



ปรากฏการณ์เบรคดาว์นไนของแข็ง

( BREAKDOWN IN SOLIDS )

จัดทำโดย

นาย บั๊ยะ พู่แสงมุกข์

นาย พลินทร์ พรประเสริฐสุข

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ จงรักษ์ มณูเส็ง  
อาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง

วิทยานิพนธ์ สำหรับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028771

12.2.ก.2534

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2533

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ปรากฏการณ์เบรคดาวน์ในของแข็ง

( BREAKDOWN IN SOLIDS )

ผู้จัดทำ

นาย ปีย์ พันแสงมุกข์ 301161

นาย พลินทร์ พรประเสริฐสุข 301184

( อาจารย์ จงรักษ์ บณฺเฑาะฐ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028771

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูป	1
สารบัญตาราง	3
สัญลักษณ์	4
บทคัดย่อ	6
Abstract	7
บทที่ 1 บทนำทั่วไป	1-1
บทที่ 2 ทฤษฎีการเบรคตาวนในของแข็ง	2-1
2.1) บทนำ	2-1
2.2) เบรคตาวนแบบแท้จริง	2-2
2.3) เบรคตาวนเนื่องจากแรงกลไฟฟ้า	2-3
2.4) เบรคตาวนแบบสตริมเมอร์	2-4
2.5) เบรคตาวนแบบเทอมอล	2-5
2.6) เบรคตาวนเนื่องจากผลทางเคมี	2-7
2.7) เบรคตาวนเนื่องจากดิสซาร์จภายใน	2-9
2.8) เบรคตาวนเนื่องจากร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิว	2-12
2.9) ฉนวนของแข็ง	2-13
2.10) สรุป	2-20
บทที่ 3 การคำนวณสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนของแข็ง	3-1
3.1) บทนำ	3-1
3.2) การเกิดอิเล็กทริกคอแลทริอิ่ง	3-2
3.3) สรุป	3-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	4-1
4.1)	บทนำ	4-1
4.2)	แชมเบอร์ (กล่องบรรจุอิเล็กทรอนิกส์)	4-1
4.3)	การสร้างอิเล็กทรอนิกส์	4-2
4.4)	วงจรโวลเตจ ดีไวเดอร์	4-3
4.5)	หม้อแปลงไฟฟ้า	4-4
4.6)	Variac	4-4
4.7)	กราวนด์ของหม้อแปลง	4-4
4.8)	ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้	4-5
4.9)	สรุป	4-5
บทที่ 5	ขั้นตอนและผลการทดสอบ	5-1
5.1)	บทนำ	5-1
5.2)	ขั้นตอนการทดสอบ	5-1
5.3)	ผลการทดสอบ	5-2
5.4)	สรุป	5-11
บทที่ 6	สรุปและพิจารณาผลการทดสอบ	6-1
*	ภาคผนวก ภาพประกอบเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	
*	Reference book	
*	กิตติกรรมประกาศ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

บทที่ 1		
รูปที่		หน้า
1.1	แสดงโวลเตจเบรคดาวนแบบ เทอมอลเทียบกับเวลา	1-6
1.2	แสดงโวลเตจเบรคดาวนของกระจกบาง เทียบกับความหนา	1-6
1.3	แสดงความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนจากเทอมอล เป็นอิเล็กทรอนิกส์เบรคดาวน	1-8
1.4	แสดงค่า electric strength เทียบกับอุณหภูมิ	1-8
1.5	แสดงโวลเตจเบรคดาวน และความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิของrock salt	1-10
1.6	Electric strength เทียบกับอุณหภูมิของ โพลีเมอร์รีค ไดอิเล็กตริก	1-10
1.7	ความสัมพันธ์ของโวลเตจเบรคดาวนและelectric strengthของเซรามิค เทียบกับความหนา	1-11
1.8	ความสัมพันธ์ของ electric strength กับความหนาในอิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน	1-11
1.9	แสดงโวลเตจเบรคดาวนของกระดาษ KTMC	1-13
1.10	แสดงโวลเตจเบรคดาวนกับจำนวนพัลส์ ของกระดาษเคเบิล	1-13
1.11	ค่าelectric strength ของสารประกอบไฟเบอร์กลาสกับไนโตรเจน ที่ขึ้นกับ อุณหภูมิ	1-13
บทที่ 2		
รูปที่		หน้า
2.1	แสดงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า แปรตามช่วงเวลาที่บ่อนแรงดัน	2-2
2.2	ลักษณะดิสชาร์จเบรคดาวนแบบทรีอิ่ง ระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ	2-5
2.3	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกล ของฉนวนกระดาษ	2-8
2.4	แสดงฉนวนมีโพรงและ วงจรสมมูลย์	2-10
2.5	การดิสชาร์จภายในเมื่อบ่อนแรงดันกระแสลับ	2-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3		
รูปที่		หน้า
3.1	แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในเทอมของสนามไฟฟ้าในของแข็ง	3-2
3.2	แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า	3-3
3.4	แสดงลักษณะของชุดภาชนะทดสอบ	3-4
3.5	แบบจำลองอิลคิโตรดทรงกลมมีจุดศูนย์กลางร่วม	3-4
3.6	แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $E_r$ ในเทอมของ $r$	3-9
3.7	แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $E_r/E_0$ ในเทอมของ $r$	3-10
3.8	แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง $E_r/E_0$ ในเทอมของ $b$	3-10
บทที่ 4		
รูปที่		หน้า
4.1	วงจรที่ใช้ในการทดลอง	4-6
4.2	แสดงขนาดของ แคมเบอร์	4-7
4.3	แสดงขนาดของ อิลคิโตรด	4-8
4.4	ลักษณะอิลคิโตรดเมื่อประกอบแล้ว	4-9
ภาคผนวก		
รูปที่		หน้า
1	แสดงการต่อระหว่างอินพุท และหม้อแสดง	1
2	แสดง test cell ซึ่งประกอบด้วยแคมเบอร์ และอิลคิโตรด	2
3	แสดงการต่อระหว่าง test cell กับหม้อแปลง	2
4	ชุดแสดงผลซึ่งนำเอาที่พุด ต่อกับชุดโวลเตจ ดีไวเซอร์	3
5	แสดงลักษณะการต่อขั้วอิลคิโตรด	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษซับน้ำมัน	2-14
2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscovite และ Photogopite	2-16
5.1 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.1	5-2
5.2 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.2	5-3
5.3 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.3	5-4
5.4 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.4	5-5
5.5 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.5	5-6
5.6 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.6	5-7
5.7 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.7	5-8
5.8 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.8	5-9
5.9 โวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.9	5-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

$^{\circ}\text{C}$	: องศาเซลเซียส
$C_v$	: ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน
$d$	: ความหนาของฉนวนขณะได้รับแรงอัด
$d_0$	: ความหนาเริ่มต้นของฉนวน
$dm$	: ความหนาของวัสดุทดสอบมากที่สุด
$E$	: ความเครียดสนามไฟฟ้า
$E_{avg}$	: ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย
$E_b$	: ความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์
$E_{br}$	: ความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์
$E_{max}$	: ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
$f$	: ความถี่ของแรงดันที่ป้อน
$h$	: ความหนาของฉนวน
$J$	: ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า
$K$	: สภาพนำความร้อนของฉนวน
$\epsilon$	: รัศมีความโค้งของ อิเล็กโตรด
$T$	: อุณหภูมิของฉนวน
$t_{SD}$	: แผงเตอรันพลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริก
$U$	: แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน
$U_{br}$	: แรงดันเบรคดาวน์
$Y$	: ค่ายังโมดูลัส
$\alpha$	: temperature coefficient of losses
$\beta$	: ค่าที่แสดงเงื่อนไขเกี่ยวกับการระบายความร้อนของฉนวน
$\epsilon$	: เพอร์มิตติวิตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\epsilon_r$  : เปรอรั้มตติวิตีลั้มนั้ทส์  
 $\epsilon_0$  : เปรอรั้มตติวิตีของอากาศ  
 $\lambda$  : ลั้มประสิทธิทส์ของ อิเลคโตรเทอมอล คอนดัคติวิตี  
 $\delta_i$  : loss angle  
 $\phi$  : พิกัดการนำไฟฟ้า  
 $\sigma$  : conductivity



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์เบรคดาวน้ันของแข็ง

บู้ย      ผู้แสงมุกข์

พลินทร์    พรประ เสรรัฐสุข

อ. จงรักข์    บุญเลี้ยง,    อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สมเจตน์    เทียมเมือง,    อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในการนำวัสดุมาทำฉนวนไฟฟ้า เมื่อมีโวลเตจสูงมาก ๆ ฉนวนนั้นจะกลายเป็นตัวนำ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์เบรคดาวน้ัน ทำให้สูญเสียสภาพการเป็นฉนวน หรือเกิดสภาพการเป็นตัวนำที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในกรณีนี้ จะนำฉนวนของแข็งมาเป็นฉนวนทดสอบ ซึ่งต้องทดสอบโดยใช้เครื่องมือชนิดหนึ่ง คือ แชนเบอร์ มาหาจุดเบรคดาวน้ันของฉนวนของแข็งนั้น โดยผลที่ออกมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ใ้ในอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง, ลูกถ้วย, คาปาซิเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BREAKDOWN IN SOLID.ABSTRACT

On selection of material for electrical insulator for exceptionally high voltage, one shall realize that a particular material may lose its insulation or become conductive, In order to use solid as an insulator, one has to find out its breakdown point thru the chamber. The value can be applied in high voltage electrical instruments such as transformer, bushing, capacitor etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

บทนำทั่วไป

โครงการเรื่องนี้ เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ ลักษณะการเบรคตาวน ของฉนวนของแข็งโดยการทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบ ที่เรียกว่า chamber ซึ่งถูกออกแบบตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น โดยจุดเบรคตาวนของฉนวนของแข็งที่ได้นั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการออกแบบฉนวนที่จะใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยโครงการนี้มี 2 ลักษณะคือ

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน เกี่ยวกับการเบรคตาวนในของแข็ง
2. การสร้างอุปกรณ์ทดสอบ และ ทดสอบฉนวนของแข็งที่สามารถนำมาปฏิบัติได้

### 1.1) ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการเบรคตาวนในของแข็ง

การศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์เบรคตาวนในของแข็ง เป็นส่วนสำคัญมากในทางฉนวนไฟฟ้าของวิศวกรรมไฟฟ้า

หลักการทั่วไปของการเบรคตาวนในของแข็ง อาจจะกว้างแล้วแต่ลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้งานในที่นี้จะกล่าวถึง หลักการเบรคตาวนชนิดที่สำคัญ ๆ ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ electric breakdown และ electrothermal breakdown

1.1.1) Electric Breakdown การเบรคตาวนชนิดนี้ อาจจะเรียกว่าการเบรคตาวนไฟฟ้าแบบบริสุทธิ์ ( purely electric breakdown ) การเบรคตาวนแบบนี้มีลักษณะเด่นที่ต้องพิจารณาคือ

ก) จะเกิดในระยะเวลาสั้นมาก โดยปกติแล้วจะมีหน่วยเป็น ไมโครวินาที ซึ่งถ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฉนวนของแข็งนั้น ยังไม่เสียหาย และ โวลเตจยังถูกบ่อนอยู่ โดยไม่มี กราวน์ จะเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นอีก แต่จะเปลี่ยนจุดที่เบรคดาวน์ไป

ข) สิ่งเล็ก ๆ ที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ความถี่ของแรงดันที่บ่อน ซึ่งจะเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะทราบค่า values of voltage ซึ่งค่าความถี่นี้ก็ขึ้นกับ โวลเตจที่บ่อนว่าเป็น direct pulse หรือ sinusoidal voltage

ค) สิ่งเล็ก ๆ อีกสิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ อุณหภูมิเพราะที่อุณหภูมิต่างกัน ความคงทนของฉนวนจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ค่า values of voltage ไม่เท่ากันด้วย

ง) การเปรียบเทียบระหว่าง ค่าความคงทนของของแข็ง กับ อิเล็กโตรด ว่ามีความคงทนได้มากต่างกันเพียงใด

1.1.2) Electrothermal breakdown ในการที่จะเข้าใจการเบรคดาวน์ ชนิดนี้ จะต้องเข้าใจถึงความร้อน ที่ทำให้เกิดความสูญเสียในฉนวนของแข็ง ซึ่งค่าความสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของโวลเตจที่บ่อน คือ เป็น direct pulse หรือ sinusoidal voltage ซึ่งค่าความถี่สูงก็จะทำให้เกิดความสูญเสียในฉนวนมาก

ทฤษฎีที่ค้นพบและศึกษาโดย Fok และ Semenov สามารถสรุปหาจุด เบรคดาวน์แบบ อิเล็กโตรเทอมอล ได้ซึ่งเท่ากับ

$$U_{br} = 382 \sqrt{\frac{\lambda}{f \epsilon_i \alpha \tan \delta_i}} \phi (ph) \quad (1.1)$$

เมื่อ  $U_{br}$  = แรงดันเบรคดาวน์ ( acting value ), KV

$\lambda$  = สัมประสิทธิ์ของ electricthermal conductivity

$f$  = ความถี่ของแรงดันที่บ่อน , Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028771

$\epsilon_i$  และ  $\delta_i$  = เปรอริมิตติวิตี และ loss angle ที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน

$\alpha$  = temperature coefficient of dielectric loss factor

$h$  = ความหนาของฉนวน , m

$\beta$  = ค่าที่แสดงเงื่อนไขเกี่ยวกับ การระบายความร้อนของฉนวนทดสอบ

จากทฤษฎีดังกล่าวจะพบว่า การเบรคดาวน์ แบบ อิเล็กโตรเทอมอลนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ความถี่ของแรงดันที่ป้อน , อุณหภูมิ , ความหนาของชั้นฉนวน , การระบายความร้อน และ ค่าความคงทนของฉนวน ในกรณีของ แรงดันกระแสสลับ

การเบรคดาวน์ แบบอิเล็กโตรเทอมอลนั้น จะพิจารณาปัจจัย 3 ประการของฉนวนที่จะนำมาทดสอบคือ

ก) coefficient of thermal conductivity ;  $\lambda$

ข) loss factor ;  $\epsilon \tan \delta$

ค) temperature coefficient of losses ;  $\alpha$

ทฤษฎีของ Fok และ Semenov สามารถยืนยันได้จากการทดลอง เพราะสามารถใช้ได้กับ วัสดุฉนวนไฟฟ้า และ อาจใช้ได้ในการคำนวณ เมื่อฉนวนมีรูปทรง ทางเรขาคณิตแบบง่ายที่สุดและไม่มีแหล่งความร้อนอื่น ๆ นอกจากความร้อนจากบรรยากาศ เกี่ยวข้องกับ dielectric loss ในอุปกรณ์ที่ทำการคำนวณ ข้อจำกัดเหล่านี้ จะทำให้การนำทฤษฎีของ Fok และ Semenov ไปใช้ได้น้อยลงในทางการคำนวณในทางปฏิบัติ

การศึกษาที่สำคัญในสาขาของ electrothermal breakdown ทำให้การคำนวณในทางปฏิบัติ เป็นไปได้ง่ายขึ้น กระทำโดย N. Bogoroditsky และ ผู้ช่วยของเขา

N. Bogoroditsky , Yu. Vologobinsky และ I. Fridberg ได้เสนอวิธีวิเคราะห์ทางกราฟผิโคอย่างง่าย เพื่อใช้แสดง โวลเตจันเบรคดาวน์ของ ฉนวนความถี่สูง Yu.

Vologobinsky ได้พัฒนาทฤษฎีการเบรคดาวน์ของ ไดอิเล็กตริกที่เปราะ ( กระจุก, เซรามิค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกัมมูเซงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอื่น ๆ ) เนื่องจากรอยแตกของวัสดุซึ่งเกิดจากความร้อนเนื่องจาก dielectric loss ที่ความถี่สูง ๆ ของโวลเตจที่จ่ายให้

จากข้อมูลที่กล่าวมานั้น อิเล็กทริกเทอมอล เบรคดาวน์ จะเกิดจาก องค์ประกอบต่าง ๆ คือ ความถี่สูง , วัสดุมีค่า thermal conductivity ต่ำ , ระบบระบายความร้อนไม่เพียงพอ ( สำหรับฉนวนที่มีความหนามาก ) , อุณหภูมิสูง , ระยะเวลาที่ป้อนไฟนาน ( ทำให้เกิดความร้อนสะสม ในสารไดอิเล็กตริก ) และค่า  $\epsilon \tan \delta$  หรือ  $\delta$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิ

ในทางกลับกัน เป็นไปได้ที่จะพบ อิเล็กทริกเบรคดาวน์ อย่างเดียวที่ ความถี่ และอุณหภูมิต่ำ เมื่อป้อนโวลเตจเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และค่า  $\epsilon \tan \delta$  เพิ่มตามอุณหภูมิอย่างช้า ๆ

ตามที่กล่าวมานั้น ในกรณีของ อิเล็กทริกเทอมอล เบรคดาวน์ ค่า electric strength ของสารขึ้นกับ

- ก) ความถี่โวลเตจ , ค่า strength จะลดลงเมื่อความถี่มากขึ้น
- ข) เวลาที่ป้อนโวลเตจ
- ค) จากที่กล่าวมาแสดงว่า การเกิด เทอมอลเบรคดาวน์ ต้องใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งที่สะสมในสารไดอิเล็กตริก ซึ่งต้องใช้เวลาดังหนึ่ง ( โวลเตจยิ่งต่ำยิ่งต้องใช้เวลามากขึ้น ) เวลาที่ต้องใช้ในการป้อนโวลเตจ เพื่อให้เกิด อิเล็กทริกเทอมอล เบรคดาวน์ แสดงดังรูปที่ 1.1 ถ้าป้อนโวลเตจ  $U_1$  ให้สารไดอิเล็กตริก เป็นเวลาน้อยกว่า  $t_1$  แล้วจึงเลิกป้อน ไดอิเล็กตริก จะไม่สามารถรับความร้อนและ เกิดเบรคดาวน์ได้ สารไดอิเล็กตริกจะสามารถทน โวลเตจที่มีขนาดน้อยกว่า  $U_{\infty}$  ได้เป็นเวลานานไม่สิ้นสุด ซึ่ง  $U_{\infty}$  มีแนวโน้มเป็นเส้นขนานกับแกนนอนเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ทั้งสามที่กล่าวมานั้น ไม่ใช่ลักษณะของการเกิด อิเล็กทริกเบรคดาวน์ในกรณีนี้การเบรคดาวน์จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ ดังนั้น  $U_{\infty}$  จะไม่ขึ้นกับเวลา ( ถ้าไม่เกิดการเบรคดาวน์โดย แรงดันสูง ๆ ทันทีทันใด ภายใน 1  $\mu\text{sec}$  หรือน้อยกว่านั้น ) เนื่องจาก อิเล็กทริกเบรคดาวน์ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการเป็นฉนวน เนื่องจาก dielectric loss ความสัมพันธ์ ของ  $U_{\infty}$  กับความถี่ จะหมดความหมายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท้ายที่สุด อิเล็กทริกเบรคดาวน์ จะไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอน ระหว่าง  $U_{br}$  กับอุณหภูมิ ดังนั้น ความสัมพันธ์ทั้งสามชนิด สามารถใช้เป็นมาตรฐาน ในการแยกความแตกต่าง ระหว่าง อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์ กับ อิเล็กทริก เบรคดาวน์ ได้

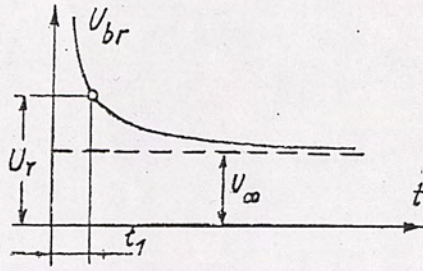
สิ่งที่สำคัญอย่างมากคือ ต้องเข้าใจว่า ข้อแตกต่างของ อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์ และ อิเล็กทริก เบรคดาวน์ สามารถใช้ในการอธิบาย เมื่อเกิดปรากฏการณ์ เบรคดาวน์เท่านั้น ภายหลังการเกิด เบรคดาวน์ ปรากฏการณ์หลังจากนั้น ( การเกิดอิเล็กทริก อาร์ค , วัสดุเกิด รอยแตก และ อื่น ๆ ) จะอธิบายตามหลักธรรมชาติของวัสดุ และพลังงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งไม่เกี่ยวกับการเกิด เบรคดาวน์

