่อขจัดฟองอากาศที่แขวนลอยในน้ำมัน แต่ไม่ควรทิ้งไว้นานเกิน 3 นาที ก่อนการทดสอบ ปรับตั้งระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดทดสอบที่ 2 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นอะคริลิก ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร เป็นตัวปรับระยะแก ซึ่งการปรับตั้งระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดทดสอบนี้จะต้องทำการปรับตั้งใหม่ทุกครั้งก่อนการเริ่มต้นทดสอบ



### 1.3 ฉนวนแข็ง

วางวัสดุที่ต้องการทดสอบบนตัวฉนวนที่ได้ออกแบบมาแบ่งสัดส่วนให้ตัวทดสอบอยู่จุดกึ่งกลางพอดีจากนั้นวางตัวฉนวนทดสอบลงบนเครื่องมือทดสอบ



## 2. วิธีการทดสอบ

2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดทดสอบ โดยเริ่มจากศูนย์แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดเบรกดาวนในตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน ให้บันทึกค่าแรงดันนี้ไว้



แรงดันเบรกคาวน์ล่าสุด จะแสดงผลที่หน้าจอแสดงผลการวัดของโวลต์มิเตอร์ซึ่งเป็นอัตราส่วน 1 : 1000 จากแรงดันภาคแรงสูงโดยการวัดแรงดัน ใช้การวัดภาคแรงต่ำของโวลต์เตจติไวเตอร์



2.3 ทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกคาวน์ของตัวอย่างฉนวนน้ำมันหม้อแปลงทั้งหมด 5 ครั้ง โดยทิ้งช่วงเวลาการทดสอบในแต่ละครั้งประมาณ 1 นาที จากนั้นให้คำนวณหาค่าแรงดันเบรกคาวน์เฉลี่ยโดยใช้การวิเคราะห์จากค่าที่ได้



## ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1. ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว ชนนท์ ดิสสะมาน จีรวรรธ เกตุเหม และสุดาพร คุ่มทวีวุฒิ “ การสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กทริกต่อไฟฟ้าแรงดันสูงของฉนวนไฟฟ้า



การประชุมนานาชาติวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี  
มทร.พระนคร ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> RMUTP Conference on Engineering and Technology

“การพัฒนางานวิจัย สิ่งประดิษฐ์ นวัตกรรม  
ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ในยุคอุตสาหกรรม 4.0”

23 มีนาคม 2561  
ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี นครพระนคร ครั้งที่ 3

Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

# การสร้างชุดทดสอบความคงทนไดอิเล็กทริกต่อไฟฟ้าแรงดันสูงของฉนวนไฟฟ้า

## Design of High Voltage insulation dielectric strength testing

ศุภาวิณี เนตรโพธิ์แก้ว, ชรินทร์ ดิสสะมาน, จีรวรรณ์ เกตุกลม และสุดาพร กุ่มภวิวุฒิ

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขต พระนครเหนือ

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800 โทรศัพท์ 02-836-3000 Email: Supawad.n@rmutp.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ในประเทศมาเพื่อใช้ในการสร้างชุดทดสอบโดยในการทดสอบนั้นจะต้องได้ผลที่มีค่าความผิดพลาดและคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุดเพื่อความน่าเชื่อถือและแม่นยำการออกแบบชุดทดสอบฉนวนเหลว ได้ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 156 โดยใช้วัสดุทดสอบเป็นน้ำมันหม้อแปลง การออกแบบชุดทดสอบฉนวนแข็ง ได้ออกแบบให้มีระยะเวลาจับวัดจุดแบบปรับระยะได้ โดยใช้วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เป็น แผ่นเบกาไลต์ และการออกแบบชุดทดสอบฉนวนก๊าซ ได้ออกแบบวัสดุที่ใช้วัสดุอะคริลิกให้สามารถบรรจุก๊าซได้ โดยภายในบรรจุก๊าซออกซิเจนความดัน 2 bar การทดสอบวัสดุทั้ง 3 ชนิด นำไปใช้โดยการจ่ายแรงดันทดสอบเป็นแรงดันสูงกระแสสลับ ให้กับชุดทดสอบจนเกิดการเบรกดาวน์ผ่านวัสดุฉนวนนั้น

