

ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัตโนมัติ

AUTOMATIC DIELECTRIC STRENGTH OF SOLID INSULATING  
MATERIALS TEST SET



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-153-1

ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัตโนมัติ

Automatic Dielectric Strength of Solid Insulating Materials Test Set



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...45659  
จัน, เดือน, ปี. 1. 2. ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานบัณฑิตวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์เป็นของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-153-1

# **Automatic Dielectric Strength of Solid Insulating Materials Test Set**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974-324-153-1**



**COPYRIGHT 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัด โนมัติ  
AUTOMATIC DIELECTRIC STRENGTH OF SOLID INSULATING  
MATERIALS TEST SET

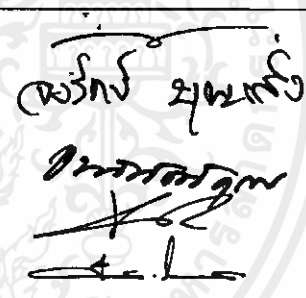
**ชื่อนักศึกษา** นายมินเรศน์ เตชะวงค์

**รหัสประจำตัว** 41061126

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์** รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
รศ.จงรักษ์	บุญเส็ง	
ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.ศิริวัฒน์	โทธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 25 ตุลาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานวันที่... ๒๓ ...เดือน... ๒๕๔๕... พ.ศ. ๒๕๔๕... ารค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัดโนมิตี
ชื่อนักศึกษา	นายมินเรศน์ เคะชะวงศ์
รหัสประจำตัวนักศึกษา	41061126
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอจัดสร้างชุดทดสอบความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัดโนมิตี ที่สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิขณะทดสอบได้ และควบคุมขบวนการทดสอบแบบอัดโนมิตี ตามมาตรฐาน IEC 243-1 1998 โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทดสอบแบบ การปรับค่าแบบขั้นบันได และแบบทันทีทันใด จะทำการเปลี่ยนรูปทรงอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ระนาบ ตามเงื่อนไขการทดสอบ รวมทั้งในขบวนการทดสอบจะทำการปรับอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบ ตั้งแต่อุณหภูมิแวดล้อม จนถึงค่าสูงสุด 80 องศาเซลเซียส และผลการทดสอบจะรายงานผลอัดโนมิตี โดยค่าข้อมูลที่ได้เป็นค่าแรงดันเบรกควาน์ฉนวนขณะทดสอบผ่านชุดวัดชนิดแบ่งแรงดัน ส่งข้อมูลสู่ส่วนเชื่อมโยงระบบ เพื่อประมวลผลทางคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Automatic Dielectric Strength of Solid Insulating Materials Test Set
<b>Student</b>	Mr. Minareat Teachawong
<b>Student ID.</b>	41061126
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

## ABSTRACT

The thesis presents a construction and design of a tester for insulating materials. The purpose of the tester is to measure dielectric strength of such materials. The temperature in the chamber of the tester can be varied and controlled. Tests are performed according to IEC standard NO 243-1 1998. A microcomputer is used as a control device for the tester. Thus, the step by step and short-time breakdown test can be performed by changing the shape of sphere-plane electrodes while the temperature in the chamber are varied from room temperature to the maximum temperature of 80°C. It is found that the tester gives satisfactory results for recording breakdown voltage values. The values are also transfer to data acquisition system via voltage divider.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อท่าน รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษา และแนะนำในการทำโครงการวิทยานิพนธ์ รวมทั้งสั่งสอนมาตลอดเวลา ทำให้ผู้จัดทำมีความมานะพยายาม ขอขอบคุณอาจารย์ที่มีส่วนร่วมทุกท่าน ผู้ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการให้แนวทาง ความคิดและข้อแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ขอขอบพระคุณต่อบุพการีเป็นอย่างสูงที่ได้เลี้ยงดูส่งเสริมให้เล่าเรียน และขอบคุณเพื่อน และน้อง ที่มีส่วนช่วยทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป	
2.1 บทนำ.....	5
2.2 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี.....	5
2.3 ชนิดของฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง.....	6
2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ในสารฉนวนแข็ง.....	7
2.5 แฟกเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์.....	15
2.6 สนามไฟฟ้า.....	17
2.7 ไดอิเล็กตริก.....	22
2.8 อุณหภูมิ.....	30
บทที่ 3 การออกแบบ	
3.1 โปรแกรมควบคุม และส่วนเชื่อมโยงข้อมูลในการประมวลผล.....	34
3.2 การออกแบบ ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ และตู้ทดสอบ.....	44
3.3 การออกแบบชุดขับเคลื่อน และชุดป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	46

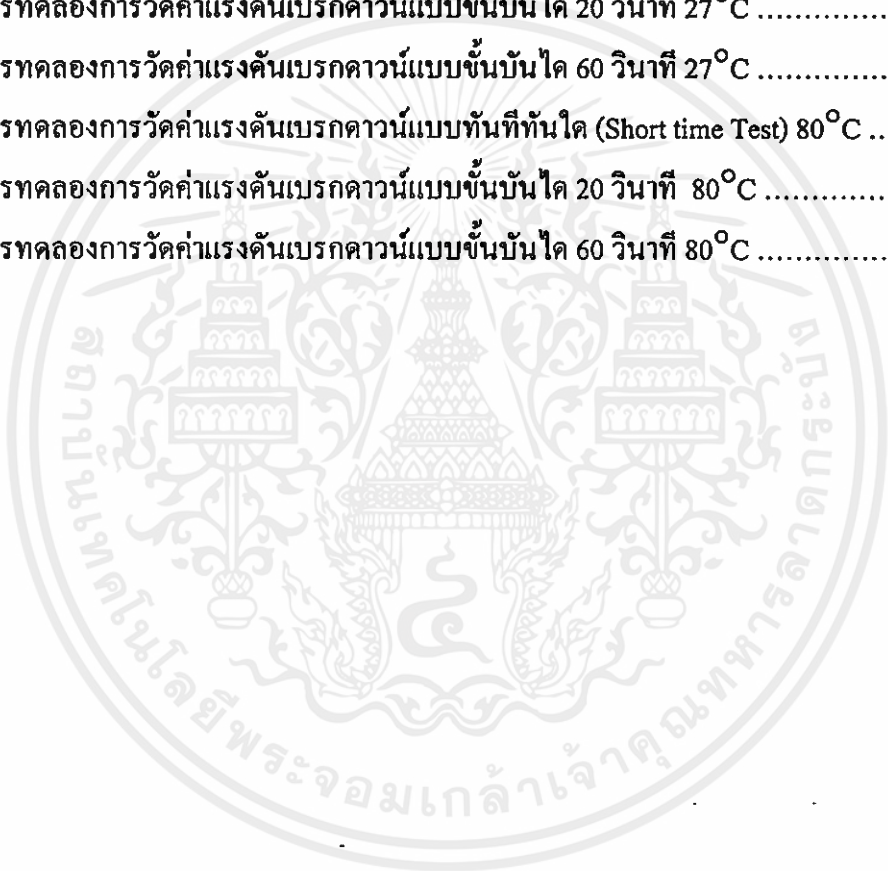
# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบเฟืองของชุดปรับแรงดัน.....	55
3.5 ขั้นตอนการหาแรงบิดของหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ.....	57
บทที่ 4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม.....	59
บทที่ 5 การทดลอง และวิเคราะห์ผล.....	63
5.1 คำนำ.....	63
5.2 วัตถุประสงค์.....	63
5.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	64
5.4 ข้อควรระวังในการทดลอง.....	64
5.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	64
5.6 ผลการทดลอง.....	66
5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	86
5.8 ผลการทดลองแรงดันเบรกคาน์ที่อุณหภูมิ 27 °C และ 80 °C.....	87
บทที่ 6 สรุปผล.....	90
6.1 สรุปผล.....	90
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
6.3 ประโยชน์ และแนวทางพัฒนางานวิจัย.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างโปรแกรมสำหรับรับค่าแรงดัน พร้อมแสดงผล.....	93
ภาคผนวก ข ภาพการออกแบบการ์ดอินเทอร์เฟซ และชุดอุปกรณ์การทดสอบ.....	108
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ และมาตรฐาน IEC 243-1 1998.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกลของ Muscovite และ Phlogopite.....	7
2.2 เทอร์โมคัปเปิ้ลมาตรฐาน.....	33
3.1 ตารางการออกแบบวงจรลดความร้อน.....	36
3.2 การปรับตั้งความต้านทาน $R_2$ .....	54
5.1 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบทันทีทันใด (Short time Test) 27°C.....	66
5.2 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบขั้นบันได 20 วินาที 27°C .....	68
5.3 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบขั้นบันได 60 วินาที 27°C .....	71
5.4 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบทันทีทันใด (Short time Test) 80°C .....	75
5.5 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบขั้นบันได 20 วินาที 80°C .....	77
5.6 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกคาวน์แบบขั้นบันได 60 วินาที 80°C .....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบสารฉนวนแข็ง.....	2
1.2 วงจรการทำงานของชุดทดสอบสารฉนวนแข็ง.....	2
2.1 ความคงทนสารฉนวนแข็งต่อแรงดัน ไฟฟ้าในเทอมของเวลา.....	8
2.2 ลักษณะการเบรคความถี่แบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโตรคปลายแหลมกับระนาบ.....	10
2.3 ฉนวนมีโพรง และวงจรสมมูล.....	13
2.4 คิซซาร์ตภายในเมื่อป้อนแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	14
2.5 แรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยค่าของกระแสสลับ 50/60 Hz ในอากาศ.....	15
2.6 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....	18
2.7 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	19
2.8 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	20
2.9 ความแตกต่างของคาปาซิแตนซ์ของอากาศเทียบกับสารไดอิเล็กตริกในอากาศ.....	22
2.10 วงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีค่าพลังงานสูญเสีย.....	22
2.11 วงจรเสมือนแบบขนาน.....	23
2.12 วงจรเสมือนแบบอนุกรม.....	24
2.13 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกเป็นสูญญากาศ.....	26
2.14 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกเป็นของแข็งอยู่.....	27
2.15 ไดอิเล็กตริกซึ่งมีประจุที่ผิว $\pm Q_A$ A.....	28
2.16 สนามไฟฟ้าโพลาไรเซชันใน ไดอิเล็กตริก.....	29
2.17 วงจรไฟฟ้าความร้อนพื้นฐาน.....	30
2.18 กฎของอุณหภูมิเทรก.....	32
3.1 บล็อกไดอะแกรมส่วนส่งข้อมูล.....	34
3.2 รูปสัญญาณขาออกของพอร์ท A ของไอซีเบอร์ 8255.....	34
3.3 วงจรการทำงานของ ไอซีเบอร์ 8255.....	35
3.4 วงจรการทำงานของ ไอซีเบอร์ 74LS139.....	36
3.5 วงจรการทำงานของ ไอซีเบอร์ 74LS245.....	36
3.6 วงจรการทำงานของ ไอซีเบอร์ 74LS688.....	37
3.7 วงจรควบคุมรีเลย์โดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมและการต่อหน้าสัมผัส รีเลย์แบบเปิดวงจร (NO).....	37

# สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 วงจรควบคุมรีเลย์โดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมและการต่อหน้าสัมผัสรีเลย์แบบเปิดวงจร (NC).....	38
3.9 บล็อกไดอะแกรมส่วนรับข้อมูล.....	39
3.10 การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล.....	40
3.11 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง.....	40
3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบสารฉนวนแห้งแบบอัตโนมัติ.....	41
3.13 โพลซาร์การ์การทำงานของชุดทดสอบสารฉนวนแห้งแบบอัตโนมัติ.....	42
3.14 แผงวงจรการ์ดอินเตอร์เฟส.....	43
3.15 ขั้วไฟฟ้าทดสอบแบบทรงกลม-ระนาบ Sphere-Disk.....	44
3.16 ชุดทดสอบสารฉนวนแห้ง.....	45
3.17 เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิภายในชุดทดสอบสารฉนวนแห้งทั้ง 4 ด้าน.....	45
3.18 วงจรการทำงานของชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารฉนวนแห้ง.....	46
3.19 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	47
3.20 วงจรป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	48
3.21 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ไม่มี C ฟิลเตอร์.....	51
3.22 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรแบ่งแรงดันที่มี C ฟิลเตอร์กรองแรงกันให้เรียบ.....	51
3.23 สัญญาณแรงดันอ้างอิง จากจุด $V_{ref}$ ในวงจรป้องกันแหล่งจ่าย.....	52
3.24 แรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันอ้างอิงที่ขา 3.....	52
3.25 แรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันที่ขา 2 มากกว่าแรงดันอ้างอิงที่ขา 3.....	53
3.26 การทำงานของออปแอมป์คอมพาราเตอร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดัน $V_{in}$ กับ $V_{ref}$ .....	53
3.27 สัญญาณที่ค่าความต้านทาน $R_2$ เท่ากับ 2376 โอห์ม.....	54
3.28 สัญญาณที่ค่าความต้านทาน $R_2$ เท่ากับ 4250 โอห์ม.....	54
3.29 ลักษณะของพินเพื่อใช้งาน.....	56
3.30. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงติดตั้งบนชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	58
4.1 ภาพหน้าจอตอนเริ่มเข้าโปรแกรม.....	59
4.2 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ Start.....	60
4.3 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ Stop.....	60
4.4 ผลที่ได้จากการทดลอง (Short Time).....	61

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ (Step by Step).....	62
5.1 วงจรรวมที่ใช้ในการทดสอบ.....	63
5.2 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใดที่อุณหภูมิ 27 °C.....	67
5.3 กราฟลักษณะ และค่าแรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใด.....	67
5.4 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C.....	69
5.5 กราฟลักษณะ และค่าแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 20 วินาที.....	67
5.6 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C.....	72
5.7 กราฟลักษณะ และค่าแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 60 วินาที.....	73
5.8 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใด, ขึ้นบันได 20 วินาที, ขึ้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C.....	74
5.9 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใดที่อุณหภูมิ 80 °C.....	76
5.10 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	78
5.11 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	80
5.12 กราฟแรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใด, ขึ้นบันได 20 วินาที, ขึ้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	81
5.13 แรงดันเบรกดาว์นแบบทันทีทันใดที่อุณหภูมิ 27 °C และ 80 °C.....	82
5.14 แรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C และ 80 °C.....	83
5.15 แรงดันเบรกดาว์นแบบขึ้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C และ 80 °C.....	84
5.16 ความสัมพันธ์อุณหภูมิเทียบกับเวลา.....	85
5.17 ระดับความเที่ยงตรงของอุณหภูมิ.....	85
5.18 ลักษณะการจ่ายแรงดันแบบทันทีทันใด.....	86
5.19 อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมระนาบคั่นควยคนวน.....	89
ข.1 วงจรของการ์ดอินเทอร์เฟซ (Interface Card Circuit).....	108
ข.2 ชุดการ์ดอินเทอร์เฟซ.....	109
ข.3 ชุดควบคุมรีเลย์.....	109
ข.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมแหล่งจ่ายแรงดัน.....	110
ข.5 ชุดป้องกันแหล่งจ่าย.....	110
ข.6 ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	111

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข.7 ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	111
ข.8 เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบสารจนวนแข็ง.....	112
ข.9 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Analyzer Recorder YOKOGAWA AR 1100 A.....	112
ข.10 เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า Volt meter Fluke 89 VI True Digital Multimeter.....	112
ข.11 Variable voltage transformer CTSB-5M 1 kVA.....	113
ข.12 Temperature & Humanity T-1 M MINOLTA.....	113



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

#### 1.1.1 ปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย

ในระบบไฟฟ้ากำลัง การผลิตและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเฉพาะไฟฟ้าแรงสูงรวมถึงระบบอื่นที่เกี่ยวข้อง ฉนวนไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่มีความจำเป็นในการป้องกันความปลอดภัยต่อบุคลากรหรือผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับไฟฟ้า และระบบงานอื่นๆ เพราะหากฉนวนไม่ดีพออาจทำให้อันตรายขึ้นแก่ชีวิต และทรัพย์สิน มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนแข็งเปลี่ยนแปลงเช่น อุณหภูมิ ชนิดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า ชนิดฉนวน เป็นต้น การนำฉนวนเลือกใช้งานนั้น จำเป็นต้องได้รับการทดสอบตามมาตรฐานกำหนดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

การทดสอบฉนวนแข็งซึ่งจะใช้แรงดันไฟฟ้าสูงและอุณหภูมิสูงในการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนจากเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งไม่มีการแสดงเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้า และการเพิ่มแรงดันทดสอบเป็นแบบ Manual ซึ่งทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากต้องเตรียมการทดสอบค่อนข้างมาก เช่นการปรับอุณหภูมิ การเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า และการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์

#### 1.1.2 ปัญหาที่เป็นที่น่าสนใจ

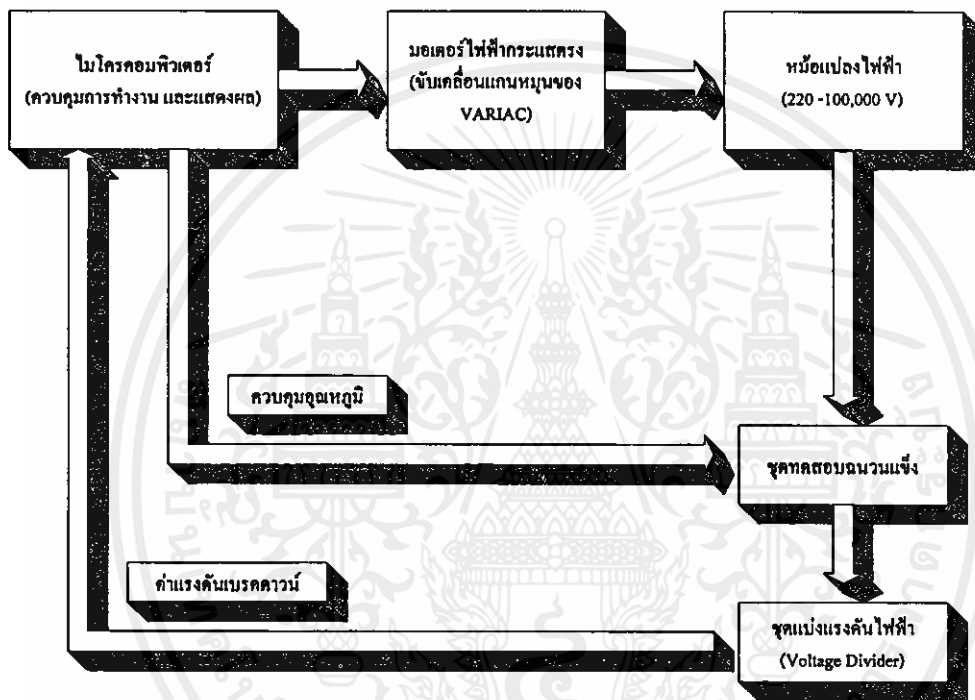
จากปัญหาค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่อ่านได้จะเป็นเพียงตัวเลข ไม่แสดงถึงลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเบรกดาวน์ฉนวนที่ได้ จึงต้องมีการแสดงรูปกราฟ เพื่อที่จะได้ศึกษา และวิจัยรูปคลื่นแรงดันเบรกดาวน์ในสารฉนวนแข็งชนิดเดียวกัน การควบคุมจากหลายตำแหน่ง ซึ่งไม่สะดวกต่อการทดสอบเนื่องจากเป็นแบบ Manual จึงพัฒนาขึ้นมาเป็นการควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์เพียงตำแหน่งเดียว เช่นการปรับอุณหภูมิ ตั้งค่าแรงดันทดสอบ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบเป็นตัวเลขแรงดันเบรกดาวน์ฉนวน และเป็นรูปคลื่นกราฟแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ฉนวน

#### 1.1.3 เปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่มีอยู่

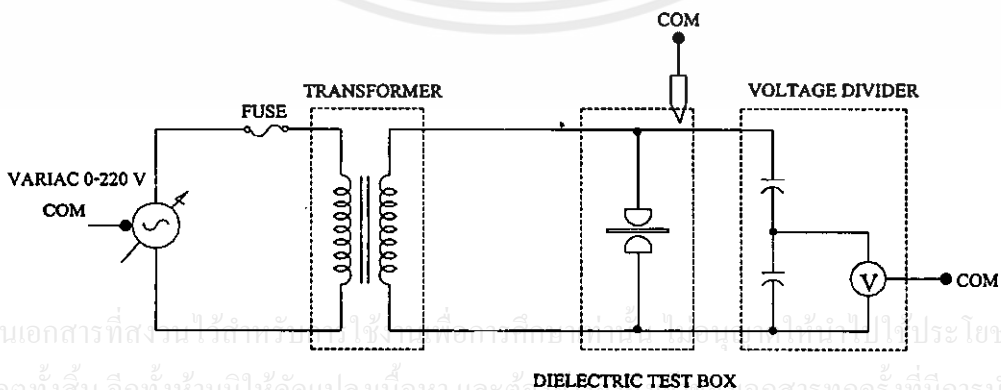
โครงการพัฒนา และวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบวิธีการปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้แรงดันแบบขั้นบันได (Step by Step) ที่ 20, 60 วินาที โดยแรงดันแต่ละขั้นจะใช้เวลา 20, 60 วินาทีในการคงสภาพระดับแรงดันนั้น แล้วค่อยปรับแรงดันขึ้นทีละขั้นจนกว่าจะเสีสภาพการเป็นฉนวน และแบบทันทีทันใด (Short Time) ก็คือต้องปรับแรงดันให้สูงขึ้นจนกว่าฉนวนจะเสีสภาพภายในเวลา 10-20 วินาทีจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแส

10-20 วินาทีจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อที่จะขับเคลื่อนแกนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Variac) โดยหลักการเดิมจะเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้มือหมุน ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดสอบในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน

หลักการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนที่ได้จะรับค่าผ่านเครื่องวัดชนิดแบ่งแรงดัน เพื่อให้เครื่องมือวัดชนิดแรงดันต่ำวัดค่าได้ และนำสัญญาณผ่านชุดเชื่อมโยงระบบ (Interfacing) ส่งข้อมูลให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผลออกมาเป็นรูปภาพแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน



รูปที่ 1.1 บล็อกโคอะแกรมการทำงานของชุดทดสอบสารฉนวนแข็ง



รูปที่ 1.2 วงจรการทำงานชุดทดสอบสารฉนวนแข็ง

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้จัดสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นชุดทดสอบต้นแบบขึ้นมาใหม่ โดยใช้หลักการ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน และรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาประมวลผลเป็นรูปกราฟบนจอคอมพิวเตอร์ และนำไปทดสอบสารฉนวนแข็ง โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น
2. เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจถึงลักษณะของรูปกราฟแรงดันเบรกคาวน์ที่ได้ทดสอบ
3. เพื่อทดสอบแรงดันเบรกคาวน์สารฉนวนแข็งชนิดแผ่นหนาไม่เกิน 2 มม.
4. เพื่อการทดสอบที่แม่นยำ และรวดเร็วในการทดสอบแต่ละครั้ง
5. เพื่อเป็นการพัฒนาการทดสอบสารฉนวนแข็งให้ทันสมัย

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. โปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นสามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทันทีทันใด และแบบขั้นบันได โดยใช้หลักการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก เข้าสู่รีเลย์ เพื่อเป็นสวิตช์ในการควบคุมมอเตอร์
2. โปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมอากาศภายในตู้ทดสอบ จนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3. โปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นสามารถรับข้อมูลแรงดันเบรกคาวน์เข้าประมวลผลเป็นรูปกราฟ โดยใช้หลักการรับสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเข้าสู่คอมพิวเตอร์
4. การทดสอบสารฉนวนแข็งในสภาวะอุณหภูมิปกติของอากาศแวดล้อม สามารถดูฉนวนที่ดีได้จากผลการทดสอบ

## 1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การทดสอบสารฉนวนแข็งโดยการควบคุมการป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Variac) แบบทันทีทันใด และขั้นบันได ซึ่งใช้ส่วนเชื่อมต่อระบบ (Interface System) มาช่วยทำการในด้านการติดต่อสื่อสารสัญญาณต่างๆระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์กับชุดทดสอบ โดยใช้วงจร D to A คอนเวอร์เตอร์แปลงสัญญาณดิจิทัลจากโปรแกรมที่สร้างขึ้น เป็นสัญญาณอนาลอก เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง และรับข้อมูลจากส่วนของเทอร์โมคัปเปิ้ล แรงดันที่วัดได้จากชุดแบ่งแรงดัน ผ่านวงจร A to D คอนเวอร์เตอร์แปลงสัญญาณอนาลอก เป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลออกมาเป็นรูปคลื่นกราฟแรงดันไฟฟ้าเบรกคาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1. สร้างโปรแกรมการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทันทีทันใด และแบบขั้นบันได และส่วนแสดงผลเป็นรูปภาพแรงดันเบรกคาว์นของสารฉนวนแข็ง
2. ออกแบบ และสร้างชุดป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้า
3. ออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า
4. ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบควบคุมอุณหภูมิอากาศที่สถานะแวดล้อมถึง 80 องศาเซลเซียส รวมถึงอิเล็กทรอนิกส์
5. สร้างชุดการ์ดอินเตอร์เฟส

### 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาทฤษฎีสวนรับ-ส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์
3. ศึกษาทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
4. ออกแบบ และสร้าง โปรแกรมในส่วนรับ-ส่งข้อมูล
5. ออกแบบ และสร้างชุดป้องกันแหล่งจ่าย และชุดขับเคลื่อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า
6. ศึกษาเรื่องการให้ความร้อนแก่วัสดุ และฉนวนของแข็ง
7. ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบ และอิเล็กทรอนิกส์
8. ทดสอบ และบันทึกผลการทดสอบ
9. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป

### 2.1 บทนำ

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้ประโยชน์ของไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูง การฉนวนเป็นการป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้หรือสัมผัสเข้า หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจร การออกแบบการฉนวนที่ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะคุณสมบัติของฉนวน และพิถีพิถันความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของตัวฉนวนหรือวัสดุฉนวนก็คือ การเป็นฉนวนคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำมีแรงดันกับดิน ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่รับแรงกล เผชิญกับความชื้น ปรุฏิกิริยาเคมี และระบายความร้อน ยิ่งกว่านั้นต้องคำนึงถึงความประหยัดโดยพิจารณาถึงอายุการใช้งานที่นานพอ การฉนวนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ฉะนั้นการเลือกใช้วัสดุฉนวนจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของการฉนวนที่ดีและเหมาะสม

### 2.2 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี

วัสดุฉนวนที่ดีจะพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของวัสดุฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง เพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย ประหยัด มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกักร่อน หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน

2. คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความทนต่อแรงกลสูงเนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง ตัวอย่าง เช่น ลูกถ้วยฉนวนยึดสายไฟซึ่งในอากาศ เป็นค้ำ ตลอดจนแรงระเบิดจากความดันของก๊าซภายใน

3. คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกันขณะเกิดผิดพลาดก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมากมาย ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อนเหล่านี้ได้ ช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

4. มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

5. คุณสมบัติของฉนวนที่ดีต้องทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันทนต่อไอโซนไม่ดูดซึมความชื้น ทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

## 2.3 ชนิดของวัสดุฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง

สารฉนวนไฟฟ้าอาจแบ่งออกตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงฉนวนแข็งเท่านั้น

### 2.3.1 สารฉนวนแข็ง

ในอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบกับฉนวนเหลว หรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึด และรองรับทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรกดาวน์ หรือเจาะผ่าน และเสียสภาพการฉนวนโดยสมบูรณ์ มีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ระบายความร้อนได้ไม่ดีเท่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุเกิดการคิสซาร์ตบางส่วน และนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้กัน โดยทั่วไปได้แก่ กระดาษ กระดาษอัด ยาง ไมก้า แก้ว เซรามิกส์ หรือ พอร์ซเลน พลาสติก เบกะไลท์ คาสต์เรซิน ไฟเบอร์ใยแก้ว พีวีซี พีอี (PE) ครอสลิงค์ (XLPE)