อย่างไรก็ดี มีตัวอย่างเมื่อสามารถตัดสินลักษณะของการเกิด เบรคดาวน์จากสิ่งที่ ปรากฏ ในฉนวนที่ผ่านการ เบรคดาวน์แล้ว ดังนั้นในกรณีของ อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์ การทะลุเป็นไปได้อีก ที่จะเกิดที่ใกล้จุดกึ่งกลาง ของอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นจุดที่ยากต่อ การระบาย ความร้อน การเกิดอิเล็กทริก เบรคดาวน์ มักเกิดที่ขอบ อิเล็กโตรดในบริเวณที่มี เส้นสนามไฟ ฟ้าหนาแน่นสุด ( "edge effect" จะมีผลมากที่สุด ในการเกิดอิเล็กทริกเบรคดาวน์ ) แต่เมื่อ เกิดจุดบกพร่องใน สารไดอิเล็กทริก จุดที่เกิดเบรคดาวน์ จะเกิดที่จุดบกพร่องเหล่านี้

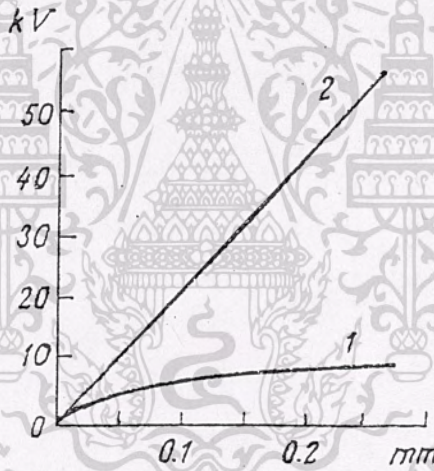
ผลของ edge effect สามารถทำให้น้อยลงได้ ถ้าสารไดอิเล็กทริกอยู่ในตัวกลางที่มี ค่า conductivity (  $\sigma$  ) สูง หรือในตัวกลางที่มี ค่า permittivity (  $\epsilon$  ) สูง ( กรณี เบรคดาวน์ในกระแสสลับ ) วิธีนี้สามารถเพิ่มค่า electric strength (  $E_{br}$  ) ของสาร ไดอิเล็กทริก ขณะเดียวกัน ก็จะลดความสัมพันธ์ของ  $E_{br}$  ต่อ ความหนาของ ไดอิเล็กทริก หรือ อีกนัยหนึ่ง กราฟของ  $U_{br}$  ( h ) เป็นการประมาณให้เกิดกราฟ ดังรูปที่ 1.2 ในทางปฏิบัติ สนาม ไฟฟ้าสามารถทำให้สม่ำเสมอที่ บริเวณใกล้เคียง อิเล็กโตรด ของระบบฉนวน ถ้าจุดที่ขดลวดของ เครื่องจักรไฟฟ้าแรงสูง ออกจากร่อง สล๊อต ถูกเคลือบด้วย semiconductive varnish

ตามปกติ วัสดุไดอิเล็กทริก ไม่สามารถบรรยายโดย กลไกการเบรคดาวน์อย่างใด อย่างหนึ่ง ถ้าภาวะการทดลองถูกเปลี่ยนไป การเบรคดาวน์ แบบหนึ่งอาจ ถูกเปลี่ยนเป็นอีก แบบหนึ่งได้ ซึ่งสามารถทำได้หลาย วิธีเช่น เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ , ความถี่ , สภาวะการระบาย ความร้อน และ อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงโวลเตจเบรคดาวน์แบบ  
เทอมอลเทียช กับ เวลา



รูปที่ 1.2 แสดงโวลเตจเบรคดาวน์ (ความถี่ 50 Hz) ของ  
แผ่นกระจกบางเปรียบเทียบกับความหนา  
1- วัสดุทดสอบกับ อิเล็กโตรดในน้ำมันหม้อแปลง  
2- วัสดุทดสอบในของเหลวนำกระแส เข้มข้น  
( xylene ผสมกับ acetone )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวอย่างนี้จะพิจารณา กรณีของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สมมติว่า ค่าโวลเตจ เบรคดาวน์ ซึ่งเป็นฟังก์ชัน ของอุณหภูมิของ อิเล็กโตรเทอมิล เบรคดาวน์ ( ส่วนโค้ง AB ) และสำหรับอิเล็กทริก เบรคดาวน์ ( พิจารณาโดยประมาณ โดยเส้น CD ขนานกับแกน X ) ของ วัสดุที่เหมือนกัน ต่างก็ได้อาจมาจากการคำนวณ ทางทฤษฎี กราฟทั้งสองตัดกันที่จุด K ( รูปที่ 1.3 )

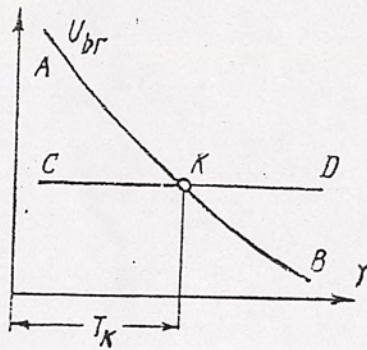
เห็นได้ชัดว่า มีค่าโวลเตจเบรคดาวน์ เพียงค่าเดียว คือค่าน้อยสุดที่เป็นไปได้ตาม ทฤษฎี ที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ ของการทดลอง ดังนั้นความสัมพันธ์ ของโวลเตจเบรคดาวน์ กับ อุณหภูมิ แสดงได้โดยเส้น CKB ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_K$  แสดงถึงลักษณะของ อิเล็กทริก เบรคดาวน์ โดยไม่เกี่ยวข้องกันระหว่าง  $U_{br}$  กับอุณหภูมิ และความถี่ เมื่ออุณหภูมิ มากกว่า  $T_K$  จะ เกิด อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สูงกว่านี้  $U_{br}$  จะตกลงเนื่องมา จากความสัมพันธ์ ของ  $U_{br}$  กับความถี่ และเวลาที่บ่อน โวลเตจ ของ กลไกการเบรค ดาวน์ แบบอิเล็กโตรเทอมอล แสดงได้โดยความสัมพันธ์ ( รูปที่ 1.4 , 1.5 ) ของ dielectric strength กับอุณหภูมิ สำหรับกระเบื้อง และ rock salt และความสัมพันธ์ของ  $E_{br}$  ( รูปที่ 1.6 ) สำหรับ โพลีเมอร์ แบบไม่มีขั้ว ( ค่า loss factor  $\tan$  เพิ่มขึ้น ช้า ๆ เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้น ) และแบบมีขั้วซึ่งขึ้นที่ที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ กัน

จากพื้นที่ อิเล็กทริกเบรคดาวน์ ไปยัง พื้นที่อิเล็กโตรเทอมอลเบรคดาวน์ สามารถ ได้รับผลกระทบจาก อุณหภูมิ และ ความถี่ของโวลเตจ เพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น เป็นการ เพียงพอที่จะพิจารณาความสัมพันธ์ จากกราฟระหว่างโวลเตจเบรคดาวน์ กับ ความถี่ ที่คล้าย กับความสัมพันธ์ ที่กล่าวมาแล้วกับอุณหภูมิ

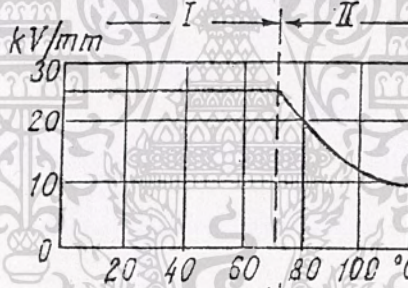
เราจะพิจารณาความสัมพันธ์อื่น ๆ ของโวลเตจ เบรคดาวน์ และ electric strength ของ ของแข็ง กับ องค์ประกอบอื่น ๆ

ดังนั้น ค่า electric strength ของ hygroscopic dielectric ขึ้น กับความชื้น และลดลง เมื่อความชื้นมากขึ้น ในกรณีนี้ สามารถสรุปจาก การศึกษาการเบรค ดาวน์ ของ ฉนวนไฟฟ้า ซึ่งถูกทำให้เลวลงโดย อุณหภูมิ และความชื้นที่สูง

ตามกฎเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ค่า โวลเตจเบรคดาวน์ จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า การเพิ่มความหนา ดังนั้น ในกรณีนี้ ค่า electric strength ของวัสดุ จะลดลง ( ตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แสดงความเป็นไปได้ ของการเปลี่ยนจากเทอมอล เป็น อิเล็กตริก เบรคดาวน์



รูปที่ 1.4 แสดงค่า electric strength กับ อุณหภูมิภายใต้ โวลเตจที่ความถี่ 50 Hz

- 1- เขตเกิด อิเล็กตริก เบรคดาวน์
- 2- เขตเกิด อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

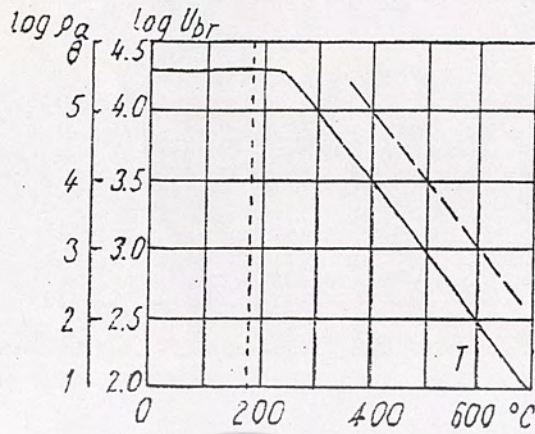
อย่างในรูปที่ 1.2 , 1.7 ) เมื่อการเบรคดาวน เป็นแบบ อิเล็กโตรเทอมอล การลดลงของ  $E_{br}$  ขณะที่  $h$  เพิ่มขึ้น การลดลงของ ความร้อน และ ลักษณะของฟังก์ชัน ( $\rho h$ ) เพื่อความเข้าใจอย่างละเอียด จึงนำวัสดุทดสอบ 2 อันที่มีขนาดเหมือนกัน หน้า 3 และ 5 mm โดยป้อนโวลเตจ 30 และ 50 KV ตามลำดับ ในกรณีนี้ ค่า dielectric loss ที่กลางไดอิเล็กตริก จะเหมือนกับในช่วงแรกที่ป้อนโวลเตจให้วัสดุทดสอบเนื่องจากค่า  $\epsilon$  ในตัวอย่างในรูป 1.8 เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ไรท์ตี ค่าความร้อนที่ลดลง จากจุดกึ่งกลางไดอิเล็กตริก ไปยัง อิเล็กโตรด ในรูป 1.8 a มีความชัดเจนมากกว่าในรูป 1.8 b จะเห็นว่า electric strength เมื่อมี อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน ในรูป 1.8 b จะต่ำกว่าในรูป 1.8 a

ความสัมพันธ์ ของ  $U_{br}$  และ  $E_{br}$  กับ  $h$  คล้ายกับ อิเล็กตริก เบรคดาวน ล้วน ๆ โดยเฉพาะใน inhomogeneous field (เปรียบเทียบกับ ลักษณะความสัมพันธ์ของก๊าซ) ในหลาย ๆ กรณี เช่น ในกระเบื้อง การลดลงของ  $E_{br}$  เป็นผลจากการลดลง ของคุณภาพ วัสดุใน ชั้นความหนา เนื่องจากการผลิต ในกรณีของชั้นที่บางมากๆ เมื่อ inhomonities เริ่ม ชัดเจนยิ่งขึ้น (ใน vanish films)  $E_{br}$  จะตกลงอีกครั้ง

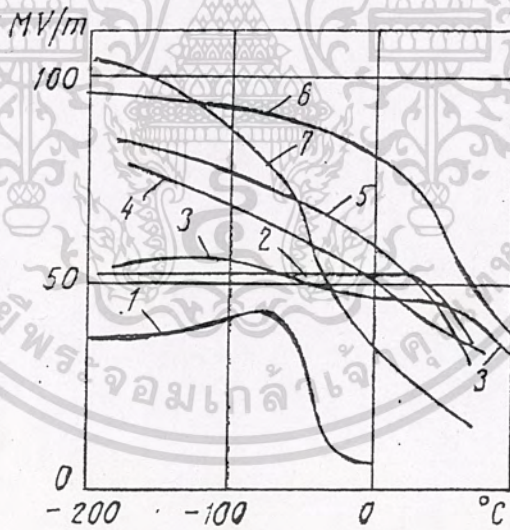
การเพิ่มพื้นที่ของ อิเล็กโตรด ทำให้ค่า  $U_{br}$  ลดต่ำลง (ถ้าเราไม่พิจารณาถึง พื้นที่ของ อิเล็กโตรดที่ถือว่าเล็กมาก เมื่อเป็นปลายแหลม แบบ non uniform field ซึ่งค่า  $U_{br}$  จะลดลง ) ความสัมพันธ์จะมีในกระดาศ , ฝา varnished และ แผ่นฉนวนอื่น ๆ เนื่องมาจากจุด weak point ใน ไดอิเล็กตริก ลดลงภายในอิเล็กโตรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ในวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ anisotropic electric strength จะแตกต่าง ในหลายทิศทางดังนั้น electric strength ที่ผ่านชั้นต่าง ๆ จะมากกว่าค่าภายในชั้นเดียวกัน ในวัสดุ laminated (พลาสติก laminated , กระดาษฉนวนสายไฟแรงสูง , ไม้ก้ำ ) เหล่านี้ จะแสดงในรูป 1.9 a, b เส้นโค้ง 1, 2, 3 ในรูปแสดงผลของ อุณหภูมิ และ ความชื้นที่มีต่อ electric strength ของวัสดุ

เนื่องจากลักษณะจำเพาะของ โครงสร้างเหล่านี้ crystal dielectric จะ แสดงทิศทางที่เกิดการ เบรคดาวน ง่ายที่สุดด้วย โวลเตจพัลส์ ที่กระทำต่อ crystals จะทำให้เกิด imperfect breakdown ซึ่งไม่แผ่ขยายไปทั่วทั้งพื้นที่ ระหว่าง electrode การเกิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 โวลเตจเบรคดาวน์  $U_{br}, V$ , (เส้นทึบ) และความต้านทาน  $\rho_g$ , โอห์ม. เมตร, (เส้นประ) ที่กระแสสลับ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของ rock salt crystal แกน Y เป็น log สเกล



รูปที่ 1.6 electric strength ที่ 60 Hz เทียบกับอุณหภูมิของ

โพลีเมอร์รีค ไดอิเล็กตริก

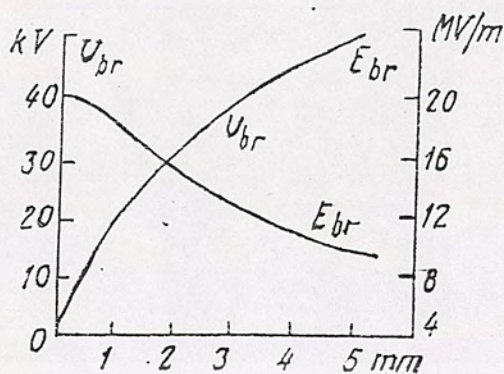
1) polyisobutylene 2) polyethylene 3) polystyrene

4) chlorinated polyethylene 5) copolymer of vinyl

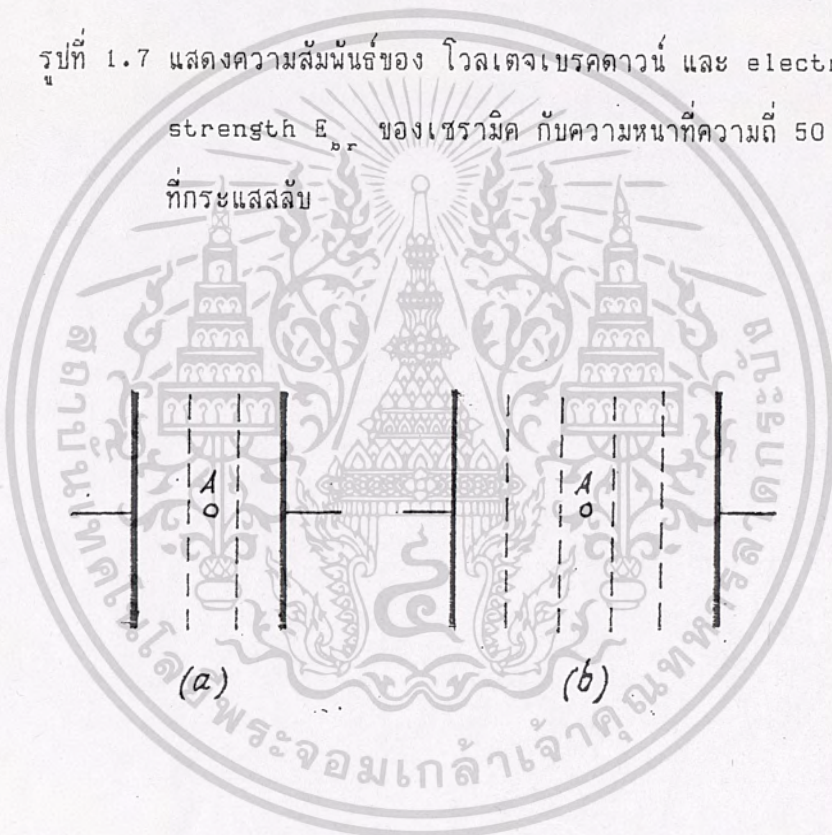
chloride and vinylacetate 6) polymethylmetacrylate

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) polyvinyl alcohol



รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ของ โวลเตจเบรคดาวน์ และ electric strength  $E_{br}$  ของเซรามิค กับความหนาที่ความถี่ 50 Hz ที่กระแสสลับ



รูปที่ 1.8 อธิบายความสัมพันธ์ของ electric strength กับความหนา ในกรณีเกิด อิเล็กโตรเทอมอล เบรคดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรคดาว์นจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อมี จำนวนครั้งของแรงดันพัลส์ หลายครั้งติดต่อกัน จึงจะทำให้ เกิด breakdown แนวของการนำไฟฟ้าจากขั้ว อิเล็กโตรดอันหนึ่ง ไปยังอีกอันหนึ่ง ความสัมพันธ์ ของโวลเตจ เบรคดาว์น ต่อจำนวนครั้งของ พัลส์ที่ให้แก่ ไดอิเล็กตริก สามารถสังเกตได้ จาก crystal dielectric และ ฉนวนทางไฟฟ้า ที่เป็น สารประกอบชนิดอื่น ๆ ด้วย

สังเกตได้ว่า electric strength ของ ไดอิเล็กตริก แข็ง ที่มีรูพรุนจะได้อามา จากค่า dielectric strength ของภาชนะที่บรรจุในรูเหล่านี้

จากลักษณะนี้ ค่า electric strength ของ ไดอิเล็กตริกแข็ง สามารถปรับปรุง โดยการเพิ่มความดันของ ก๊าซในรู หรือการแทนที่อากาศ หรือ การในรู ( ซึ่งมีค่า electric strength ต่ำ ) ด้วยก๊าซที่มีค่า electric strength สูง

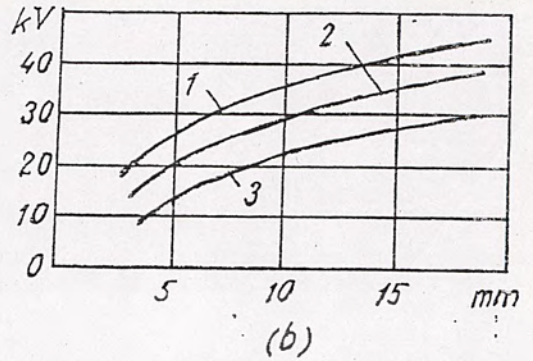
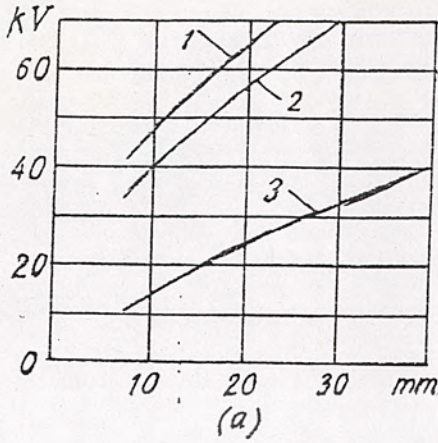
รูปที่ 1.11 แสดงถึงวิธีการเพิ่มความ electric strength ของ ไดอิเล็กตริก ที่มีรูพรุน ( glass cloth - gas composition ) โดยการเพิ่มความดันของ ก๊าซในรูเหล่านั้น