คำสำคัญ: เบรกดาวน์, ฉนวน, เบกาไลต์

### Abstract

This article about design and builds test three types of the insulation, liquid insulator, rigid insulating gas using materials can be procured locally to be used to create a series of tests in the test. It must work with mistakes and errors to a minimum to ensure reliable and accurate. The design of insulation liquid test kit has designed according to the standard IEC 156 materials test as transformer oil test kit for solid insulation design, has designed a custom object in the catch phrase. By the materials used in the tests is a sheet of bakelite test design and insulation gas. Designed using the material acrylic can pack up gas. By internal gas pressure of 2 Bar, oxidation test materials by type, 3 supply Voltage is AC high voltage test, with test kits to breakdown through the insulator material and then make a note of the test.

Keywords: breakdown, insulation, bakelite

### 1. บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังเริ่มตั้งแต่ระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดเป็นระบบที่ใช้ระดับแรงดันสูง ปัญหาสำคัญซึ่งประการหนึ่งของการใช้ระบบไฟฟ้าแรงสูง ก็คือการฉนวน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ ฉนวนไฟฟ้าจึงมีความสำคัญยิ่งในงานวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญที่เข้ามาใน หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์สายส่ง อุปกรณ์ต่างๆ ในสถานีไฟฟ้า

ฉนวนที่ใช้กับงานไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่ ฉนวนก๊าซ เป็นฉนวนแทรกซึม และเป็นฉนวนระบายความร้อน เป็นฉนวนที่ติดตั้งคู่สภาพฉนวนได้เร็ว ฉนวนเหลว โดยทั่วไปคือไม่มีขั้วแรงดันสูงเป็นฉนวนที่สามารถสืบสภาพฉนวนได้หลังเบรกดาวน์ ฉนวนแข็งมีความเป็นฉนวนสูงกว่าฉนวนสองชนิดแรก แต่จะสามารถสืบสภาพฉนวนอย่างจริงจังได้ยาก

ในการทดสอบชุดทดสอบวัสดุฉนวน มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบค่าความคงทนฉนวนเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการฉนวน โดยทั่วไปหากให้อุปกรณ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศหรือสั่งซื้อจากตามหน่วยงานต่างๆ จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในราคาที่ค่อนข้างสูง จึงได้มีการประดิษฐ์ที่ได้ก่อกำเนิดขึ้นของได้ โดยอาศัย โดยอาศัยความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มาประยุกต์ใช้กับวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ในประเทศไทยเพื่อใช้ในการสร้างชุดทดสอบโดยในการทดสอบนั้นจะต้องได้ผลที่มีค่าความผิดพลาดและคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุดเพื่อความน่าเชื่อถือและแม่นยำของชิ้นงานที่จะสามารถนำไปใช้จริงได้อย่างถูกต้อง

### 2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการออกแบบฉนวนในส่วนของฉนวนทางไฟฟ้าโดยหลักการของฉนวนนั้นต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ฉนวนได้รับและจัดการนำของกระแสไฟฟ้าได้เป็นหลัก ทั้งนี้ยังต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่นๆ อีก เช่น พลังงานแฟลคเคอร์ที่สูงเกินไปในหม้อแปลงที่จะมีผลกระทบต่อความร้อนอุณหภูมิของหม้อแปลงทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นฉนวนจะต้องเป็นวัสดุที่ระบายความร้อนได้เป็นคุณสมบัติต่อมา การ

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 3  
 Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

ระบอบความร้อนของฉนวนจะต้องมีค่ารีโมคเลนซ์และแรงทางกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะระบบไฟฟ้าเกิดทำงานผิดปกติ โดยต้องทนต่อความร้อนแรงกล ค่าใช้จ่ายในการทำฉนวน สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