### 2.3.2 ฉนวนไมก้า

ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมทั่วไปของแร่ผลึกซิลิเกตของอะลูมินา และโปแตช ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ (1) muscovite (2) phlogopite (3) fibiolite และ (4) Lipidolite โดยที่สองกลุ่มหลังนี้แข็งและเปราะจึงไม่ค่อยใช้ในงานการฉนวน ไมก้าสามารถแยกเป็นแผ่นบางมากๆ ได้ไมก้าเป็นวัสดุฉนวนที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกน้อย ทนต่อความร้อนสูง คงทนต่อแรงกลได้ดี ด้วยเหตุนี้เองไมก้าจึงเหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวาง อุปกรณ์แรงดันต่ำใช้ไมก้าเป็นตัวกั้นระหว่างขั้วของคอมมิวเตเตอร์ชดลวดอาร์เมเจอร์ สวิตช์เกียร์ และอุปกรณ์ทำความร้อนและความเย็น ไมก้าที่บริสุทธิ์มากๆเหมาะที่จะใช้กับความถี่สูง ในตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไมก้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

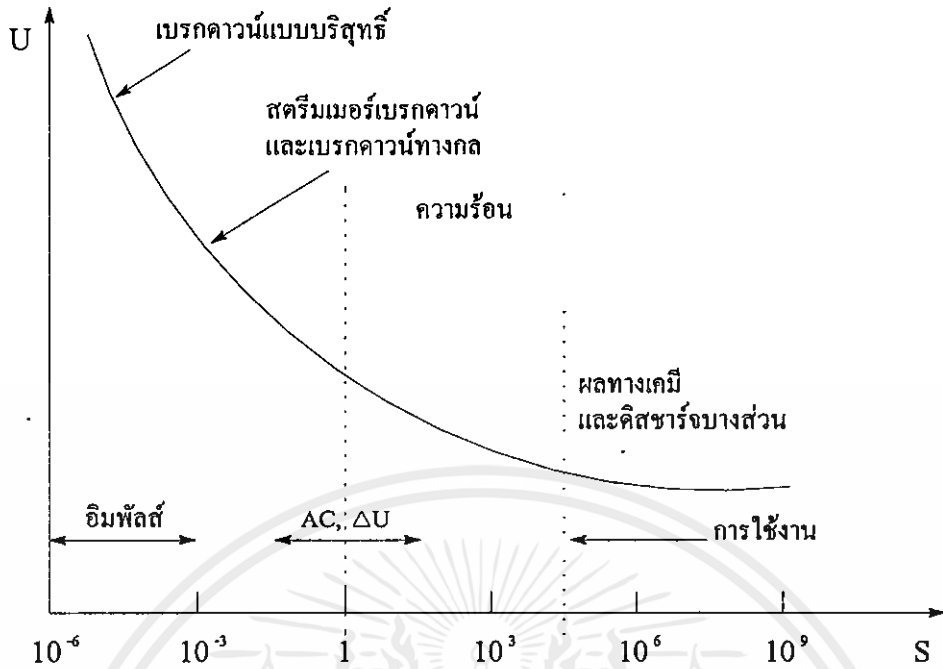
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscovite และ Phlogopite

คุณสมบัติ	Muscovite	Phlogopite
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ 30°C kV/mm	1000	700
ค่าเปอร์มีตติวิตี $\epsilon_r$ ที่ 1KHz-3000 MHz	6 - 7.5	6 - 7.5
tg $\delta$	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)
ความต้านจำเพาะเชิงผิว ความชื้น 60% ( $\Omega$ - cm)	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{10} - 10^{11}$
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรมีค่าคงที่ถึง 200°C ( $\Omega$ - cm)	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{14}$
ความทนแรงดึงหนา 0.02 - 0.03 mm kgf/mm <sup>2</sup>	17 - 36	16 - 26

## 2.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนแข็ง

การเกิดเบรกดาวนในสารฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการ และรูปแบบแรงดันที่ป้อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ขึ้นอยู่อย่างมากกับช่วงระยะเวลาคงอยู่ของแรงดัน หรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน ฉะนั้นความคงทนของฉนวนแข็งต่อแรงดันไฟฟ้าจึงอาจแสดงในเทอมของเวลาในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงกลไกการเสียดสภาพ และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งนั้น เปลี่ยนแปลงตามเวลาป้อนคงอยู่ เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ จึงอาจแบ่งช่วงเวลาดังกล่าวตามลักษณะกลไกการเบรกดาวน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความคงทนฉนวนแข็งต่อแรงดันไฟฟ้าในเทอมของเวลา

กลไกการเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการป้อนแรงดันและที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่อยู่ของแรงดันหรือสนามแม่เหล็กที่ป้อน การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรกดาวน์ได้คือ

- 1) เบรกดาวน์แบบบริสุทธ์หรือแบบไอออนิก
- 2) เบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
- 3) เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์
- 4) เบรกดาวน์แบบเทอร์มัล
- 5) เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี
- 6) เบรกดาวน์เนื่องจากผลของการคิซซาร์จภายใน

#### 2.4.1 เบรกดาวน์บริสุทธ์

ในช่วงเวลาต้นๆ คือ ช่วงเวลาที่เกิดการเบรกดาวน์แบบบริสุทธ์ (Intrinsic breakdown) และเบรกดาวน์ทางไฟฟ้า ถ้าวัสดุฉนวนมีความบริสุทธิ์เนื้อเดียวสม่ำเสมอ เมื่อป้อนแรงดันในช่วงสั้นๆ เช่น แรงดันอิมพัลส์มีช่วงเวลาเป็นนาโนวินาที ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  ของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงถึงขีดจำกัดบน ซึ่งอาจมีค่าถึง หรือมากกว่า 10 เมกกะโวลต์/เซนติเมตร เรียกว่าเบรกดาวน์แบบ

บริสุทธิ์เป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนแท้ๆ การเกิดเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์เป็นการสูญเสียสภาพฉนวนอย่างทันทีทันใด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าในช่วงระยะสั้นมากๆ โดยไม่มีความร้อนหรือดีสชาร์ตบางส่วน เกิดขึ้นก่อนเลย เป็นการเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ในเวลาเป็นนาโนวินาที เบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์อาจเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์เบรกดาวน์ คือ เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในฉนวนได้รับพลังงานในสนามไฟฟ้าที่ป้อนเพียงพอที่จะกระโดดข้ามแถบพลังงานจากวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก พอนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ ในวัสดุฉนวนเนื้อเดียว และบริสุทธิ์แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์จะแยกห่างจากกันด้วยแถบพลังงานช่วงกว้าง ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนไม่สามารถได้รับพลังงานความร้อนได้เพียงพอที่จะข้ามแถบพลังงานได้ จึงไม่มีสภาพนำไฟฟ้าได้เลย คือเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติในฉนวนจะมีสิ่งเจือปน ซึ่งจะดอมสิ่งเจือปนมักจะมีอิเล็กตรอนอิสระ มีระดับพลังงานหนึ่งติดอยู่กับแถบนำไฟฟ้า เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า และความร้อนอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานและเพิ่มทวีเข้าไปอยู่ในอิเล็กตรอนกลุ่มนำไฟฟ้ามากขึ้น

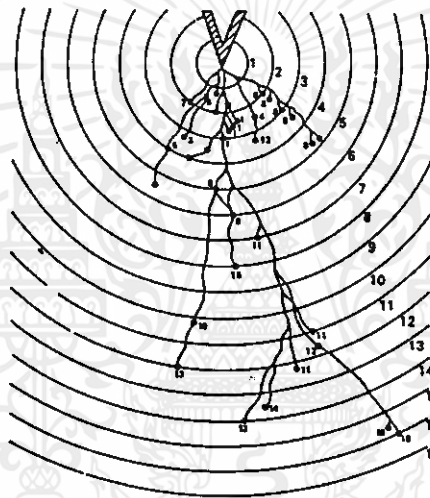
อีกกระบวนการหนึ่งของการเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์ก็คือ สตรีมเมอร์เบรกดาวน์ซึ่งเป็นกระบวนการทำนองเดียวกับที่เกิดในก๊าซ ที่เกิดสะสมอิเล็กตรอนอิสระจากการวิ่งชนแล้วเกิดไอออนไนซ์เชนซ์เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเกินกว่าค่าวิกฤติ ในจำนวนอิเล็กตรอนถึงค่าวิกฤติ ก็จะเกิดการเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์

#### 2.4.2 เบรกดาวน์แบบแท้จริง (intrinsic breakdown)

เบรกดาวน์แบบแท้จริง หมายถึงการเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาอันสั้นมาก คือ ราว 0.01 ไมโครวินาที ต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก และถือเป็นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนแบบบริสุทธิ์ การที่จะให้ได้เบรกดาวน์แบบแท้จริงซึ่งมีความคงทนสูงนี้ จะได้จากการทดลองที่มีเงื่อนไขพิเศษ โดยขจัดผลกระทบจากแฟคเตอร์อื่นๆ ออกให้หมด เพื่อให้เบรกดาวน์นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างและอุณหภูมิของสารฉนวนเท่านั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์นี้สูงกว่า 10 เมกกะโวลต์/เซนติเมตร ตัวอย่างเช่น โพลีไวนิล - แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ทนความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ถึง 15 เมกกะโวลต์/เซนติเมตร โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 5 - 10 เมกกะโวลต์/เซนติเมตร อย่างไรก็ตามเป็นการทดลองค่อนข้างยากที่จะบอกได้ว่าเบรกดาวน์นั้นเป็นเบรกดาวน์อย่างแท้จริงหรือไม่แท้จริงเกือบจะเรียกได้ว่าค่าเบรกดาวน์แบบแท้จริงนั้นเป็นค่าอุดมการณ์ ฉะนั้นในทางภาคปฏิบัติก็มักจะถือเอาค่าที่ทดลองได้สูงสุดของสารฉนวนแต่ละชนิด โดยขจัดผลสืบเนื่องอื่นๆ ออกหมด ความเครียดสนามไฟฟ้าของเบรกดาวน์บริสุทธิ์จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากที่มีอยู่ตามธรรมชาติในไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนมากพอที่จะข้ามช่องแถบพลังงานต้องห้ามจากวาเลนซ์ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มทวีคูณมากขึ้นในแถบการนำไฟฟ้านั้น และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

### 2.4.3 เบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโทรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง การเบรกดาวนอาจเกิดขึ้นได้จากอะวานแลนซ์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่เป็นไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสตรีมเมอร์ที่อธิบายการเกิดเบรกดาวนในก๊าซดังที่ได้กล่าวมาแล้วอิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่ตะโถจะเคลื่อนที่ไปหาอะโนด และได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะที่เคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้านี้เกิดค่าพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก (lattice ionizing energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโครงสร้างผลึก จำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวานแลนซ์ และเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในอะวานแลนซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต



รูปที่ 2.2 ลักษณะเบรกดาวนแบบรากไม้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ (Cooper)

ในทางปฏิบัติเบรกดาวนจะไม่เกิดการคัสซาร์ดครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียว แต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการคัสซาร์ดหลายครั้งดังในรูปที่ 2.2 ที่ได้จากการทดลอง ป้อนแรงดันอิมพัลส์ระหว่างปลายรัศมี 0.254 มิลลิเมตร กับแผ่นระนาบ โดยฝังปลายอิเล็กโทรดเข้าไปในเนื้อฉนวนโพร่งใสหนา 4.8 มิลลิเมตร แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนมีรูปคลื่น  $1/30$  ไมโครวินาที จำนวน 190 ครั้ง สังเกตร่องรอยของการคัสซาร์ดแต่ละครั้ง แต่ไม่เกิดแนวคัสซาร์ดทุกครั้งที่ป้อนแรงดัน ร่องรอยจะเกิดขยายตัวออกไปเป็นชั้นๆจนกระทั่งรอยคัสซาร์ดเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรดเบรกดาวนที่เกิดขึ้น ในกรณีของแรงดันกระแสสลับเบรกดาวนจะเกิดขึ้นใช้

เวลาของการป้อนแรงดันตั้งแต่หลายๆ วินาทีไปจนถึงเป็นนาที ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 เบรกดาวนแบบเทอร์มัล (Thermal Breakdown)

ค่าเบรกดาวนของฉนวนแข็งจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฉนวน แต่ข้อนี้จะเป็นจริงจนถึงความหนาค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากฉนวนแข็งหนามากเกินไปนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสไหลผ่านจะเป็นผลให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายขึ้นนั่นคือ ค่าแรงดันเบรกดาวนไม่แปรเพิ่มขึ้นตามความหนา

เมื่อป้อนแรงดันให้กับฉนวนแข็ง สนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่จะถ่ายเทแผ่กระจายออกไปสู่ตัวกลางรอบๆ โดยการนำผ่านฉนวนและส่วนหนึ่งทำให้ฉนวนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉนวนแข็งยังคงมีสภาพอยู่ได้ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถจะระบายออกไปสู่ในตัวกลางรอบๆ ได้ทัน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของฉนวนนั้น แต่ถ้าอัตราความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าที่ระบายออกไปก็จะทำให้เสียความสมดุลและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนแบบเทอร์มัลขึ้นได้ อาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานความสมดุลจะยังคงรักษาอยู่ได้เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวนจะต้องเท่ากับความร้อนที่แผ่กระจายออกไปพร้อมกับความร้อนที่ทำให้ปริมาตรของฉนวนร้อนขึ้นด้วยอุณหภูมิ  $T$

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีแรงดันกระแสตรง คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W_g = \sigma E^2 \quad (W / cm^3) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของฉนวนเป็น (S/m)

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเป็น (kV/cm)

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} W_g &= \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 \\ &= 0.566 f E^2 \operatorname{tg} \delta \times 10^{-12} \quad (W / cm^3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $W_g$  คือ ความร้อนในสารฉนวนเป็น (W/cm<sup>3</sup>)

$f$  คือ ความถี่เป็น (Hz)

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเป็น (kV/cm)

$\operatorname{tg} \delta$  คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามขอสงวนสิทธิ์ในข้อความและแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่ระบายออกไปคำนวณได้จากสมการ

$$W_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}(k \text{grad} T) \quad (W/cm^3) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $C_v$  คือ ความร้อนจำเพาะต่อปริมาตรของฉนวน

$T$  คือ อุณหภูมิฉนวนเป็น (องศาเซลเซียส)

$k$  คือ สภาพนำความร้อนของฉนวน

ฉะนั้นเทอร์มัลเบรกดาวน์จะไม่เกิดขึ้นถ้า

$$W_g \leq W_d$$

เนื่องจากพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่ามากกว่าในสนามไฟฟ้ากระแสตรงเพราะสนามไฟฟ้ากระแสสลับมีพลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาริเซชัน ซึ่งโมเมนต์ของไดอิเล็กตริกจะกลับหัวไปมาตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันเทอร์มัลเบรกดาวน์ของกระแสสลับจึงมีค่าต่ำกว่า และจะยิ่งลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

#### 2.4.5 เบรกดาวน์เนื่องจากดีสชาร์ตภายใน (Erosion Breakdown)

ดีสชาร์ตภายในไดอิเล็กตริกเกิดขึ้น เพราะมีไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวนหรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด สารเจือปนที่เกิดจากเบรกดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอรมิตทิวิตีต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก่อน

โพรงฉนวนเป็นก๊าซ

ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรกดาวน์ของฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมิติของโพรง

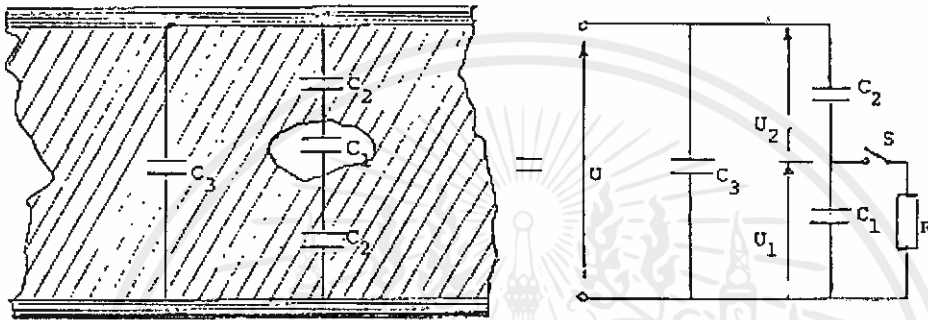
โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน

กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปนเช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากการเกิดเบรกดาวน์ในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นในโพรง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรกดาวน์ครั้งแรกแล้ว

โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน

โพรจนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มขุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรจอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีโพรจก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโพรจน้ำมัน ( $\mathcal{E}_1$ ) จะเป็น  $\mathcal{E}_2/\mathcal{E}$  เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ( $\mathcal{E}_2$ ) ในกรณีที่โพรจแบบตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรกควาน์ในโพรจน้ำมันก็เกิดก๊าซขึ้นในโพรจและเกิดดิสชาร์จภายในขึ้น

ในเนื้อฉนวนที่มีโพรจก๊าซและน้ำมันอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ดังในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ฉนวนมีโพรจและวงจรสมมูล

ในรูปที่ 2.3  $C_1$  แทนคาปาซิแตนซ์ของโพรจก๊าซ  $C_2$  แทนคาปาซิแตนซ์ของฉนวนส่วนที่ต่ออันดับกับโพรจ  $C_3$  แทนคาปาซิแตนซ์เนื้อฉนวนที่เหลือ เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  ระหว่างอิเล็กโทรดที่คั่นด้วยฉนวนนี้ทั้งหมด และ  $U_1$  เป็นแรงดันคร่อมโพรจซึ่งอาจจะคำนวณในลักษณะของโวลเตจดิไวเดอร์จะได้

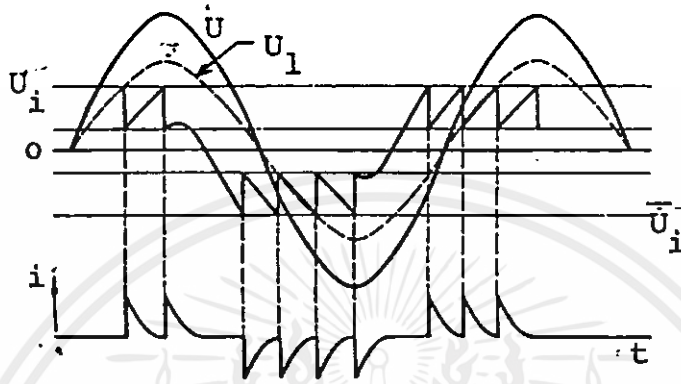
$$U_1 = U \cdot \epsilon_r \frac{d_1}{d_2} \quad (V) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  เป็นเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน

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

ถ้าแรงดันคร่อมโพรจถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรจเท่ากับ  $U_1$  ก็จะเบรกควาน์หรือดิสชาร์จในโพรจ ค่าแรงดัน  $U_1$  เรียกว่าแรงดันเริ่มต้นดิสชาร์จ (discharge inception voltage) ในกรณีที่แรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับ เบรกควาน์จะเกิดขึ้นที่ขอดทั้งสองข้างของรูปคลื่น จำนวนครั้งดิสชาร์จขึ้นอยู่กับการที่ป้อนที่ป้อนดังในรูปที่ 2.4 เส้นประแสดงถึงแรงดันคร่อมโพรจที่ควรจะ

เป็นถ้าหากไม่เกิดดีสชาร์จ์ เมื่อ  $U_1$  มีค่าถึง  $U_1^+$  หรือ  $U_1^-$  ดีสชาร์จ์จะเกิดขึ้น แรงดันคร่อมโพรงจะเป็นศูนย์เมื่อหยุดดีสชาร์จ์แรงดันในโพรงก็เพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งถึง  $U_1$  อีกก็จะดีสชาร์จ์ใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ทั้งทางครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่น ทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จ์ก็จะมีกระแสพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน



รูปที่ 2.4 ดีสชาร์จ์ภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสลับ

เมื่อก๊าซในโพรงเบรกดาวน์เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโพรง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของโพรง ถ้าพลังงานมากพอก็จะทำให้บอนด์ทางเคมีแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้นในโพรง มีเขม่าคาร์บอนที่ผิวใน เกิดกักร่อนเนื้อสารเป็นร่องรอยตามผิวในโพรง สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานสูญเสียไปโดยอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น ผลทางปฏิกิริยาเคมีทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ความหนาของฉนวนลดน้อยลงและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด อายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จ์ภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนและจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จ์ เบรกดาวน์โดยกระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นภายในสองสามวัน หรือหลายปีอย่างไรก็ตามหากมีดีสชาร์จ์ภายในจะทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง

#### 2.4.6 เบรกดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking Breakdown)

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการฉนวนอาจเสียเนื่องจากร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking)

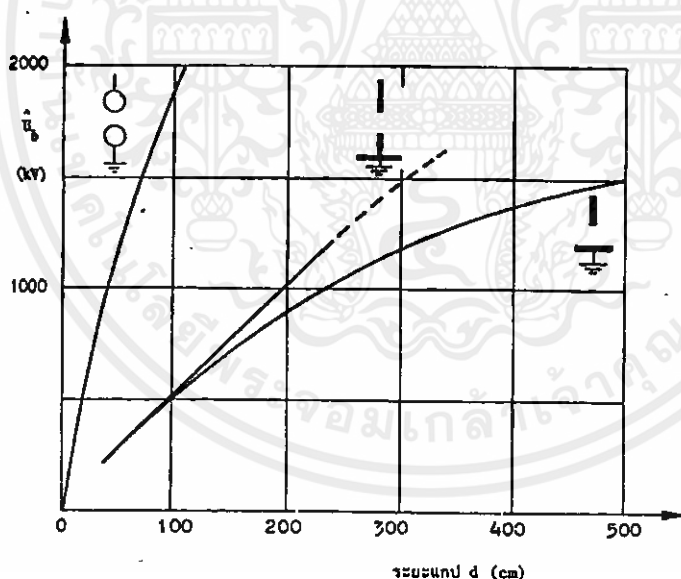
เนื่องจากมีร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิวฉนวนอันอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง และเพราะความชื้นในบรรยากาศประกอบกับความสกปรกบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่นและเกลือ กระแสรั่วตามผิวไฟฟ้านี้ ทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไปได้ ทำให้เกิดสปาร์คในช่วงที่ผิวนำไฟฟ้าขาดไป ทำให้ผิวฉนวนเสียหาย เช่น กระดาษเบคกะไลต์ การเกิดเสียหายเนื่องจากร่องรอยนำ

ไฟฟ้านี้จะแตกต่างไปจากการเสียดสภาพเพราะดีสชาร์ต ดีสชาร์ตจะเกิดขึ้น (ในก๊าซรอบนอกจนวน) อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากันหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเซน แต่เบรกดาวนจ์ารร่องรอยนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมากและไม่ขึ้นอยู่กับเบรกดาวนจ์ารของก๊าซรอบๆ

## 2.5 แฟกเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวนจ์าร

### 2.5.1 รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode Configuration)

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มากนัก ค่าแรงดันเริ่มต้น (Threshold Voltage) กับค่าแรงดันเบรกดาวนจ์ารเป็นค่าเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาฉะวิตกฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรกดาวนจ์ารทันทีที่ไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อน เบรกดาวนจ์ารจึงเรียกลักษณะเบรกดาวนจ์ารแบบนี้ว่า เบรกดาวนจ์ารโดยตรง (Direct Breakdown) เช่น เบรกดาวนจ์ารที่เกิดขึ้นในแก๊สของทรงกลมที่มีระยะห่างกันไม่มากนัก เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $d < D/2$ ) ความแตกต่างของขั้วแรงดันมีผลต่อขั้วแรงดันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.5 แรงดันเบรกดาวนจ์ารเฉลี่ยค่าของกระแสสลับ 50/60 Hz ในอากาศ

ที่สภาวะปกติ มาตรฐาน IEC ในเทอมระยะแก๊ป (d) ของอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการใช้เอกสารนี้

ในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field) ระยะแก๊ปห่างเมื่อเทียบกับรัศมีของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวนจ์ารอย่างเห็นได้ชัด

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น ทรงกลม-ทรงกลมที่เหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรด ไม่มีผลต่อแรงดันเบรกคาวน จะมีผลในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นลักษณะไม่สมมาตรมากๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ

### 2.5.2 ผลของความหนาแน่นก๊าซ

ในทางปฏิบัติความหนาแน่นในอากาศ มีบทบาทสำคัญต่อการจนวนกลางแข็ง แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ลักษณะของแรงดันเบรกคาวนในเทอมของความดันก๊าซจะมีลักษณะสูงสุด-ต่ำสุด กล่าวคือที่ความดันต่างๆ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกคาวนถ้าเป็นแบบโคโรนาคงสถานะ จะทำให้แรงดันเบรกคาวนสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมาก แต่เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นโคโรนาคงสถานะจะลดน้อยลงทำให้ค่าแรงดันเบรกคาวนลดต่ำลงด้วยจนกระทั่งแรงดันเบรกคาวนและค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าเท่ากัน เป็นความดันที่แรงดันมีค่าต่ำ จากจุดนี้หากเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีกค่าแรงดันเบรกคาวนจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับก๊าซอีก เห็นเด่นชัดในกรณีของก๊าซประจุไฟฟ้าลบ

### 2.5.3 ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุล  $H_2O$  ในอากาศมีลักษณะก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศมีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้น ครอบคลุมถึงความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่คิซซาร์ตก่อน หรือในแง่ของทรงกลม ( $d < D/2$ ) ผลของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรกคาวนน้อยมากเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดคิซซาร์ตก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกคาวนและมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อย เช่น แรงดันอิมพัลส์ความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกคาวนน้อย

### 2.5.4 ผลของสิ่งปรุอะเปื้อนและน้ำฝน

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการจนวน กำหนดด้วยผิวชั้นแนวต่อระหว่างก๊าซกับจนวนแผ่นโดยทั่วๆ ไปความชื้นในอากาศจะทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อน้ำค้างผิวมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่ ฝน และหมอกเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าวาบไฟตามผิวลดลง

### 2.5.5 ผลของรูปแบบแรงดัน

แรงดันเบรกคาวนขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดันแบบอิมพัลส์สวิทชิงซั้วบวก มีค่าเบรกคาวนต่ำสุด แรงดันที่ซั้วลบกระแสตรงมีค่าเบรกคาวนสูงสุดแต่สูงกว่าแรงดันเบรกคาวนอิมพัลส์ (แบบฟ้าผ่าและแบบสวิทชิง) ซั้วลบเล็กน้อย แรงดันซั้วบวกอิมพัลส์และกระแสตรงเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน

เชิงเส้น โดยตรงกับระยะแกป ส่วนแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน (50/60 Hz) จะมีค่าแรงดันเบรกควาน์เท่าๆ กับแรงดันเบรกควาน์กระแสตรง ในแกปที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm แต่โดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าความถี่สูงจากหม้อแปลงเตสลาทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์ต่ำลง แรงดันเบรกควาน์อิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความชัน (Steepness) ของรูปคลื่น และยังขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันอีกด้วย

### 2.5.6 ผลของประจุค้างมีต่อแรงดันเบรกควาน์ต่างขั้ว

ประจุค้าง (Space Charge) เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงเป็นผลทำให้แรงดันเบรกควาน์  $U_b$  มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ( $U_c$ ) และผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกควาน์ของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรกควาน์โดยตรง (Direct Breakdown) กล่าวคือ แรงดันเบรกควาน์หรือแรงดันเริ่มต้น (Threshold Voltage or Starting Voltage) ของขั้วลบจะต่ำกว่าขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกควาน์ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกปรากฏเช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC, AC และอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงของอิเล็กโทรดแบบไม่สมมาตร ดังตัวอย่างเช่น ปลายแหลมกับระนาบการอ้างถึงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบหมายถึงขั้วแรงดันอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

### 2.5.7 ผลของอุณหภูมิ

เมื่อค่าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์ต่ำลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยจะทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวได้เร็ว ทำให้เกิดไอออนในเซชัน นำไปสู่การเกิดการเบรกควาน์