เราจะสรุปได้ว่า บางกรณีของการเกิด เบรคดาว์น จะเกิดจากกรณีของ อิเล็กตริก และ เทอมอล เบรคดาว์น เช่นการเกิด chemical ( electrochemical ) breakdown อย่างช้า ๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง ทางเคมีใน ไดอิเล็กตริก ภายใต้โวลเตจ ที่จ่ายให้ ( การเกิด อิเล็กโตรไลซิส ใน ไดอิเล็กตริก , ผลกระทบของโอโซนเมื่อเกิดโคโรนา ในอากาศ บริเวณ ผิวของไดอิเล็กตริก เป็นต้น )

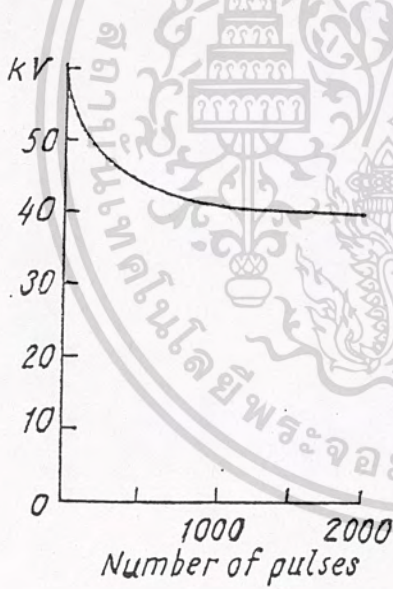
การเกิด ionization breakdown จะมีความสำคัญมากในเทคนิคของ คาปาซิเตอร์ และ เคเบิลแรงสูง ที่ใช้กระดาษฉนวน ที่มีช่องว่างภายใน การเกิด เบรคดาว์น จะเกิดขึ้น เนื่องจาก การ ionization ของอากาศในฉนวน ระหว่างการเกิด ionization ( แยก จากความร้อนในบรรยากาศ และ การเกิด โอโซน ) อิเล็กตรอนอิสระ จะเกิดขึ้นในโพรง อากาศ อย่างมากมายภายใต้ผลของ สนามไฟฟ้า และ ชั้นของฉนวน จะเชื่อมต่อกับ โพรงอากาศ

นอกจากนั้น กระบวนการ polymerization และ condensation ที่เกิดกับก๊าซ อิสระ ( ไฮโดรเจน ) และการเปลี่ยนแปลง ของสาร ที่แทรกอยู่ในฉนวน ในสารจำพวก wax-type จะเกิดขึ้นเนื่องจากการ ionization ในสารเจือปนในฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 แสดงโวลเตจ เบรคดาวน์ของ กระจกตาช KTMK หน้า 80  $\mu\text{m}$  เมื่อทดสอบ across layers (a) กับ along layers (b) ความลึกของสารที่ทะลุ อยู่ในแกน X 1) ที่ภาวะปกติ 2) ที่อุณหภูมิ 120 C 3) ที่ความชื้น 95%

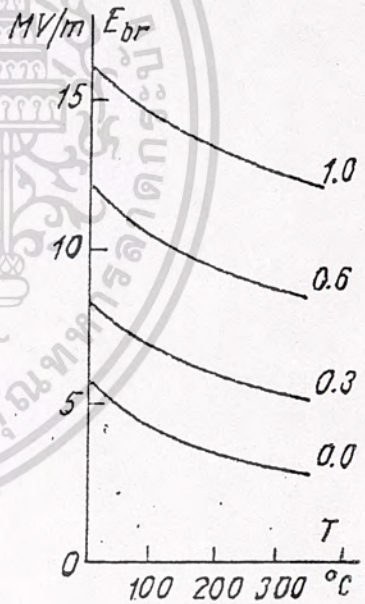


รูปที่ 1.10

แสดงค่าโวลเตจ เบรคดาวน์กับ จำนวน

พัลส์ของกระจกตาชเคเบิล impregnated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ตัวเลขที่ปรากฏ บอกค่าความดัน แกะรอย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงแหล่งของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 1.11

electric strength ของสารประกอบ

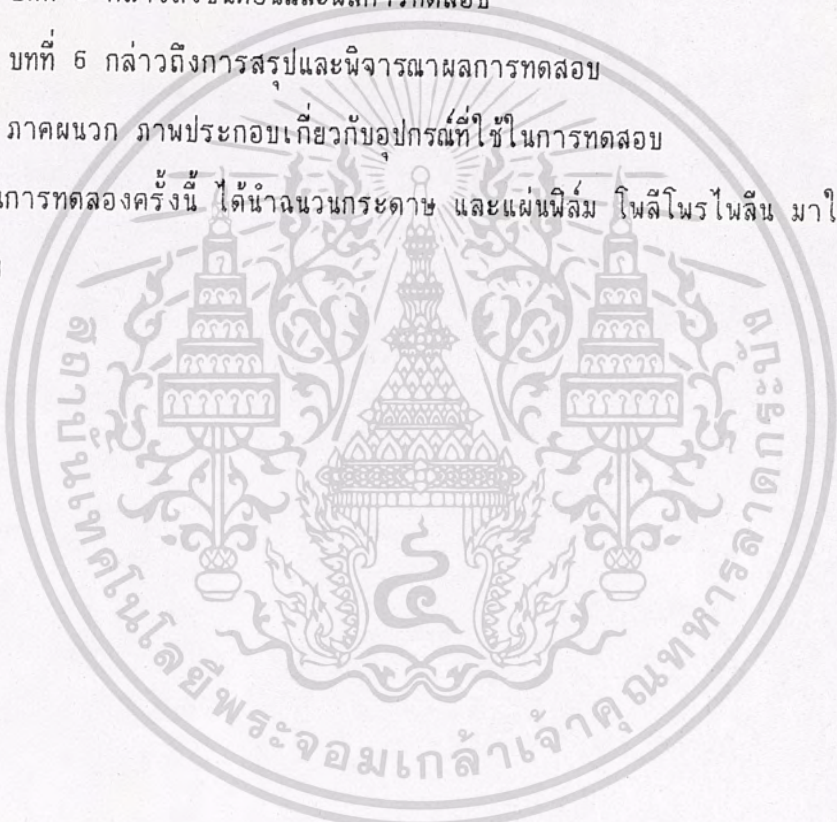
ไฟเบอร์กลาสกับไนโตรเจนที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ภายใต้ความดันของไนโตรเจนที่เปลี่ยนไป

สำหรับเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 6 บท ซึ่งในแต่ละบทประกอบไปด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการเบรคดาวนในของแข็ง
- บทที่ 3 กล่าวถึงการคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนของแข็ง
- บทที่ 4 กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
- บทที่ 5 กล่าวถึงขั้นตอนและผลการทดสอบ
- บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปและพิจารณาผลการทดสอบ

ภาคผนวก ภาพประกอบเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ  
ในการทดลองครั้งนี้ ได้นำฉนวนกระดาษ และแผ่นฟิล์ม โพลีโพรไพลีน มาใช้เป็นฉนวนในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการเบรคดาวนั้ในของแข็ง

2.1) บทนำ

ผลของการเกิดเบรคดาวนั้ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรคดาวนั้ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับเข้าสู่สภาพการฉนวนได้ตั้งเดิมภายในเวลาอันรวดเร็ว หลังจากการเบรคดาวนั้นั้นได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็ทำนองเดียวกันฉนวนสามารถกลับคืนสู่สภาพการฉนวนได้แต่อาจช้ากว่าก๊าซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรคดาวนั้แล้วฉนวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้

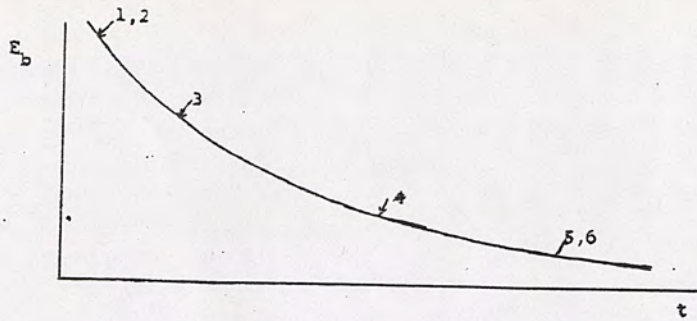
กลไกเบรคดาวนั้ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดัน และ ที่สำคัญ คือขึ้นอยู่กับ ช่วงเวลาคงอยู่ของ แรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรคดาวนั้ในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของ แรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของ การเกิดเบรคดาวนั้ได้คือ

- เบรคดาวนั้แบบบริสทุลั้หรือแบบไอออนิค
- เบรคดาวนั้เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
- เบรคดาวนั้แบบสตรีมเมอร์
- เบรคดาวนั้แบบเทอร์มัล
- เบรคดาวนั้เนื่องจากผลทางเคมี
- เบรคดาวนั้เนื่องจากดิสชาร์จภายใน
- เบรคดาวนั้เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว

การเกิดเบรคดาวนั้ตามลักษณะหรือสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง

กันตามรูป 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  แปรไปตามช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน

## 2.2) เบรคดาวน์แบบแท้จริง (intrinsic breakdown)

เบรคดาวน์แบบแท้จริง หมายถึงการเกิดเบรคดาวน์จากการย้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาอันสั้นมาก คือ 0.01 ไมโครวินาที ต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก และถือเป็นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ของฉนวนแบบบริสุทธิ์ การที่จะให้ได้เบรคดาวน์แบบแท้จริงซึ่งมีค่าความคงทนสูงนี้ จะได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขพิเศษ โดยจัดผลกระทบจากแฟคเตอร์อื่น ๆ ออกให้หมด เพื่อให้เบรคดาวน์นั้น ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และ อุณหภูมิของ สารฉนวนเท่านั้น ค่าความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์แบบบริสุทธิ์นี้สูงกว่า 10 MV/cm ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีน แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  ทนความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ถึง 15 MV/cm โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5 - 10 MV/cm อย่างไรก็ตามเป็นการทดลองค่อนข้างยากที่จะบอกได้ว่าเบรคดาวน์นั้นเป็นเบรคดาวน์แบบแท้จริงหรือไม่แท้จริง เกือบจะเรียกได้ว่าค่าเบรคดาวน์แบบแท้จริงนั้นเป็นค่าอุดมการณ์ ฉะนั้นในทางปฏิบัติก็มักจะถือเอาค่าที่ทดลองได้สูงสุดของสารฉนวนแต่ละชนิด โดยจัดผลสืบเนื่องอื่น ๆ ออกหมด ความเครียดสนามไฟฟ้าของเบรคดาวน์บริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่มีอยู่ตามธรรมชาติในไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ย้อนมากพอที่จะข้ามช่องแถบ พลังงานต้องห้ามจาก วาเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มทวีคูณมากขึ้นในแถบการนำไฟฟ้านั้น และนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3) เบรคดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า

ณวนของแข็งเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของณวนด้านสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างด้านผิวของณวนดังกล่าว ทำให้เนื้อณวนได้รับแรงอัดบีบได้ และถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของณวนก็จะทำให้เกิดแตกสลาย โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนณวนจากสนามไฟฟ้า 1 MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เงื่อนไขของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงกลไฟฟ้าวิกฤตอาจคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

แรงอัดที่เกิดจากสนามไฟฟ้ายังอยู่ในสภาวะสมดุลได้ถ้า

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

หรือ  $U^2 = d^2 \frac{2Y}{\epsilon} \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)$  (2.1)

- โดยที่
- E = ความเครียดสนามไฟฟ้า
  - U = คือแรงดันที่ป้อน
  - d = ความหนาของณวนขณะที่ได้รับแรงอัด
  - d<sub>0</sub> = ความหนาเริ่มต้นของณวน
  - ε = ε<sub>r</sub> · ε<sub>0</sub>
  - Y = ยังไม่คูลส์

แรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (แรงดันที่ป้อนสูงขึ้น) ความหนาจะลดลง และนั่นหาค่าสูงสุด  $d^2 \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)$  โดยดิฟเฟอเรนเชียล (2.1) เทียบกับ d ได้เมื่อ

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

ซึ่งแสดงว่า จะเกิดความไม่สมดุลระหว่างความคงทนต่อแรงอัดของณวนกับแรงกลไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสนามไฟฟ้าเมื่อ  $\frac{d_0}{d}$  เท่ากันหรือมากกว่า 1.67 นั่นคือฉนวนแข็งจะเริ่มแตกสลายเมื่อ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะหาได้จากสมการ (2.1) เป็น

$$E_{max} = \frac{U}{d_0} = \frac{1}{1.67} \sqrt{\frac{Y}{\epsilon}} = 0.6 \sqrt{\frac{Y}{\epsilon}} \quad (2.3)$$

#### 2.4) เบรคดาวนแบบสตรีมเมอร์

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ ได้จากอิเล็กโตรดฝังเข้าไปในเนื้อ ของฉนวนแข็ง เบรคดาวนอาจเกิดขึ้นได้จาก อะวาลานซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่เป็นไปในลักษณะเดียวกับ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ที่อธิบาย การเกิดเบรคดาวนในก๊าซ อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่ค้ำโอด จะเคลื่อนที่ไปหาอะโนด และได้รับพลังงานจาก สนามไฟฟ้าขณะที่เคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้า ที่เกินค่าพลังงาน ไอออนไนเซชัน ของโครงสร้างผลึก (lattice ionizing energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก อะตอมโครงสร้างผลึก จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวาลานซ์ และเบรคดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์จำนวนถึง ค่าวิกฤต

ในทางปฏิบัติ เบรคดาวนมักจะไม่เกิด การดิสชาร์จครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทาง จากการดิสชาร์จหลายครั้งดังในรูป 2.2 ที่ได้จากการทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่าง ปลายแหลมรัศมี 0.254 มิลลิเมตรกับแผ่นระนาบ โดยฝังปลายอิเล็กโตรดเข้าไปในเนื้อฉนวนโปร่งไสหนา 4.8 มิลลิเมตร แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนมีรูปคลื่น 1/30  $\mu\text{sec}$  จำนวน 190 ครั้ง สังเกตร่องรอยของดิสชาร์จแต่ละครั้ง แต่ไม่เกิดแนวดิสชาร์จทุกครั้ง ที่ป้อนแรงดัน ร่องรอยจะเกิดขยายตัวออกไปเป็นชั้น ๆ จนกระทั่งรอยดิสชาร์จเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรดเบรคดาวนก็เกิดขึ้น ในกรณีของแรงดันกระแสลับเบรคดาวนจะเกิดขึ้นใช้เวลาของการป้อนแรงดันตั้งแต่หลาย ๆ วินาทีไปจนถึงเป็นนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.2 ลักษณะตลิสซาร์จเบรคดาวนแบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับกระบวน  
(Cooper)

### 2.5) เบรคดาวนแบบเทอร์มัล

ค่าเบรคดาวนของฉนวนแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวน แต่ข้อนี้จะเป็นจริงจนถึงความหนาค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากฉนวนแข็งหนามากกว่านั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในไดโอดเลคติกเนื่องจากกระแสไหลผ่านจะเป็นผลให้เกิดเบรคดาวนได้ง่ายขึ้น นั่นคือค่าแรงดันเบรคดาวนไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา

เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทแผ่กระจายออกไปสู่ตัวกลางรอบ ๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งจะยังคงสภาพอยู่ได้ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถระบายออกไปสู่ในตัวกลางรอบ ๆ ได้ทัน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไปก็จะทำให้เสียความสมดุลและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน แบบเทอร์มัลขึ้นได้อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานความสมดุลจะยังคงรักษาอยู่ได้ เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการ ป้อนแรงดันให้กับ ฉนวนจะต้องเท่ากับความร้อนที่แผ่กระจายออกไปพร้อมกับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วยอุณหภูมิ  $T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีแรงดันกระแสตรง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W_{\text{r}} = \rho E^2 \quad \text{W/cm}^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวน

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} W_{\text{r}} &= \omega \epsilon t \epsilon_0 E^2 \\ &= 0.556 f E^2 t \epsilon_0 \times 10^{-12} \quad \text{W/cm}^3 \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่เป็น Hz

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

$t \epsilon_0$  คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

ความร้อนที่ระบายออกไปคำนวณได้จากสมการ

$$W_{\text{d}} = C \frac{dT}{dt} + \text{div} (k \text{ grad } T) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน

$T$  คือ อุณหภูมิของฉนวน

$k$  คือ สภาพนำความร้อนของฉนวน

ฉะนั้นเทอร์มัลเบรคดาวน์จะไม่เกิดขึ้นถ้า

$$W_{\text{r}} \leq W_{\text{d}}$$

เนื่องจาก พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่ามากกว่าในสนามไฟฟ้ากระแสตรง เพราะในสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชันซึ่งโมเลกุลของ ไดอิเล็กตริกจะกลับขั้วไปมาตาม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ สนามไฟฟ้า ดังนั้นค่าแรงดันเทอร์มัลเบรคดาวน์ ของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยิ่งลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6) เบรคตาวนเนื่องจากผลเคมีและเคมีไฟฟ้า

### 2.6.1) ผลทางเคมี

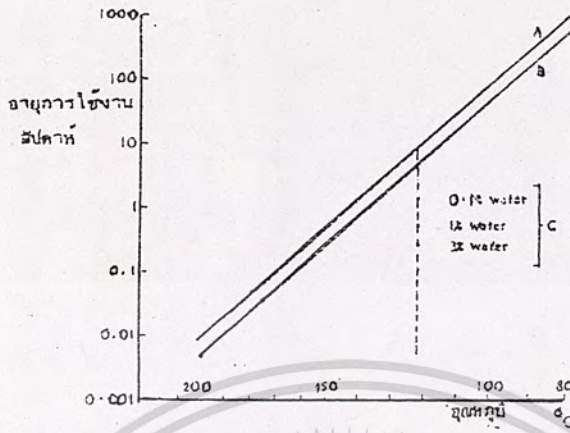
สารฉนวนอาจเสื่อมสภาพทางเคมีได้แม้ว่าจะไม่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าก็ตาม

ก. เสถียรภาพทางเคมีเสื่อม ฉนวนเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะอินทรีย์สาร สภาพทางเคมีจะเสื่อมช้าลงมากในสภาวะใช้งานปกติ แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจมีผลมาจากการแตกสลายของโครงสร้างในเนื้อสาร เช่น คาร์บอนในเซลลูโลส หรือ สารสังเคราะห์ เช่น กระจกฉนวนจะเสถียรสภาพทางแรงกลภายในสองสามวันที่อุณหภูมิ  $150^{\circ} \text{C}$  ถึงแม้ว่าจะไม่มีอากาศหรือความชื้น กระบวนการเสื่อมสภาพนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่ามากถ้าหากมีออกซิเจนและความชื้น ดังในรูป 2.3 อีกตัวอย่างหนึ่งก็คือไมกาที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}$  ถึง  $500^{\circ} \text{C}$  จะเริ่มเสถียรภาพช้า ๆ ทั้งทางสารและทางกล ฉะนั้นในมาตรฐานทั้งหลายเกี่ยวกับการใช้ฉนวนสำหรับเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะกำหนดแยกประเภทตามอุณหภูมิสูงสุดของการใช้งาน

ข. ออกซิเจน เป็นผลทางเคมีอันหนึ่งที่ทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ถ้าสารนั้นมีอากาศหรือโอโซนเช่น ยาง และ โพลีเทน จะเกิดออกซิเดชันทำให้ผิวแตกครากเมื่อยึดและได้รับแสงแดด

ค. ไฮโดรลิซิส สารฉนวนบางชนิดถ้าได้รับทั้งความชื้นและความร้อนจะเกิดไฮโดรลิซิสขึ้น ทำให้เสถียรสภาพทางกลและทางไฟฟ้า เช่น โพลีทีลิน เทเลทฮาเลท เซลลูโลสของเอสเทอร์และโพลิเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- A : กระดาษขอบแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสผลกับ  $N_2$
- E : กระดาษขอบแห้งในสุญญากาศจุ่มในน้ำมันหม้อแปลงสัมผัสผลกับ  $O_2$
- C : กระดาษชั้นจุ่มน้ำมันสัมผัสผลกับ  $N_2$

รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออายุการใช้งานทางกลของฉนวนกระดาษ

2.6.2) ผลทางเคมีไฟฟ้า

ไม่มีสารฉนวนใดที่ปราศจากไอออน หรือ อีกนัยหนึ่งก็คือไม่มีสารฉนวนใดที่มีความต้านทานเป็นอนันต์ ฉะนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจึงเป็นผลให้มีกระแสรั่ว (leakage current) ไอออนเหล่านี้อาจเกิดจากสารเจือปน หรือเกิดไอออนในเซชัน ภายในฉนวนเอง เมื่อไอออนมาถึงอิเล็กโตรดอาจ เกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาจเกิดก๊าซขึ้น หรือเกิดสารเกาะบนผิวอิเล็กโตรดในลักษณะอิเล็กโตรไลซิสนั่นเอง กระบวนการนี้จะมีผลเร็วขึ้นถ้าหากอุณหภูมิสูง และเป็นผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสนามไฟฟ้ากระแสตรง

กล่าวโดยสรุปก็คือ อัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากผลทางเคมีไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแสรั่ว ซึ่งขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ ประการแรกคือ ความหนาแน่นของไอออนในฉนวน อันเกิดจากสิ่งเจือปนในฉนวน จึงต้องระมัดระวังหรือป้องกันมิให้มีสิ่งเจือปนในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และประกอบแพคเตอร์ประการที่สองคือ อุดหนุนที่ทำให้กระแสเร็วเพิ่มขึ้นถ้าอุดหนุนสูงขึ้น ซึ่งทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากเคมีไฟฟ้าเร็วขึ้น ยกเว้นเสียแต่นวนมีความชื้น อุดหนุนเพิ่มขึ้นจะทำให้แห้งเร็วขึ้น แพคเตอร์ประการที่สามก็คือ สารที่เป็นโพลาร์ คือโมเลกุลมีขั้วจะมีกระแสเร็วกว่าสารที่ไม่เป็นโพลาร์

ตัวอย่างการฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของเคมีไฟฟ้า เช่น สายไฟหุ้มฉนวนและใช้ในที่ความชื้น เมื่อมีความต่างศักย์ระหว่างขดลวดหรือระหว่างชั้นในขดเดียวกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ปฏิกริยากัดกร่อนของสายไฟเกิดขึ้นได้ ถ้าฉนวนมีสิ่งเจือปนไอออน (เช่น น้ำมีสารละลาย) เช่น ผ้าฝ้ายหุ้มสายทองแดง ในที่ชื้นจะมีสีเขียว การฉนวนจะเสียหายถ้าผ้าฝ้ายนั้นดูดความชื้นได้

## 2.7) เบรคดาวนเนื่องจากดิสชาร์จภายใน

ดิสชาร์จภายในไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นเพราะมีไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในฉนวนหรือที่เชื่อมต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโตรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรคดาวนที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าที่ฉนวนทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตทิวิตีต่ำกว่าฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรคดาวนในโพรงก่อน (ดูวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนต่างชนิดวางซ้อนกัน)

### 2.7.1) โพรงฉนวนเป็นก๊าซ

ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหลอมพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรคดาวนของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมีติของโพรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

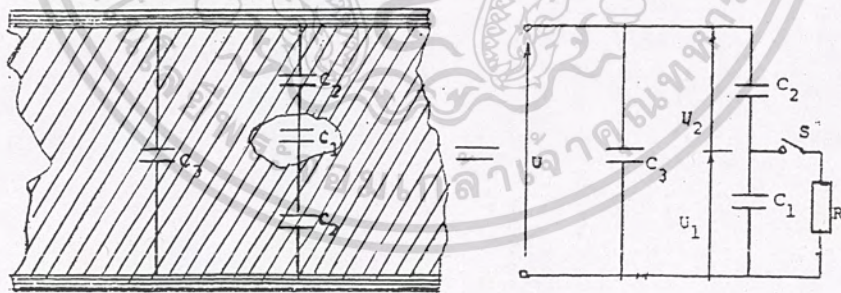
### 2.7.2) โพรงนวนเป็นสิ่งเจือปน

กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรคเตวอนในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรง ค่าแรงดันเบรคเตวอนจะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรคเตวอนครั้งแรกแล้ว

### 2.7.3) โพรงนวนเป็นน้ำมัน

โพรงนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มขุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้ เช่นเดียวกับกรณีโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน ( $\epsilon_2$ ) จะเป็น  $\epsilon_2 / \epsilon_1$  เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ( $\epsilon_1$ ) ในกรณีที่โพรงแบบตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรคเตวอนในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดีสชาร์จภายในชั้น

ในเนื้อฉนวน ที่มีโพรงก๊าซ หรือน้ำมันอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ ดังในรูป 2.4



รูป 2.4 ฉนวนมีโพรงและวงจรสมมูลย์

ในรูป 2.4  $C_1$  แทนคัพซิแตนซ์ของโพรงก๊าซ  $C_2$  แทนคัพซิแตนซ์ของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ต่ออันดับกับโพรง  $C_3$  แทนคัพซีแทนซ์ เนื้อฉนวนที่เหลือ เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  ระหว่างอิเล็กโตรดที่คั่นด้วยฉนวนนี้ทั้งหมด และ  $U_1$  เป็นแรงดันคร่อมโพรงซึ่งอาจคำนวณในลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์จะได้

$$U_1 = U \cdot \epsilon_r \frac{d_1}{d_2}$$

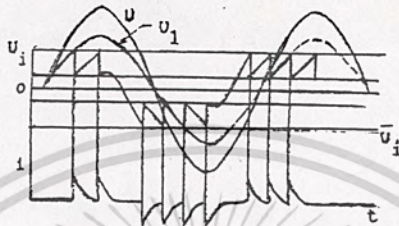
เมื่อ  $\epsilon_r$  เป็นเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน

$d_1$  และ  $d_2$  เป็นความหนาของโพรงและของฉนวนตามลำดับ (ปกติ  $d_1 \ll d_2$ )

ถ้าแรงดันคร่อมโพรงถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรงเท่ากับ  $U_1$  ก็จะมีเบรคดาวน์หรือดีสชาร์จในโพรง ค่าแรงดัน  $U_1$  เรียกว่าแรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ (discharge inception voltage) ในกรณีแรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับ เบรคดาวน์จะเกิดขึ้นที่ยอดทั้งสอง ของรูปคลื่น จำนวนครั้งดีสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนดังรูป 2.5 เส้นประแสดงถึงแรงดันคร่อมโพรงที่ควรจะเป็นถ้าหากไม่เกิดดีสชาร์จ เมื่อ  $U_1$  มีค่าถึง  $U_1^+$  หรือ  $U_1^-$  ดีสชาร์จจะเกิดขึ้น แรงดันคร่อมโพรงจะเป็นศูนย์ เมื่อหยุดดีสชาร์จแรงดันในโพรงก็เพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งถึง  $U_1$  อีกก็ดีสชาร์จใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ทั้งทางครึ่งบวก และครึ่งลบของรูปคลื่น ทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จก็จะมีกระแสพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน

เมื่อก๊าซในโพรงเบรคดาวน์เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโพรง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของโพรง ถ้าพลังงานมากพอก็จะทำให้บอนด์ทางเคมีแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้นในโพรง มีเขม่าคาร์บอนที่ผิวใน เกิดกักตร้อนเนื้อสารเป็นร่องรอยตามผิวในโพรง สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานสูญเสียไปได้อิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น ผลทางปฏิกิริยาเคมีทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ความหนาของฉนวนลดน้อยลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด อายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนและจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จ เบรคดาวน์โดยกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นภายในสองสามวัน หรือหลายปี อย่างไรก็ตามหากมีดีสชาร์จภายในจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.5 ดิสซาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ

## 2.8) เบรคดาวน เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ฉีก (Tracking)

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการฉนวนอาจเสียหาย เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ฉีก (tracking)

เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ฉีกฉนวนอันอาจ เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง และ เพราะความชื้น ในบรรยากาศ ประกอบกับ ความสกปรกบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่น และเกลือ กระจายตามผิวนำไฟฟ้านี้ ทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไปได้ ทำให้เกิดสปาร์คในช่วงที่ผิวนำไฟฟ้าขาดไปทำให้ฉนวนเสียหาย เช่น กระจกเบคเคสไลท์ การเกิดเสียหายเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้านี้จะแตกต่างไปจากการเสียหายเพราะดิสซาร์จ ดิสซาร์จจะเกิดขึ้น (ในก๊าซรอบนอกฉนวน) อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากันหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเซน แต่เบรคดาวนจากร่องรอยนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมากและไม่ขึ้นอยู่กับการเบรคดาวนของก๊าซรอบ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9) ฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดีและเพียงพอ แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่าย ๆ เช่น สายไฟขึงในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่ฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลุกด้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟไว้ให้มั่นคงห่างจากดินและสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือเคเบิลอัดก๊าซน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นตัวฉนวน แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดขดลวดต่าง ๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามที่กำหนดออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่ต้องการฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength)
- 2) เพอร์มิตทิวิตี ( $\epsilon$ )
- 3) แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ )
- 4) ความคงทนต่อแรงกล
- 5) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี, ความร้อน

ฉนวนแข็งที่ฉนวนนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้นและไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เปื้อนเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอาจได้มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ, ผ้า, ยาง เป็นต้น หรือสารอินทรีย์ เช่น ไมก้า, แก้ว, เซรามิกส์ หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติก รายละเอียดของคุณสมบัติฉนวนแข็งที่ใช้กันทั่วไปจะนำมากล่าวในที่นี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9.1) กระจกตาช

กระจกตาชปกติ ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์การฉนวน รู้จักกันในลักษณะ กระจกตาชบาง ๆ หรือ กระจกตาชเหนียว ความหนาแน่นและความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งานความหนาแน่นต่ำ ( $0.8 \text{ g/cm}^3$ ) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคัพเพซีเตอร์ความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคัพเพซีเตอร์ไฟฟ้ากำลัง กระจกตาชที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในคัพเพซีเตอร์กระแสตรงเพื่อเก็บพลังงาน หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากกระจกตาชมีคุณสมบัติดูดซึมความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระจกตาชเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก เช่น น้ำหนักแห้ง ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระจกตาชชั่งน้ำหนักขึ้นอยู่กับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเซลลูโลสของกระจกตาช และของน้ำหนักที่ชั่ง และความหนาแน่นของกระจกตาช ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นนี้สามารถคำนวณได้ ดังตัวอย่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระจกตาชชั่งน้ำหนักต่างกันแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระจกตาชชั่งน้ำหนักที่  $20^\circ\text{C}$  ( $\epsilon_{\text{res}}$ )

ฉนวนแห้งที่ใช้ชั่ง	เปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระจกตาชชั่งน้ำหนัก $\epsilon_{\text{res}}$ ตามความหนาแน่นของกระจกตาช		
	$0.8 \text{ g/cm}^3$	$1.0 \text{ g/cm}^3$	$1.2 \text{ g/cm}^3$
Trichlorodiphenyl $\epsilon_r = 6.1$	6.28	6.30	6.40
Pentachlorodiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

## 2.9.2) เซรามิค

เซรามิคส์เป็นอนินทรีย์สารได้จากส่วนผสมของดินเหนียว หินบด เฟลสปาร์ ฟลิ้นท์ อะลูมินา แล้วเผาด้วยอุณหภูมิสูง เซรามิคอาจแบ่ง ตามค่าเปอร์มิตติวิตี้ออกได้เป็น 2 ประเภท คือประเภทที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้น้อย ( $\epsilon_r < 12$ ) ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ส่วนอีก ประเภทหนึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้นสูง ( $\epsilon_r > 12$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคเคแปซิเตอร์ ตั้งตัวอย่างสมบัติ ของไดอิเล็กตริกเซรามิคส์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ

## 2.9.3) แก้ว

แก้วเป็น สารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติก ประกอบด้วยออกไซด์  $SiO_2$  ที่ซับซ้อน ค่าเปอร์มิตติวิตี้น้อย อยู่ในช่วง 3.5 ถึง 9 ความหนาแน่น ตั้งแต่ 2.2 ถึง 6 กรัม ต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรที่ อุณหภูมิห้องค่าความต้านทานจำเพาะ มีค่าตั้งแต่  $10^{12}$  ถึง  $10^{20}$  โอห์ม-ซม. ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก 0.005 ถึง 0.01 ค่าพลังงานสูญเสียเปล่านั้นจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 3000 ถึง 5000 kv/cm และสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหลือครึ่งหนึ่งที่  $100^\circ C$

## 2.9.4) ไมก้า

ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมทั่วไปของ แร่ผลึกซิลิเคตของอะลูมินาและโปแตช ซึ่งอาจแบ่ง ออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกันคือ (1) muscovite (2) phlogopite (3) fibrolite และ (4) lipidolite โดยที่สองกลุ่มหลังนี้แข็ง และเปราะจึงไม่ค่อยใช้ในางานการฉนวน ไมก้าสามารถแยกเป็นแผ่นบางมาก ๆ ได้ ไมก้าเป็นวัสดุฉนวน ที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกน้อย ทนต่อความร้อนสูง คงทนแรงกลได้ดี ด้วยเหตุนี้เอง ไมก้าจึงเหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ได้อย่างกว้างขวาง อุปกรณ์แรงดันต่ำ ใช้ไมก้าเป็นตัวกัน ระหว่างซี ของคอมมิวเตเตอร์ขดลวดอาร์เมเจอร์ สวิตช์เกียร์ และ อุปกรณ์ทำความร้อนและความเย็น ไมก้าที่บริสุทธิ์มาก ๆ เหมาะที่จะใช้กับความถี่สูง ในตาราง 2.2 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไมก้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscovite และ Phlogopite

คุณสมบัติ	Muscovite	Phlogopite
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ 30° kv/mm	1000	700
ค่าเปอร์มิตติวิตี $\epsilon_r$ ที่ 1 kHz-3000 MHz	6 - 7.5	6 - 7.5
$\tan \delta$	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)
ความต้านทานจำเพาะเชิงผิว ความชื้น 60 ( $\Omega$ - cm)	$10^{11}$ - $10^{12}$	$10^{10}$ - $10^{11}$
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรมีค่าคงที่ ถึง 200° C ( $\Omega$ - cm)KS	$10^{14}$ - $10^{15}$	$10^{13}$ - $10^{14}$
ความทนแรงดึงหนา 0.02-0.03 mm kgf/mm <sup>2</sup>	17 - 36	16 - 26

### 2.9.5) ยาง

ยางเป็นสารที่มีทั้งตามธรรมชาติและสารสังเคราะห์ของโพลีเมอร์ มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นได้ดี คุณสมบัติทางไฟฟ้าของยางขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและวิธีการที่ทำให้ยืดหยุ่นได้ (vulcanizing) และยังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามเวลาที่ผ่านไปและความชื้นภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.6) พลาสติก

พลาสติกเป็นฉนวนแข็งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีเป็นพิเศษ การพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายในปัจจุบันต้องอาศัยพลาสติก พลาสติกประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลเล็กมากมายเป็นโมเลกุลใหญ่ ฉะนั้นโครงสร้างแตกต่างกันเป็นผลให้มีชนิดของพลาสติกมากมาย สารสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกส่วนมากจะมีโครงสร้างของอะตอมเป็นพันธะเชื่อมโยงเข้าด้วยกันไปในทิศทางหนึ่ง แต่ สารสังเคราะห์ เทอร์โมเซตติงประกอบด้วยโมเลกุลเป็นทรงลูกบาศก์ (สามมิติ) เนื่องจากพลาสติกมีมากมายหลายชนิด จึงขอออกกล่าวแต่เฉพาะที่มีใช้งานเพื่อการฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น

#### ก. โพลีเอทิลีน (Polyethylene = PE)

PE เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาเคมีได้สูง มีความต้านทานจำเพาะและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง แม้แต่ที่ความถี่สูง กระบวนการทำง่าย ราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีที่ใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) ทั้งในงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE มีแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมากน้อย แบบเบา ปานกลาง และแบบหนัก และยังอาจใช้กรรมวิธีผ่านรังสีแกมมาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า  $10^{16}$  โอห์ม-เซนติเมตร ค่าเปอร์มิตติวิตี (50 Hz - 1 MHz) เท่ากับ 2.3 และ  $\epsilon \delta$  เท่ากับ  $2 \times 10^{-4}$  มีความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 400 kv/cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง  $90^{\circ}$  C ถ้า PE ที่ผ่านรังสีแกมมาจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 700-1000 kv/cm แต่จะมีค่า  $\epsilon \delta$  เท่ากับ  $5 \times 10^{-4}$

#### ข. โพลีเอสเตอ์ (Polyesters)

โพลีเอสเตอ์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง ประกอบด้วยกรดdicarboxylic และแอลกอฮอล์ dihydric มีคุณสมบัติคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมาก ผิวแข็งเป็นพิเศษ และ ทนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อปฏิกิริยาเคมี ทั้งหลายได้ดี อาจแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทอิมิตัว และ ไม่อิมิตัว โพลีเอสเตอร์อิมิตัวใช้ในชั้นแผ่นแก้วบางหรือหล่อแก้วไฟเบอร์ ซึ่งใช้มากในรูปขององค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนโพลีเอสเตอร์อิมิตัวใช้ทำ ไฟเบอร์และฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ ใช้ทำกระดาษ เสื้อ และใยผ้าเพื่อใช้ในงานไฟฟ้า ส่วนฟิล์มนั้นใช้หุ้มสายไฟและเคเบิลสำหรับมอเตอร์ ค่ายซีเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติการฉนวน ของโพลีเอสเตอร์ขึ้นอยู่กับ ประเภท และ ความถี่ที่ใช้งาน มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r$  3-7 ความต้านทานจำเพาะ  $10^{13} - 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$  แพลคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับ 0.003 - 0.03 และ ที่ 1 MHz เท่ากับ 0.006-0.04 และจะยังต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 25-45 kv/mm

ค. โพลิสทีรีน (Polysterene = PS)

โพลิสทีรีนเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติต่าง ๆ กันตามสี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าราว 20-35 kv/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรราว  $10^{13} - \text{cm}$  เปอร์มิตติวิตีที่  $20^\circ \text{C}$  ประมาณ 2.05 มีแพลคเตอร์พลังงานสูญเสียโดยอิเล็กตริกต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับความถี่คือ  $\epsilon_r \delta = 0.002$  ที่ความถี่พลังงานถึงความถี่ 10,000 MHz ด้วยเหตุนี้จึงมักมีการใช้โพลิสทีรีนฟิล์มเป็นไดอิเล็กตริกของคัพเพซิเตอร์กันมาก เพราะจะทำให้ค่าคัพเพซิแตนซ์คงตัวในช่วงความถี่กว้าง และมีความต้านทานสูง

ง. โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride = PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์หรือ พีวีซีใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้า มีแบบที่ไม่เป็นพลาสติกแต่เหนียวทำเป็นรูปร่าง ต่าง ๆ ตามต้องการได้ง่าย ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรดและด่างและไม่ละลายน้ำแอลกอฮอล์และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ชิดจำกัดในด้านอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน  $60^\circ \text{C}$  มีค่า ความคงทนต่อ แรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรมีค่าสูง  $\epsilon_r$  ประมาณ 3.8 - 4.3 ที่ 50 Hz และ  $\epsilon_r \delta = 0.012$  ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนวิธีที่อ่อนตัว เป็นพลาสติกได้จะใช้ สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกถนน และ เปลือกนอกของเคเบิลนิยมใช้ฉนวนวิธีนี้มากกว่ายางเพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจนและไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น