**2.1 ฉนวนแข็ง**

คุณลักษณะและสมบัติของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วย ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เปรอมีคทีวิตี เฟลด์เตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ความคงทนต่อแรงกล ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และความร้อนการเบรกดาวน์ในของแข็งนั้นมีลักษณะแตกต่างจากของเหลวและก๊าซคือของแข็ง เมื่อเกิดการ เบรกดาวน์ จะแตกสลายทันที ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก

การเบรกดาวน์ของของแข็งมีกลไกการเบรกดาวน์อยู่ 8 ลักษณะคือ

- ก. การเบรกดาวน์ เนื่องจากเนื้อสาร (Intrinsic Breakdown)
- ข. การเบรกดาวน์ เนื่องจากแรงทางกล (Electromechanical Breakdown)
- ค. การเบรกดาวน์ แบบ Streamer (Streamer Breakdown)
- ง. การเบรกดาวน์ เนื่องจากความร้อน (Thermal Breakdown)
- จ. การเบรกดาวน์ เนื่องจาก Tracking (Tracking Breakdown)
- ฉ. การเบรกดาวน์ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Breakdown)
- ช. การเบรกดาวน์ เนื่องจากเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Breakdown)
- ซ. ขบวนการเบรกดาวน์ เนื่องจากโพรงภายใน (Cavity Breakdown)

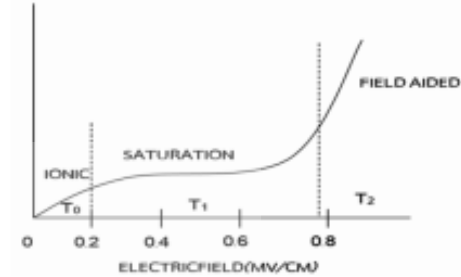


รูปที่ 1 ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับขนาดของเวลา

**2.2 ฉนวนเหลว**

ฉนวนเหลวจะแตกต่างจากฉนวนแข็งที่โมเลกุลหรืออะตอมของฉนวนเหลวไม่ได้ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยกันอย่างเหนียวแน่นเหมือนฉนวนโมเลกุลหรืออะตอมของฉนวนแข็ง โมเลกุลของฉนวนเหลวสามารถ

เคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระพอสมควรจึงทำให้อนุภาคไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายตามไปด้วย



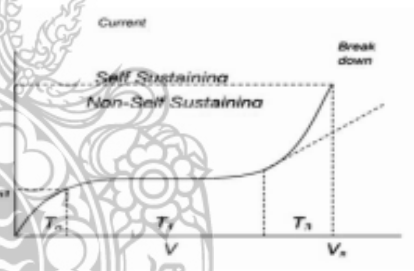
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ Electric field ในฉนวนเหลว

**3.2.1 การเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคของแข็ง**

ฉนวนเหลวไม่มีรูพรุนหรือช่องว่างของแข็งเล็กๆกระจัดอยู่เมื่อใส่สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเข้าไป จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคที่มี

**3.2.1 ฉนวนก๊าซ**

ในก๊าซนั้นจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) เมื่อมีคิสร่างเกิดขึ้น คิสร่างจในก๊าซเป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าในก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและ ไอออน ที่เกิดเพิ่มทวีคูณจากระบวนการ ไอออไนเซชัน



รูปที่ 3 การเบรกดาวน์ของก๊าซ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซอธิบายได้ด้วยทฤษฎีกลไกของทาร์นเชนด์ กลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์กลไกทั้งสองอาศัยทฤษฎีจอนสันเป็นพื้นฐานเกี่ยวกับประจุอิสระ การถ่ายเทพลังงาน การเกิดประจุอิสระโดยการ ไอออไนเซชัน การเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุ ที่นำไปสู่การเกิด คิสร่างที่เบรกดาวน์ระดัอิสระ