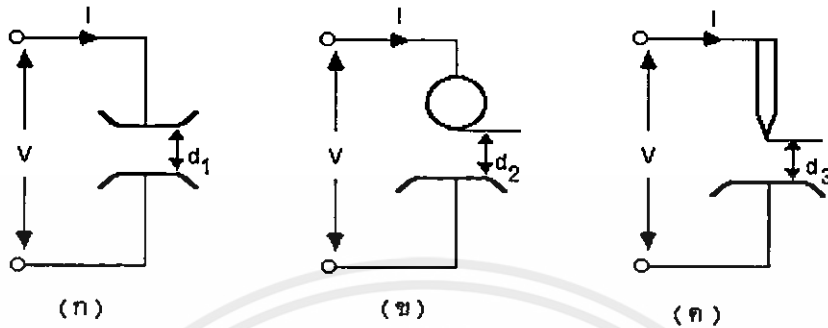
## 2.6 สนามไฟฟ้า

ก๊าซเป็นฉนวนอย่างหนึ่งทางไฟฟ้า ในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงๆ และที่มีว่างจำกัดการเป็นฉนวนจะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซ แรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าสภาพของฉนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี เมื่อเกิดการสปาร์คหรือวาบไฟหรือมีการเบรกควาน์ผ่านฉนวนในก๊าซหรือของเหลวหลังจากสภาพฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าและจะคงอยู่ถ้าแรงดันนั้นสูงพอ และจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนดั้งเดิม หลังจากการเบรกควาน์หรือสปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ซึ่งแตกต่างไปจากฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากการเกิดเบรกควาน์แล้วสภาพการเป็นฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร

### 2.6.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

เอกสารนี้เป็นเอกสารความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรกควาน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของ

อิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร (V/cm) หรือ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_0$  ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non uniform Field)
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non uniform Field)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.6 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  เป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{MAX}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่าง อิเล็กโทรดในขณะที่การเบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้นซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

### 2.6.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่าง อิเล็กโทรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{MAX} = E_{av} = \frac{V_b}{d} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V_b$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลต์ หรือกิโลโวลต์

$d$  : ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย เซนติเมตร

$E_{av}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลต์ต่อ

เซนติเมตร หรือ กิโลโวลท์ ต่อ เซนติเมตร

$E_{MAX}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งจะเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสก่อนจะเกิดเบรกดาวน์นั้นจะวัดไม่ได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

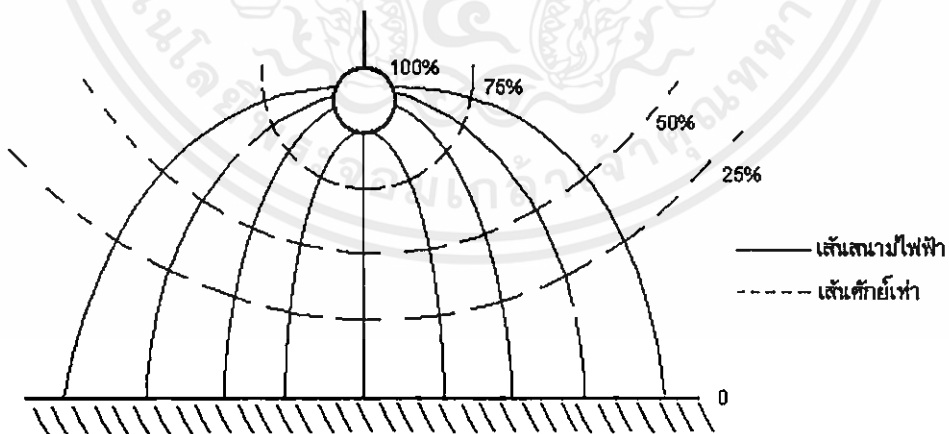
$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $V_b$  : แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

### 2.6.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุด จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

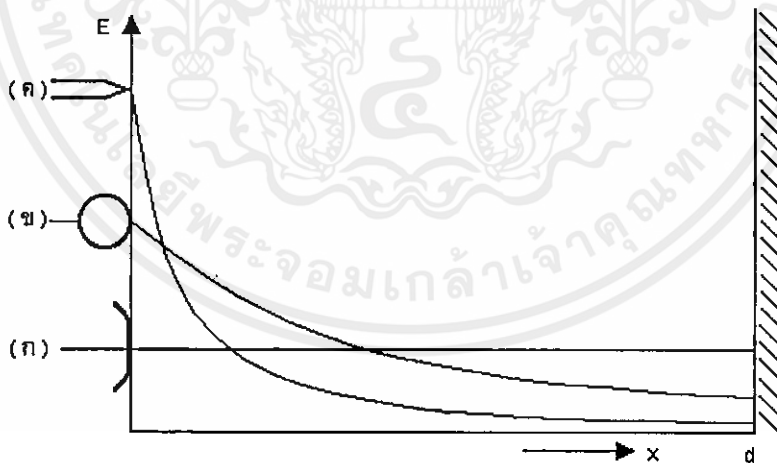
ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมอาจคำนวณได้จาก

$$E_{MAX} = \frac{V}{d\eta^*} \quad (2.7)$$

$\eta^*$  : แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ( Field Utilization Factor ) นิยามว่า  $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{MAX}}$  ; ซึ่งโดยทั่วๆ ไปจะมีค่า  $\leq 1$  ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  คือดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรกควาน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

$$E_{av} = \frac{V_b}{d\eta^*} \quad (2.8)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที้อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรน่า (Colona) หรือพรีดิสชาร์จ์ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกควาน์ดังอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.6 ( ข ) กล่าวคือก่อนการเบรกควาน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลยและลักษณะสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_b$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจะเกิดเบรกควาน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสูงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเช่นปลายแหลมดังรูปที่ 2.6 (ค) ที่ระยะห่าง

ออกจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอิเล็กโทรดแบบนี้เป็นที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะยังไม่เกิดการเบรกดาวน์ แต่จะเกิดโคโรนาพริคิซาร์ดขึ้นในบริเวณผิวอิเล็กโทรดคือบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดการดิซชาร์จ ( Discharge ) ที่ไม่สมบูรณ์ คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรดเรียกว่าการดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดกระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเบรกดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา ( Colona Circuit ) หรือกระแสพริคิซาร์ดการเกิดโคโรนาเป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง ( Space Charge ) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ ( 2.3 ) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์จะคำนวณจากสมการ ( 2.4 ) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ ( 2.8 ) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{V_i}{d\eta^*} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด

$V_i$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด ( Colona Inception Voltage )

โดย  $E_i$  และ  $V_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิดฉะนั้นจึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรดหรือกล่าวได้ว่าสมการที่ ( 2.9 ) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage , Threshold Voltage , Inception Voltage ) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรกดาวน์ในกรณีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและอาจจะเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิดในกรณีที่เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป

$$V_i = E_i d \eta^* \quad (2.10)$$

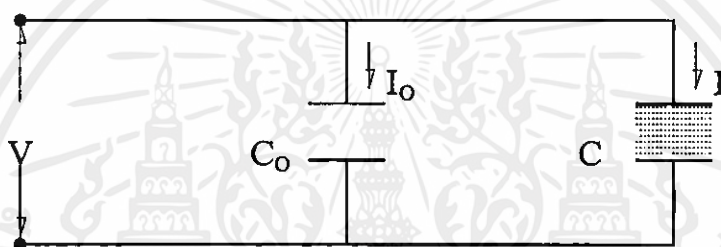
เมื่อ  $V_i$  : แรงดันเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก  $E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $V_i$  , การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ใคอิเล็กตริก

ใคอิเล็กตริก คือสารที่มีคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าที่ใช้คั่นระหว่างอิเล็กโทรดเพื่อให้ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น ข้อมูลทางใคอิเล็กตริกของระบบฉนวนให้ความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าอายุ และการประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ การรู้ข้อมูลทางใคอิเล็กตริกสามารถควบคุมระบบการฉนวนให้มีความน่าเชื่อถือ หลีกเลี่ยงผลเสียรวมทั้งค่าใช้จ่ายจากความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเพื่อความปลอดภัยภาพของระบบไฟฟ้า

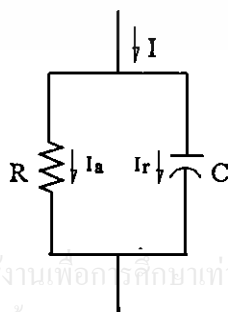
$\epsilon$  คือค่าคงที่ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดความสามารถในการสร้างคาปาซิแตนซ์ของฉนวนแต่ละชนิด ในอากาศที่คั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนอากาศคือ  $C_0$  กระแสที่ไหลผ่านคือ  $I_0$  ในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างฉนวนที่เป็นอากาศ กับฉนวนที่เป็นสารใคอิเล็กตริก (อาจเป็น ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรือของผสม)



รูปที่ 2.9 ความแตกต่างของคาปาซิแตนซ์ของอากาศเทียบกับสารใคอิเล็กตริกในอากาศ

$$I_0 = j\omega C_0 V \quad (2.11)$$

เครื่องหมาย  $j$  หมายความว่า เฟสเซอร์ของกระแสหน้าแรงดัน  $90^\circ$  แต่ในสารใคอิเล็กตริกค่าคาปาซิแตนซ์  $C$  ในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างกระแส และแรงดันน้อยกว่า  $90^\circ$  เพราะมีพลังงานสูญเสียไปในรูปแบบของความต้านทาน ในสารใคอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสียนี้อาจจะเสมือนเป็น RC ขนาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 วงจรเสมือนของใคอิเล็กตริกที่มีค่าพลังงานสูญเสีย

กระแส  $I$  แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ  $I_a$  (Active current) ไหลผ่าน  $R$  และ  $I_r$  (Reactive current) ไหลผ่าน  $C$   
 $\delta$  คือมุมพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก เป็นมุมที่รวมกับมุมเฟสของไดอิเล็กตริก ( $\phi$ ) แล้วได้  $90^\circ$   
 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ )

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} \quad (2.12)$$

พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ( $P$ ) ในฉนวนที่มีค่าคาปาซิแตนซ์  $C$  คือ

$$P = I_a V = VI_r \tan \delta \quad (2.13)$$

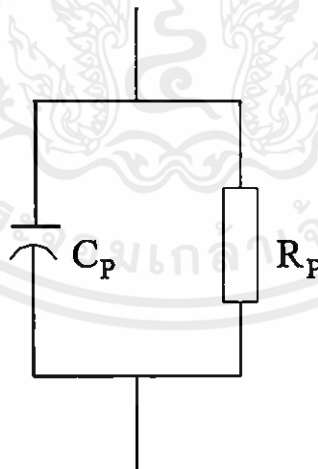
$$I_r = V\omega C \quad (2.14)$$

$$P = V^2 \omega C \tan \delta \quad (2.15)$$

วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสีย (Equivalent diagram of lossy dielectric)

วงจรสมมูลที่ใช้ศึกษาไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสียภายใต้การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. วงจรสมมูลแบบขนาน (Parallel equivalent circuit) วงจรสมมูลเป็นแบบขนาน  $R, C$



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลแบบขนาน

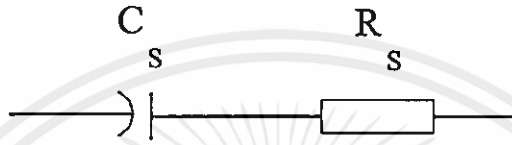
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

2. วงจรเสมือนแบบอนุกรม (Series equivalent circuit) วงจรสมมูลจะเป็นแบบอนุกรม R, C



รูปที่ 2.12 วงจรเสมือนแบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.10 จะได้ว่า

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

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการปริ๊นออกหรือการคัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_s = C_p(1 + \tan^2 \delta) \quad (2.16)$$

และจะได้

$$R_S = \frac{R_p}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.16, 2.17 ทำให้ทราบว่าถ้าค่า  $\delta$  มีค่าน้อยมาก  $\tan^2 \delta \approx 0$  จะได้

$$C_S \approx C_p \text{ และ } R_S \approx R_p \tan^2 \delta$$

และค่า  $\delta$  มีค่ามากจะได้

$$C_S \geq C_p; R_S \leq R_p; R_p = R_S \tan^2 \delta$$

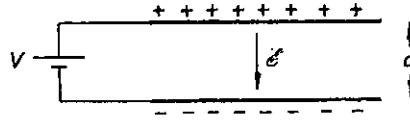
นั่นคือค่า  $\tan \delta$  ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงวงจรเสมือนได้ และมักจะพบว่าวงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีความสูญเสียจะเป็นขนาน R, C และ  $\tan \delta$  จะแปรผันตาม ความถี่, อุณหภูมิ, ความชื้น และ แรงดัน ไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้ามีสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง คือ มันสามารถเกิดมีไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ขึ้นได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้ามา ไดโพลไฟฟ้าอันหนึ่งคือ หน่วยอันหนึ่งซึ่งมีประจุบวกและประจุลบอยู่ในปริมาณที่เท่าๆกัน และประจุทั้งสองนี้ถูกแยกออกห่างจากกันเป็นระยะทางสั้นๆ สำหรับรูปไดโพลแบบง่ายๆ โมเมนต์ไดโพลไฟฟ้า  $p$  ถูกกำหนดโดย  $p = qr$

โมเมนต์ไดโพลไฟฟ้านี้เป็นปริมาณเวกเตอร์ซึ่งมีทิศทางประจุลบ ไปประจุบวก และมีหน่วยเป็น debye ( $1 \text{ debye} = 3.33 \times 10^{-30}$  คูลอมปี-เมตร)

นอกจากไดโพลไฟฟ้าจะมีอยู่ในวัสดุขณะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ไดโพลยังอาจเป็นลักษณะที่ถาวรของโครงสร้างโมเลกุลได้อีกด้วย ไดโพลประเภทนี้มีชื่อว่า ไดโพลถาวร (Permanent dipole) ส่วนวัสดุซึ่งผลของโพลาริเซชัน (polarization) มีความสำคัญมีชื่อว่า ไดอิเล็กตริก ภาพพจน์ของไดอิเล็กตริก-โพลาริเซชันสามารถแสดงให้เห็นแบบมหภาพ โดยพิจารณาตัวเก็บประจุแบบง่ายๆ สมมติให้ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะซึ่งมีพื้นที่ A อยู่สองอันแผ่นโลหะทั้งสองถูกคั่นจากกันเป็นระยะทาง  $d$  ด้วยสูญญากาศดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกเป็นสูญญากาศ

จากนั้นต่อแบตเตอรี่ซึ่งมีแรงดัน  $V$  โวลต์ คร่อมผ่านโลหะทั้งสองไว้สนามไฟฟ้า  $\xi$  ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีขนาด  $= \frac{V}{d}$  และมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าดังกล่าวเกิดจากความหนาแน่นของประจุ  $\pm Q$  ซึ่งอยู่บนแผ่นโลหะทั้งสองความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q$  และ  $\xi$  จะเป็นไปตามสมการ 2.12 โดยมี  $\epsilon_0$  เป็นค่า permittivity ของสูญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัด/เมตร

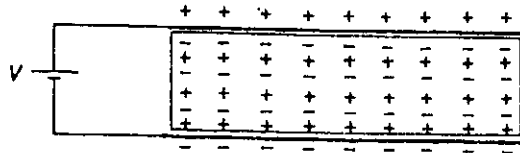
$$Q = \epsilon_0 \xi \quad (2.18)$$

เพื่อความสะดวกอาจคิดว่า  $Q$  เป็นแหล่งจ่ายเส้นแรงไฟฟ้าอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าเหล่านี้มีชื่อว่า Electric displacement  $D$

$$D = Q = \epsilon_0 \xi \quad (2.19)$$

ตอนนี้สมมติว่าสอดแผ่นไดอิเล็กตริกให้เข้าไปเต็มช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะพอดี ตัวกลางไดอิเล็กตริกนี้จะถูกโพลาไรซ์ (คือการทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าขึ้นในตัวกลาง) โดยสนามไฟฟ้า และไดโพลในตัวกลางไดอิเล็กตริกจะเรียงตัวอยู่ในทิศทางสนามไฟฟ้า ปลายของไดโพลทุกตัวที่มีประจุตรงกันจะให้ผลซึ่งหักล้างกันไป ยกเว้นที่บริเวณผิวซึ่งยังไม่มีกรหักล้างประจุจะมีประจุลบบอยู่ที่ผิวบนและประจุบวกอยู่ที่ผิวล่าง ประจุที่ผิวเหล่านี้จะดึงดูด และยึดเหนี่ยวประจุจำนวนเท่ากัน แต่เป็นชนิดตรงข้ามบนแผ่นโลหะ ประจุซึ่งอยู่บนผิวโลหะนี้ต่างจากไดโพลกล่าวคือมันสามารถเคลื่อนที่ได้

สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะจะถูกกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้ามา และจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมีไดอิเล็กตริกชนิดใดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองหรือไม่ สำหรับกรณีที่มีแผ่นไดอิเล็กตริกสอดเข้ามาอยู่ระหว่างแผ่นโลหะ ประจุที่ผิวของแผ่นโลหะบางตัวจะถูกยึดโดยประจุที่ผิวของแผ่นไดอิเล็กตริกทำให้ไม่มีส่วนของการสร้างเส้นแรงไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ เนื่องจากการค้าไม่จากสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะต้องมีค่าคงเดิมดังนั้นแบตเตอรี่จะต้องจ่ายประจุเพิ่มเติมเพื่อชดเชยประจุที่ยึดเหนี่ยว โดยประจุที่ผิวของแผ่นไดอิเล็กตริกดังกล่าว



รูปที่ 2.14 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกของแข็งอยู่

เมื่อให้  $Q$  เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวของโลหะที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ และ  $Q_b$  เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวของโลหะที่ถูกยึดเหนี่ยวโดยประจุที่ผิวของไดอิเล็กตริก ปริมาณของประจุที่ผิวของโลหะทั้งหมด  $Q'$  จะเป็น

$$Q' = Q + Q_b \quad (2.20)$$

อาจเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$Q' = \epsilon_r Q \quad (2.21)$$

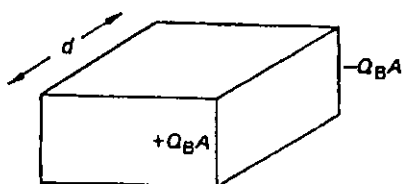
เมื่อให้  $D$  เป็นความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าทั้งหมดที่ออกจากแผ่นโลหะ โดยคิดทั้งที่ออกจากประจุที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยว และถูกยึดเหนี่ยว จะได้

$$D = Q' = \epsilon_0 \epsilon_r \xi \quad (2.22)$$

$$D = \epsilon_0 \xi + Q_b \quad (2.23)$$

ความหนาแน่นของประจุที่ถูกยึดเหนี่ยว  $Q_b$  นี้ มีชื่อเรียกว่า Polarization  $P$  ถ้าพิจารณาไดอิเล็กตริกก้อนหนึ่ง ซึ่งมีความหนาแน่นประจุ  $\pm Q_b$  อยู่บนผิวด้านตรงข้ามกันดังรูปที่ 2.15 ระยะห่างระหว่างผิวทั้งสอง  $= d$  ดังนั้นโมเมนต์ไดโพลทั้งหมดมีค่าเป็น  $Q_b Ad$  หรือเท่ากับ  $Q_b \times$  ปริมาตร นั่นคือความหนาแน่นของประจุที่ถูกยึดเหนี่ยว  $Q_b$  มีค่าเท่ากับโมเมนต์ไดโพลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ไดอิเล็กตริกซึ่งมีประจุที่ผิว  $\pm Q_A A$

โดยทั่วไปใช้เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $D$ ,  $\xi$  และ  $P$  ดังนั้นสมการ 2.23 จึงกลายเป็น

$$D = \epsilon_0 \xi + P \quad (2.24)$$

อัตราส่วน  $D/\xi$  มีชื่อว่า permittivity ของตัวกลาง ไดอิเล็กตริก

$$D/\xi = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$$

ส่วน  $\epsilon_r$  มีชื่อ relative permittivity หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของตัวกลาง สำหรับสุญญากาศ  $\epsilon_r = 1$  และ  $\epsilon = \epsilon_0$ .

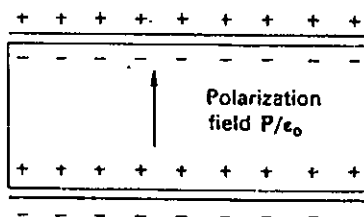
อีกวิธีหนึ่งที่ใช้การมองปัญหาข้างต้นคือการพิจารณาสนามไฟฟ้า  $\xi'$  ในไดอิเล็กตริกให้ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุทั้งหมด  $Q'$  ซึ่งอยู่บนแผ่นโลหะ สนามไฟฟ้า  $\xi'$  นี้จะมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้า  $\xi$  ที่ใส่เข้ามาเนื่องจากเบตเตอร์ นั่นคือ

$$\xi' = \xi + P/\epsilon_0$$

เทอม  $P/\epsilon_0$  เกิดจากประจุที่เพิ่มเข้ามาเมื่อแผ่นไดอิเล็กตริกถูกสอดเข้ามาระหว่างแผ่นโลหะ ภายในไดอิเล็กตริก, สนามไฟฟ้า  $\xi'$  จะถูกต้านด้วยสนามไฟฟ้า  $P/\epsilon_0$  ซึ่งเกิดจากประจุที่ผิวของไดอิเล็กตริกเอง ดังนั้นสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกจะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $\xi' - P/\epsilon_0 = \xi + P/\epsilon_0 - P/\epsilon_0 = \xi$  ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งก็เป็นผลลัพธ์เดียวแบบตอนแรก จะเห็นได้ว่าการเพิ่มตัวกลางไดอิเล็กตริกเข้ามาระหว่างแผ่นโลหะเป็นการเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุให้แก่ระบบด้วยแฟกเตอร์  $\epsilon_r$



### รูปที่ 2.16 สนามไฟฟ้าโพลาไรเซชันในไดอิเล็กตริก

จากสมการ 2.22 และ 2.24

$$\epsilon_0 \epsilon_r \xi = \epsilon_0 \xi + P$$

เพราะฉะนั้น

$$P = \epsilon_0 \xi + (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \xi$$

อัตราส่วน  $P / \epsilon_0 \xi$  มีชื่อว่า Electric susceptibility  $\chi$  ของไดอิเล็กตริก

$$P / \epsilon_0 \xi = \epsilon_r - 1 = \chi \quad (2.25)$$

$\chi$  นี้เป็นอัตราส่วนระหว่างประจุที่ถูกยึดเหนี่ยวต่อประจุที่เป็นอิสระ =  $P/Q$

โดยการใช้นิยามข้างต้นจะเห็นว่ารายละเอียดในการเกิดโพลาไรเซชันในไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งไม่จำเป็น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมทางกายภาพที่สำคัญจำนวนหนึ่งก็สามารถถูกอธิบายได้โดยโมเดลแบบง่าย ๆ

ไดอิเล็กตริกมักถูกใช้งานในรูปแบบของฉนวนไฟฟ้า และในรูปแบบของตัวเก็บประจุ น้ำมัน และกระดาษหุ้มไข ถูกใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า และ steatite (ส่วนผสมของดินเหนียว, แบเรียม และ แคลเซียม คาร์บอเนตอัดแข็ง) ถูกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูง สำหรับตัวเก็บประจุ, วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้งานก็มี กระดาษ, ฟิล์มพลาสติก และแผ่นไมก้า ; ออกไซด์ของอะลูมิเนียม, ดิเตเนียม และแทนทาลัม (ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก) และเซรามิกออกไซด์หลายชนิดซึ่งมักจะเป็นทั้งเฟอร์โรอิเล็กตริก และไดอิเล็กตริก วัสดุโพลีเมอร์ซึ่งใช้เป็นไดอิเล็กตริกเชิงพาณิชย์ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ซึ่งรู้จักชื่อว่า ไมลาร์ (PET), โพลีสไตรีน และ โพลีคาร์บอนเนต ตัวอย่างเช่น โพลีสไตรีนเป็นสารประกอบแบบไม่มีขั้วไฟฟ้าที่มีค่า relative permittivity = 2.55 ที่ 25 องศา

เซลล์เชียส และมีค่า  $\tan \delta$  น้อยกว่า  $2 \times 10^{-4}$  ในย่านความถี่ 100 ถึง  $10^{10}$  เฮิร์ต ค่ายกกำลังสองของ ครรชนีหักเหของแสงคือ 2.53

## 2.8 อุณหภูมิจ

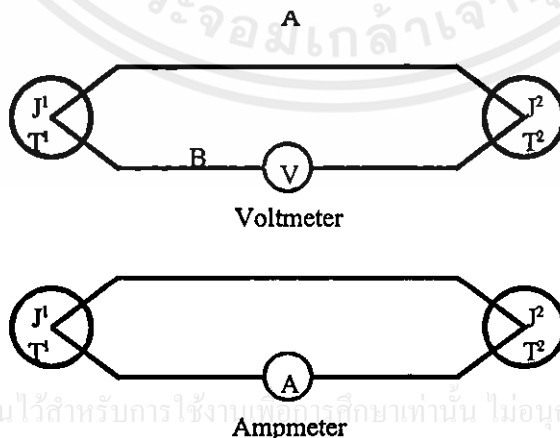
ในการวัดพลังงานความร้อน จะมีหน่วยของการวัด หน่วยเริ่มต้นที่ถูกใช้จะเป็น ร้อน และเย็น หน่วยเหล่านี้ใช้ได้สำหรับปริมาณความร้อน แต่ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในปัจจุบัน หน่วยที่ถูกต้องสำหรับวัดพลังงานความร้อนคือ Joules สำหรับในระบบ si อย่างไรก็ตามอันนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุ เพราะว่ามันแสดงพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุ ด้วยเหตุนี้การวัดพลังงานความร้อนเฉลี่ยต่อโมเลกุล ซึ่งถูกแสดงในหน่วยของ Joules สามารถใช้เพื่ออธิบายพลังงานความร้อนได้ ที่เรากล่าวว่า สามารถ เพราะว่ามันไม่ได้ถูกใช้ในชีวิตประจำวัน หน่วยพิเศษจึงได้เข้ามาแทนที่ และถูกใช้เพื่ออธิบาย พลังงานความร้อนต่อโมเลกุล ของวัสดุในรูปของ องศาของอุณหภูมิ ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้มากที่สุดคือหน่วย เคลวิน องศาแรงกิน องศาฟาเรนไฮท์ และองศาเซลเซียส

### 2.8.1 ทรานสดิวเซอร์ไฟฟ้า-ความร้อน

การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีทางไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะใช้ทรานสดิวเซอร์ไฟฟ้า-ความร้อนซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ “เทอร์โมคัปเปิ้ล” โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นง่ายมาก มันประกอบด้วยลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นปิดพันกันเป็นเกลียวเชื่อมต่อกัน โดยลวดโลหะแต่ละเส้นถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนซึ่งอาจจะเป็น

1. ฉนวนแร่ (แมกนีเซียมออกไซด์) สำหรับงานทั่วไป หรือ
2. ฉนวนเซรามิก สำหรับงานหนัก

หลักการพื้นฐานของการวัดอุณหภูมิที่ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลถูกค้นพบโดย ซีเบค ในปี ค.ศ.1821 ซึ่งแสดงภาพรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรไฟฟ้าความร้อนพื้นฐาน

เมื่อลวดโลหะตัวนำต่างชนิดกันสองเส้นที่เรียกว่า A และ B ถูกเชื่อมเข้าด้วยกันในลักษณะรูป และให้ขั้วต่อ  $J_1$  และ  $J_2$  อยู่ที่อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  ตามลำดับ แล้วใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานอนันต์วัดกำลังดันของแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือใช้แอมป์มิเตอร์ค่าความต้านทานต่ำวัดกระแสที่ไหลในลวดที่กำลังกำเนิดขึ้น โดยเทอร์โมคัปเปิลสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{emf} = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad (2.26)$$

เมื่อ  $\text{emf}$  = กำลังดันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกกำเนิดขึ้น มีหน่วยเป็น โวลท์  
 $T_1 - T_2$  = อุณหภูมิที่ขั้วต่อทั้งสอง มีองศาเป็นเคลวิน  
 $Q_A - Q_B$  = เป็นค่าคงที่ในการส่งถ่ายความร้อนของโลหะสองชนิด

จากสมการที่ 2.26 เป็นการอธิบายผลของ ซีเบค ซึ่งแสดงว่า  $\text{emf}$  ที่กำเนิดขึ้น เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ และความแตกต่างของค่าคงที่ในการส่งถ่ายความร้อนของโลหะ ดังนั้น ถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกัน  $\text{emf}$  ก็จะเป็นศูนย์ และทำนองเดียวกันถ้าอุณหภูมิเท่ากัน  $\text{emf}$  ก็จะเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกัน

ในทางปฏิบัติ พบว่าค่าคงที่ทั้ง  $Q_A$  และ  $Q_B$  ก่อนข้างจะไม่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิจึงมีค่าเป็นเชิงเส้น นั่นคือ