#### จ. ไนลอน (Nylon)

ไนลอน เป็นสารประกอบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการทำให้ทนการกระทบแรงดึง และทนต่อแรงบิดม้วนในช่วงอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ 3 ถึง 300° C มีความทนต่อแรงดันได้สูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและปริมาตรสูงถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาพความชื้นมาเป็นเวลานานแล้วก็ตาม ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี หล่อหรือเอกซทรูดหรือตบแต่งด้วยเครื่องเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย เหมาะที่จะใช้กับงานความถี่สูงและต้องการพลังงานสูญเสียเปล่าน้อย ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักใช้ไนลอนเป็นที่ผูกมัดข้อต่อ แหวนรอง สายรัดเคเบิล สวิตช์ไฟฟ้า เป็นต้น ไนลอนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 ถึง 20 kv / mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรประมาณ  $10^{12}$  ถึง  $10^{15}$   $\Omega$ -cm ค่าเปอร์มิตติวิตีประมาณ 4 - 14 ที่ 50 Hz และ 3.5-5 ที่ 1 MHz แพลคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอเลคตริก 0.014 ถึง 0.10 ที่ 50 Hz และ 0.03 ถึง 0.13 ที่ 1 MHz

#### ฉ. ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก (Fluorocarbon plastics)

ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก แบ่งเป็น polytetrafluoroethylene (PTFE) polychlorotrifluoroethylene (PCTFE), polyvinylidene (PVF<sub>2</sub>) ในบรรดาฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกนี้ PTFE มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีมากที่สุด และจัดเป็นพลาสติกที่มีคุณภาพดีที่สุดในการใช้เป็นฉนวน เพราะมีคุณสมบัติพิเศษทั้งทางไฟฟ้าและทางกล จะไม่มีการแตกตัวถึงแม้จะร้อนถึง 300° C ส่วน PCTFE มีค่า เปรอร์มิตติวิตี และพลังงานสูญเสียต่อไอเลคตริกสูงกว่าแบบ PTFE หลอมละลายที่ 190° C PVF<sub>2</sub> เหมาะที่จะใช้กับงานที่อุณหภูมิเปลี่ยนในช่วงกว้างคือ ใช้งานได้ดีตั้งแต่ -30° C ถึง 150° C ใช้หุ้มสายควบคุม เป็นปลอกหุ้มคะแพซิเตอร์ ตัวความต้านทาน กล้องขั้วต่อสายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.7) อิพ็อกซี-เรซิน

อิพ็อกซี-เรซิน เป็นสารฉนวนประเภท เทอร์โมเซตติ้ง มีคุณสมบัติยึดเกาะ ทางไดอิเล็กตริกและทางกล ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูปตามที่ต้องการแม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง ทำเป็นตัวฉนวนรูปร่างต่าง ๆ ที่ต้องการใช้งาน ส่วนมากจะใช้งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น ปลอกฉนวนนำสาย ลุกด้วยหม้ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์เกียร์ ขดลวด แม้แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ประสานต่อเข้าด้วยกันได้อย่างกว้างขวาง เช่น ปอร์ซเลน ไม้ โลหะ พลาสติก เป็นต้น ใช้งานบิตฉนวนรอยต่อเพื่อทำสัญญาณภาคในห้องทดลอง หรือโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถใช้อิพ็อกซี-เรซิน เพื่อเอนกประสงค์ ประหยัดเวลาและราคาไม่แพง

### 2.10) สรุป

การเกิดเบรคดาว์น ในฉนวนของแข็งมีกลไก ที่ค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับกระบวนการป้อนแรงดัน , ปัจจัยแวดล้อม และที่สำคัญคือช่วงเวลาที่ตั้งที่ ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน

ในการทดลองนี้เราไม่สามารถเจาะจงได้ว่าเกิดการเบรคดาว์นเนื่องจาก การเบรคดาว์นแบบใด เพราะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีของการเบรคดาว์น นี้จึงเป็นการศึกษาเบื้องต้น เพื่อจะได้นำไปประยุกต์ ในการวิเคราะห์ ผลการทดสอบในบทที่ 5 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

การคำนวณสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนของแข็ง

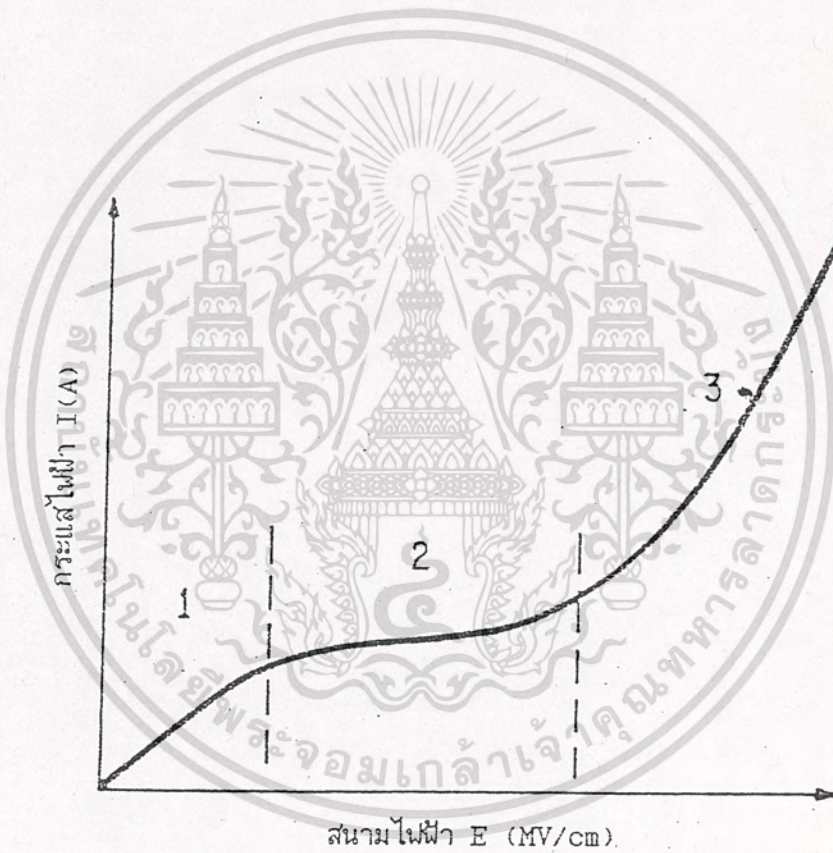
## 3.1) บทนำ

การคายประจุไฟฟ้าของฉนวนของแข็งภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในฉนวนของแข็งสามารถจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้รูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโตรดเป็นแบบจุด-พื้นระนาบ คุณสมบัติที่สำคัญของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือมีการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างช่องอิเล็กโตรดไม่เท่ากัน ถ้าวงขอบรอบนอกของขั้วอิเล็กโตรดมีลักษณะเหมือนกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีมากบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโตรดและมีความเข้มน้อยลงในบริเวณกลางช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด ถ้าวงขอบรอบนอกของขั้วอิเล็กโตรดไม่เท่ากันหรือแตกต่างกันมาก ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีมากบริเวณขั้วอิเล็กโตรดที่มีรัศมีของความโค้งน้อยกว่า ส่วนขั้วอิเล็กโตรดตรงข้าม จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยกว่า ในการวัดระดับความไม่สม่ำเสมอ ของ สนามไฟฟ้า กำหนดโดย ค่าสัมประสิทธิ์ฟิลด์เตอร์ ของ สนามไฟฟ้า (field coefficient factor) หรือ  $f$  เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มากที่สุด ( $E_{max}$ ) กับค่าเฉลี่ยความเข้ม ของ สนามไฟฟ้า ( $E_{avg}$ ) และค่า  $f$  นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะห่าง ระหว่างอิเล็กโตรดมีมาก และรัศมีความโค้งลดลง ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ในฉนวนของแข็งนั้นเป็นการทดสอบขั้นต้นว่าฉนวนของแข็ง สามารถทนต่อความเข้ม ของสนามไฟฟ้า หรือความคงทนต่อ แรงดันไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด เนื่องจากการ กระจายของสนามไฟฟ้า แบบไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายดังนั้นได้นำวิธีการเกิดอิเล็กตริกคอลลทรีอิง (electrical treeing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

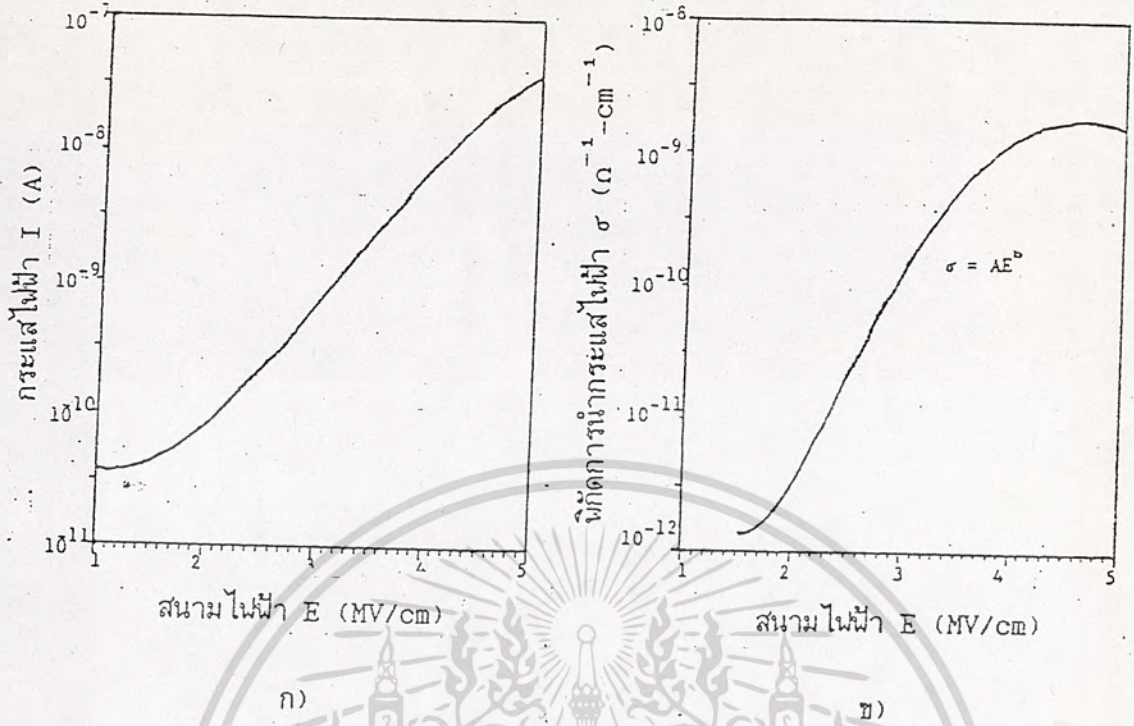
### 3.2) การเกิดอิเล็กทรอนิกส์คอลทรีอิ้ง (Electrical Treeing Model)

จากการศึกษาตัวอย่างฉนวนแข็งภายใต้สนามไฟฟ้า ข้อเท็จจริงที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) หรือพิกัดการนำกระแส (G) กับสนามไฟฟ้า (E) ของฉนวนแข็งมีแนวโน้มและลักษณะของกราฟดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าในเทอมของสนามไฟฟ้าในของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

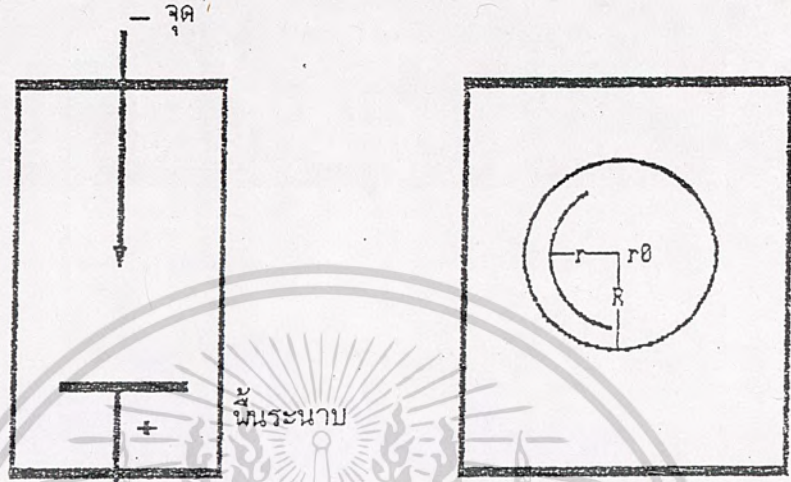


รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า ก) และพิกัดการนำกระแสไฟฟ้า ข) ในเทอมของสนามไฟฟ้าสูง ๆ

สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีการไหลกระแสเล็กน้อยเนื่องมาจากอิทธิพลของค่ากระแสเริ่มต้นของขั้วคาโธด ( $I_0$ ) เราเรียกช่วงนี้ว่าไอออนิก (ionic) ในช่วงที่ 2 เป็นช่วงกระแสอิ่มตัว (saturation) กระแสจะไหลคงที่แม้จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ช่วงนี้มีระยะสั้นมาก ในปลายของช่วงอิ่มตัวนี้กระแสเริ่มไหลมากขึ้น และถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นกว่าเดิมจะมีกระแสไหลเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิมมาก เราเรียกช่วงนี้ว่าฟิลด์เอ็ด (field-aided) การพิจารณาลักษณะของกราฟในช่วงที่ 2 และ 3 มีลักษณะคล้ายฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลสามารถสร้างสมมติฐานโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง  $I = JS$  ;  $I = \sigma ES$  ดังนั้น  $\sigma = I/ES$  จากสมการนี้สามารถเปลี่ยนกราฟจากรูปที่ 2 เป็นรูปที่ 3 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดการนำกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = AE^b \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของชุดภาชนะทอกลอบ      รูปที่ 3.5 แบบจำลองอิลีคโตรดทรงกลม  
มีจุดศูนย์กลางร่วม

การสืบสวนการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้ระบบอิลีคโตรดตั้งรูปที่ 3.4 จากรูปความเข้มของสนามไฟฟ้าจะอยู่บริเวณปลายสุดของอิลีคโตรดแบบจุดมากที่สุดในการคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าต้องใช้สมมติฐานของรูปแบบของอิลีคโตรดทรงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังรูปที่ 5 โดยให้อิลีคโตรดแบบจุดเป็นศูนย์กลางของวงกลมข้างในมีรัศมี  $r_0$  เช่นกัน และวงกลมที่อยู่ข้างนอกมีรัศมีเป็น  $R$  ดังนั้นระยะห่างระหว่างจุดปลายสุดกับพื้นราบเท่ากับ  $R - r_0 = R$  ,  $R \gg r_0$  และสนามไฟฟ้า  $E$  ณ ทุก ๆ จุดที่มีรัศมี  $r$  ภายใต้เงื่อนไขการคงตัว (steady state) หาได้จากความสัมพันธ์จากสมการของแมกซ์เวลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{(1)d(r^2 \mathbf{J})}{r^2 dr} = 0$$

ความสัมพันธ์ของกระแสที่มีเฉพาะในแนว  $r$  จะได้

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{(1)d(r^2 J_r)}{r^2 dr} = 0 \quad (3.2)$$

$$2J_r + r \frac{d(J_r)}{dr} = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{และ } J_r = \frac{1}{r} E_r \quad (3.4)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3 และ 4 จะได้

$$2 \frac{1}{r} E_r + r \frac{d(\frac{1}{r} E_r)}{dr} = 0$$

$$2 \frac{1}{r} E_r + r \frac{1}{r} \frac{d(E_r)}{dr} - \frac{1}{r} E_r = 0$$

นำ  $(dr/r \frac{1}{r} E_r)$  ทหารตลอดจะได้

$$2dr + dE_r + d = 0 \quad (3.5)$$

อินทิเกรตสมการที่ 5 จะได้

$$\ln(r^2 E_r \frac{1}{r}) = C$$

$$E_r = \frac{C}{r^2} \quad (3.6)$$

$C$  เป็นค่าคงที่ในการอินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.6 ถ้า  $\phi$  ไม่ขึ้นกับ  $E_r$  แล้ว  $E_r$  จะแปรผกผันตาม  $r^2$  นั่นคือสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางกำลังสอง และถ้า  $\phi$  ขึ้นอยู่กับ  $E_r$  แล้วแทนสมการที่ 3.1 ในสมการที่ 3.6 จะได้

$$E_r = C / A E_r^b \cdot r^2$$

$$E_r E_r^b = \frac{C}{A r^2}$$

$$E_r^{b+1} = \frac{C}{A r^2}$$

$$E_r = \left( \frac{C}{A} \right)^{1/(b+1)} \cdot r^{-2/(b+1)} \quad (3.7)$$

ถ้า  $b = 0$   $E_r = \frac{C}{A r^2}$  (3.8)

ถ้า  $b = 1$   $E_r = \left( \frac{C}{A} \right)^{1/2} \cdot r^{-1}$  (3.9)

ใช้ boundary condition

$$U_r = \int_{r_0}^r E_r dr$$

$$U_r = E_r (R - r_0)$$

$$U_r = E_r \cdot r \quad (3.10)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.7

$$\frac{C}{A} = U_r \cdot r^{(1-b)/(1+b)}$$

ที่  $b = 0$ ,  $r = r_0$

$$\frac{C}{A} = U_r \cdot r_0$$

แทนค่าในสมการ 3.7

$$E_r = E_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_0 = Ur/r_0 \quad (3.12)$$

ในทำนองเดียวกันนี้

$b = 1$  จะได้

$$Er = E_0 \frac{(r_0)}{r} \quad (3.13)$$

$$E_0 = \frac{Ur}{r_0 \ln(R/r_0)} \quad (3.14)$$

$b \neq 1$  จะได้

$$Er = E_0 \frac{(r_0)^{2/(b+1)}}{r} \quad (3.15)$$

$$E_0 = \frac{(b-1) \cdot Ur}{(b+1) \cdot r_0^{2/(b+1)} \cdot [R^{(b-1)/(b+1)} - r_0^{(b-1)/(b+1)}]} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 13 - 15 จะเห็นได้ว่า  $Er$  เป็นฟังก์ชันของ  $r/R$  และค่า  $Er$  เป็นฟังก์ชันของ  $r_0$  จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของ  $b$  จะขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าของฉนวน และค่าต่ำสุดของ  $b$  ขึ้นอยู่กับ สนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด คือบริเวณ ปลายสุด ของอิเล็กโตรดแบบจุด นอกจากนี้ยังบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพิกัดการนำกระแสไฟฟ้าในฉนวนแข็ง ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ เพื่อศึกษาการเกิดการเบรคดาวน์ในฉนวน สมมติให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายของอิเล็กโตรดในขณะใด ๆ  $U_0$  สามารถหาค่าของ ความเข้มของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น  $E_0$  จากสมการที่ 3.12, 3.14 และ 3.16 ดังนี้

$$b = 0$$

$$U_0 = E_0 r_0$$

$$b = 1$$

$$U_0 = E_0 r_0 \ln(R/r_0)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b \neq 1$

$$U_0 = E_0 r_0 \cdot \frac{(b+1) \cdot \left[ \frac{R}{r_0} \right]^{(b-1)/(b+1)} - 1}{b-1}$$

จากรูปที่ 3.6 เป็นการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_r$  ในเทอมของ  $r$  โดยสมมติค่าของ  $U_0 = 20$  kV,  $r_0 = 0.06$  ม.ม. และระยะแคป  $R = 1.5$  ม.ม. ถ้า  $b = 0$  ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ปลายสุดหรือ  $E_0 = 330.34$  kV/m.m. ซึ่งมีค่าสูงมาก ถ้าค่า  $r$  มีค่า 0.1 ม.ม. ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้ามักมีค่า 120 kV/m.m. ลดลง 2.7 เท่า ถ้า  $b = 1$  และ 2 ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น  $E_0 = 103.55$  และ 30.3 kV/m.m. ตามลำดับ ผลที่ได้จากรูปที่ 6 สรุปได้ว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ 1 ถ้า  $b$  มีค่ามาก ความเครียดของสนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง นั่นคือฉนวนแข็งชนิดนั้นมีขีดการนำกระแสดีกว่าฉนวนแข็งที่มีค่า  $b$  น้อย

จากรูปที่ 3.7 เป็นการจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_r/E_0$  ในเทอมของ  $r$  โดยมี  $r_0 = 0.06$  ม.ม.  $R = 1.5$  ม.ม. ถ้าค่าของ  $b$  มาก  $E_r/E_0$  จะมากตามไปด้วยนั้นแสดงให้เห็นว่าถ้าอัตราส่วนระหว่าง  $E_r/E_0$  มีค่ามากการกระจายของสนามไฟฟ้า ณ สองจุดที่อยู่ติดกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