**3. การออกแบบสร้าง**

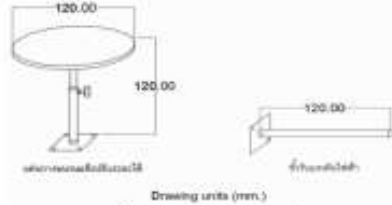
ชุดทดสอบทางไฟฟ้า 3 สถานะ ได้ทำการอ้างอิงข้อมูลบางส่วนจากมาตรฐาน IEC 156 ซึ่งการออกแบบนั้นจะแบ่งเป็นชุดทดสอบฉนวนไฟฟ้าของเหลว ชุดทดสอบไฟฟ้าฉนวนก๊าซและชุดทดสอบไฟฟ้าฉนวนแข็ง

**บทความวิจัย**

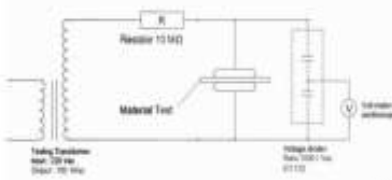
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี นทร. พระนคร ครั้งที่ 3  
 Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology

**3.1 การออกแบบชุดทดสอบความแข็งแรง**

ชุดทดสอบความแข็งแรงที่ใช้ในการทดสอบความคงทนจนวนได้ การออกแบบได้ออกแบบให้มีระยะในการจับวัดจุดทดสอบแบบปรับระยะได้ วัสดุที่นำมาใช้เป็น สแตนเลสสตีลทงวงกลมแบนไม่มีรอยต่อ



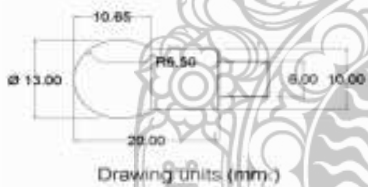
รูปที่ 4 ชุดทดสอบความแข็งแรง



รูปที่ 5 วงจรสมมูลชุดทดสอบความแข็งแรง

**3.2 การออกแบบชุดทดสอบความเหนียว**

หัวอิเล็กโทรด ที่ใช้ในการทดสอบความคงทนจนวนซึ่งมีน้ำหนักต่อแปลงของแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดและรูปทรงที่ ไม่เหมือนกัน และเกณฑ์การเลือกวัสดุที่จะ ใช้ ทำอิเล็กโทรดคือ มีคุณสมบัติทางกลและทาง ไฟฟ้าที่เหมาะสม



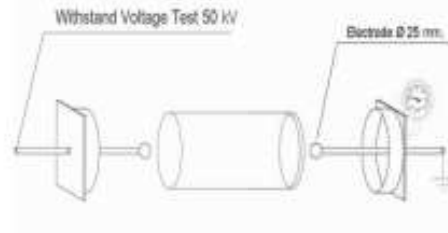
รูปที่ 6 รูปทรงอิเล็กโทรดตามแบบของ IEC 156



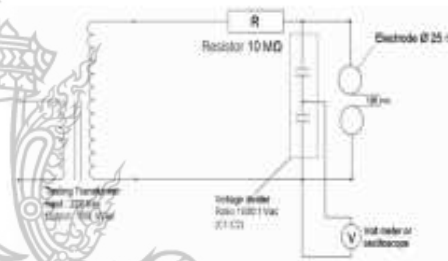
รูปที่ 7 ชุดทดสอบน้ำหนักเหน็ดแปลงมาตรฐาน IEC 156

**3.3 การออกแบบชุดทดสอบความถี่ฟ้า**

ในการออกแบบรูปทรงจนวนกึ่งตัวชุดทดสอบความถี่ฟ้าไม่มีรอยร้าวของอากาศและมีการจัดที่ตีไม่มีอากาศรั่วไหลจึงจะสามารถทดสอบได้โดยลักษณะของจนวนกึ่งฟ้าจะเป็นทรงกระบอก ด้านอิเล็กโทรดของจนวนกึ่งฟ้าจะเป็นทรงกลมทึบหนักน้ำหนักกันและ ไม่สามารถปรับระดับได้ เพื่อป้องกันกรรไกรของโลกของกึ่งฟ้า