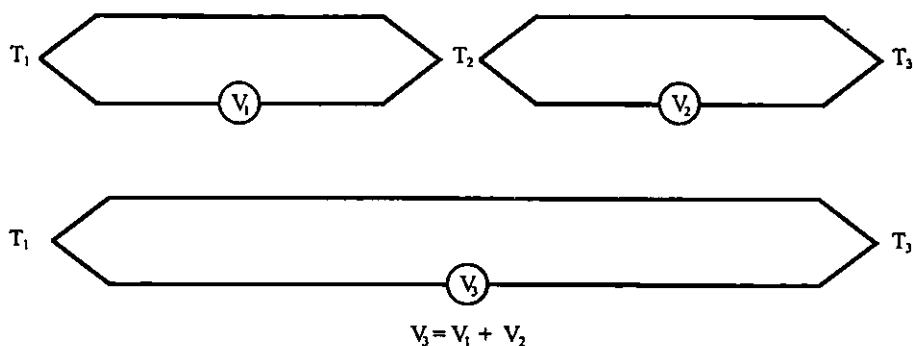
$$\text{emf} = \alpha (T_2 - T_1)$$

$\alpha$  = ค่าคงที่มีหน่วยเป็น โวลท์/K  
 $T_1 - T_2$  = อุณหภูมิที่ขั้วต่อทั้งสอง มีองศาเป็นเคลวิน

ในการนำไปใช้งานอุปกรณ์ที่เหมาะสมจะนำอุณหภูมิต่อร่วมเพื่อชี้แจงแสดง  $\text{emf}$  หรือการไหลของกระแส เพื่อความสะดวกในการวัดเป็นมาตรฐานสากล ขั้วต่อข้างหนึ่งโดยปกติแล้วจะถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิที่เรารู้ค่า  $\text{emf}$  ที่วัดได้เป็นการแสดงอุณหภูมิที่แตกต่างไปจากอุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งในทางปฏิบัติจุดเยือกแข็งมักจะถูกใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิง

### 2.8.2 กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

กฎนี้กล่าวว่า  $\text{emf}$  ที่กำเนิดขึ้นในเทอร์โมคัปเปิลขณะที่ขั้วต่ออยู่ที่อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_3$  จะเท่ากับผลรวมของ  $\text{emf}$  ที่กำเนิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเดียวกันสองตัว ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งวัดอุณหภูมิระหว่าง  $T_1$  และ  $T_2$  และเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่งวัดระหว่าง  $T_2$  และ  $T_3$  เมื่ออุณหภูมิ  $T_2$  อยู่ระหว่าง  $T_1$  และ  $T_3$  ดังแสดงในรูป 2.18



รูปที่ 2.18 กฎของอุณหภูมิแทรก

กฎนี้มีประโยชน์ในทางปฏิบัติเป็นอย่างมากเพราะว่ามันช่วยแก้ปัญหาในกรณีที่อุณหภูมิของขั้วต่ออ้างอิง (ซึ่งโดยปกติอยู่ที่  $0^{\circ}\text{C}$ ) ไม่ได้อยู่ที่  $0^{\circ}\text{C}$

กฎโลหะแทรก (Law of intermediate Metals)

รูปพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิ้ลจะประกอบด้วยลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้น A และ B ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ก. ถ้านำขดลวดเส้นที่สามมาต่อ ขั้วต่อสามขั้วจะถูกสร้างขึ้นมาแสดงในรูปที่ 2.18 ข. Emf ที่กำเนิดขึ้นจะยังคงเหมือนเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าขั้วต่อสองขั้วอันใหม่คือ B-C และ C-A อยู่ที่อุณหภูมิอันเดียวกัน

### 2.8.3 วัสดุ และชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ล

การเลือกวัสดุเทอร์โมคัปเปิ้ล ถูกกำหนดโดยปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

1. ความสามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่ต้องการวัด
2. ปลอดภัยจากสิ่งสกปรกโสโครก และการออกซิเดชัน ซึ่งทำให้เนื่อในการรักษาคุณสมบัติไฟฟ้าความร้อน ได้เที่ยงตรงตลอดอายุการใช้งาน
3. มีคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้น

โครงสร้างมาตรฐานของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้โลหะพิเศษ หรือการผสมโลหะได้ถูกนำมาใช้ และได้มีการกำหนดชื่อเป็นตัวยกษรดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 เทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิดจะมีลักษณะพิเศษของมันเอง ดังเช่น ย่านการวัด ความเป็นเชิงเส้น การไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตราย ความไว และอื่นๆ ซึ่งจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน นอกจากนี้ในแต่ละชนิดจะมีขนาดของคว้านาหลายๆขนาดให้เลือกใช้ เคริฟของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เทอร์โมคัพเบิลมาตรฐาน

ชนิด	วัสดุ	ย่านการวัด
J	Iron-Constantan	-190 °C ถึง 760 °C
T	Copper-Constantan	-200 °C ถึง 371 °C
K	Chromel-Alumel	-190 °C ถึง 1260 °C
E	Chromel-Constantan	-100 °C ถึง 1260 °C
S	90% Platinum + 10% Rhodium-Platinum	0 °C ถึง 1482 °C
R	87% Platinum + 13% Rhodium-Platinum	0 °C ถึง 1482 °C

Constantan, Chromel และ Alumel เป็นชื่อโลหะผสมที่เรียกกันในการการค้า

เมื่อ  
 Constantan = Copper/Nickel,  
 Chromel = Nickel/Chromium  
 Alumel = Nickel/Aluminium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

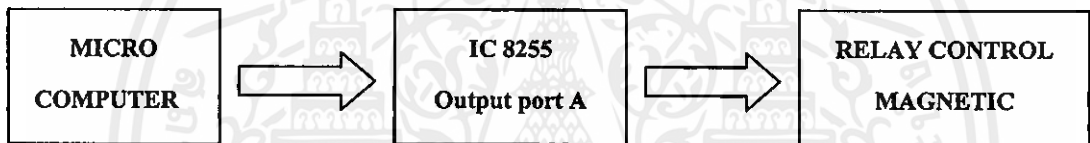
## การออกแบบ

### 3.1 โปรแกรมควบคุม และส่วนเชื่อมโยงข้อมูลในการประมวลผล

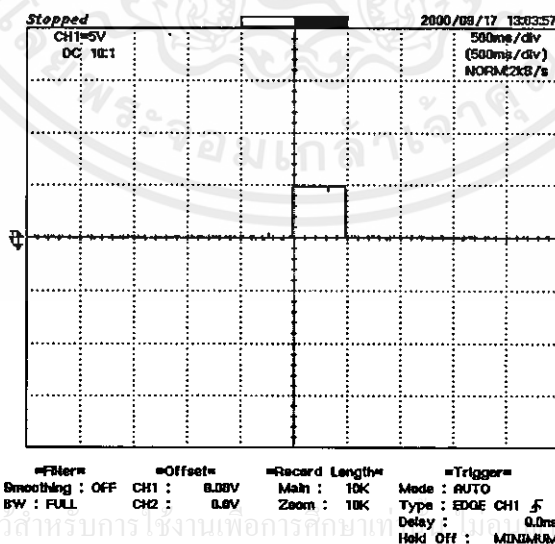
โปรแกรมควบคุมส่วนเชื่อมโยงระบบ (Interface System) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนส่งข้อมูล และส่วนรับข้อมูล

#### 3.1.1 การออกแบบส่วนส่งข้อมูล

ส่วนส่งข้อมูลจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ผ่านไอซีเบอร์ 8255 จะส่งสัญญาณลอจิก "1" มีค่าแรงดัน 5 โวลต์ และลอจิก "0" มีค่าแรงดัน 0 โวลต์ ออกจากพอร์ท A สัญญาณที่ได้จะไปควบคุมการทำงานของชุดรีเลย์ ซึ่งจะใช้ในการควบคุมการทำงานของแมกเนติกอีกทีหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมส่วนส่งข้อมูล



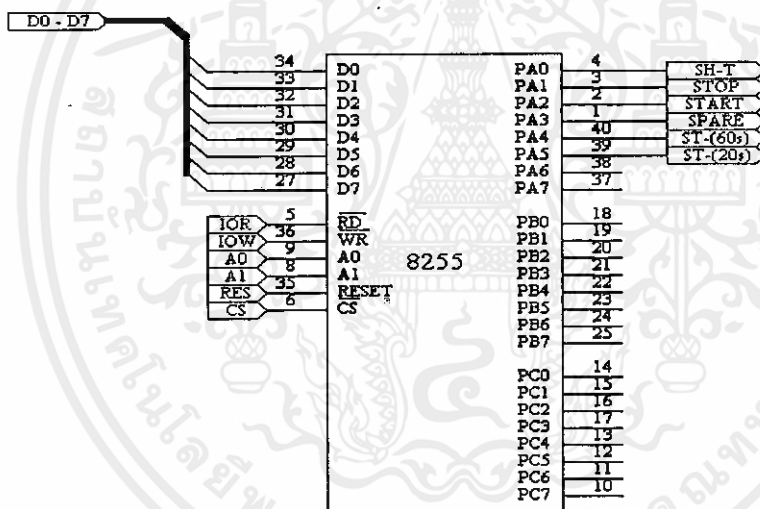
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.2 รูปสัญญาณขาออกของพอร์ท A ของ ไอซีเบอร์ 8255

การ์ดอินเตอร์เฟดสำหรับพอร์ทอินพุท/เอาต์พุทบนระบบ PC พอร์ทอินพุท/เอาต์พุทสำหรับการใช้งานของ CPU 80XXX นั้นสามารถอ้างอิงได้ 65535 ตำแหน่ง แต่การใช้งานบนระบบ PC นั้นจะใช้สูงสุดในช่วงแอดเดรส 0000 - 03FF เท่า ตำแหน่งบน PC ที่ใช้คือ Prototype Card ตำแหน่ง 300 - 31F

### 3.1.1.1 การออกแบบการ์ดอินเตอร์เฟด

ไอซีเบอร์ 8255 นำมาใช้งานเป็น อินพุท/เอาต์พุทพอร์ท โดยมีพอร์ทขนาด 8 บิตที่สามารถสั่งให้อินพุทหรือเอาต์พุทก็ได้จำนวน 3 พอร์ท หน้าที่ของ 8255 ในวงจรคือเป็นตัวส่งสัญญาณออกไปควบคุมชุดรีเลย์

การวางตำแหน่งของ 8255 จะวางที่ตำแหน่ง 300 - 303 โดยที่ตำแหน่ง 303 เป็นพอร์ทควบคุม ตำแหน่ง 300 เป็น พอร์ท A ตำแหน่ง 301 เป็น พอร์ท B และ ตำแหน่ง 302 เป็นพอร์ท C



รูปที่ 3.3 วงจรการทำงานของไอซีเบอร์ 8255

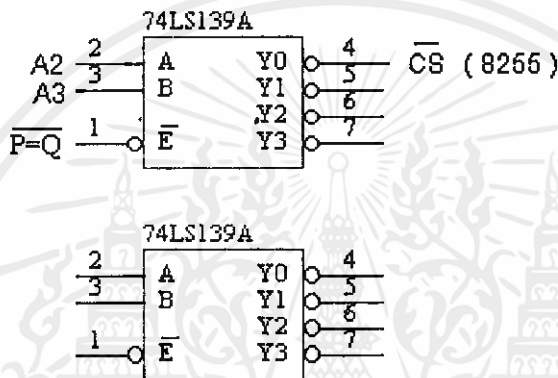
3.1.1.2 ไอซีเบอร์ 74LS139 ใช้เป็นอุปกรณ์สนับสนุนที่ใช้ในการถอดรหัส ซึ่งจะเห็นว่าเอาต์พุทแอดที่ฟคือเป็น LOW ที่บิตใดบิตหนึ่งเท่านั้น โดยการแอดที่ฟจะขึ้นอยู่กับอินพุท AB และยังสามารถควบคุมการทำงานของถอดรหัสที่ขา G ซึ่งจะมี 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางการออกแบบวงจรถอดรหัส

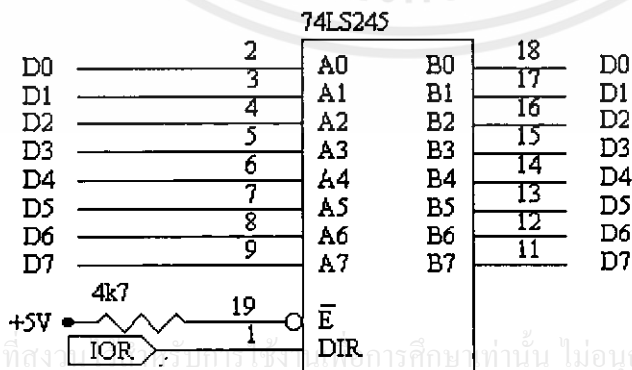
8255	AEN	A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0
300	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
303	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1

จากความสัมพันธ์ของ 8255 เราใช้ A2 กับ A3 ไปต่อเข้ากับขาสัญญาณ แอคเครส A,B ของ 74LS139



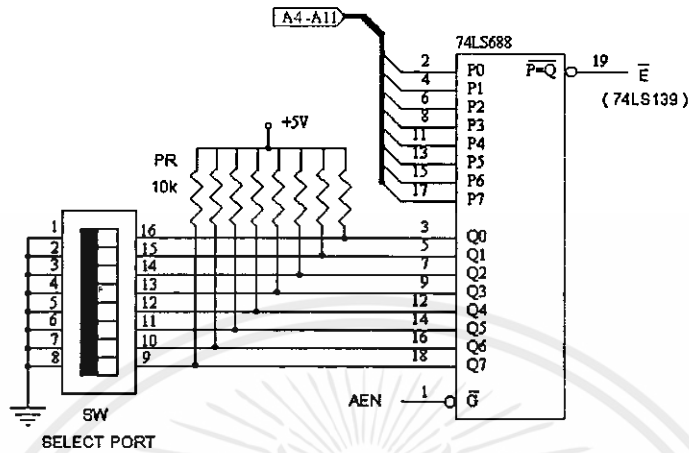
รูปที่ 3.4 วงจรการทำงานของไอซีเบอร์ 74LS139

3.1.1.3 ไอซีเบอร์ 74LS245 เป็นบัซข้อมูลแบบ สองทิศทางก็สามารถส่งข้อมูลออกไมโครโปรเซสเซอร์ก็ได้และในขณะเดียวกันยังสามารถรับข้อมูลเข้าตัวไมโครโปรเซสเซอร์ได้ เช่นเดียวกัน โดยการควบคุมที่ขา G และ DIR



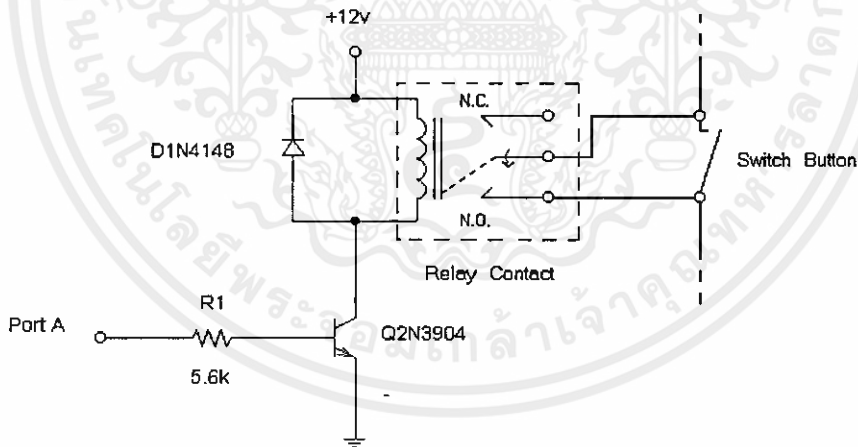
รูปที่ 3.5 วงจรการทำงานของไอซีเบอร์ 74LS245

3.1.1.4 ไอซีเบอร์ 74LS688 ใช้เป็นวงจรถอดรหัสของพอร์ทที่ใช้งาน ทำให้เพื่อสะดวกในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพอร์ท โดยการปรับที่ DIP – SWITCH



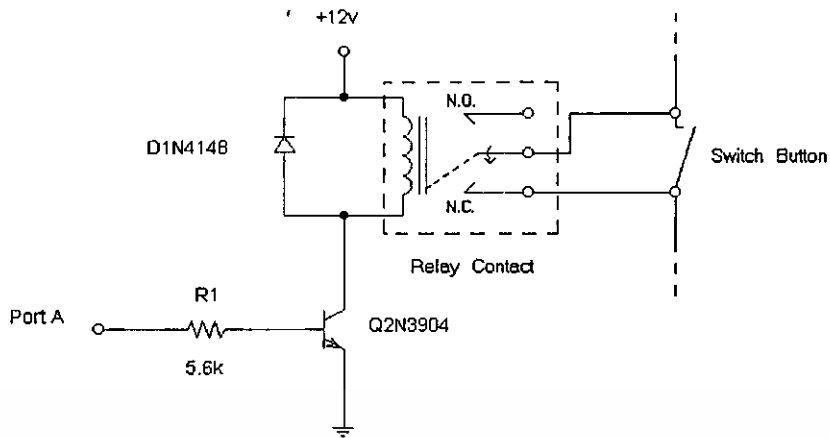
รูปที่ 3.6 วงจรการทำงานของไอซีเบอร์ 74LS688

### 3.1.2 การออกแบบวงจรถวลรีเลย์



รูปที่ 3.7 วงจรถวลรีเลย์โดยใช้วงจรถานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมและการต่อหน้าสัมผัสรีเลย์แบบเปิดวงจร (NO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรควบคุมรีเลย์โดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมและการต่อหน้าสัมผัสรีเลย์แบบปิดวงจร (NC)

การคำนวณ

จากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม

$$\text{คือ } I_C = \beta \times I_B$$

$$\text{กำหนดให้ } \beta = 100$$

$$I_C = 75 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} I_B &= I_C / \beta \\ &= 75 \text{ mA} / 100 \\ &= 0.75 \text{ mA} \end{aligned}$$

ต้องการหาค่า  $R_1$

$$\text{จะได้ } V_{in} = V_{R1} + V_{BE}$$

$$V_{in} = R_1 I_B + V_{BE}$$

$$R_1 = (V_{in} - V_{BE}) / I_B$$

$$\text{โดยให้ } V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } R_1 &= (5 - 0.7) \text{ V} / 0.75 \text{ mA} \\ &= 3.7 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ดังนั้นการคำนวณ ค่า  $R_1 = 3.7 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อใช้งานรีเลย์นั้นจะมีการต่ออยู่ 2 แบบ คือต่อแบบเปิดวงจร (NO) และปิดวงจร (NC) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

การ Start จะต่อรีเลย์แบบเปิดวงจร (NO)

การ Stop จะต่อรีเลย์แบบปิดวงจร (NC)

การทดสอบแบบ Short time breakdown test จะต่อรีเลย์แบบเปิดวงจร (NO)

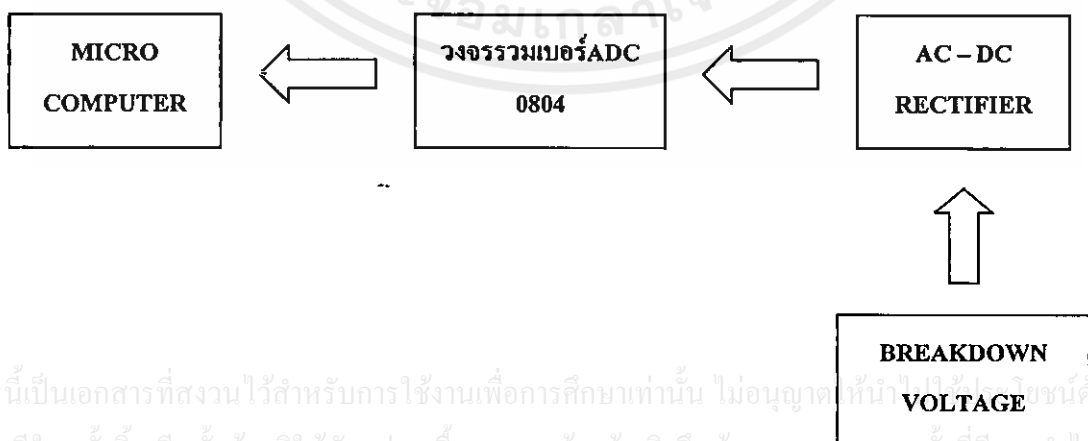
การทดสอบแบบ Step by step breakdown test 20sec จะต่อรีเลย์แบบเปิดวงจร

การทดสอบแบบ Step by step breakdown test 60sec จะต่อรีเลย์แบบเปิดวงจร

การทำงานของลจิกเอาท์พุทจะรับสถานะลจิกจากพอร์ท A ของไอซีเบอร์ 8255 เมื่อลจิกมีสถานะเป็น “1” มีค่าแรงดัน 5 โวลต์ จะมีกระแสเบสให้ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นผลทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานมีกระแสไหลจากรีเลย์ผ่านทรานซิสเตอร์ลงกราวด์ครบวงจร ทำให้รีเลย์ทำงานเช่นกัน และเมื่อลจิกมีสถานะเป็น “0” มีค่าแรงดัน 0 โวลต์ จะไม่มีกระแสเบสให้ทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานกระแสที่ไหลจากรีเลย์ไม่สามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ส่งผลให้รีเลย์ไม่ทำงาน และกระแสรีเลย์จะไหลผ่านไดโอดที่ต่อคร่อมรีเลย์ไว้กลับไปยังรีเลย์อีกครั้ง ทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่เกิดความเสียหายจากกระแสของรีเลย์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส

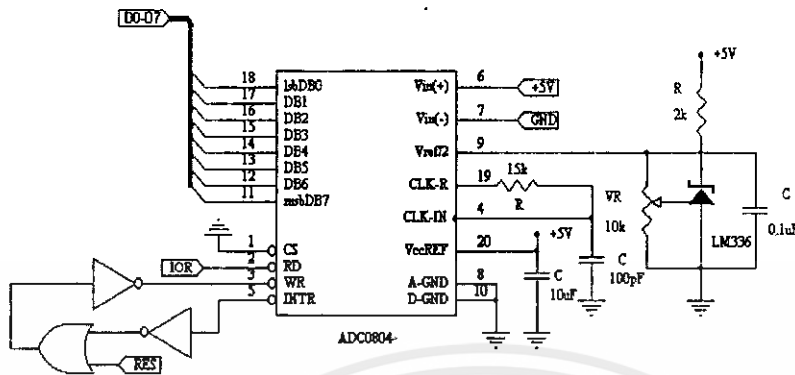
### 3.1.3 การออกแบบส่วนรับข้อมูล

ส่วนรับข้อมูลจะทำหน้าที่รับข้อมูลค่าแรงดันเบรกดาวน์จากชุดวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 – 5 โวลต์ แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยใช้ไอซีเบอร์ ADC 0804 ส่งสัญญาณดิจิทัลที่ออกจากเอาท์พุทของไอซีเบอร์ ADC 0804 ไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์และแสดงผลเป็นรูปกราฟค่าแรงดันเบรกดาวน์เทียบกับเวลา และค่าแรงดันเบรกดาวน์ตามโปรแกรมที่เขียนไว้นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมส่วนรับข้อมูล

## วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

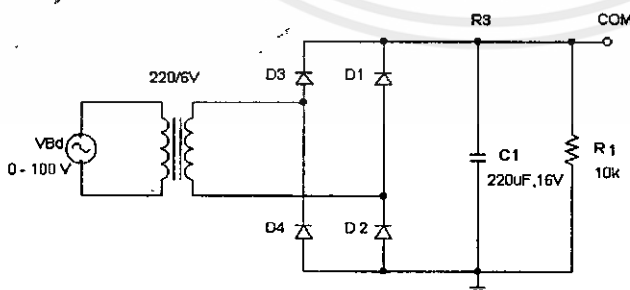


รูปที่ 3.10 การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ADC 0804 ใช้สำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล 8 บิตซึ่งสัญญาณดิจิทัลมี Step การเปลี่ยนได้ทั้งหมด 256 Step และสามารถรับสัญญาณอินพุตมีค่า 0 – 5 Vcc โดยการปรับแรงดันอ้างอิงที่ 2.5 โวลต์ ดังนั้นค่าแรงดันที่ใช้ในการแปลงสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $5/256$  ส่วนทางด้านเอาต์พุตจะส่งสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต ( $D_0 - D_7$ ) ส่งเป็นอินพุตให้กับคอมพิวเตอร์

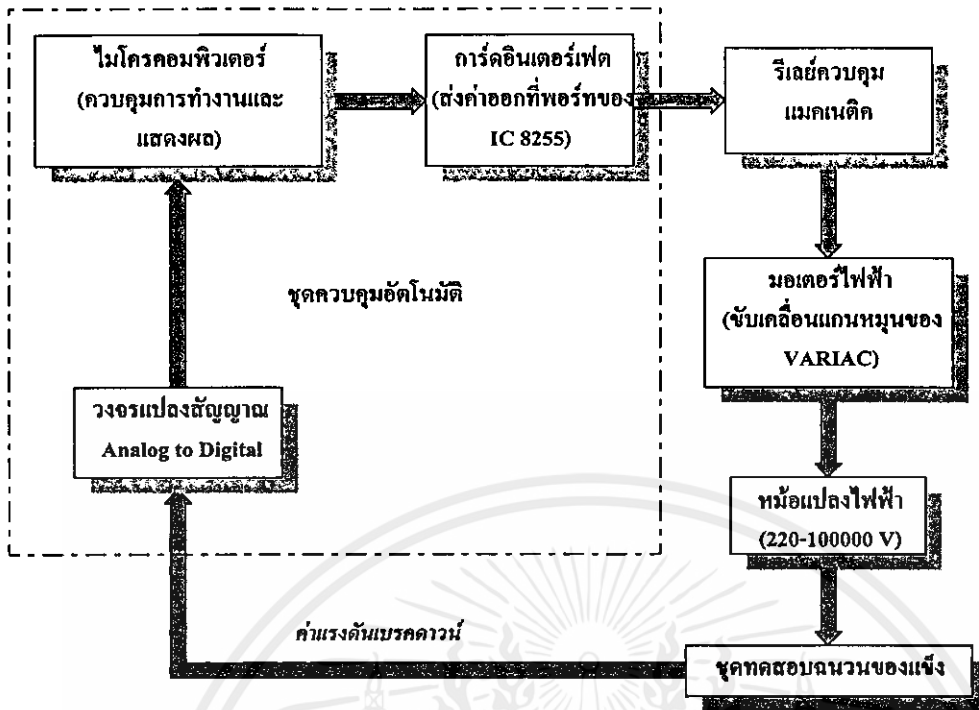
### 3.1.4 การออกแบบส่วนวัดค่าแรงดันเบรคความของฮาวไดโอดคทริก

ส่วนวัดค่าแรงดันเบรคความ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เอาต์พุตของชุดแปลงแรงดันภาคแรงต่ำเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ซึ่งจะใช้คาปาซิเตอร์กรองกระแสให้เรียบอีกทีหนึ่ง เพื่อส่งแรงดันที่ได้ 0 – 5 โวลต์ ไปยังวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งต่อไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