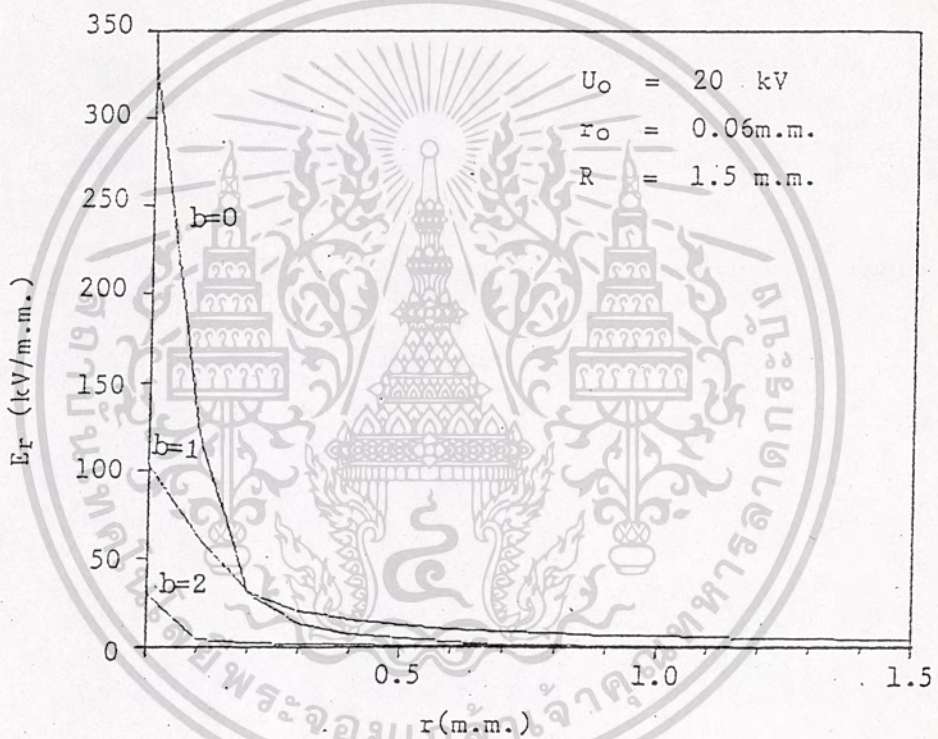
จากรูปที่ 3.8 เป็นการจำลองแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_r/E_0$  ในเทอมของ  $b$  เป็นแบบเส้นตรง  $b > 2$  โดยปกติอัตราการเพิ่มของ  $E_0$  กับค่าของ  $b$  ไม่สามารถสังเกตได้จากการทดลอง การลดลงของ  $E_r$  ด้วยการเพิ่มค่า  $b$  ทำให้อัตราการเพิ่มของ  $E_0$  ลดน้อยลงสำหรับค่า  $b$  สูง ๆ

### 3.3) สรุป

ในการคำนวณการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในฉนวนแข็งซึ่งนำการเกิดอิเล็กตริกคอสทริคชั่น โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการนำกระแสไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า ซึ่งได้มาจากการทดลอง วิธีนี้สามารถให้ผลใกล้เคียงในช่วงการที่ 2 และ 3 ของรูปที่ 3.1 สำหรับในช่วงแรกนั้น ความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง ผลที่ออกมาคลาด

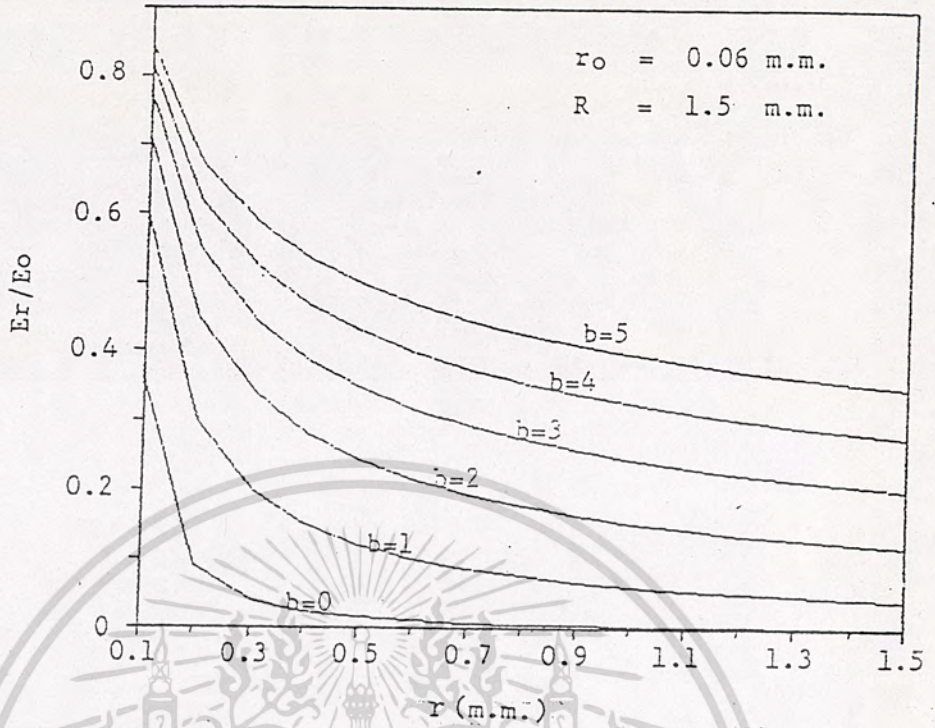
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ให้ความสำคัญสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นการคำนวณสนามไฟฟ้าโดยวิธีนี้จึงจำลองรูปแบบของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ (ช่วงที่ 3) เท่านั้น.

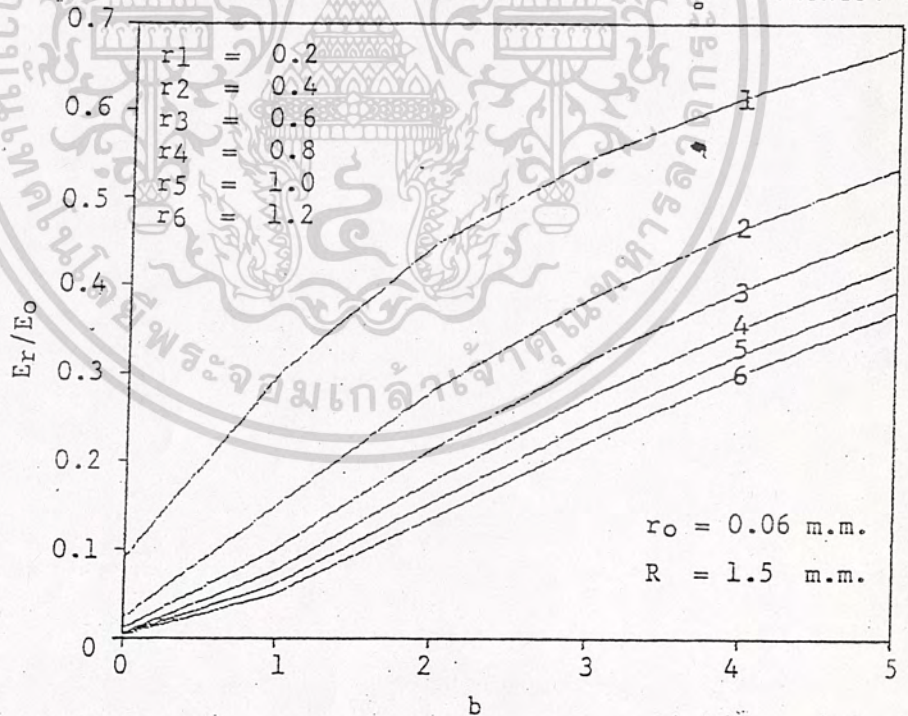


รูปที่ 3.6 แสดงการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_r$  ในเทอมของ  $r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการจำลองความล้นน้ระหว่าง  $Er/E_0$  ในเทอมของ  $r$



รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองความล้นน้ระหว่าง  $Er/E_0$  ในเทอมของ  $b$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4.1) บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึง ขั้นตอนการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ทั้งที่มีอยู่แล้วในการทดลองในปีที่ผ่านมา และ อุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเอง รวมทั้งวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น แผ่นกระดาษที่ใช้ในการพันหม้อแปลง , แผ่นฟิล์มพลาสติก ที่ใช้ในการทำ low voltage capacitor

อนึ่งการทดลองเรื่อง การเบรคดาวนในของแข็งนี้ เป็นการทดลองที่ยังไม่เคยมีการจัดเป็น project สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 4 มาก่อน ดังนั้นอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงจัดทำขึ้นโดยการศึกษารายละเอียด จากหลาย ๆ แหล่งมาประกอบกัน เช่น จากวารสาร IEEE เป็นต้น เรื่องการเบรคดาวนในของแข็งนี้ ยังไม่มีข้อมูลที่เป็นการกำหนดเป็นสมการที่แน่นอน เหมือนกับการเบรคดาวนในก๊าซ และ ของเหลว ดังนั้น มาตรฐาน ของอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงยังไม่มีกำหนดออกมา อย่างแน่นอน หากแต่เป็นการอาศัยรูปแบบ ตามแต่ความเหมาะสม รวมทั้ง วัสดุที่จะใช้ทดสอบที่จัดว่าเป็นของแข็ง ที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้านั้นยังหาได้ ไม่หลากหลาย เท่าที่ควรเนื่องจากการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ภายในประเทศยังไม่สามารถผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ เทคโนโลยีขั้นสูง ๆ ได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงใช้ วัสดุทดสอบ ที่สามารถหาได้ในประเทศ เท่านั้น

#### 4.2) Chamber ( กล่องบรรจุ อิเล็กโตรด )

กล่องใส่อิเล็กโตรดนี้ประกอบขึ้นจาก แผ่นอะคริลิก ที่มีขนาดตามรูปที่ 4.2 โดยใช้แผ่น อะคริลิก ที่มีความหนา 12 mm ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป นำมาตัด เป็นขนาดตามต้องการ แล้วเชื่อมด้วย น้ำยาเชื่อมพลาสติก ด้านหน้ามีช่องเปิดเป็นวงกลม สำหรับอำนวยความสะดวกในการเปลี่ยน วัสดุทดสอบ โดยไม่ต้องยก อิเล็กโตรดออกทุกครั้ง ที่ทำการทดลอง

ช่องด้านหน้า เซาะร่องใส่ โอริง เพื่อกันอากาศออก ใช้สำหรับการเปลี่ยนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chamber ให้สามารถบรรจุ ก๊าซชนิดต่าง ๆ เพื่อการทดสอบในอนาคต เช่น การทดสอบ การเบรคดาว์น ที่ความดันต่าง ๆ

อนึ่งในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบ การเบรคดาว์นใน dry air จึงไม่มีการ seal chamber

#### 4.3) การสร้าง electrode

อิเล็กโตรดที่ใช้ทำจาก ทองเหลือง นำมาลึงให้มีลักษณะ ตามรูปที่ 4.3 การออกแบบอิเล็กโตรดชนิดนี้ ไม่ได้สร้างขึ้นจาก มาตรฐานใดที่แน่นอน ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้การออกแบบ อิเล็กโตรด ของ Rokowsky และสมการต่าง ๆ มาใช้ในการคำนวณ แต่อิเล็กโตรดชนิดนี้เป็นการปรับปรุง ลักษณะของอิเล็กโตรด เพื่อป้องกัน หรือ ลดผลของการเกิด flash over ขณะทำการทดสอบ โดยในการปรับปรุงนี้ เราได้สมการการคำนวณ รัศมีของความโค้งของขอบบน และ ของล่าง ของอิเล็กโตรด จากหนังสือการออกแบบ อิเล็กโตรด เพื่อใช้ในการทดสอบ เบรคดาว์น ซึ่งเป็น การทดลองในประเทศ ญี่ปุ่น โดยมีการคำนวณ รัศมีความโค้ง (r) ดังนี้

$$r = 0.5 \text{ dm} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $dm = \text{max. gap}$  ( ความหนาของวัสดุทดสอบ ที่มากที่สุด ) ในการทดลองนี้ วัสดุขนาดหนามากที่สุด ที่ใช้ในการทดลอง มีความหนาเพียง 1 mm ดังนั้น r ที่ได้จากการคำนวณ คือ 0.5 mm แต่ในการกลึง อิเล็กโตรด เราได้เผื่อรัศมี ถึงประมาณ 2 mm เพื่อความแน่ใจว่า จะไม่เกิดการ flash over ขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4) วงจร voltage divider

เพื่อใช้ในการวัดค่า โวลเตจที่ทนได้มากที่สุด ของฉนวน ชนิดนั้น ๆ ขณะเกิดการเบรคดาวน์ voltage divider ใช้ความต้านทานขนาด  $1\text{ M}\Omega$  100 ตัวมาต่ออนุกรมกัน บนแผ่น เบกาไลต์ โดยเราจะวัด โวลเตจ ที่ตกคร่อม ความต้านทาน 1 ตัว คือ  $1\text{ M}\Omega$  จากการคำนวณ จากสมการ

$$v = Ir \quad (4.2)$$

$$V = IR + Ir \quad (4.3)$$

แทนค่าจากสมการ (1) ในสมการที่ (2) ได้

$$V = v (R/r + 1) \quad (4.4)$$

เมื่อกำหนด

$$V = \text{โวลเตจคร่อม อิเล็กโตรด}$$

$$v = \text{โวลเตจคร่อม ความต้านทาน } 1\text{ M}\Omega$$

$$R = \text{ความต้านทาน } 99\text{ M}\Omega$$

$$r = \text{ความต้านทาน } 1\text{ M}\Omega$$

แทนค่าทั้งหมดในสมการที่ (4.4)

$$V = v (99/1 + 1)$$

$$= 100 v$$

จะเห็นว่า โวลเตจ ที่ตกคร่อม อิเล็กโตรด หาได้จากการคูณ โวลเตจที่อ่านค่าได้จาก voltage divider ด้วย 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5) หม้อแปลง

หม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลง AC 1 KVA 1 PHASE 50 Hz

โวลเตจ            220 v / 10 KV

กระแส            4.5 A / 0.1 A

4.6) variac

ในการทดลอง ใช้ variac 2 ตัวต่ออนุกรมกัน เพื่อช่วยในการปรับ โวลเตจช่วง อินพุต เข้าหม้อแปลง ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยเราจะตั้ง range ของ variac ตัวที่ 2 ไว้ ที่ค่า ๆ หนึ่งก่อน แล้วจึงปรับ โวลเตจตัวแรกให้ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และ เมื่อ ปรับตัวแรกจนสุด สเกลก็จะมีค่ามากที่สุด คือ เท่ากับ range ของตัวที่ 2 ที่ตั้งไว้ การที่ต้องใช้ variac 2 ตัวต่อ อนุกรมกัน ก็เนื่องจาก ถ้าใช้ variac เพียง 1 ตัว อาจทำให้โวลเตจที่เข้าหม้อแปลง เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ โวลเตจ เอาท์พุท หม้อแปลง ออกมามากเกินไป ทำให้เราไม่สามารถ สังเกตจุดที่เป็น โวลเตจ เบรคดาวน์ ได้ละเอียดเท่าที่ควร

ในการต่อ variac นี้ต้องใช้ ฟิวส์ ขนาด 10 A ต่อเพื่อป้องกัน variac ด้วย เนื่องจาก variac ที่ใช้นี้ไม่มี ฟิวส์ ในตัว ซึ่งเมื่อเกิดการเบรคดาวน์ โวลเตจ จะตกลงต่ำมาก กระแสจะพุ่งเข้าสู่ variac อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ variac เสียหายได้

4.7) การต่อ Ground หม้อแปลง

ในการใช้หม้อแปลงขนาด 10 KV นี้เราต้องต่อสาย ground โดยตรงจากตัว หม้อแปลง ลงดิน โดยใช้สายทองแดงเกลียวขนาด 10 sq.mm เดินในท่อ PVC โดยยึด ลงดินกับ ground rod ขนาดความยาว 6 ฟุต ซึ่งการ ground นั้นสามารถป้องกันอันตราย ที่อาจเกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการทดลองได้

#### 4.8) ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

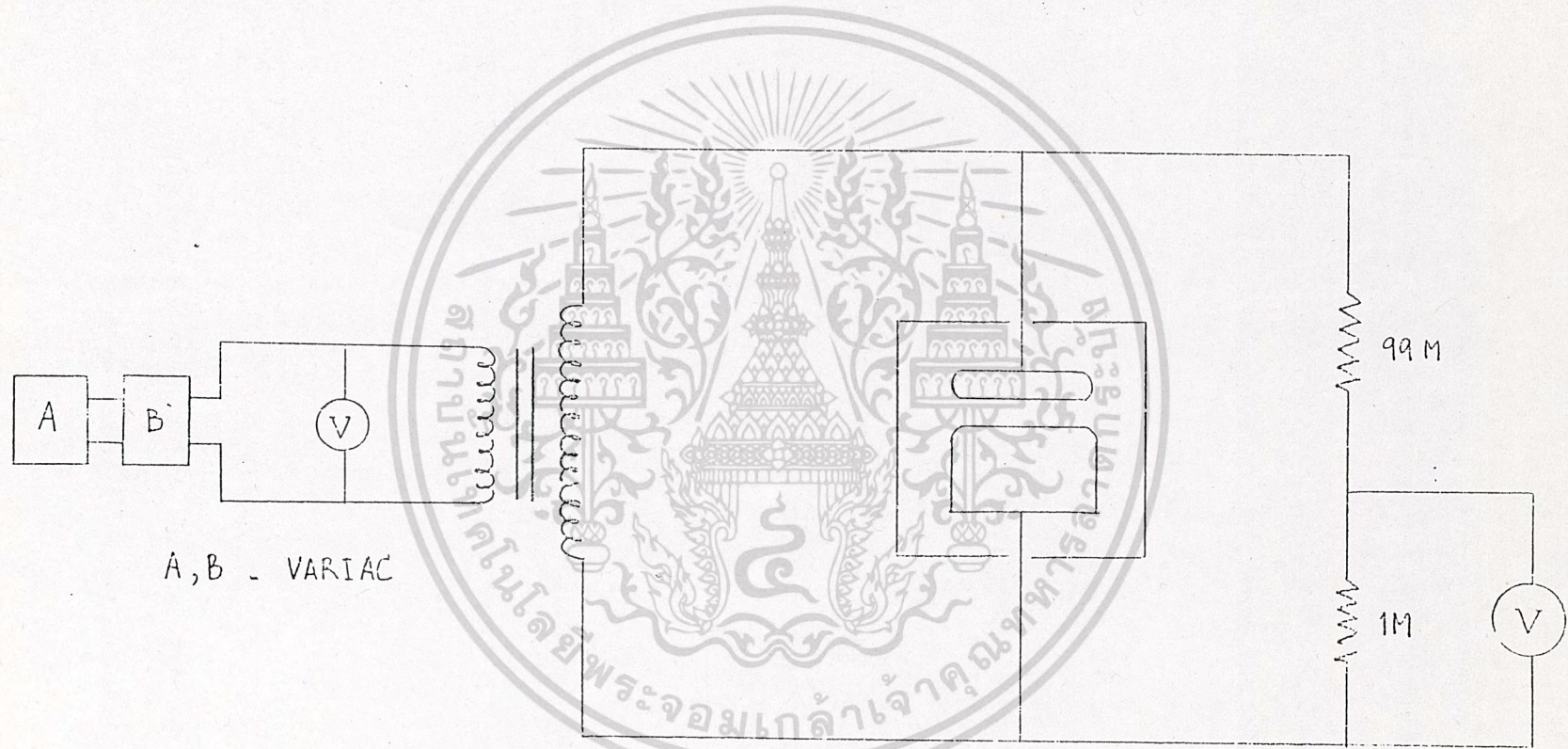
อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง เราต้องการฉนวน ซึ่งเป็นของแข็งซึ่งก็มีพวก PVC , PP , PE , ไม้ก้ำ , กระดาษ , แผ่นฟิล์มต่าง ๆ แต่การหาฉนวนไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ นี้ ที่ใช้อยู่ภายในประเทศมีหลายชนิด แต่บางชนิดไม่สามารถนำมาทดสอบได้ เนื่องจากข้อจำกัด ด้านรูปร่างของฉนวนที่หาได้ เพราะ พลาสติกบางชนิดที่ใส่หุ้มสายไฟ ไม่ได้ผลิตขึ้นมาเป็น แผ่นๆ แล้วจึงนำไปพันกับสายไฟ แต่จะผลิตโดยการหลอม เม็ดพลาสติก ลงในเตาหลอม แล้ว ค่อยๆ คุมสายไฟ ลงในพลาสติกที่หลอมละลายอีกที ดังนั้นเราจึงไม่สามารถนำพลาสติก เหล่านี้ มาทดสอบได้