รูปที่ 8 รายละเอียดไดอะแกรมชุดทดสอบความถี่ฟ้า



รูปที่ 9 วงจรสมมูลชุดทดสอบความถี่ฟ้า

**3.4 ชุดทดสอบ**

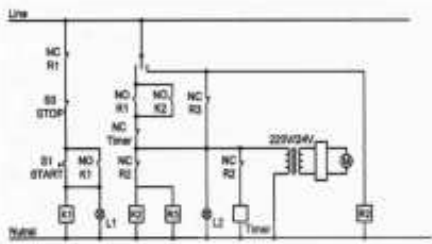
ได้มีการออกแบบไว้มีความสะดวกในการวางชุดทดสอบเคลื่อนย้ายสะดวกเพราะมีลูกบอลยึดติดอยู่ด้านล่าง



รูปที่ 10 ใต้รางชุดทดสอบ

**บทความวิจัย**

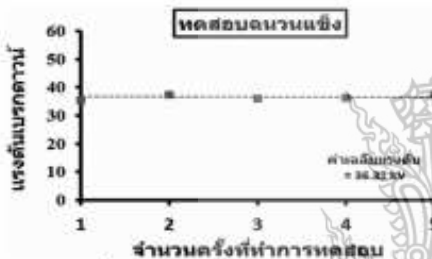
การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ครั้งที่ 3  
 Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology



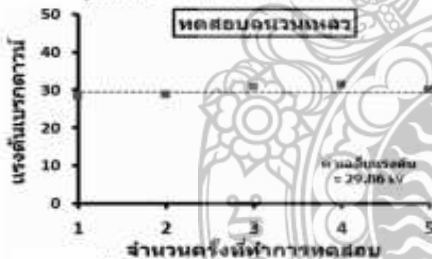
รูปที่ 11 วงจรควบคุมการทำงาน

**4.ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผล**

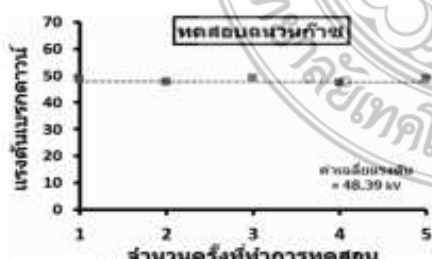
ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันเหลว ฉนวนแข็ง และ ฉนวนก๊าซ โดยใช้ชุดทดสอบที่ได้ ออกแบบสร้างไว้ตามรายละเอียดดังบทที่ 3 การทดสอบทำโดยการป้อนแรงสูงกระแสสลับให้อันวัสดุทดสอบจนเกิดการเบรกดาวน์ โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการบันทึกผล



รูปที่ 12 กราฟแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมัน



รูปที่ 13 กราฟแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง



รูปที่ 14 กราฟแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนก๊าซ

**5.สรุปผลงานวิจัย**

ในการทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบจะขึ้นอยู่กับ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิห้องและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของห้อง ซึ่งจะมีผลต่อกำหนดเบรกดาวน์ของฉนวนทดสอบทั้ง 3 ชนิด แต่ในการทดสอบครั้งนี้ทางผู้จัดทำได้นำส่วนนี้มาคิดค่าเนื่องจากไม่มีผลมากนัก ในการออกแบบชุดทดสอบค่าความคงทนฉนวนทั้ง 3 สถานะจะเห็นว่าค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันยังไม่ตรงตามที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นในการพัฒนาโครงการจะเพิ่มอัตราการเพิ่มของแรงดันที่ได้มาตรฐาน เช่น การจัดที่ฉนวนช่วงบริเวณอิเล็กโตรดที่ต้องมีความแม่นยำและชำนาญในการจัดรูอิเล็กโตรดทั้ง 2 ข้างให้มีความตรงกันเพื่อระงับการเกิดเบรกดาวน์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น