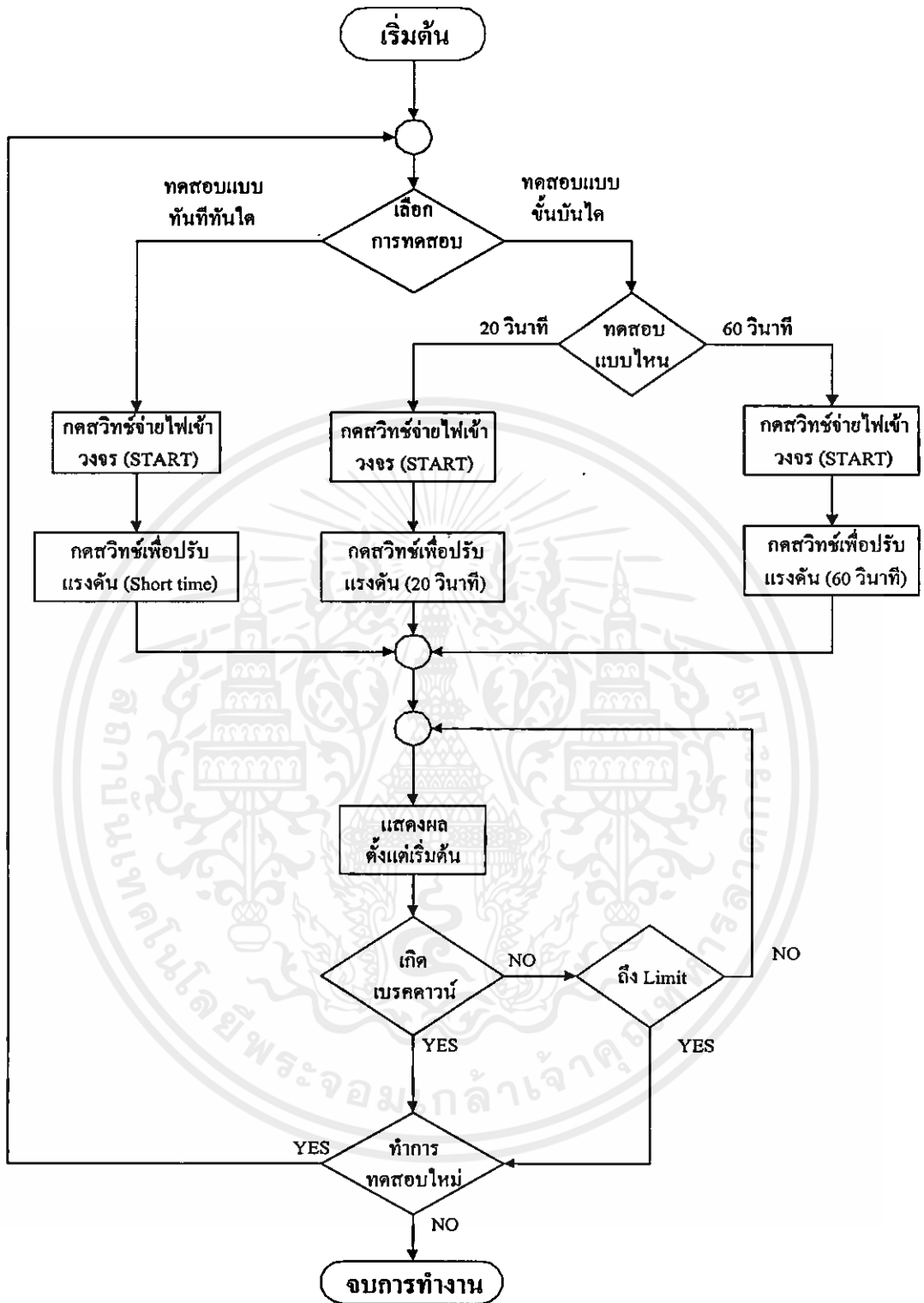
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 บล็อกโคะแกรมการทำงานชุดทดสอบสารถนนวนแข็งแบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 3.12 การทำงานของชุดทดสอบสารถนนวนแข็งเริ่มจากสั่งการทำงานผ่านเมาท์โดยการเลือกคลิกในไอคอนที่ต้องการสั่งการทำงานที่หน้าจอของไมโครคอมพิวเตอร์ เช่น Start , Stop , Short time , Step by step เป็นต้น จากนั้นจะส่งค่าที่ได้ไปยังไอซีเบอร์ 8255 ซึ่งจะรับค่าที่ป้อนเข้ามาแล้วเข้ารหัสส่งสัญญาณที่ได้ออกพอร์ทเป็นค่าลอจิก “1” มีค่าแรงดันไฟฟ้า 5 โวลท์ และลอจิก “0” มีแรงดันไฟฟ้า 0 โวลท์ ตามเงื่อนไขของคำสั่งที่เขียนโปรแกรมไว้ เมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกมาให้กับชุดรีเลย์ถ้าสัญญาณเป็นลอจิก “1” รีเลย์ทำงานส่งผลให้แมกเนติกทำงาน และมอเตอร์ที่หมุนแกนตัวปรับค่าแรงดันให้เพิ่มค่าแรงดันขึ้นผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/100,000 โวลท์ เพื่อป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบสารถนนวนแข็งจนเกิดการเบรกคาวร์นที่สารถนนวนแข็งนั้น เมื่อการเบรกคาวร์นเสร็จสิ้นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนแกนตัวปรับค่าแรงดันจะหมุนปรับแกนตัวปรับแรงดันหมุนกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นเพื่อให้อยู่ในสภาพพร้อมที่จะทำการทดสอบใหม่ ในส่วนของการวัดค่าแรงดันเบรกคาวร์นเมื่อได้ค่าแรงดันเบรกคาวร์นก็จะเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อส่งสัญญาณดิจิตอลที่ได้ไปให้กับไมโครคอมพิวเตอร์ประมวลผลและแสดงผลเป็นกราฟแสดงค่าแรงดันเบรกคาวร์นเทียบกับเวลา

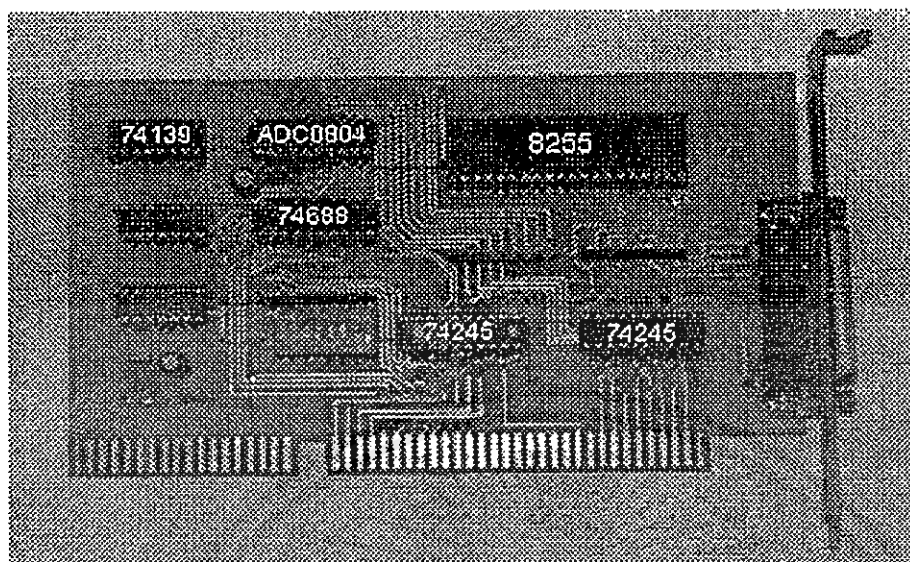
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 โฟลวชาร์ตการทำงานชุดทดสอบสารจนวนแข็งแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 การทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์



รูปที่ 3.14 แผงวงจรการ์ดอินเตอร์เฟส

จะใช้ IC 74688 ต่อร่วมกับ Dip-switch 8 บิต เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าตำแหน่ง Address ของการ์ดอินเตอร์เฟส ให้ติดต่อกับและสามารถทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งจะใช้ IC 74139 ให้แยกการทำงานระหว่าง ADC 0804 กับ IC 8255 ไม่ให้ทำงานพร้อมกัน เพื่อไม่ให้ข้อมูลการรับส่งเกิดการชนกัน เพราะว่า ADC 0804 กับ IC 8255 จะให้บัสข้อมูลชุดเดียวกันในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์

การส่งข้อมูล เมื่อมีการสั่งงานจากโปรแกรม โปรแกรมจะส่งข้อมูลไปยังพอร์ตของคอมพิวเตอร์ จากนั้น IC 74245 จำทำหน้าที่เป็นบัสควบคุมในการรับส่งข้อมูลจากพอร์ตของคอมพิวเตอร์จำนวน 8 บิต และส่งข้อมูลไปยัง IC 8255 เพื่อสั่งงานให้ IC 8255 ส่งค่าออกมาเป็นดิจิทัลโดยมีค่าแรงดันเข้าที่พุทเท่ากับ  $5 V_{cc}$  จะนำค่าเข้าที่พุท  $5 V_{cc}$  นี้ไปควบคุมการทำงานของรีเลย์ในส่วนของชุดควบคุมจนวนแจ้งต่อไป

การรับข้อมูล การ์ดอินเตอร์เฟสนี้จะทำการรับค่าแรงดันมาจากชุดรับแรงดัน จะนำค่าแรงดันเข้าที่พุทที่ได้จากชุดรับแหล่งจ่ายให้กับ ADC 0804 เพื่อแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัลจำนวน 8 บิต โดยมี IC 74245 เป็นบัสข้อมูลในการรับข้อมูลจาก ADC 0804 ที่แปลงเป็นดิจิทัลแล้วส่งไปพอร์ตของคอมพิวเตอร์ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผล และแสดงผลออกจากหน้าจอคอมพิวเตอร์

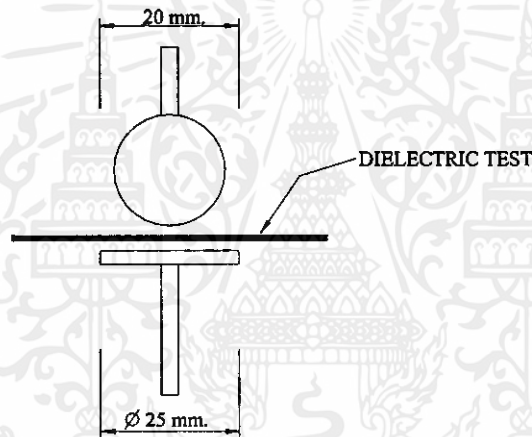
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะริได้อะไรทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบขั้วอิเล็กโทรด และตู้ทดสอบ

การสร้างและออกแบบชุดทดสอบฉนวนของแข็งนั้น จะยึดถือหลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC ที่กำหนดเอาไว้ มาตรฐานที่นำมาใช้ได้แก่ IEC 243-1, IEC 243-2 โดยนำมาเป็นข้อมูลในการจัดทำ

#### 3.2.1 ขั้วไฟฟ้าทดสอบแบบทรงกลม - ระนาบ (Sphere - Disk Electrodes)

ขั้วไฟฟ้าทดสอบชนิดนี้จะมีลักษณะที่คล้ายๆ กับขั้วไฟฟ้าทดสอบแบบทรงกลม - ทรงกลม (Sphere - Sphere) แต่จะแตกต่างกันที่ขั้วไฟฟ้าทดสอบข้างล่างจะมีลักษณะเป็นแผ่น (Disk) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร  $\pm$  1 มิลลิเมตรหนา 2.5 มิลลิเมตร คุณสมบัติการทดสอบของขั้วไฟฟ้า มีคุณสมบัติเหมือนกับการทดสอบของขั้วไฟฟ้าทดสอบแบบ ทรงกลม-ทรงกลม (Sphere - Sphere)



รูปที่ 3.15 ขั้วไฟฟ้าทดสอบแบบทรงกลม-ระนาบ Sphere - Disk

แกนยึดอิเล็กโทรด เป็นตัวยึดอิเล็กโทรด มี 2 ด้าน คือด้านยึดชุดทดสอบ และด้านที่สามารถปรับเลื่อนได้ วัสดุที่ใช้ทำคือทองเหลือง

#### 3.2.2 ตู้ทดสอบ

วัสดุที่ใช้สร้างทำคือวัสดุทนความร้อนสูง สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลง และการเบรกดาวนของฉนวนแข็งขณะทำการทดสอบ

ฝาปิดตู้ทดสอบ ข้างล่างเจาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อรับความร้อนจากฮีตเตอร์ 2 ชุด และมีประตูใช้เปลี่ยนสารฉนวนแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อมีผู้เห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้บริษัทฯ ทราบเพื่อพิจารณาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

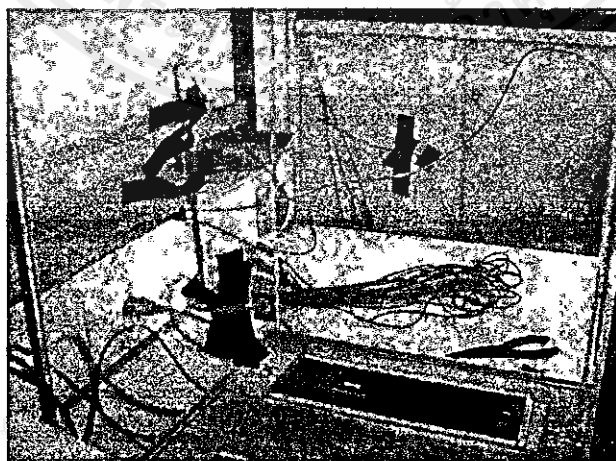
ตู้ทดสอบ สามารถให้ความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิปกติ ถึง 80 °C โดยใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวช่วยให้ ความร้อน มีชุดควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวควบคุมระดับอุณหภูมิ โดยการออกแบบในรัศมี 3.5 เท่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมจะต้องไม่มีโลหะ หรือคาน้ำใดๆ ซึ่งจะได้ 8.75 ซม. แต่ออกแบบเพื่อติดตั้ง ฮีตเตอร์เข้าในตู้ด้วยจึงมีขนาดรวมทั้งหมด 35.7x35.7x42.0 ซม. ดังรูปที่ 3.16

สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงและการเบรคดาวนของฉนวนแข็งขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.16 ตู้ทดสอบสารฉนวนแข็ง

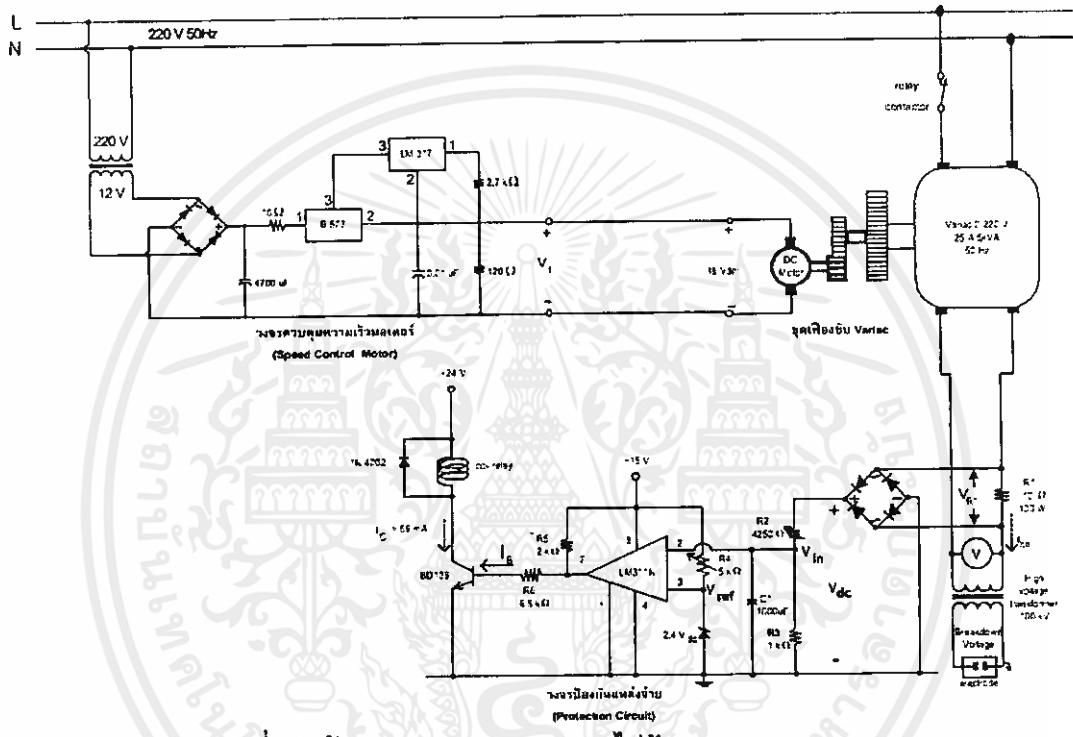
ในการวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบนั้นใช้เครื่องมือวัด Analyzing Recorder YOGOGAWA AR 1100 A วัดทางด้านซ้าย-ขวา และหน้า-หลัง ทั้ง 4 ตำแหน่ง เพื่อบันทึกผลการวัดอุณหภูมิว่ามีค่า โกล้เคียงกันหรือไม่ ส่วนในการควบคุมอุณหภูมิใช้ชุดควบคุม Shinha GCS-300 ซึ่งหน้าสัมผัส ปุ่มกดเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ ถูกต่ออยู่กับรีเลย์ช่วยเพื่อควบคุมจากคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.17 เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบสารฉนวนแข็ง ทั้ง 4 ด้าน

### 3.3 การออกแบบชุดขับเคลื่อน และชุดป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็ง ได้ทำการอ้างอิงข้อมูลบางส่วนจากมาตรฐาน ASTM D877-87 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดสอบ คือ หม้อแปลงแรงดัน อุปกรณ์ตัดวงจรแหล่งจ่าย อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน อิเล็กทรอนิกส์ ชุดทดสอบ ตัวอย่างฉนวนที่ทดสอบ ซึ่งการออกแบบนั้น ทำการออกแบบอุปกรณ์ตัดวงจรแหล่งจ่ายและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันของชุดทดสอบสามารถแสดงเป็นผังการทำงานของชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็ง ดังรูปที่ 3.18

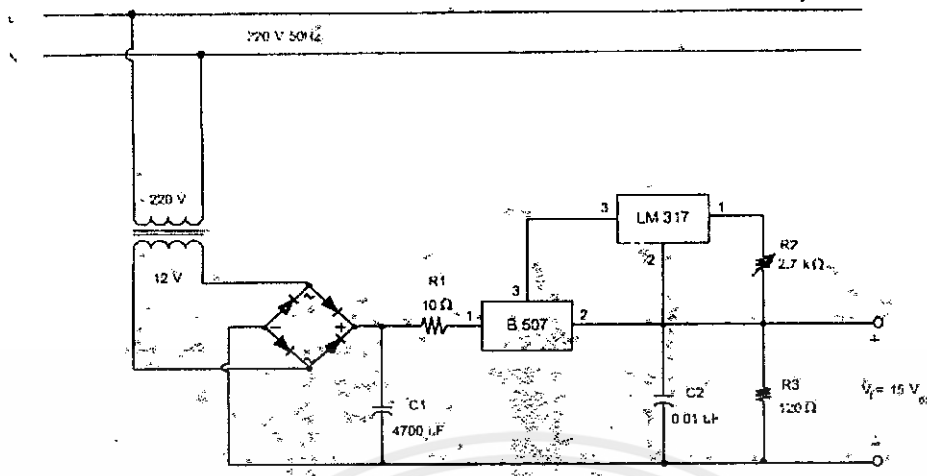


รูปที่ 3.18 วงจรการทำงานของชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็ง

#### 3.3.1 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Speed Control Motor)

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์หมุนขับหม้อแปลงอัตโนมัติที่อัตราการเพิ่มของแรงดันเป็น 3 กิโลโวลต์ต่อวินาที อย่างสม่ำเสมอ รูปวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

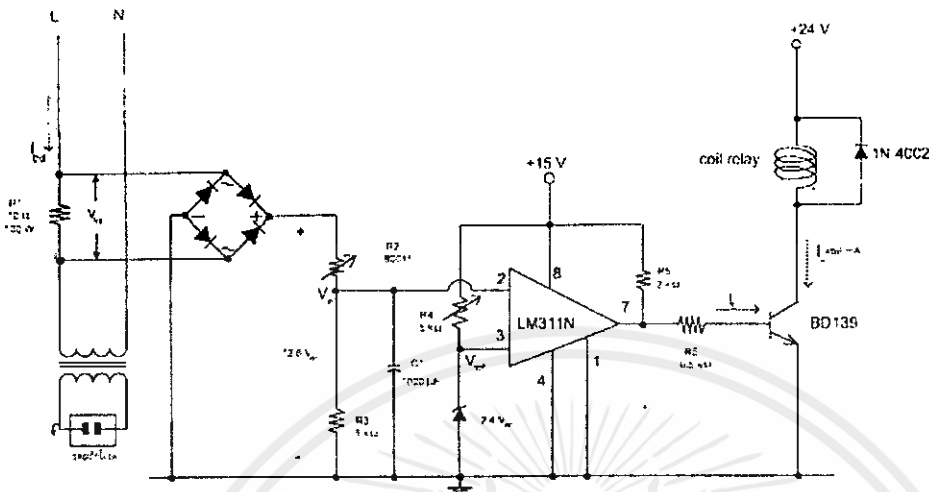
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถควบคุมความเร็วได้หลายวิธี ซึ่งหลักการควบคุมโดยการปรับค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์เป็นวิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ เนื่องจาก การควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยการปรับค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนี้ มีความสะดวก ไม่ยุ่งยากมากนัก ราคาถูก และวิธีการนี้จะใช้การปรับค่าความต้านทานเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ ซึ่งเหมาะกับงานควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วบ่อยๆ วิธีการนี้จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้กับโครงการ

หลักการทำงาน เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงแรงดันแบบลดแรงดัน (Step-down Transformer) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 12 โวลต์ เข้ามาที่วงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ ผ่านคาปาซิเตอร์กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบ LM317 ทำหน้าที่คงค่าแรงดันที่จะออกไปเป็นแรงดันเอาต์พุต โดยมีทรานซิสเตอร์ B507 เป็นตัวขยายกระแส และเมื่อต้องการปรับค่าแรงดันเอาต์พุต สามารถทำได้โดยการปรับความต้านทาน  $R_2$  คือ ถ้าต้องการให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น ต้องทำการปรับค่าความต้านทาน  $R_2$  ให้มีค่าน้อยลงแต่ถ้าต้องการให้แรงดันเอาต์พุตน้อยลง จะต้องทำการปรับค่าความต้านทาน  $R_2$  ให้มีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.3.2 วงจรป้องกันแหล่งจ่าย (Protection Circuit)

วงจรป้องกันแหล่งจ่าย เป็นวงจรที่มีความจำเป็นสำหรับชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายานยนต์ ไม่นับเป็นลิขสิทธิ์ เช่นงานด้านการค้า จนวนแข็ง เนื่องจากว่า เมื่อทำการทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยที่แรงดันดังกล่าว หนึ่งจะ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเบรคความชื้นที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้นเป็นหลายเท่าของกระแสปกติ ถ้าไม่มี วงจรป้องกันแหล่งจ่าย จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้



รูปที่ 3.20 วงจรป้องกันแหล่งจ่าย (Protection Circuit)

วงจรป้องกันแหล่งจ่ายใช้หลักการของการเปรียบเทียบแรงดันอินพุตของออปแอมป์วงจรภายในของออปแอมป์คอมพาราเตอร์จะทำการเปรียบเทียบแรงดันกระแสตรงที่เข้ามาที่ขา 3 ของคอมพาราเตอร์ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงอยู่ ถ้าแรงดันที่ขา 2 น้อยกว่าแรงดันที่ขา 3 เอาท์พุทที่ออกจากคอมพาราเตอร์จะมีสถานะเป็น Low ถ้าแรงดันที่ขา 2 มากกว่าแรงดันที่ขา 3 เอาท์พุทที่ออกจากคอมพาราเตอร์จะมีสถานะเป็น High ซึ่งจะนำสถานะเป็น High นี้ไปใช้งานในการสั่งงานให้รีเลย์ทำงานต่อไป จากรูปที่ 3.19 สามารถออกแบบค่าต่างๆ ได้ดังนี้

LM311N ทำงานและทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะ Saturation ซึ่งค่า  $\beta$  นั้นจะมีค่าต่ำลงดังนั้นกำหนดค่า  $\beta$  ขณะ Saturation  $\cong 35$

รีเลย์ตัวนี้มีกระแสประมาณ 59 mA และ LM311N ที่ใช้เป็นแบบ Open collector output ดังนั้นขณะ LM311N ทำงานทรานซิสเตอร์ ภายในตัวของ LM311N จะ cutoff

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{I_c}{\beta} & (3.1) \\
 &= \frac{59}{35} \\
 &= 1.69 \text{ mA} \\
 &= \frac{(15 - 0.7)}{R_5 + R_6}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 8.46 \text{ k}\Omega \\
 \text{ฉะนั้นเราจึงเลือกใช้} \\
 R_5 &= 2 \text{ k}\Omega \\
 R_6 &= 6.5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

การหาขนาดของ  $R_1$

เนื่องจากต้องการออกแบบวงจรป้องกันแหล่งจ่ายให้ทำงานที่กระแสจากการทดสอบประมาณ 0.6 ถึง 3.0 A ให้  $V_{in} = V_{ref} = 2.4 \text{ V}$  ปรับ  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $V_1$  คือแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดเท่ากับ 0.7 V

$$I_{R3} = \frac{V_{in}}{R} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
 I_{R3} &= \frac{2.4}{1 \times 10^3} \\
 &= 2.4 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$V_{R2} = I_{R3} \times R_2 \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
 V_{R2} &= 2.4 \text{ mA} \times 10 \text{ k}\Omega \\
 &= 24 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= 2.4 + 24 \\
 &= 26.4 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_m &= \frac{V_{dc}}{0.636} + 2V_T \\
 &= \frac{26.4}{0.636} + (2 \times 0.7) \\
 &= 42.91 \text{ V}
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \\
 &= \frac{42.91}{\sqrt{2}}
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{V_{rms}}{I_{3A}} \\
 &= \frac{30.34}{3}
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทำการออกแบบให้  $R_1$  ทนกระแส 3 A ดังนั้น  $R_1$  ต้องมีพิกัดกำลัง (watt) ดังนี้

$$P = I^2 \times R \quad (3.7)$$

$$= 3^2 \times 10$$

$$= 90 \text{ W}$$

เมื่อต้องการให้วงจรทำงานที่กระแส 0.6 A

$$V_{R1} = I \times R_1 \quad (3.8)$$

$$V_{R1} = 0.6 \times 10$$

$$= 6.0 \text{ V}$$

$$V_m = \sqrt{2} \times 6.0$$

$$= 8.49 \text{ V}$$

$$V_{dc} = 0.636(V_m - 2V_T) \quad (3.9)$$

$$= 0.636(8.49 - (2 \times 0.7))$$

$$= 4.5 \text{ V}$$

$$V_{R2} = 4.5 - 2.4$$

$$= 2.1 \text{ V}$$

$$V_{R2} = I_{R3}$$

$$= \frac{2.4}{1 \times 10^3}$$

$$= 2.4 \text{ mA}$$

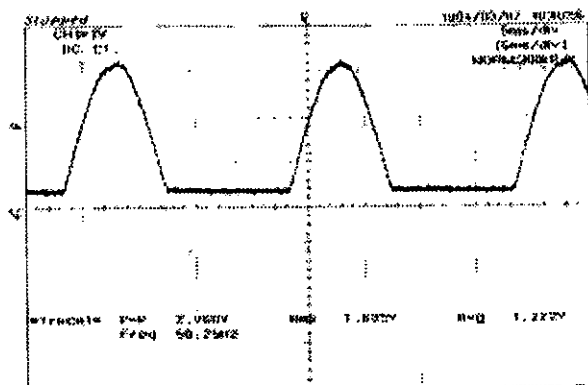
$$R_2 = \frac{2.1}{2.4 \text{ mA}}$$

$$= 875 \Omega$$

ดังนั้นเมื่อต้องการให้วงจรทำงานที่กระแส 0.6 A ต้องปรับ  $R_2$  875  $\Omega$

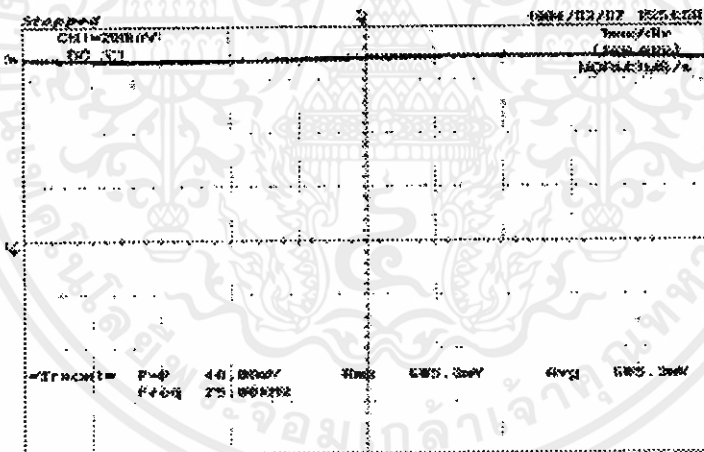
หลักการการทำงานของวงจรป้องกันแหล่งจ่ายคั้งที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ซึ่งสามารถอธิบายในแต่ละส่วนของวงจรได้โดยละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 5 โวลต์ ผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์จะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกจากวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ เป็นสัญญาณฟลูวเฟที่ยังไม่เรียบออกมาดังรูปที่ 3.21