ต่อมาจึงต้องเปลี่ยนไปใช้วัสดุที่ใช้ในการทำ capacitor ซึ่งในการผลิต capacitor ต้องใช้ แผ่นฟิล์ม จำพวก โพลีโพรไพลีน ในการผลิต ( ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ABB ประเทศไทย จำกัด ) และ กระดาษต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลง เช่น กระดาษ ไดมอนด์ ( ได้รับความอนุเคราะห์ จาก บริษัท THAI MAXWELL จำกัด ) กระดาษ และ แผ่นฟิล์มที่ได้ นำมาตัด เป็นแผ่นวงกลมขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 9 cm เพื่อให้ได้ขนาดเหมาะสมกับ อิเล็กโตรด โดยให้เผื่อขอบให้เลย อิเล็กโตรด ออกไปอีกประมาณ 1.5 cm เพื่อป้องกันการเกิด flash over

#### 4.9) สรุป

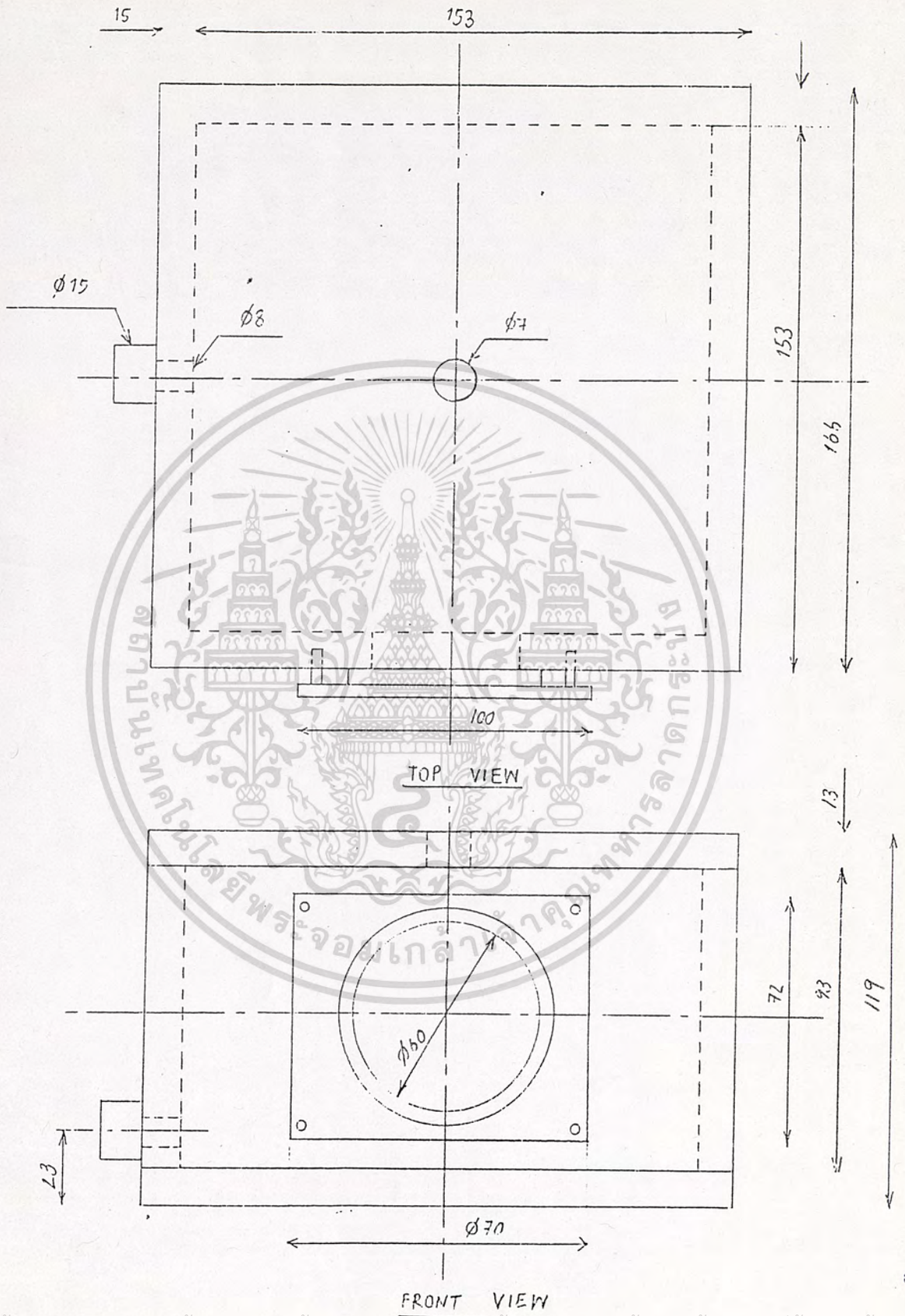
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นอุปกรณ์ ที่สามารถหามาได้ภายในประเทศ และ นำมา ประกอบขึ้นตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วแต่เป็นที่น่าเสียดายว่าฉนวนของแข็ง บางประเภท ไม่สามารถหาได้ ในลักษณะที่ต้องการจึงไม่สามารถนำมาทดสอบด้วยเครื่องมือ ที่ได้ออกแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



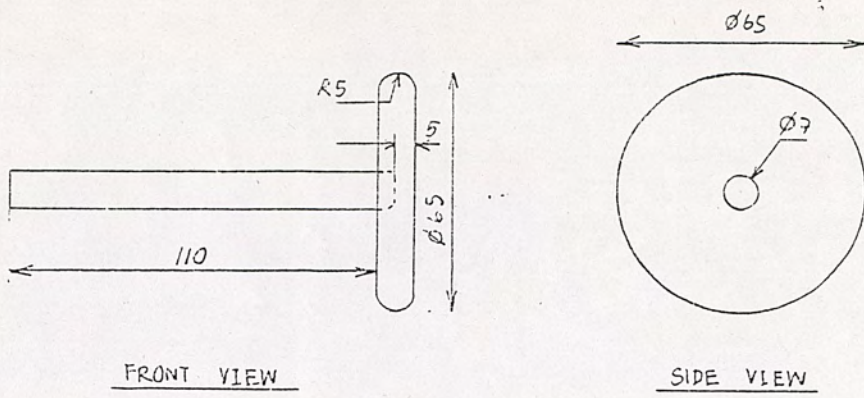
A, B - VARIAC

รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

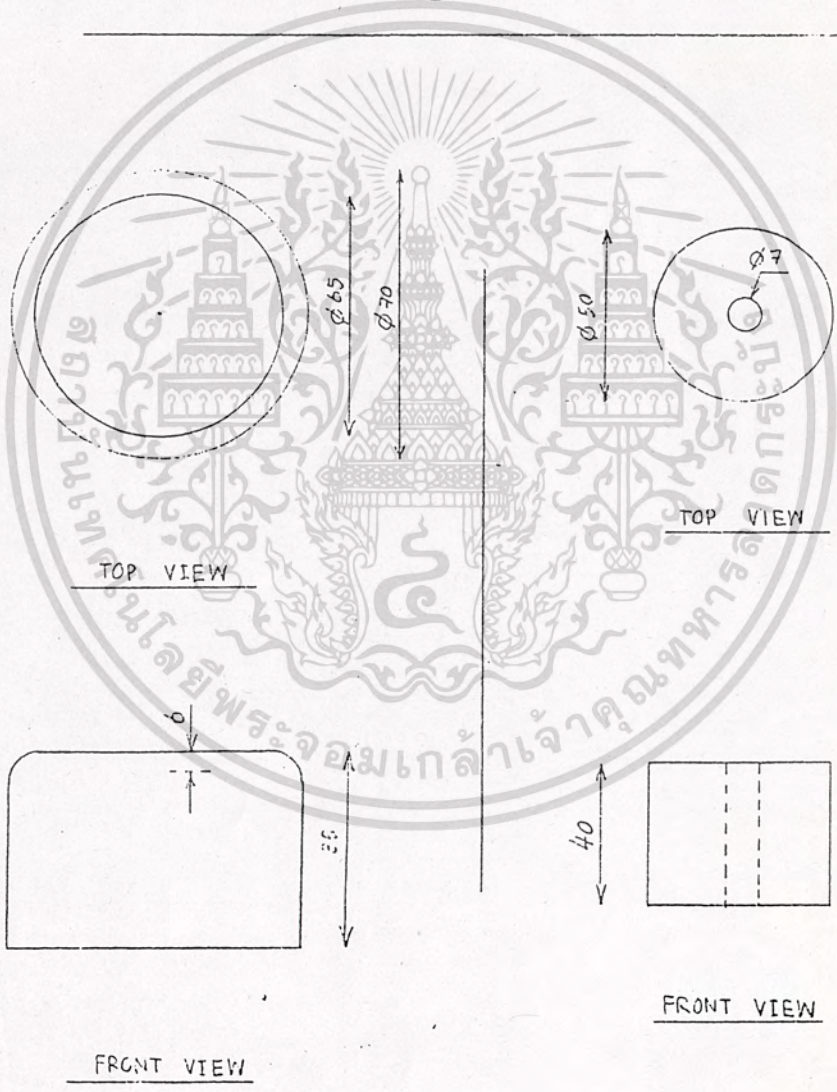


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดต่อ เปรียบเทียบ และดัดแปลงอย่างถึงกับเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงขนาด chamber



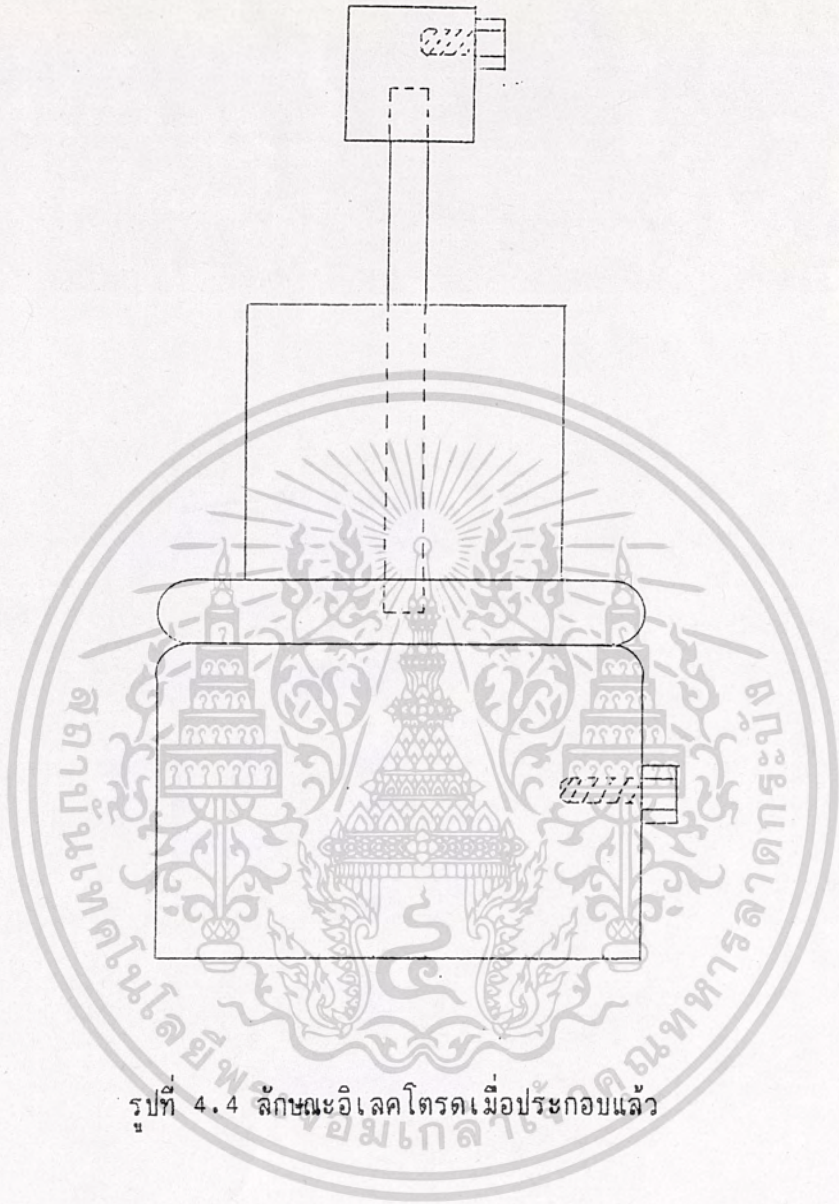
1



2

3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหาารูที่ 4.3 แสดง dimension of electrode ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์เมื่อประกอบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

ขั้นตอนและผลการทดสอบ5.1) บทนำ

ภายหลังจากการศึกษาศาสตร์การเบรคดาวน ในของแข็ง และ กลไกการเบรคดาวน ในของแข็งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการทดสอบต่าง ๆ ขั้นตอนต่อไปนี้จะอธิบายถึง ขั้นตอนการทดสอบนวน ของแข็งที่มีอยู่ และ แสดงตารางบันทึกผลการทดสอบที่ได้ตามลำดับดังนี้

5.2) ขั้นตอนการทดสอบ

5.2.1) นำกระดาษ หรือ แผ่นฟิล์มต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ใช้ในการทดสอบ มาทดสอบโดยวางระหว่าง ระบายอิเล็กโตรด แล้วปล่อย โวลเตจตกคร่อม วัสดุทดสอบโดยอ่านค่าจาก มิเตอร์ ในวงจร voltage divider

5.2.2) เมื่อเกิดการเบรคดาวน โวลเตจตกคร่อม จะตกลง แสดงว่าเกิดการเบรคดาวนแล้ว ให้ทำการบันทึกผลการทดสอบ แล้วหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบ 3 ครั้ง

5.2.3) ในการทดสอบทุกครั้ง จะเกิดรอย การเบรคดาวนบนผิวของ อิเล็กโตรด ดังนั้น ภายหลังจากการทดสอบ แต่ละครั้งต้องถอด อิเล็กโตรดมาขัดให้เรียบ ด้วยกระดาษทราย แล้ว จึงจะสามารถ ทำการทดสอบครั้งต่อไปได้

## 5.3) ผลการทดสอบ

5.3.1) ทดสอบด้วยกระดาษ plate diamond หน้าแผ่นละ 0.13 mm มีลักษณะเป็นกระดาษ สีน้ำเงินเข้ม โดยใช้ทดสอบเรียงซ้อนกัน 1,2,3 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.1

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น	3 แผ่น
Vb 1	1.46	3.77	5.89
Vb 2	1.63	3.63	5.15
Vb 3	1.82	3.29	5.25
Vb ave.	1.637	3.563	5.263

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2) ทดสอบด้วยกระดาษ plate diamond หนาแผ่นละ 0.2 mm มีลักษณะเป็นกระดาษ สีฟ้า โดยใช้ทดสอบเรียงซ้อนกัน 1,2 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.2

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น
Vb 1	2.19	4.87
Vb 2	2.13	4.13
Vb 3	2.42	4.65
Vb ave.	2.246	4.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3) ทดสอบด้วยกระดาษ plate board หนาแผ่นละ 0.1 mm มีลักษณะเป็น  
กระดาษสีน้ำตาล โดยใช้ทดสอบเรียงซ้อนกัน 1,2 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.3

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น
Vb 1	1.29	2.74
Vb 2	1.39	2.18
Vb 3	1.26	2.45
Vb ave.	1.313	2.456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4) ทดสอบด้วยกระดาษ plate board หนาแผ่นละ 0.25 mm มีลักษณะเป็นกระดาษสีน้ำตาล โดยใช้ทดสอบเรียงซ้อนกัน 1,2 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.4

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น
Vb 1	2.48	4.93
Vb 2	2.62	5.18
Vb 3	2.64	4.79
Vb ave.	2.58	4.967

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.5) ทดสอบด้วยกระดาษ plate board หนาแผ่นละ 0.5 mm มีลักษณะเป็นกระดาษสีน้ำตาล โดยใช้ทดสอบเรียงซ้อนกัน 1,2 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.5

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น
Vb 1	4.02	9.55
Vb 2	4.85	9.89
Vb 3	5.03	9.68
Vb ave.	4.533	9.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.6) ทดสอบด้วยกระดาษ plate board หนาแผ่นละ 1.0 mm มีลักษณะเป็นกระดาษสีน้ำตาล โดยใช้ทดสอบเพียง 1 ชั้นเนื่องจากมีกระดาษไม่เพียงพอ

ตารางที่ 5.6 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.6

voltage (KV)	1 แผ่น
Vb 1	11.86
Vb 2	12.05
Vb 3	13.22
Vb ave.	12.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7) ทดสอบด้วยแผ่นฟิล์ม polypropylene หนาแผ่นละ 0.02 mm มีลักษณะคล้ายถุงพลาสติกใส ใช้ทดสอบโดยใช้เรียงซ้อนกัน 1,2 ชั้นตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.7

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น
Vb 1	1.27	1.998
Vb 2	0.786	1.997
Vb 3	0.798	1.994
Vb ave.	0.951	1.996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.8) ทดสอบด้วยแผ่นฟิล์ม polypropylene metalization หนาแผ่นละ 0.014 mm มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกบาง ๆ 2 แผ่นซ้อนกันอยู่ โดยมีผง ซิงค์ออกไซด์ เคลือบอยู่

ตารางที่ 5.8 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.8

voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น	3 แผ่น
Vb 1	0.312	0.685	1.975
Vb 2	0.242	0.628	1.988
Vb 3	0.265	0.734	1.982
Vb ave.	0.273	0.682	1.982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.9) ทดสอบด้วยแผ่นฟิล์ม polypropylene metalization หน้าแผ่นละ 0.012 mm มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกบาง ๆ 2 แผ่นซ้อนกันอยู่ โดยมีวง ซิงค์ออกไซด์ เคลือบอยู่

ตารางที่ 5.9 ค่าโวลเตจในผลการทดสอบที่ 5.3.9

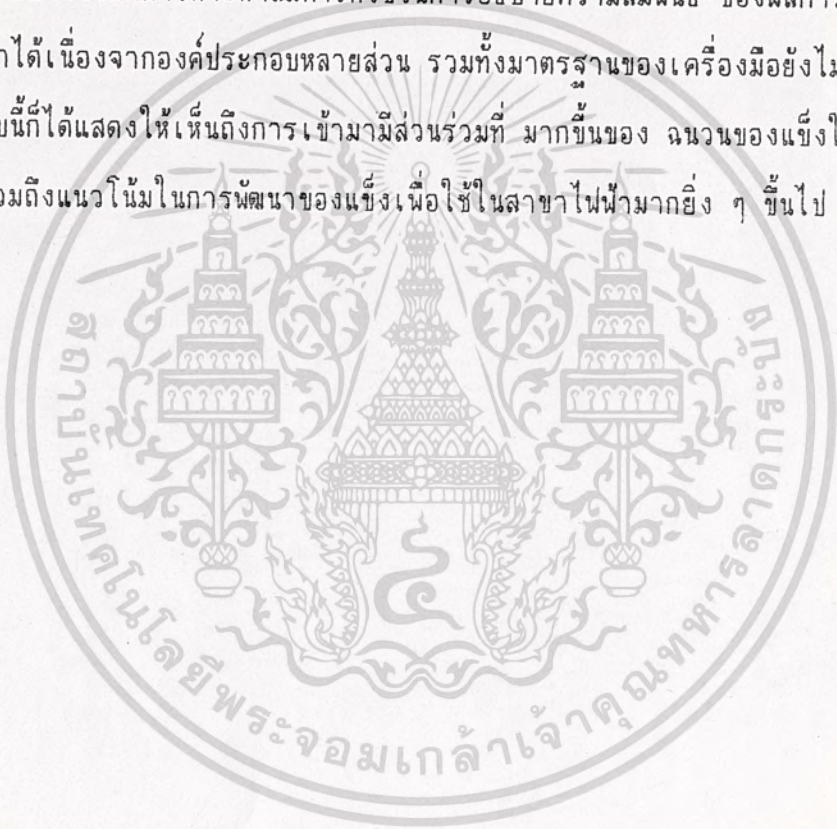
voltage (KV)	1 แผ่น	2 แผ่น	3 แผ่น
Vb 1	0.321	1.993	1.969
Vb 2	0.245	1.979	1.96
Vb 3	0.295	1.984	1.97
Vb ave.	0.287	1.985	1.966