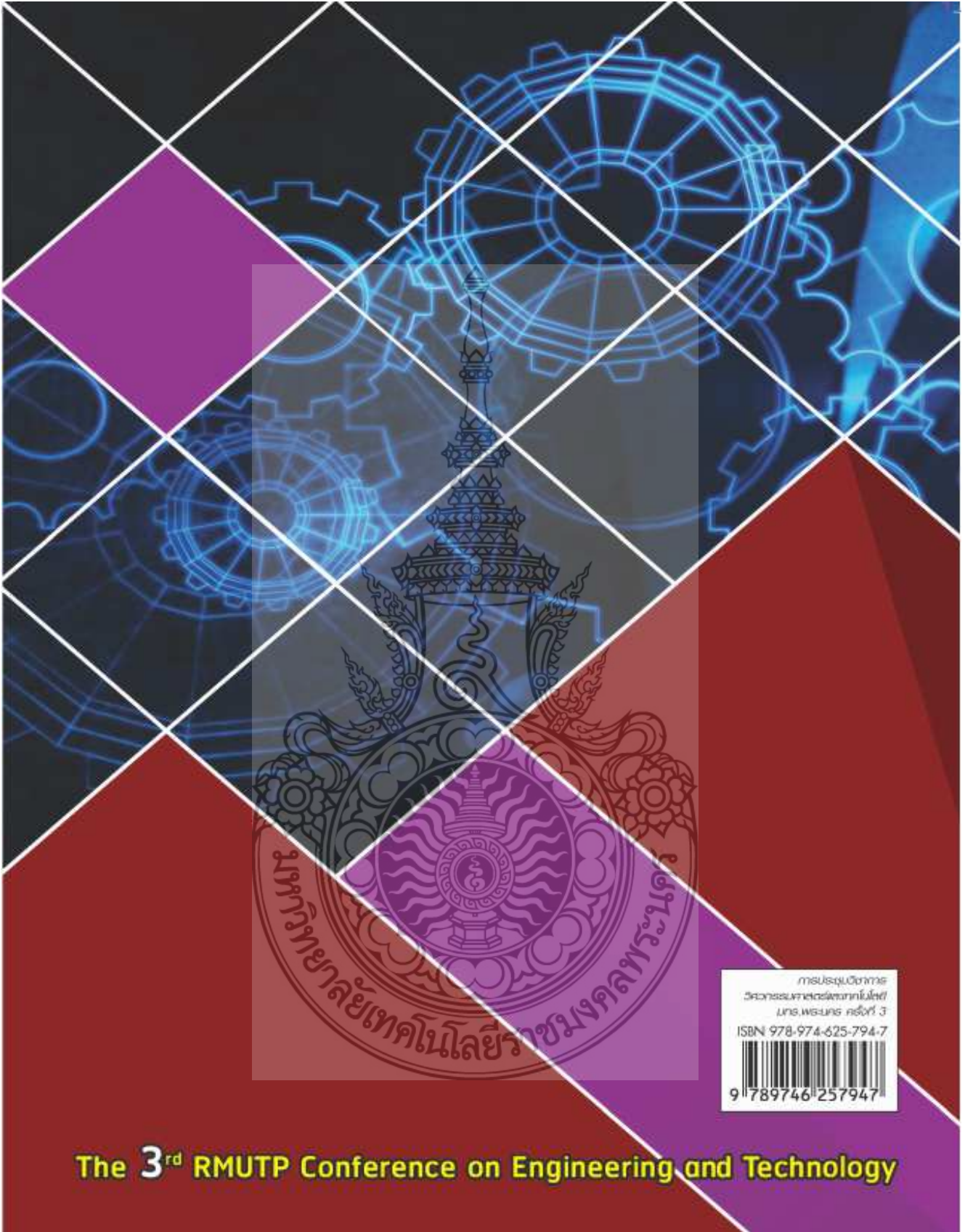
**เอกสารอ้างอิง**

- [1] จิตติพงษ์ จันทร์บุญเรือง, (2557), การวิจัยไฟฟ้าแรงดันสูงไฟฟ้ากำลัง 50 กิโลโวลต์ 50 เฮิรตซ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, เชียงใหม่.
- [2] อธิราช สังข์สะอาด, (2549), วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, พระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] สุภาวดี เนศวุ โพธิ์แก้ว, (2558), วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร: สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [4] ธนภกร นาคตา, (2550), ชุดทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพมหานคร.
- [5] IEC Standard sub No 1564(995-07)