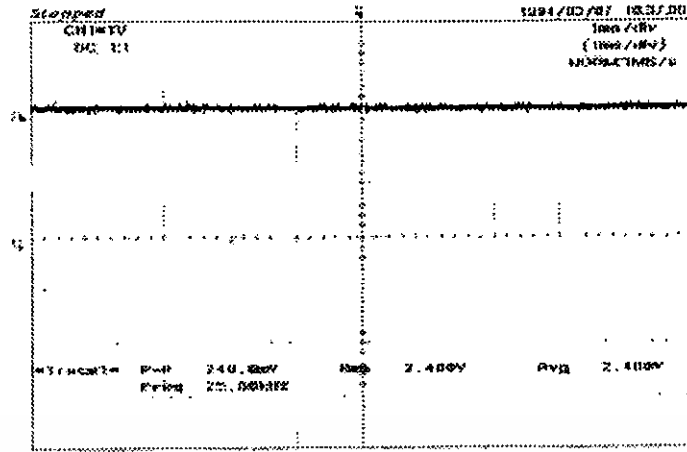
รูปที่ 3.21 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ไม่มี C ฟิลเตอร์

ส่วนที่ 2 แรงดันกระแสตรงที่ได้ออกมา นี้ จะผ่านวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน  $R_2$  ที่ปรับค่าได้ กับความต้านทาน  $R_3$  แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกมา ยังไม่เรียบพอที่จะนำมาใช้งานได้ จึงต้องใส่ C ฟิลเตอร์เพื่อทำให้สัญญาณที่ได้ออกมาเป็นกระแสตรงที่เรียบมากขึ้น ซึ่ง C ที่ใส่ควรจะมีค่ามาก นั่นหมายถึงว่า การคายประจุจะใช้เวลานานขึ้น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกมาก็จะเรียบมากขึ้น ดังรูปที่ 3.22



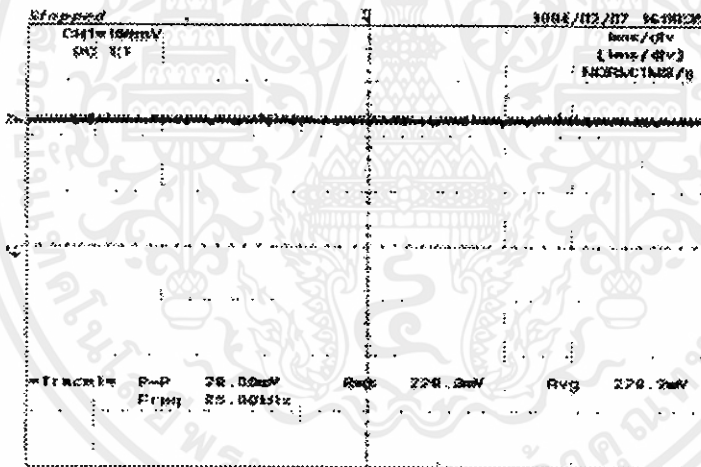
รูปที่ 3.22 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรแบ่งแรงดันที่มี C ฟิลเตอร์กรองแรงกันให้เรียบ

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากวงจรแบ่งแรงดันเป็นแรงดันกระแสตรงที่เรียบสามารถนำมาใช้งานได้ในส่วนที่ 3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้จากจุด  $V_{in}$  ในรูปวงจรป้องกันแหล่งจ่าย จะนำไปป้อนให้ขา 2 ของออปแอมป์คอมพาราเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงจากจุด  $V_{ref}$  ของวงจรป้องกันแหล่งจ่าย ที่ป้อนให้กับขา 3 ของคอมพาราเตอร์ รูปสัญญาณของแรงดันอ้างอิงจะเป็นดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สัญญาณแรงดันอ้างอิง จากจุด  $V_{ref}$  ในวงจรป้องกันแหล่งจ่าย

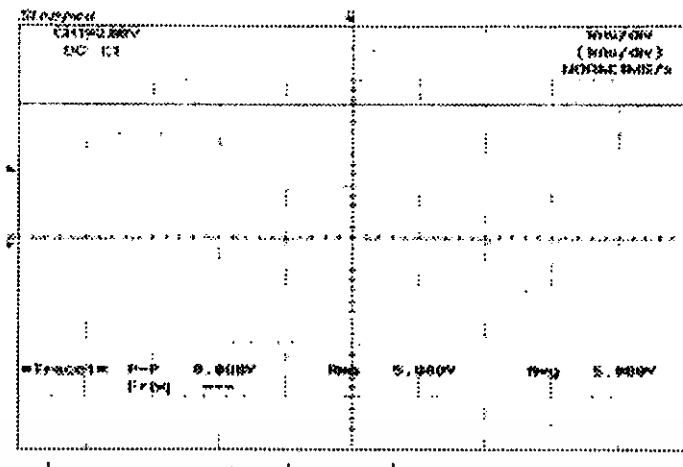
ออปแอมป์คอมพาราเตอร์ เบอร์ LM311N จะทำการเปรียบเทียบแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามาทางขา 2 และขา 3 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดันอินพุตแล้ว ถ้าค่าของแรงดันที่ขา 2 มีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขา 3 ทรานซิสเตอร์ภายในตัวคอมพาราเตอร์ จะทำงานในสถานะ saturation มีรูปสัญญาณที่วัดออกมาได้เป็นสัญญาณ  $V_{out}$  ดังรูปที่ 3.24



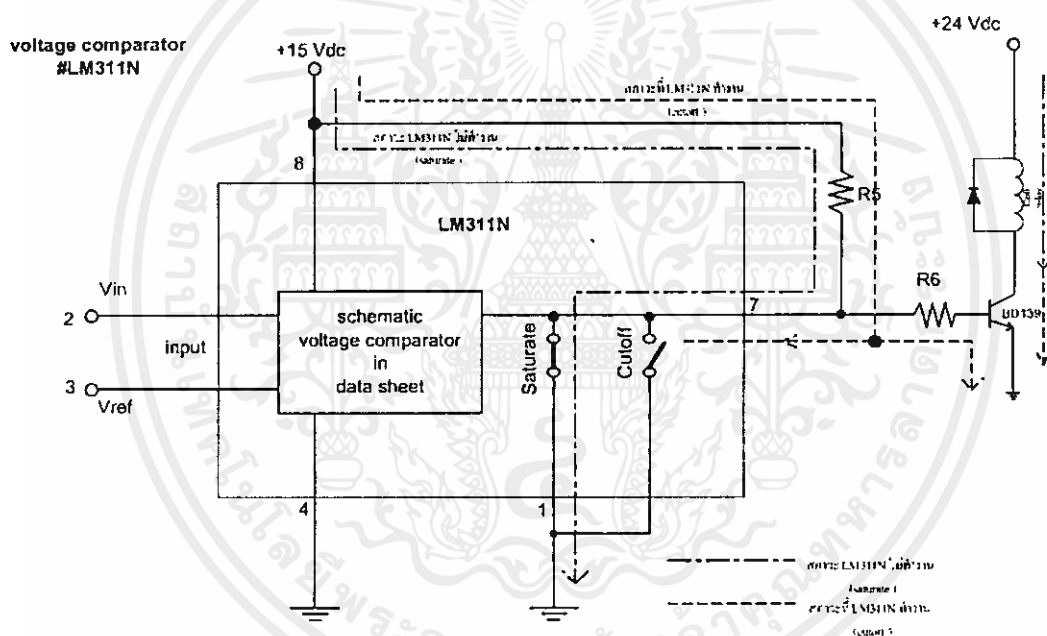
รูปที่ 3.24 แรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันอ้างอิงที่ขา 3

และในกรณีที่ แรงดันที่ป้อนให้ขา 2 มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 วงจรภายในคอมพาราเตอร์ทำการเปรียบเทียบ ผลที่ได้คือจะทำให้ทรานซิสเตอร์ในคอมพาราเตอร์ทำงานในสถานะ Cutoff ซึ่งมีรูปสัญญาณที่วัดออกมาได้เป็น  $V_{out}$  ดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันที่ขา 2 มากกว่าแรงดันอ้างอิงที่ ขา 3



รูปที่ 3.26 การทำงานของออปแอมป์คอมพาราเตอร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงดัน  $V_{in}$  กับ  $V_{ref}$

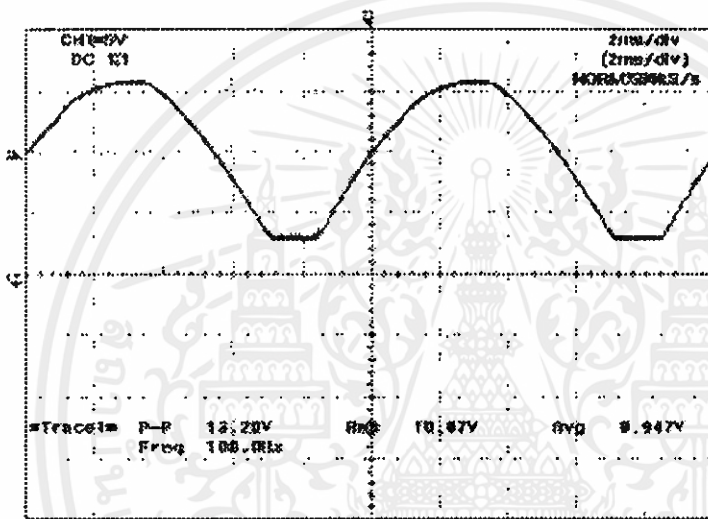
ทำให้มีแรงดันที่ความต้านทาน  $R_5$  และ  $R_6$  และทำให้มีกระแสแอสไปทริกขาเบสของทรานซิสเตอร์ BD139 ให้คีย์รีเลย์ทำงาน คัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบ

ความต้านทาน  $R_2$  ในวงจรป้องกันแหล่งจ่าย เป็นตัวปรับค่าแรงดัน  $V_{dc}$  เพื่อแบ่งแรงดัน  $V_{in}$  ที่จะป้อนให้กับขา 2 ของออปแอมป์ รูปคลื่นสัญญาณการปรับค่าความต้านทาน  $R_2$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

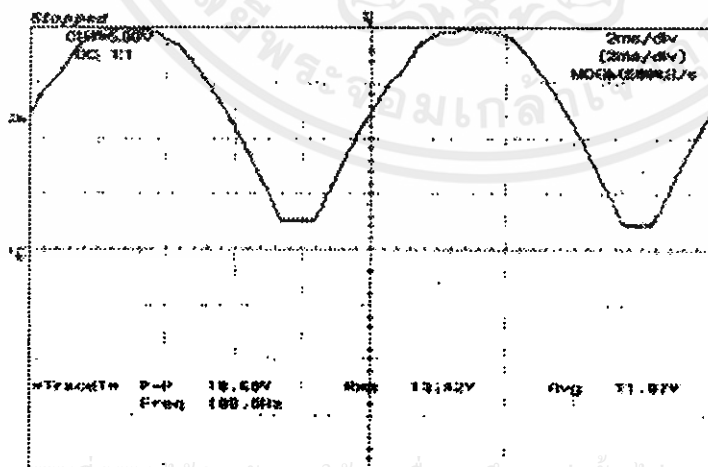
ตารางที่ 3.2 การปรับตั้งความต้านทาน  $R_2$

กระแส (Amp)	ความต้านทาน $R_2$ ( $\Omega$ )	แรงดัน $V_{dc}$ ค่าวัดได้ (Volt)	แรงดัน $V_{dc}$ ค่าคำนวณ (Volt)
0.8	1627	6.30	6.30
1.0	2376	7.30	8.10
1.5	4250	11.87	12.63

1. แสดงรูปคลื่นสัญญาณเมื่อทำการปรับตั้งความต้านทานค่าต่างๆ



รูปที่ 3.27 สัญญาณที่ค่าความต้านทาน  $R_2$  เท่ากับ 2376 โอห์ม



รูปที่ 3.28 สัญญาณที่ค่าความต้านทาน  $R_2$  เท่ากับ 4250 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การยืมหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบเฟืองของชุดปรับแรงดัน

เนื่องจากการออกแบบต้องการให้แกนของหม้อแปลงอัตโนมัติ สามารถหมุนไปกลับได้เพื่อเพิ่มลดแรงดันที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ ในการออกแบบมอเตอร์ที่ใช้ขับเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (แบบ Permanent magnet) ซึ่งมีความเร็วคงที่ อยู่ที่ 26 รอบ/นาที แต่ในการขับหม้อแปลงอัตโนมัติต้องการให้แรงดันเพิ่มขึ้นประมาณ 3 กิโลโวลต์/วินาที ในการออกแบบจะใช้เฟืองขับ 2 ตัวกับเฟืองทด 1 ตัว แรงดันเอาต์พุทของชุดปรับแรงดันจะจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง จะคิดที่ 100 กิโลโวลต์ ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง (220 โวลต์/100 กิโลโวลต์)

#### 3.4.1 เฟืองขับที่ติดกับแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นเฟืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13 มิลลิเมตร. ความหนาของเฟืองมีขนาด 10 มิลลิเมตร. ความหนาของฟันเฟืองมีขนาด 1 มิลลิเมตร. เฟืองขับที่ติดอยู่กับแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีจำนวนฟันเฟือง 16 ฟัน

#### 3.4.2 เฟืองทด

เป็นเฟืองทดที่มีอัตราส่วนการทดประมาณ 3.38:1 และเฟืองทดด้านที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับแกนโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 113 มิลลิเมตร. ความหนาของเฟืองมีขนาด 10 มิลลิเมตร

จะได้ว่าในเวลา 1 นาที มอเตอร์หมุนไป 26 รอบ หรือ

$$26 \times 16 = 416 \text{ ฟันเฟือง}$$

และจะได้ว่าเมื่อมอเตอร์หมุนไป 26 รอบ ทำให้เฟืองทดด้านที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับแกนโรเตอร์หมุนได้เท่ากับ

$$\frac{416}{142} = 2.93 \text{ รอบ}$$

ส่วนเฟืองทดด้านที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับหม้อแปลงอัตโนมัติ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร. ความหนาของเฟืองมีขนาด 15 มิลลิเมตร เฟืองทดด้านนี้มีจำนวนซี่เฟืองเท่ากับ 42 ฟันเฟือง

จะได้ว่าในเวลา 1 นาที มอเตอร์หมุนไป 26 รอบ ทำให้เฟืองทดด้านที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับหม้อแปลงอัตโนมัติหมุนไปได้เท่ากับ

$$2.93 \times 42 = 123.00 \text{ ฟันเฟือง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 เฟืองที่ติดกับแกนของหม้อแปลงอัตโนมัติ

เป็นเฟืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 66 มิลลิเมตร ความหนาของเฟืองมีขนาด 10 มิลลิเมตร ความหนาของฟันเฟืองมีขนาด 1 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างฟันเฟืองมีขนาด 1.5 มิลลิเมตร. มีฟันเฟืองทั้งหมดเท่ากับ 80 ฟัน

ต้องการแรงดันที่ 3.00 กิโลโวลต์/วินาที

$$\frac{100000}{3000} = 3.00 \text{ กิโลโวลต์/วินาที ของหม้อแปลงแรงสูง}$$

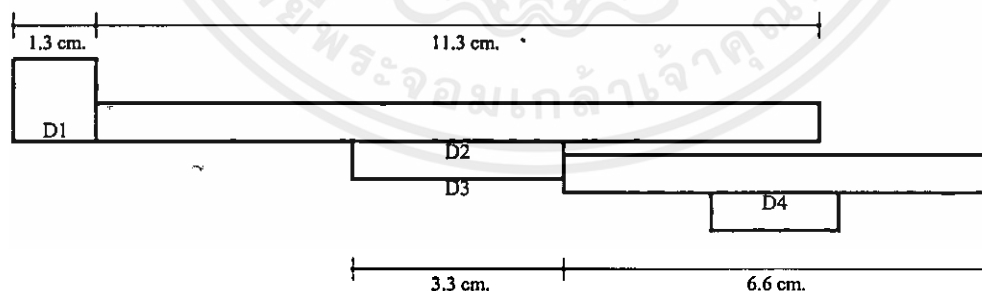
ในเวลา 1 นาที มอเตอร์หมุนไป 26 รอบ จะทำให้หม้อแปลงอัตโนมัติหมุนไปได้เท่ากับ

$$\frac{123}{80} = 1.53 \text{ รอบ/นาที}$$

หม้อแปลงอัตโนมัติมีพิกัดแรงดัน 260 โวลต์ เมื่อหม้อแปลงอัตโนมัติหมุนไปหนึ่งนาทีจะแรงดันที่วัดได้ประมาณ 260 ดังนั้นที่ 220 โวลต์ ของหม้อแปลงอัตโนมัติ (ได้จาก 100 กิโลโวลต์ ของพิกัดหม้อแปลงแรงสูง) จะใช้เวลาในการหมุนเท่ากับ

$$\left(\frac{220}{260}\right) / 1.53 \times 60 = 33.18 \text{ วินาที}$$

เมื่อทำการเพิ่มแรงดันให้หม้อแปลงอัตโนมัติไปเรื่อยๆ โดยไม่มีการหยุดจนถึงพิกัดแรงดัน 220 โวลต์ ของหม้อแปลงอัตโนมัติ หรือ 100 กิโลโวลต์ ของพิกัดหม้อแปลงแรงสูง จะใช้เวลาเพียง 33.18 วินาที



### รูปที่ 3.29 ลักษณะของเฟืองที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ D1 คือ เฟืองขับที่ติดกับแกน โรเตอร์ของคีมอเตอร์  
 D2 คือ เฟืองทดค้ำที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับแกน โรเตอร์  
 D3 คือ เฟืองทดค้ำที่ใช้ขับร่วมกับเฟืองที่ติดกับหม้อแปลงอัตโนมัติ  
 D4 คือ เฟืองที่ติดกับแกนของหม้อแปลงอัตโนมัติ

### 3.5 ขั้นตอนในการหาค่าแรงบิดของหม้อแปลงอัตโนมัติ (Variac)

$$T = rxF \tag{3.10}$$

$$F = mxg \tag{3.11}$$

- เมื่อ  $T$  คือ แรงบิดของหม้อแปลงอัตโนมัติ (N-m)  
 $r$  คือ ระยะห่างระหว่างหม้อแปลงอัตโนมัติกับน้ำหนัก (m)  
 $F$  คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักและแรงโน้มถ่วงของโลก (N)  
 $m$  คือ น้ำหนักที่ชั่ง (kg)  
 $g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s)

วิธีการหาแรงบิดคือ นำเชือกมาผูกกับหม้อแปลงอัตโนมัติกับรอกโดยมี น้ำหนักถ่วงไว้ ซึ่งจะทำการเพิ่มน้ำหนักไปเรื่อยๆ จนกว่าหม้อแปลงอัตโนมัติจะเริ่มหมุน เมื่อหม้อแปลงอัตโนมัติเริ่มหมุนแสดงว่าน้ำหนัก (Mass) ที่ได้นำมาคูณกับแรงโน้มถ่วงของโลก ก็จะได้แรงสูงสุด ( $F_{MAX}$ ) ที่หม้อแปลงอัตโนมัติจะหมุนต่อไปได้ และเมื่อนำค่าแรงสูงสุดมาคูณกับระยะทางจากหม้อแปลงอัตโนมัติกับรอก ( $r$ ) ก็จะได้ แรงบิดสูงสุด ( $T_{MAX}$ ) เพื่อนำไปหาขนาดของมอเตอร์ได้ต่อไป

ในการทดสอบใช้ค่า  $r = 0.5$  เมตร ได้ค่าน้ำหนักที่ทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเริ่มหมุน  $m = 2.3$  กิโลกรัม ดังนั้น

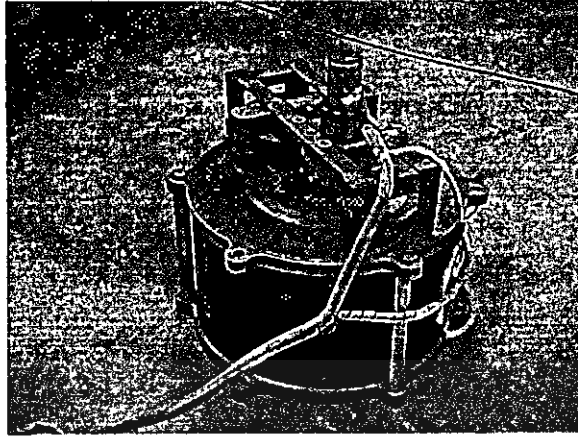
$$\begin{aligned} F &= mxg \\ &= 2.3 \times 9.81 \\ &= 22.563 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= rxF \\ &= 0.5 \times 22.563 \end{aligned}$$

$$\approx 11.28 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นมอเตอร์ที่ใช้หมุนหม้อแปลงอัตโนมัติต้องมีขนาดค่าของแรงบิด  $T \geq 11.28 \text{ N} \cdot \text{m}$



รูปที่ 3.30 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงติดตั้งบนชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

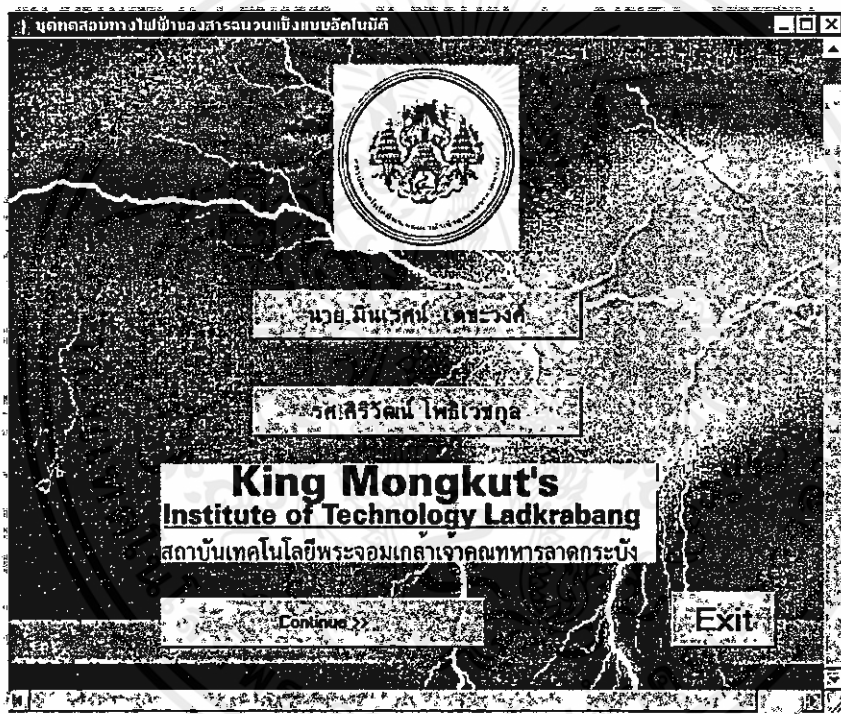


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ขั้นตอนการใช้โปรแกรม

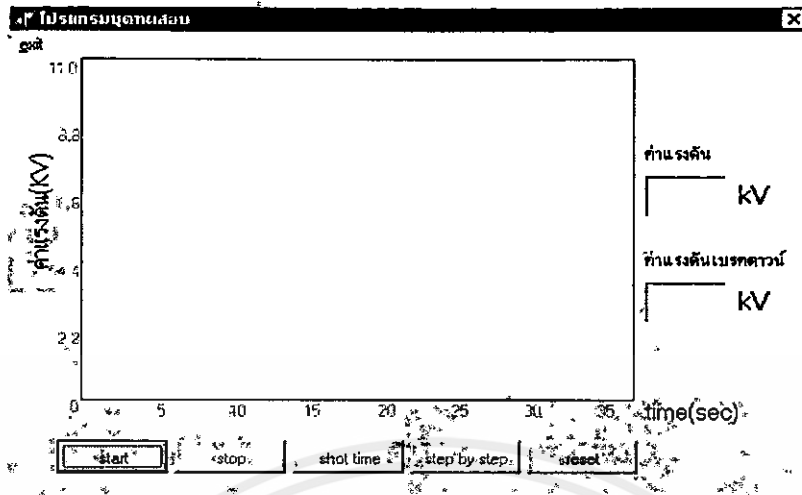
การเขียนโปรแกรมในโครงการชุดนี้จะเขียนด้วยโปรแกรมเดลไฟต์ เวอร์ชัน 5 ซึ่งโปรแกรมนี้จะใช้ความรู้เบื้องต้นของ โปรแกรมปาสคาล และใช้รูปภาพเป็นชุดคำสั่งต่างๆของโปรแกรม โดยเริ่มต้นเปิดโปรแกรม จะเป็นดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเป็นหน้าโปรแกรม ถ้าจะให้ทำงานต่อไปก็ให้ กดที่ปุ่ม “ Continue ” แต่ถ้าจะออกจากโปรแกรมก็ให้ กดปุ่ม “ Exit ”



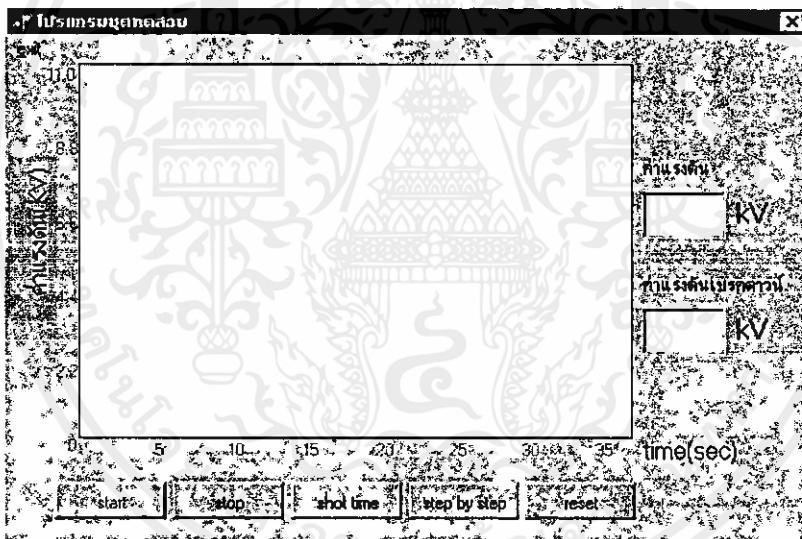
รูปที่ 4.1 ภาพหน้าจอตอนเริ่มเข้าโปรแกรม

เมื่อทำการกดปุ่ม “ Continue ” โปรแกรมก็จะสั่งให้แสดงภาพต่อไปดังรูปที่ 4.2 โดยในหน้าจอนี้จำเป็นต้องทำการกดปุ่ม “ Start ” ที่เป็นตัวหนังสือเข้มก่อนซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ (Start)



รูปที่ 4.3 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ (Stop)

เมื่อหน้าจอเป็นดังรูปที่ 4.3 กดปุ่มอื่นๆ ได้ การกดปุ่ม “ Stop ” จะเป็นการกลับไปเริ่มต้นที่รูป 4.2 ใหม่อีกครั้ง แต่ถ้ากดที่ปุ่ม “ short time ” โปรแกรมเมื่อได้รับคำสั่งก็จะทำการรับค่าแรงดันจากชุดทดลองมาแปลงเป็นรหัสดิจิทัล มาประมวลผลซึ่งค่าที่ได้รับมานำมาเข้าสู่ตรรก

นี้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

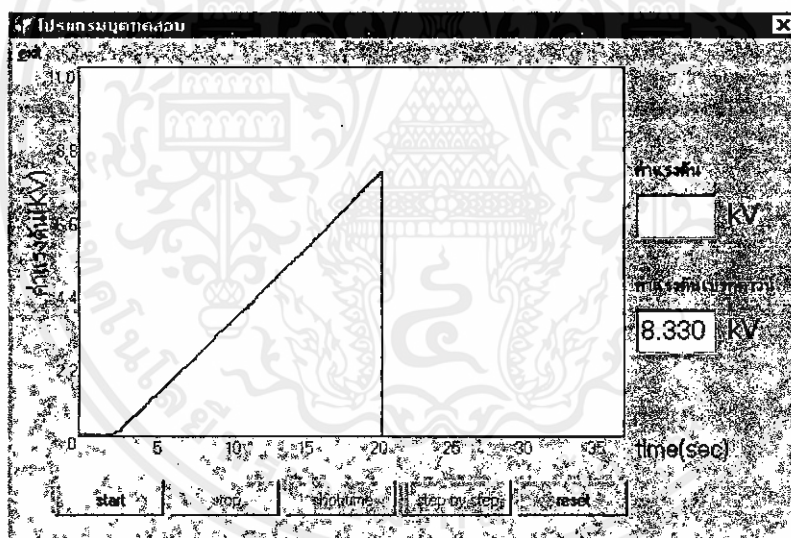
$$V = \frac{\left[ \sqrt{2} \times a V_{in} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right]}{10} \quad (kV) \quad (4.1)$$