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4) สรุป

จากผลการทดสอบที่ได้มาจากการทดสอบต่าง ๆ แสดงถึงความสัมพันธ์กันระหว่างความหนาของวัสดุทดสอบ และ โวลเตจน์เบรคดาวน์ได้ในลักษณะที่เหมือนกันคือ เมื่อวัสดุหนาขึ้นแรงดันที่ต้องใช้ในการเบรคดาวน์ ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไม่ได้มีลักษณะ เป็นเส้นตรงแต่อย่างใด

อย่างไรก็ดีการที่จะหาสมการที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ ของผลการทดสอบนี้ยังไม่สามารถทำได้เนื่องจากองค์ประกอบหลายส่วน รวมทั้งมาตรฐานของเครื่องมือยังไม่ดีเท่าที่ควรแต่การทดสอบนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเข้ามามีส่วนร่วมที่มากขึ้นของ ฉนวนของแข็งใน เทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงแนวโน้มในการพัฒนาของแข็งเพื่อใช้ในสาขาไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ๆ ขึ้นไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและพิจารณาผลการทดสอบ

6.1) สรุปรูปแบบของการทดสอบ

การทดสอบเกี่ยวกับปรากฏการณ์เบรคดาวน์ในของแข็งนี้ ได้ทดสอบในชุดทดสอบที่คณะผู้จัดทำขึ้นซึ่งได้จัดทำตามแบบมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ชุดทดสอบนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ

6.1.1) ส่วนที่เป็น test cell ได้จัดทำตามแบบมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งบางส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ผู้จัดทำได้ดัดแปลงออกแบบใหม่ เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอมากขึ้น

6.1.2) ส่วนอินพุทของหม้อแปลง ใช้ไฟกระแสสลับ 220 โวลท์ ต่อเข้า variac 2 ตัวมาต่อร่วมกัน เพื่อปรับโวลเตจให้เพิ่มขึ้นทีละขั้นๆตามต้องการ และได้ต่อฟิวส์ขนาด 10 แอมป์เอาไว้ เพื่อป้องกัน variac ด้วย

6.1.3) ส่วนหม้อแปลงแรงสูง เป็นหม้อแปลงขนาด 1 kVA นิเกิ้ลอินพุท 220 โวลท์นิเกิ้ลเอาต์พุท 10 กิโลโวลท์

6.1.4) ส่วนแสดงผลซึ่งใช้วงจรโวลเตจดิไวเดอร์วัดค่าแรงดันเอาต์พุทออกมาในอัตราส่วน 1:100

6.1.5) ส่วนระบบกราวด์ของหม้อแปลงและขั้วอิเล็กทรอนิกส์ ได้ทำการต่อลงดินโดยเดินสายทองแดงเปลือยขนาด 10 sq. mm. เดินในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ต่อลงกราวด์รอตทองแดงแบบหุ้มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 10 ฟุต

ซึ่งชุดทดสอบนี้เป็นชุดทดสอบที่ทำขึ้นเบื้องต้นเท่านั้น ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างเนื่องจากความไม่แน่นอนของอุปกรณ์ต่างๆ และขณะทดสอบนั้นไม่คำนึงถึงปัจจัยเล็กๆต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, แรงดัน, ความชื้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2) พิจารณาผลการทดสอบ

จากการทดสอบปรากฏการณ์เบรคดาวนี้ในของแข็งนี้ พบว่ามีหลายจุดที่ควรพิจารณาคือ

6.2.1) เมื่อใช้ฉนวนขนาดหนานๆ (ฉนวนกระดาษหนาประมาณ 0.1 mm.) เมื่อเกิดการเบรคดาวแล้วนิวส์ที่ต่อไว้เพื่อป้องกัน variac จะขาด เพราะจุดที่เบรคดาวนี้มีค่าโวลเตจสูงมาก ทำให้กระแสที่ผ่านเข้า variac สูงมาก ดังนั้นนิวส์จึงขาด

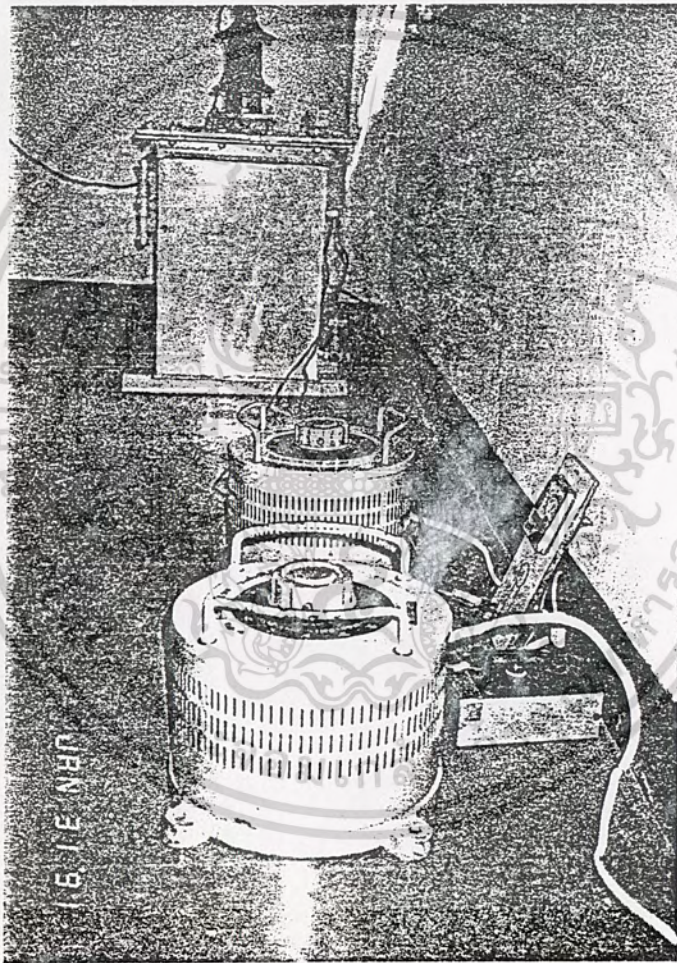
6.2.2) เมื่อเกิดการเบรคดาวขึ้นแล้วและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตกแล้วถ้ายังป้อนแรงดันต่อไปอีกจะเกิดการเบรคดาวขึ้นอีกครั้งณ อีกจุดหนึ่งของฉนวน จึงพอสรุปได้ว่าฉนวนของแข็งเมื่อเกิดการเบรคดาวขึ้นแล้วจะยังไม่แปรสภาพเป็นตัวนำอย่างสมบูรณ์ เพราะความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวของอิเล็กโตรดมีค่าไม่สม่ำเสมอทำให้สามารถเกิดการเบรคดาวนี้ได้หลายจุด

6.2.3) เมื่อทดสอบกับแผ่นฟิล์มบางๆ ก่อนที่จะเกิดการเบรคดาวนั้น แผ่นฟิล์มจะเกิดประกายไฟ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการ flash over ก่อนที่จะเกิดการเบรคดาว

สรุปได้ว่าจากการทดสอบการเบรคดาวของฉนวนของแข็งนี้ทำให้เราได้ทราบค่าความคงทนของฉนวนชนิดต่างๆ จึงทำให้เราทราบค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนแต่ละชนิดจะทนได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

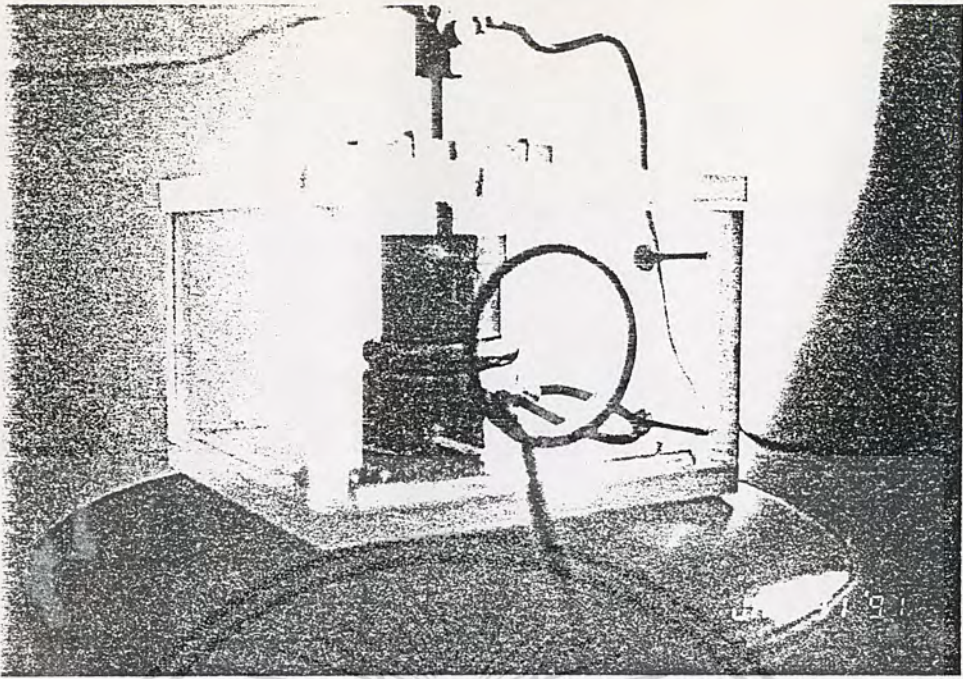
ภาคผนวก

ภาพประกอบเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

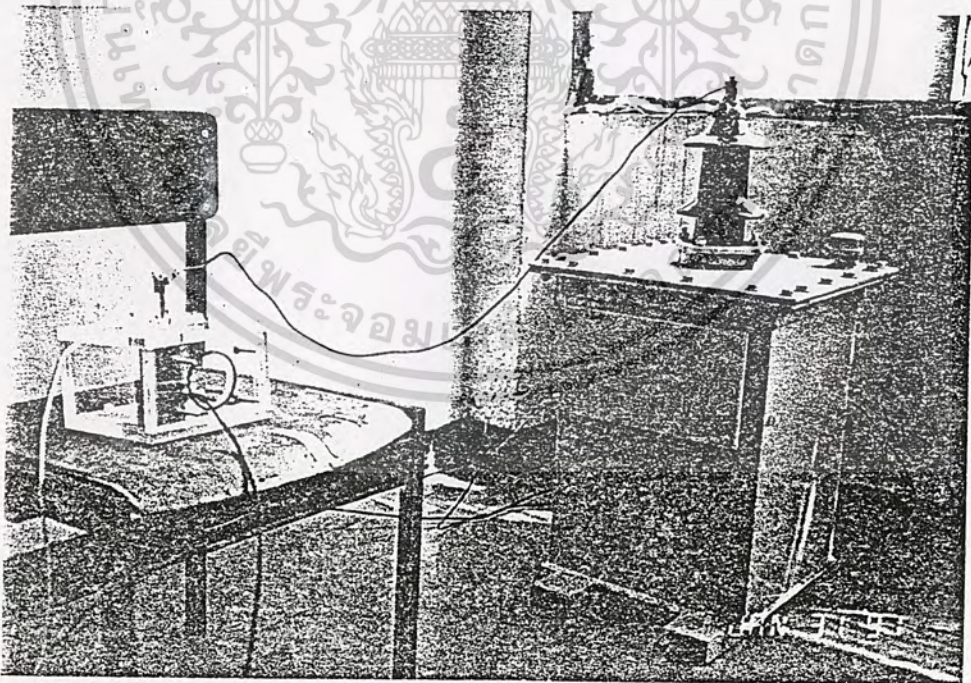


รูปที่ 1 แสดงการต่อระหว่างชุดอินพุทและหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

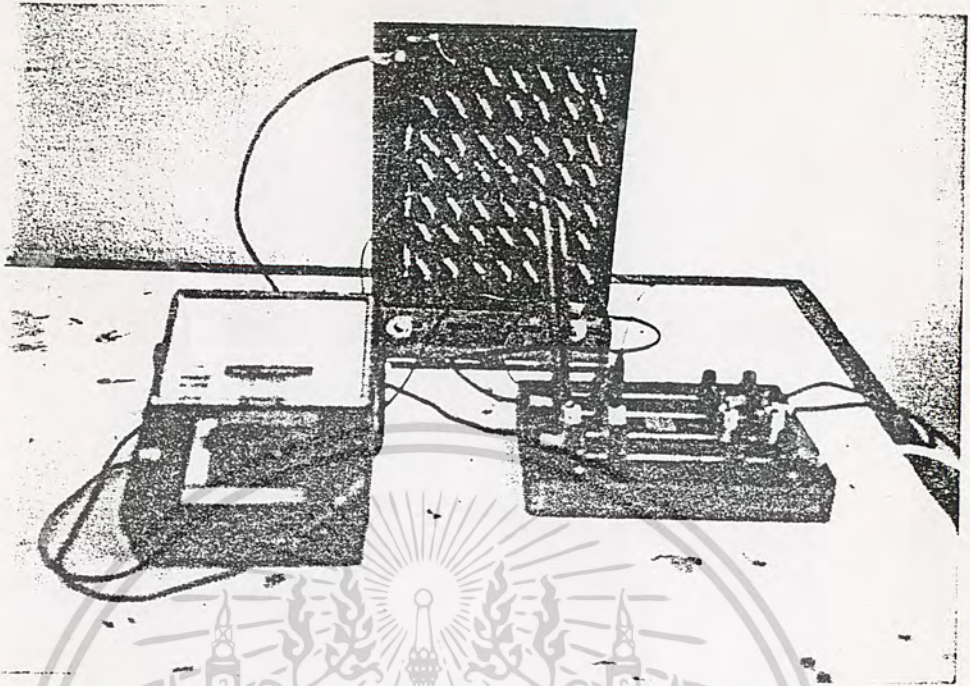


รูปที่ 2 แสดง TEST CELL ซึ่งประกอบด้วย แซมเบอร์ และขั้วอิเล็กโตรด

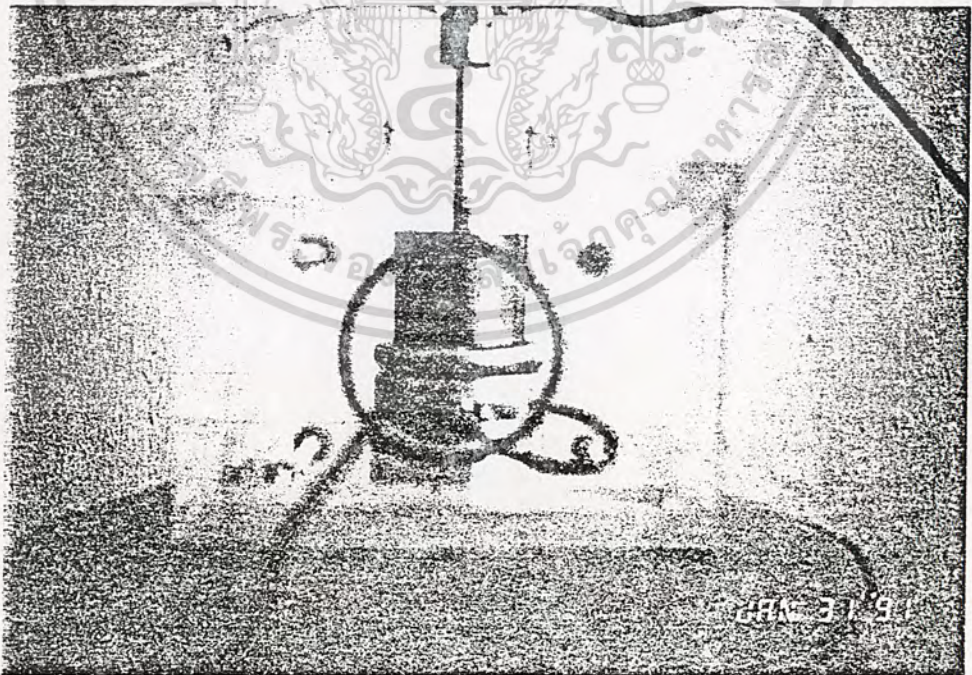


รูปที่ 3 แสดงการต่อระหว่าง TEST CELL กับหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงชุดแสดงผลซึ่งนำเอาที่พหุต่อกับชุดโวลเตจดีไวเตอร์



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการต่อขั้วอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REFERENCE BOOK

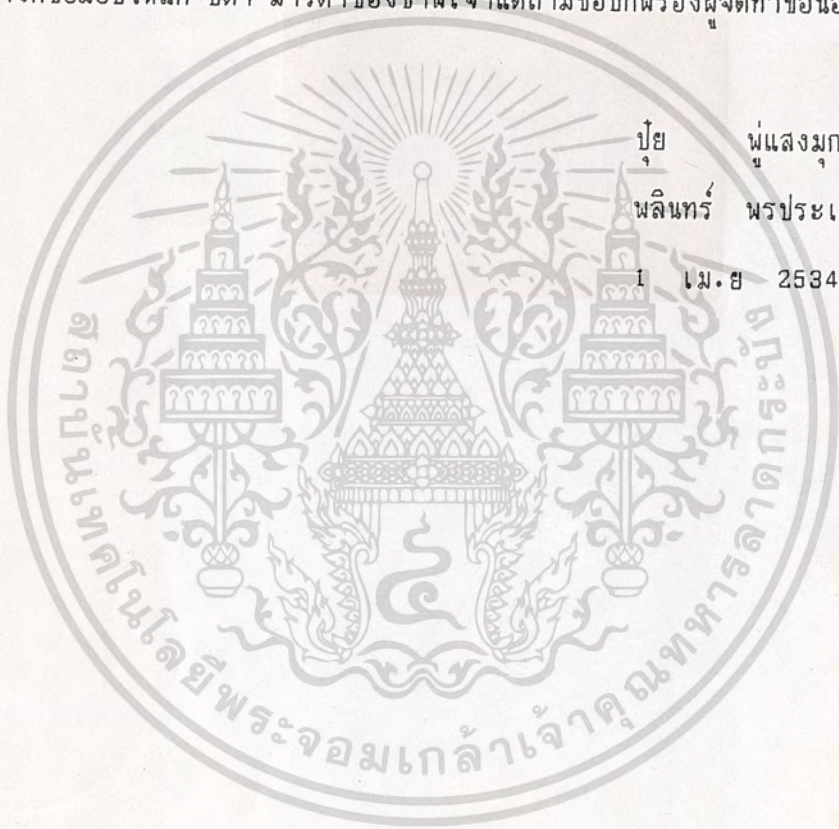
- 1) B. Tareev, "Physics of dielectric Materials" , Russian Edition, 1975
- 2) E. Kuffel & W.S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamental"
- 3) LL. Alston, "High Voltage Technology", Oxford University Press, 1968
- 4) Eugene J. McMahon, "A Tutorial on Treeing", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-13 No 4, August 1978
- 5) Richard Lovell, "The Effect of Specimen Size on the Electric Breakdown", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-11, No. 4 December 1976
- 6) ASTM Standard Designation : D149-87
- 7) G.K. Mithal, "Electrical Engineering Materials", Khanna Publishers New Delhi, 1980
- 8) ดร.สำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 9) จงรักษ์ บุญเลี้ยง, "วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง ,อาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง และ คณะ  
จารย์ทุก ๆ ท่านที่ช่วยให้คำแนะนำในการทดลอง และให้คำปรึกษา ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท ABB CAPACITOR จำกัด, บริษัท THAI MAXWELL จำกัดที่อนุเคราะห์  
ฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยให้กำลังใจเมื่อมีปัญหาต่าง ๆ และถ้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มี  
ส่วนต้อยบ้างก็ขอมอบให้แก่ บิดา มารดาของข้าพเจ้าแต่ถ้ามีข้อบกพร่องผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้



ป๋วย พู่แสงมุกข์  
พลินทร์ พรประเสริฐสุข  
1 เมษายน 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

057840