**7. ประวัติผู้เขียน**



ดร.จตุพร เนตรโพธิ์แก้วสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า จาก มทร.ธัญบุรี ปริญญาโท วิศวกรรมไฟฟ้า จาก ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริญญาเอก Ed.D. in Educational Administration จาก Univ. of Northern Philippines (ปัจจุบันปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และการประยุกต์,ออกแบบระบบพลังงานทางอิเล็กทรอนิกส์ใหม่



กรมส่งเสริมการค้า  
ระหว่างประเทศ (สอท.) กระทรวงพาณิชย์  
นาง.พรนุช ศรีจันทร์ 3  
ISBN 978-974-625-794-7  
9 789746 257947

The 3<sup>rd</sup> RMUTP Conference on Engineering and Technology

## ประวัติผู้วิจัย



1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Supawud Nedphograw
2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
3. หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง  
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 โทรสาร 02-836-3000 ต่อ 4151

e-mail: supawud.n@rmutp.ac.th โทรศัพท์ 081-620-3266

### 4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก Doctor of Education University Of Northern Philippines (UNP)  
Educational Administration

ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- การจัดการด้านอนุรักษ์พลังงาน
- การตรวจสอบความปลอดภัยในอาคารควบคุม

### 6. ประสบการณ์งานวิจัย

#### ผลงานทางวิชาการ

##### วารสารวิชาการ (ระดับชาติ)

1. ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, และคณะ, “การบังคับรถควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ด้วยระบบจีพีเอสแบบไร้สาย,” วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กันยายน 2555, หน้า 77-80.

##### บทความวิจัย ในการประชุมวิชาการ (ระดับชาติ)

1. ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, “การควบคุมประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ด้วยหลักการควบคุมค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37), รร.พหลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, หน้า 161-164

2. ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว “การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับการวางแผนก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย,”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40), โรงแรมเดอะ ซายน์ (The Zign Hotel) อ.บางละมุง จ.ชลบุรี, 15-17 พฤศจิกายน 2560, หน้า 231-234

##### บทความวิจัย ในการประชุมวิชาการ (ระดับนานาชาติ)

- 1.S.Nedphokaew, “DESIGN AND INSTALLER SOLAR ENERGY SYSTEMS SUN TRACKING FOR COMPARISON,” 18<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, Republic of Korea, during August 25-30, 2013, pp. 486-489.

2. Tanmaneeprasert, P.Wannakarn, and **S.Nedphokaew**, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 1 kV PORTABLE RING WAVE GENERATOR,” 18<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, Republic of Korea, during August 25-30, 2013, pp. 382-385.

3. **S.Nedphokaew**, V.Phupha, and T.Tanmaneeprasert, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 1 kV PORTABLE IMPULSE VOLTAGE GENERATOR,” 18<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, Republic of Korea, during August 25-30, 2013, pp. 83-86.

4. **Supawud Nedphokaew**, “Designed and Construction the Spark Tester by DC High Voltage 15 KV Rated,” The International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD2014), to be held in Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju Island, Republic of Korea, during September 21-25, 2014, pp. 375-378.

5. **Supawud Nedphokaew** “The effects of induced Voltage under High Voltage transmission lines affects inside the fence in the 115 kV Substation rate,” 2018 International Conference on Materials Engineering and Applications (ICMEA 2018) in Bali, Indonesia during January 14-16, 2018, paper ID A0018.

บทความวิชาการ  
ในการประชุมวิชาการ  
(ระดับชาติ)

1. วิมลภ ภูผา, **ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว**, อรุณ ชลิ่งสุทธิ, สมเกียรติ ทองแก้ว, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ, “การศึกษาโคมโม่ไฟฟ้าแสงสว่างด้วยระบบพลังงานระบบผสมผสาน,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2013), โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, 27-29 มีนาคม 2556, หน้าที่ 657-660.

ตำราเรียน

**ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว**, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2558.