$a$  คือ ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลง

$V_{in}$  คือ ค่าแรงดันที่ได้รับ 0 ถึง 5 Vdc ที่แปลงมาจากกรหัสดิจิตอลแล้วหารด้วย 255

$R_1, R_2$  คือ ค่าความต้านทานจากชุดแบ่งแรงดันเป็น ( $\Omega$ )

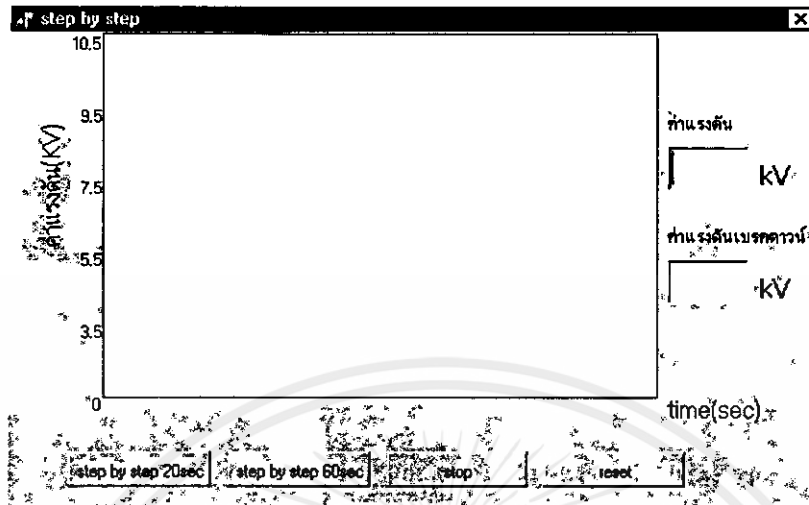
ซึ่งค่าสเกลแรงดันนั้นจะได้จากการกำหนดช่องแสดงรูปภาพซึ่งแบ่งเป็น 255 ช่อง และแบ่งออกเป็น 5 ช่องย่อยซึ่งแทนค่า 0 ถึง 5 Vdc ที่ได้รับเข้ามา ส่วนของค่าแกนเวลานั้นจะใช้ค่าที่ทำการหน่วงเวลาในการพล็อตกราฟมาเป็นส่วนในการคำนวณแบ่งช่องค่าแกนเวลา เมื่อได้รับค่าแรงดันจนถึงค่าเบรคควอร์แล้วจึงกดปุ่ม “ stop ” กราฟจึงจะหยุด plot ส่วนปุ่ม “ reset ” นั้นจะเป็นการลบกราฟเดิมให้อยู่ในสภาพพร้อมที่จะใช้งานอีกครั้ง ดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลที่ได้จากการทดลอง (short time)

ในการทดลอง Step by step นั้นจะทำการกดปุ่ม “ start ” ก่อนเหมือน กับ short time ก่อนแล้วจึงไปกดปุ่ม “ step by step ” แล้วจะได้ผลดังรูป 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หน้าต่างหลักที่ใช้ในการทดสอบ (Step by Step)

ในหน้าจอนี้จะให้เลือกว่าจะทำการทดสอบแบบ 20 วินาที หรือ แบบ 60 วินาที โดยทำการ กดปุ่ม “ Step by step 20 sec ” หรือ กดปุ่ม “ step by step 60 sec ” ซึ่งเป็นการตั้งรรับค่าแรงดันเพื่อนำมาทำการประมวลผลตามสูตรที่ 4.1 ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนวิธีจะมีขั้นตอนเหมือนกันแต่จะแตกต่างกันที่ค่าหน่วยเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

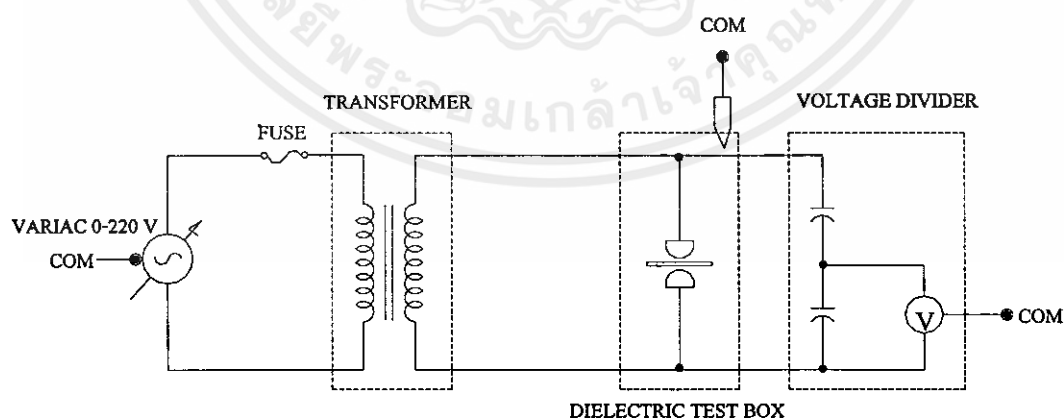
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 คำนำ

การทดลองสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทดสอบค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ของสารฉนวนแข็ง โดยได้ทำการสร้างชุดควบคุมระบบอัตโนมัติสำหรับการทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับของสารฉนวนแข็ง เพื่อที่จะนำมาใช้ในการควบคุมการป้อนแรงดันแรงสูงให้กับชุดทดสอบฉนวนแข็ง ซึ่งจะมีการทดสอบแบบทันทีทันใด และแบบปรับค่าแบบขั้นบันได และนำค่าแรงดันเบรกความถี่ที่ได้มาประมวลผลทางคอมพิวเตอร์

#### 5.2 วัตถุประสงค์

- 5.2.1 เพื่อประยุกต์การควบคุมการทำงานและประมวลผล โดยใช้คอมพิวเตอร์
- 5.2.2 เพื่อทดสอบหาค่าแรงดันเบรกความถี่ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของสารฉนวนไม้ก้ำขนาด 4 ซม. x 4 ซม. หนา 0.13 มม.
- 5.2.3 เพื่อเป็นการพัฒนาชุดทดสอบให้ทันสมัยยิ่งขึ้น
- 5.2.4 เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการทดสอบ
- 5.2.5 เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงดันเบรกความถี่ในแบบต่างๆ ได้ง่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1 วงจรรวมที่ใช้ในการทดสอบ

### 5.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 5.3.1 ชุดควบคุมการปรับแรงดันโดยไมโครคอมพิวเตอร์
- 5.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/100,000 โวลต์, 50 เฮิร์ต
- 5.3.3 หม้อแปลงไฟฟ้า Isolate 1 เฟส 220/220 โวลต์, 50 เฮิร์ต
- 5.3.4 ตู้ทดสอบสารฉนวนแข็ง ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม – ระบาย
- 5.3.5 สารฉนวนแข็ง ไมก้า
- 5.3.6 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

### 5.4 ข้อควรระวังในการทดลอง

- 5.4.1 ควรสวมรองเท้าหุ้มส้นทุกครั้งที่จะทำการทดสอบ
- 5.4.2 เพื่อป้องกันอุปกรณ์ควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายควรนำหม้อแปลงไฟฟ้า Isolate 1 เฟส 220/220 โวลต์ มาต่อก่อนเข้าอุปกรณ์ควบคุมและคอมพิวเตอร์เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าในส่วนของภาคแรงสูงนั้น ไหลย้อนกลับไปทำให้อุปกรณ์ควบคุมเสียหาย
- 5.4.3 ควรตรวจสอบสายกราวด์ให้เรียบร้อย เนื่องจากแรงดันที่ใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
- 5.4.4 ควรทำการดิสชาร์จอุปกรณ์ทุกครั้งก่อนที่จะเข้าไปจับอุปกรณ์นั้นเพื่อป้องกันไม่ให้มีประจุค้างในอุปกรณ์นั้น
- 5.4.5 ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการให้เข้าใจอย่างละเอียด
- 5.4.6 ควรจัดอุปกรณ์ควบคุมให้อยู่ห่างจากเครื่องทดสอบฉนวน เพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเบรคควาน์มารบกวนระบบควบคุมได้
- 5.4.7 ต้องมีความระมัดระวังให้มาก

### 5.5 ขั้นตอนการทดลอง

- 5.5.1 ศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบฉนวนให้เข้าใจและสามารถใช้งานได้
- 5.5.2 ทำความสะอาดขั้วอิเล็กโทรดให้มีสภาพที่พร้อมทดสอบ
- 5.5.3 จัดวางสารไดอิเล็กตริกให้แนบชิดกับขั้วอิเล็กโทรด
- 5.5.4 วัดสภาวะแวดล้อมต่างๆ และบันทึกผล
- 5.5.5 เลือกทำการทดสอบแบบต่าง ๆ โดยปรับปุ่มหมายเลข 1 ทดสอบแบบทันทีทันใด , หมายเลข 2 ทดสอบแบบปรับค่าแบบขั้นบันได 20 วินาที, หมายเลข 3 ทดสอบแบบปรับค่าแบบขั้นบันได 60 วินาที ที่ชุดทดสอบก่อน
- 5.5.6 เริ่มทำการทดสอบแบบทันทีทันใด โดยใช้โปรแกรมชุดควบคุมอัตโนมัติขั้นตอนการใช้

#### โปรแกรมคูบทที่ 4

5.5.7 บันทึกค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่ได้จากเครื่องมือวัดและโปรแกรม

5.5.8 เมื่อเกิดการเบรกคาวน์แล้ว ให้รอแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหมุนกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้นก่อน แล้วค่อยทำการทดลองต่อ

5.5.9 คำนวณหาค่า % ผิดพลาดของแรงดันเบรกคาวน์ที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับเครื่องมือวัด

5.5.10 กลับไปทำข้อ 5.2.2 ใหม่ โดยการเปลี่ยนชนิดของสารไดอิเล็กตริกแล้วทำการทดสอบแบบขั้นบันได 20 วินาที และ 60 วินาที ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 ผลการทดลอง

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์สารฉนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 27°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92%

วิธีการทดสอบ                    ทันทันทันใด (Short time Breakdown test)

ชุดอิเล็กโทรดประเภท        ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ                    กระดาษไมก้าเคลือบฟิล์ม

ขนาด                                4 ซม. X 4 ซม.

หนา                                 0.13 มม.

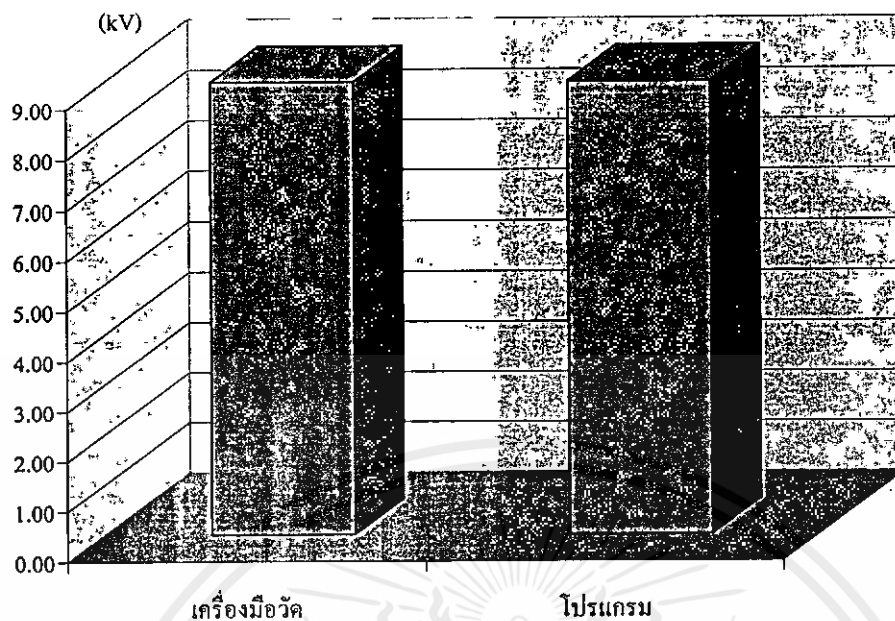
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทันทันใด (Short time Test)

จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	8.230	8.296	0.802
2	8.913	8.990	0.864
3	8.492	8.523	0.365
4	8.870	8.914	0.496
5	8.341	8.383	0.504
6	8.723	8.804	0.929
7	8.494	8.540	0.542
8	8.758	8.782	0.274
9	8.617	8.666	0.569
10	8.320	8.336	0.192
ค่าเฉลี่ย	8.576	8.623	

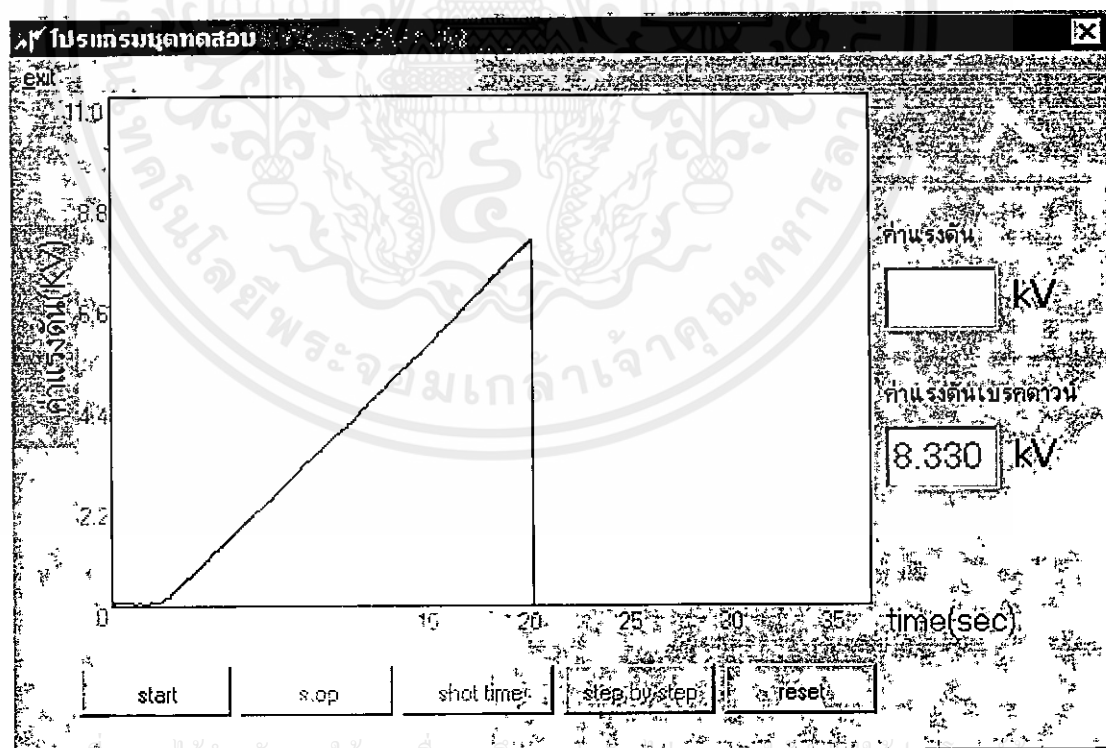
$$\%error = \left| \frac{8.623 - 8.576}{8.623} \right| \times 100\%$$

$$\%error = 0.545\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก  $\bar{X} = 8.623$  คัด,  $SD = 0.245$  จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีที่อุณหภูมิ  $27^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.3 กราฟลักษณะและค่าแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีที่อุณหภูมิ

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกควาน์สารฉนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 27°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92 %

วิธีการทดสอบ : ขั้นตอนใด 20 วินาที (Step by Step Breakdown test 20 sec)

ชุดอิเล็กโทรดประเภท ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ กระจกชายไมก้าเคลือบฟิล์ม

ขนาด 4 ซม. X 4 ซม.

หนา 0.13 มม.

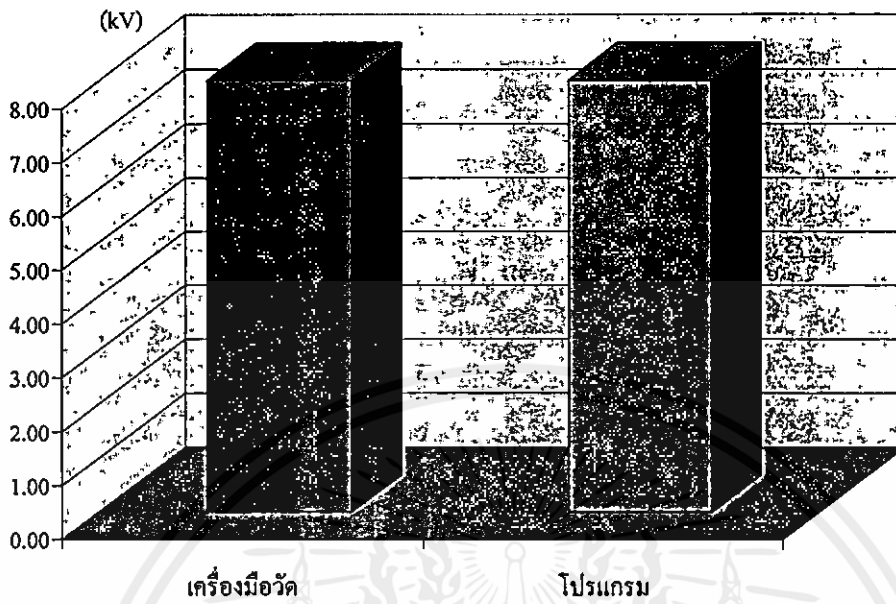
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกควาน์แบบขั้นตอนใด 20 วินาที

จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกควาน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	6.830	6.744	1.259
2	7.296	7.200	1.316
3	7.120	7.000	1.685
4	6.823	6.790	0.484
5	7.361	7.228	1.807
6	7.256	7.165	1.254
7	7.371	7.369	0.027
8	7.688	7.587	1.314
9	7.537	7.540	0.040
10	7.056	7.025	0.439
ค่าเฉลี่ย	7.234	7.165	

$$\%error = \left| \frac{7.165 - 7.234}{7.165} \right| \times 100\%$$

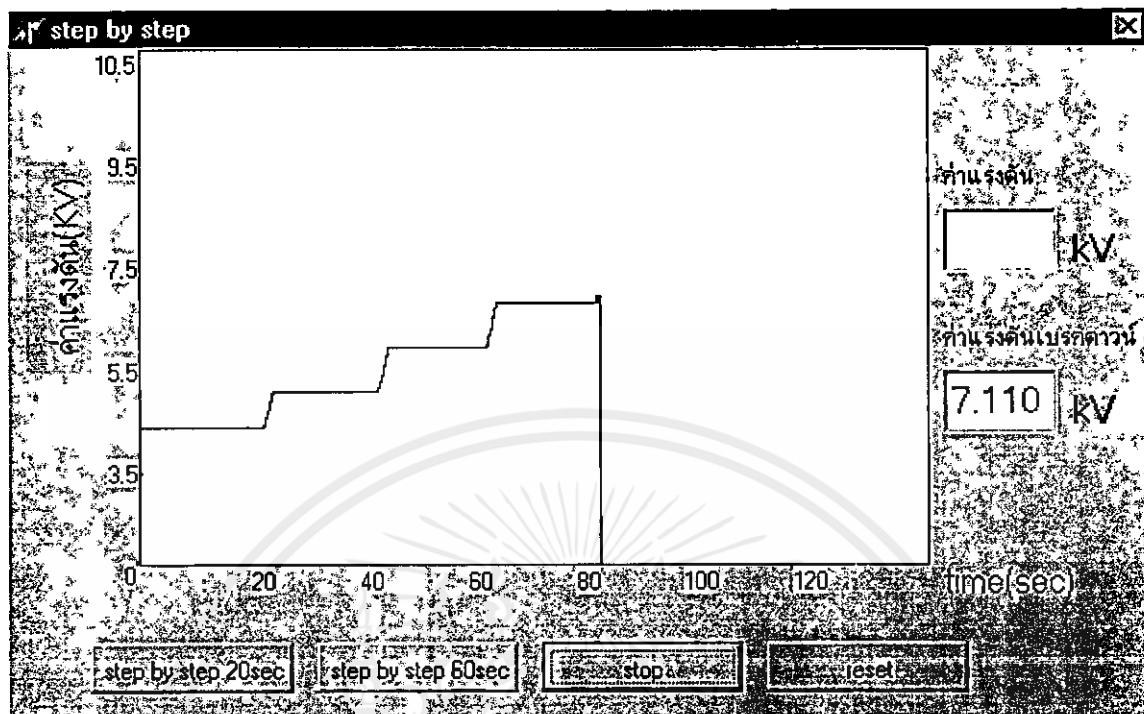
$$\%error = 0.963\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $\bar{X} = 7.165$  รับค่า  $SD = 0.284$  ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟแรงดันเบรกคาวน์แบบขั้นบันได 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟลักษณะและค่าแรงดันเบรกความแบบขั้นบันได 20 วินาที

จากรูปที่ 5.5 จะพบว่าค่าแรงดันเริ่มต้นของขั้นแรกจะเริ่มตั้งแต่ 50% ของค่าแรงดันเบรกความของ Short time คือ ค่าแรงดันเบรกความของ Short time จะได้เท่ากับ 8.621 กิโลโวลต์ ดังนั้นแรงดันขั้นแรกของ Step by Step จะต้องเริ่มที่ 4.310 กิโลโวลต์ โดยคอมพิวเตอร์จะประมวลผลค่าโดยอัตโนมัติ เพราะในการทดสอบนี้จะรับค่าแรงดันเอาท์พุทของชุดแบ่งแรงดันมาประมวลผลเป็นค่าแรงดันเบรกความ ดังนั้นชุดประมวลผลจะรับค่าแรงดันตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าเริ่มจ่ายแรงดัน กราฟที่ได้ก็จะเริ่มบันทึกล้อที่ค่าที่ตำแหน่ง 50% ไปเรื่อยๆ จนถึง 20 วินาที หลังจากนั้นจะเพิ่มแรงดันอีก 20% ของค่ายอด และเริ่มคงที่เวลาไว้ที่ 20 วินาที หลังจาก 20 วินาที ก็จะเพิ่มแรงดันอีก 20% ของค่าเดิมจนกระทั่งเกิดการเบรกความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกควาน์สารฉนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 27°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92 %

วิธีการทดสอบ : ขั้นตอนใด 60 วินาที (Step by Step Breakdown test 60 sec)

ชุดอิเล็กโตรดประเภท ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ กระจกใสไม่ก้ำเคลือบฟิล์ม

ขนาด 4 ซม. X 4 ซม.

หนา 0.13 มม.

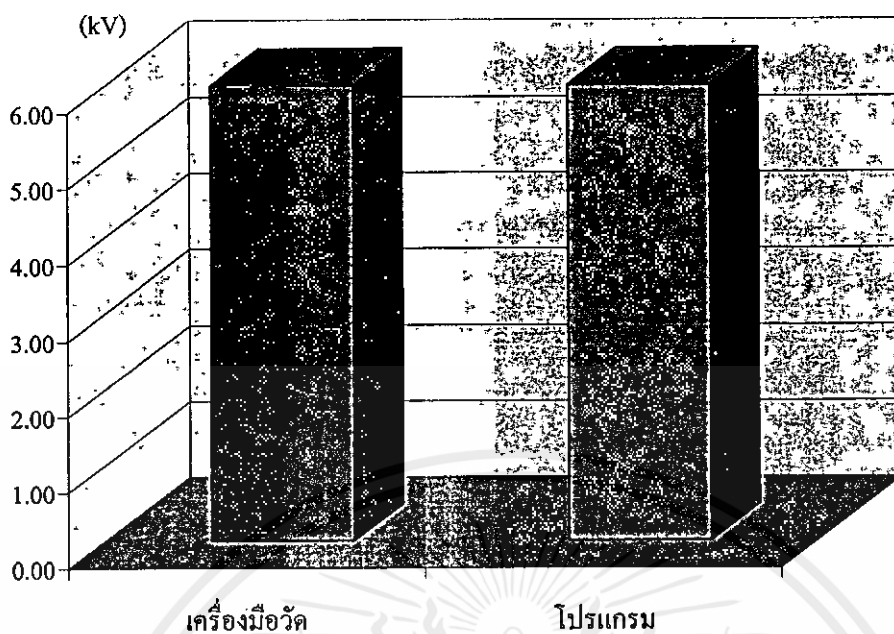
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกควาน์แบบขั้นตอนใด 60 วินาที

จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกควาน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	6.402	6.275	1.984
2	5.899	5.882	0.288
3	6.291	6.088	3.227
4	5.879	5.807	1.225
5	6.291	6.228	1.001
6	6.231	6.135	1.541
7	5.759	5.666	1.615
8	6.573	6.369	3.104
9	6.211	6.088	1.980
10	5.759	5.713	0.799
ค่าเฉลี่ย	6.130	6.025	

$$\%error = \left| \frac{6.130 - 6.025}{6.130} \right| \times 100$$

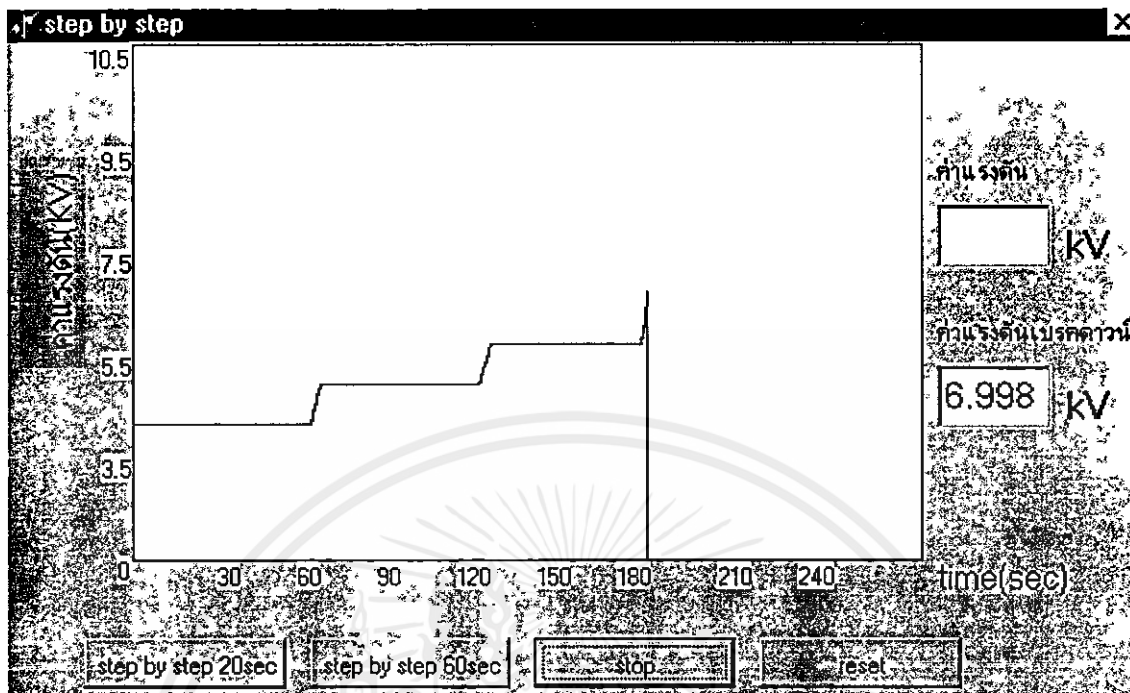
$$\%error = 1.712\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง  $\bar{X} = 6.025$  รับจาก  $SD = 0.244$  ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟแรงดันเบรกดาวน์แบบขั้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 27 °C

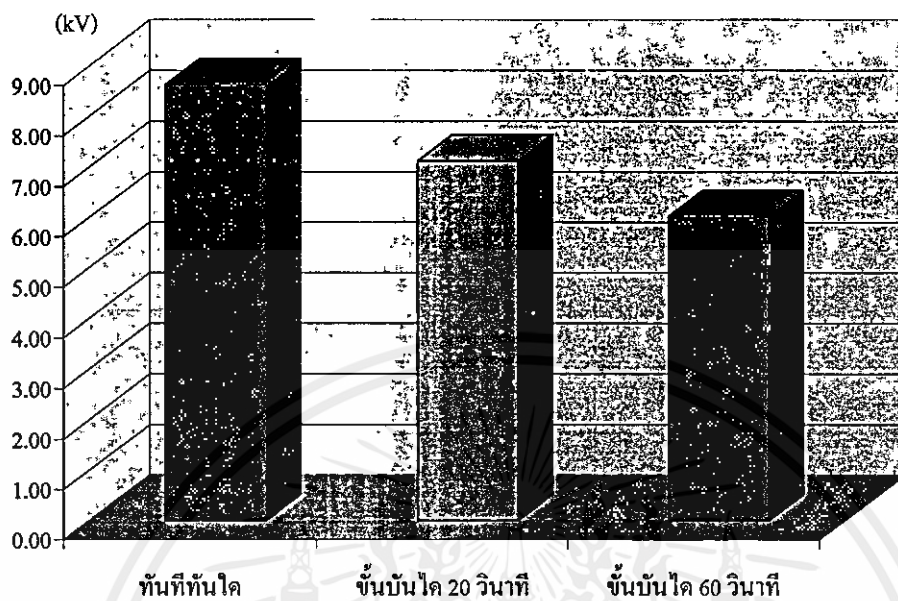
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟลักษณะและค่าแรงดันเบรกความแบบขั้นบันได 60 วินาที

จากรูปที่ 5.7 จะพบว่าค่าแรงดันเริ่มต้นของขั้นแรกจะเริ่มต้นที่ 50% ของค่าแรงดันเบรกความของ Short time คือ ค่าแรงดันเบรกความของ Short time จะได้เท่ากับ 8.621 กิโลโวลต์ ดังนั้นแรงดันขั้นแรกของ Step by Step จะต้องเริ่มที่ 4.310 กิโลโวลต์ โดยคอมพิวเตอร์จะประมวลผลค่าโดยอัตโนมัติ เพราะในการทดสอบนี้จะรับค่าแรงดันเอาท์พุทของชุดแบ่งแรงดันมาประมวลผลเป็นค่าแรงดันเบรกความ ดังนั้นชุดประมวลผลจะรับค่าแรงดันตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าเริ่มจ่ายแรงดัน กราฟที่ได้ก็จะเริ่มบันทึกล้อทค่าที่ตำแหน่ง 50% ไปเรื่อยๆ จนถึง 60 วินาที หลังจากนั้นจะเพิ่มแรงดันอีก 20% ของค่ายอด และเริ่มคงที่เวลาไว้ที่ 60 วินาที หลังจาก 60 วินาทีก็จะเพิ่มแรงดันอีก 20% ของค่าเดิมจนกระทั่งเกิดการเบรกความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีทันใด, ชั้นบ่มไค 20 วินาที, ชั้นบ่มไค 60 วินาที  
ที่ อุณหภูมิ 27 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกควาน์สารนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 80°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92%

วิธีการทดสอบ ทันทันทันใด (Short time Breakdown test)

ชุดอิเล็กโทรดประเภท ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ กระจกใสไม่ก้ำเคลือบฟิล์ม

ขนาด 4 ซม. X 4 ซม.

หนา 0.13 มม.

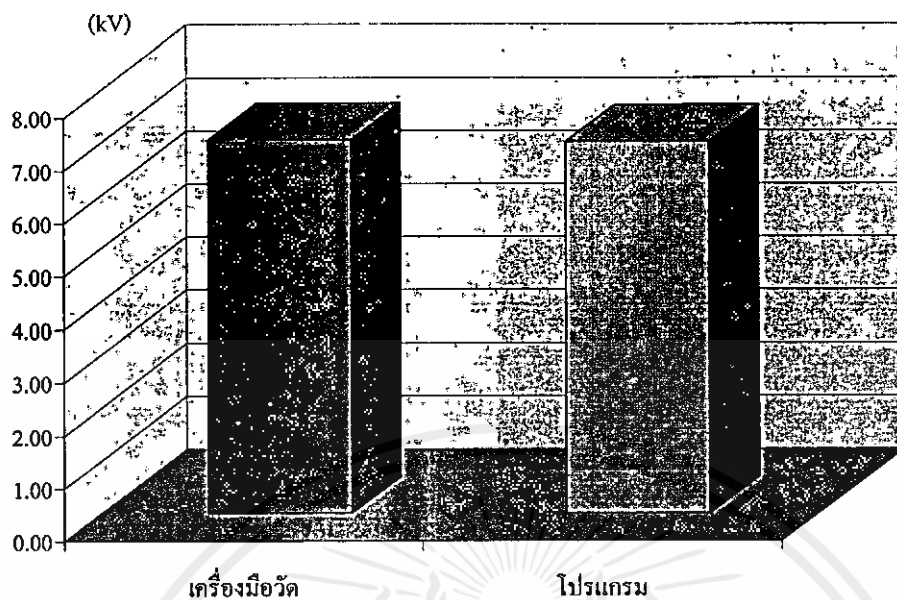
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกควาน์แบบทันทันทันใด (Short time Test)

จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกควาน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	7.030	6.971	0.839
2	6.950	6.921	0.417
3	6.758	6.730	0.414
4	7.436	7.400	0.484
5	7.269	7.213	0.770
6	7.457	7.404	0.711
7	6.518	6.491	0.414
8	6.865	6.832	0.481
9	7.149	7.114	0.490
10	7.128	7.095	0.463
ค่าเฉลี่ย	7.056	7.017	-

$$\%error = \left| \frac{7.056 - 7.017}{7.056} \right| \times 100\%$$

$$\%error = 0.552\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก  $\bar{X} = 7.017$  ค่า,  $SD = 0.289$  จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแรงดันเบรกดาวนแบบทันสมัยที่อุณหภูมิ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกควาน์สารฉนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 80°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92 %

วิธีการทดสอบ : ขึ้นบันได 20 วินาที (Step by Step Breakdown test 20 sec)

ชุดอิเล็กโทรดประเภท ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ กระจกฉายไมก้าเคลือบฟิล์ม

ขนาด 4 ซม. X 4 ซม.

หนา 0.13 มม.

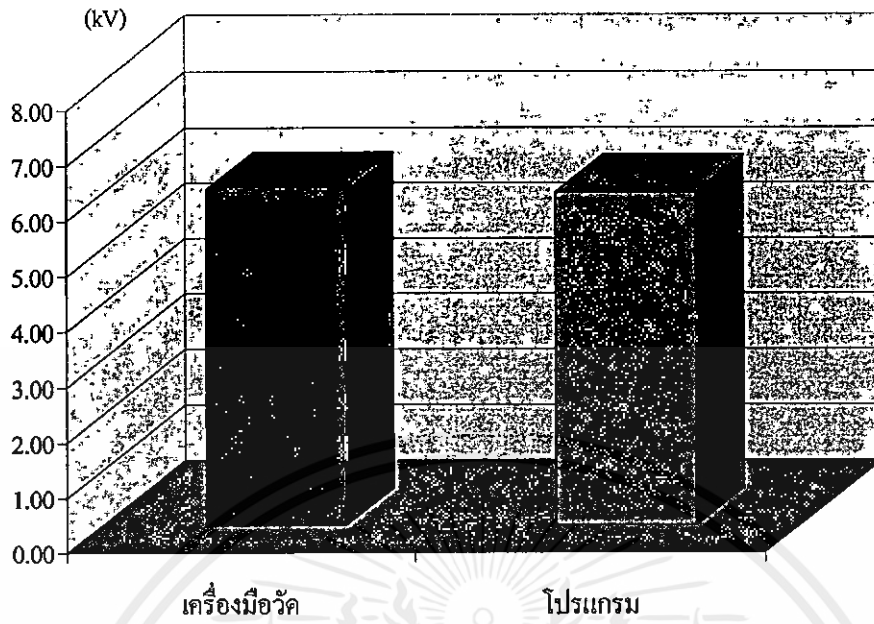
ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกควาน์แบบขึ้นบันได 20 วินาที

จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกควาน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	5.850	5.800	0.855
2	6.348	6.292	0.882
3	5.526	5.480	0.832
4	5.752	5.704	0.834
5	6.343	6.288	0.867
6	6.142	6.090	0.847
7	6.092	6.043	0.804
8	6.272	6.221	0.813
9	6.080	6.032	0.789
10	6.236	6.182	0.866
ค่าเฉลี่ย	6.064	6.013	

$$\%error = \left| \frac{6.064 - 6.013}{6.064} \right| \times 100\%$$

$$\%error = 0.841\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง  $\bar{X} = 6.013$  รับจาก  $SD = 0.270$  ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแรงดันเบรกคาว์นแบบขั้นบันได 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเรื่อง การวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์สารฉนวนแข็ง

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 80°C

: ความชื้นสัมพัทธ์ 92 %

วิธีการทดสอบ                    ขั้นบันได 60 วินาที (Step by Step Breakdown test 60 sec)

ชุดอิเล็กโตรดประเภท       ทรงกลม – ระนาบ (Sphere – Disk Electrodes)

ชนิดของวัสดุ                   กระดาษไมก้าเคลือบฟิล์ม

ขนาด                               4 ซม. X 4 ซม.

หนา                               0.13 มม

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันเบรกดาวน์แบบขั้นบันได 60 วินาที

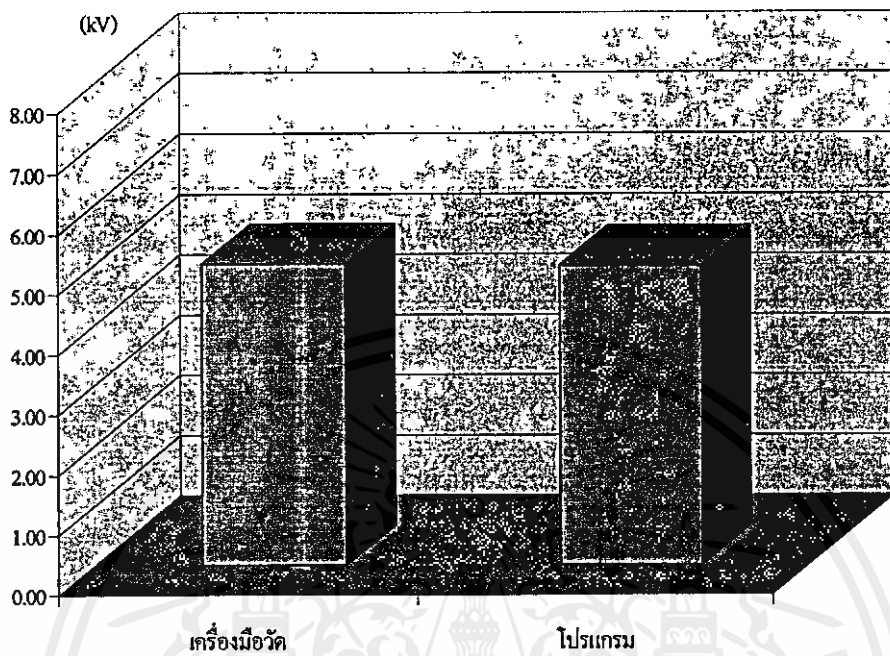
จำนวนครั้งที่ ทดสอบ	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)		ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
	เครื่องมือวัด	คอมพิวเตอร์	
1	5.251	5.208	0.819
2	4.962	4.910	1.048
3	4.909	4.870	0.794
4	4.742	4.770	0.590
5	5.086	5.045	0.806
6	5.134	5.092	0.818
7	5.200	5.140	1.154
8	5.071	5.032	0.769
9	4.971	4.931	0.805
10	4.781	4.742	0.816
ค่าเฉลี่ย	5.011	4.974	

$$\%error = \left| \frac{5.011 - 4.974}{5.011} \right| \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ %error หรือ = 0.738% หารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

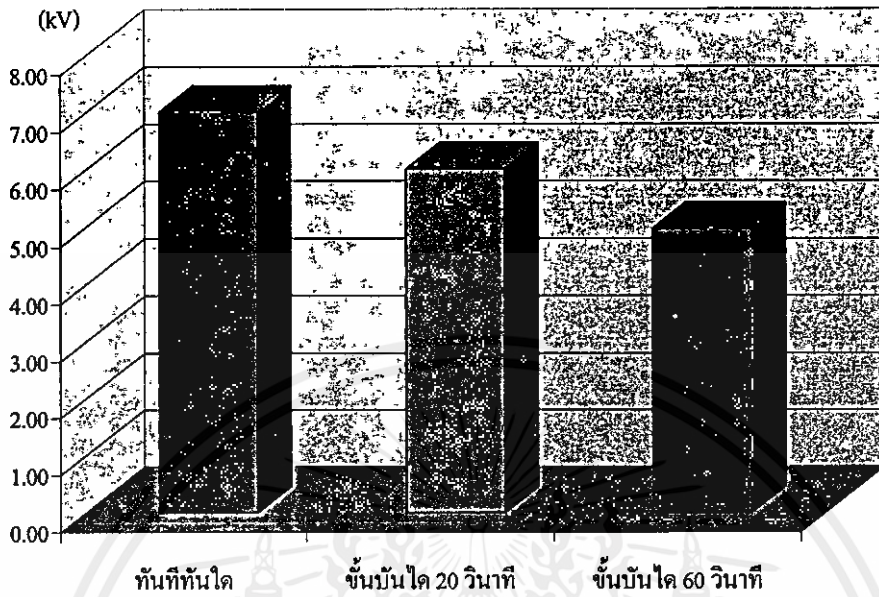
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{X} = 4.974 \quad , \quad SD = 0.155$$



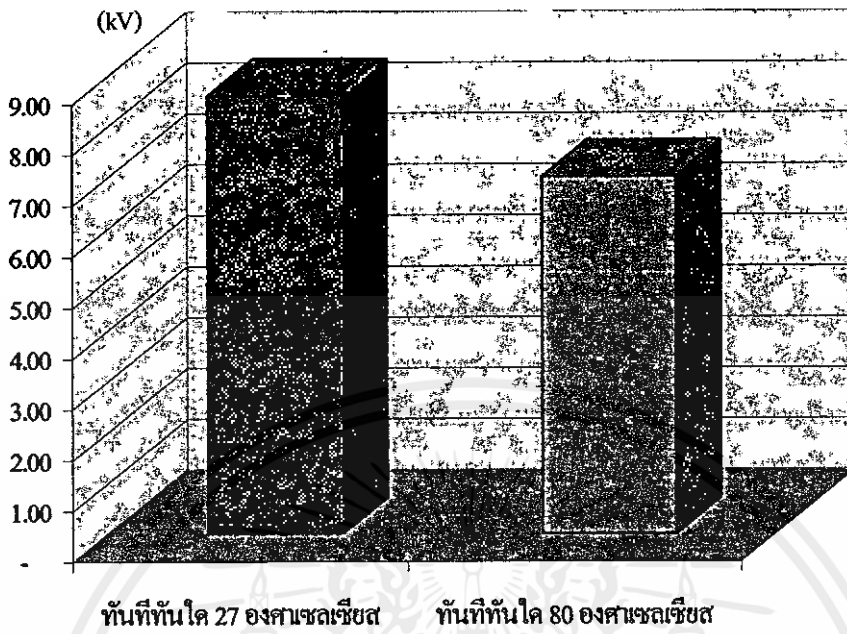
รูปที่ 5.11 กราฟแรงดันเบรกดาวน์แบบขั้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



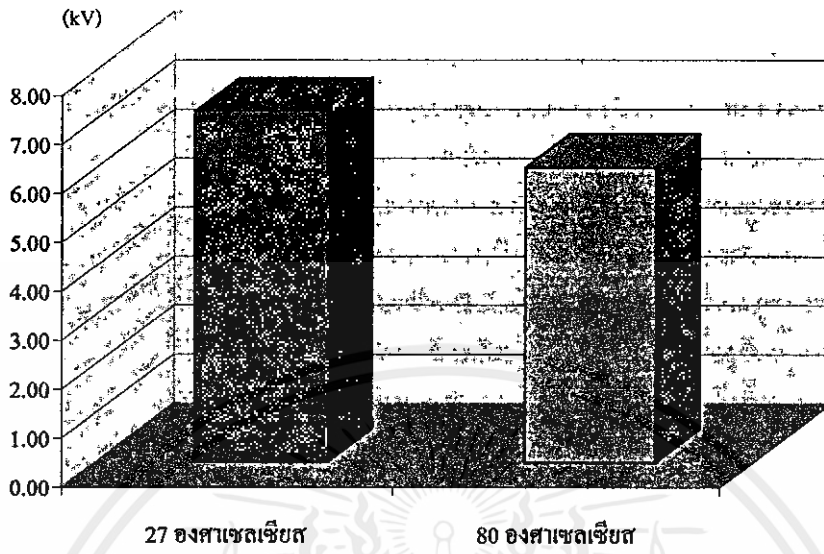
รูปที่ 5.12 กราฟแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีทันใด, ชั้นบันได 20 วินาที, ชั้นบันได 60 วินาที ที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



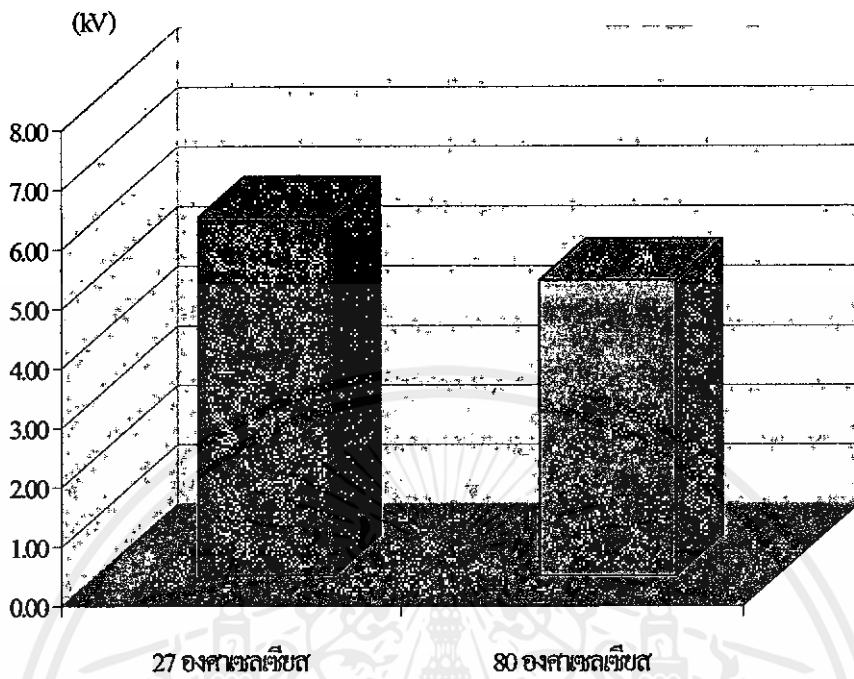
รูปที่ 5.13 แรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีที่ 27°C และ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



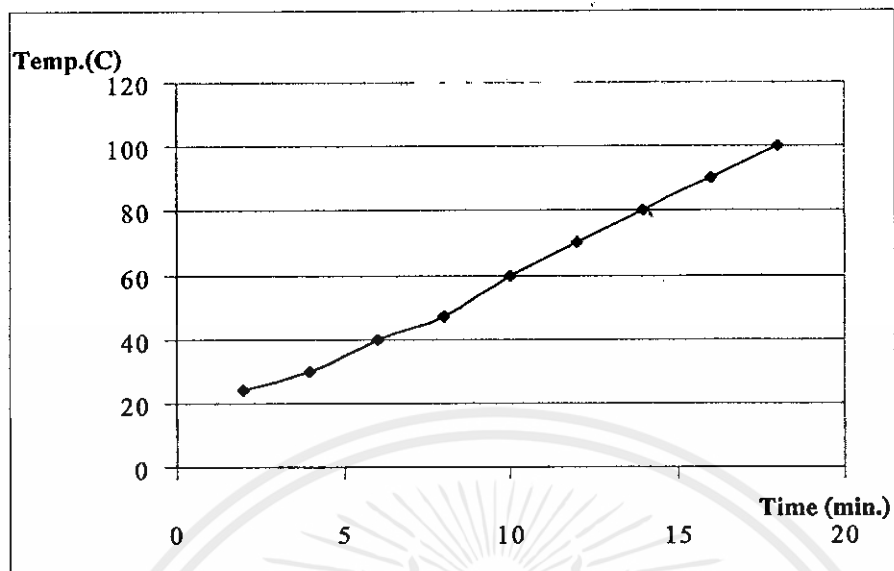
รูปที่ 5.14 แรงดันเบรคควอน์แบบขึ้นบันได 20 วินาที ที่ อุณหภูมิ 27°C และ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

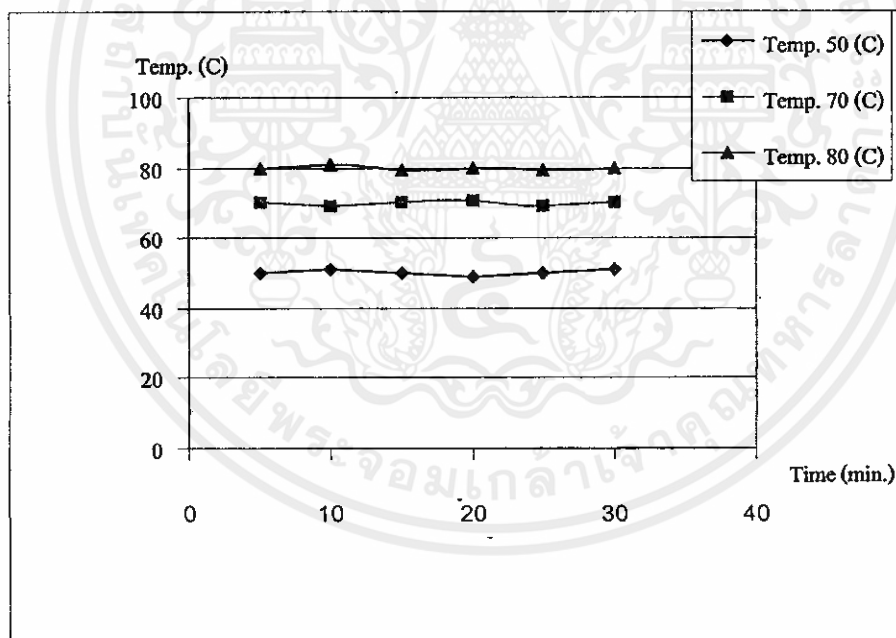


รูปที่ 5.15 แรงดันเบรกควมแบบขั้นบันได 60 วินาที ที่ อุณหภูมิ 27°C และ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์อุณหภูมิเทียบกับเวลา



รูปที่ 5.17. ระดับความเที่ยงตรงของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

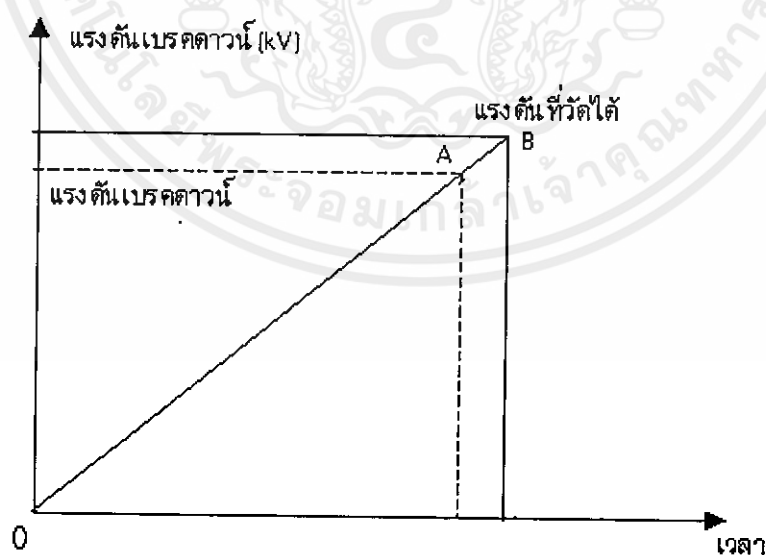
ในรูปที่ 5.16 เป็นเวลาที่ใช้ในการปรับระดับความร้อนจากชุดควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบให้เพิ่มขึ้นจากสถานะแวดล้อมจนถึง 80 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 5.17 เป็นการแสดงให้เห็นถึงความเที่ยงตรงของอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบในช่วงเวลา 30 นาที

## 5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาความคงทนต่อแรงดันเบรกคาวน์ของสารฉนวนแข็งที่สถานะอุณหภูมิปกติโดยทดสอบการเบรกคาวน์ที่ชุดทดสอบสารฉนวนแข็งที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 0–100 กิโลโวลต์ ในการทดสอบนี้จะใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ Sphere – Disk และเป็นการทดสอบฉนวนแบบทำลาย ซึ่งการทดสอบความคงทนของสารฉนวนแข็ง แบ่งเป็น 3 แบบ คือ

- ทันทันทันใด (Short Time Breakdown Test)
- ขึ้นบันได 20 วินาที (Step By Step Breakdown Test 20 sec)
- ขึ้นบันได 60 วินาที (Step By Step Breakdown Test 60 sec)

จากการทดสอบสารฉนวนแบบทันทันทันใด (Short Time Breakdown Test) เป็นการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงเป็นระยะสั้นๆ ซึ่งการเบรกคาวน์จะอยู่ในช่วง 10 – 20 วินาที ซึ่งจากผลการทดลอง จะเห็นว่าค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่วัดได้จะเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8 กิโลโวลต์ ซึ่งการทดสอบแบบทันทันทันใด นี้เราจึงไม่ทราบค่าแรงดันเบรกคาวน์ที่แท้จริงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18 ลักษณะการจ่ายแรงดันแบบทันทันทันใด

จากรูปที่ 5.18 จะพบว่าสารฉนวนจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าและอาจจะเกิดการเบรกดาวน์ที่จุด A แต่เนื่องจากผลของการเพิ่มแรงดันอย่างรวดเร็วทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้จะไม่ใช่ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่แท้จริง

การทดสอบสารฉนวนแข็งแบบขั้นบันได (Step By Step Breakdown Test 20 sec) จะทำการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงเป็นแบบขั้นบันได โดยเริ่มจากชุดทดสอบจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วอิเล็กโทรด การป้อนแรงดันจะคิดที่ 50% ของแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีทันใด (Short Time) แรงดันที่ป้อนครั้งแรกจะประมาณ 4 กิโลโวลต์ แล้วโหมเมอร์จะหน่วงเวลาไว้ 20 วินาที แล้วจะเพิ่มขึ้นทีละ 20% ของค่ายอด และหน่วงไว้อีก 20 วินาที ไปอย่างนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ และจากผลการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์จะอยู่ประมาณ 7 กิโลโวลต์ ซึ่งแรงดันเบรกดาวน์จะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีทันใด ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดก็น้อยกว่าแรงดันเบรกดาวน์แบบทันทีทันใด ถ้าเราต้องการค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด ที่มีค่าต่ำๆ เราสามารถตั้งค่าแรงดันเบรกดาวน์เริ่มต้นที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรดน้อยๆ จะได้รูปกราฟขั้นบันไดหลายขั้น จะเกิดเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดในการเบรกดาวน์น้อยแต่ต้องใช้เวลาาน

การทดสอบสารฉนวนแข็งแบบขั้นบันได 60 วินาที (Step By Step Breakdown Test 60 sec) จะเหมือนกับการทดสอบแบบขั้นบันได 20 วินาที (Step By Step Breakdown Test 20 sec) เพียงแต่หน่วงเวลาเพิ่มขึ้นจาก 20 วินาที เป็น 60 วินาที การหน่วงเวลาเพิ่มขึ้นนี้จะใช้สำหรับการทดสอบฉนวนที่มีความหนาเพิ่มขึ้น จากการทดสอบจะเห็นว่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยจะอยู่ที่ 6 กิโลโวลต์

## 5.8 ผลจากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิ 27°C และ 80 °C

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.13 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 80 °C จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 27 °C เนื่องจากผลของความร้อนมาเกี่ยวข้องด้วยคือเมื่อมีแรงดันให้กับฉนวนแข็งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้านี้ทำให้มีกระแสไหลผ่านฉนวนแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีแรงดันกระแสสลับ คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} W_g^m &= \omega \varepsilon t g \delta E^2 \\ &= 0.566 f E^2 t g \delta \times 10^{-12} \quad (W / cm^3) \end{aligned}$$

$$\text{โดย } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \times 100 \quad (F/cm)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เมื่อที่  $W_g^m$  คือ ความร้อนในสารฉนวนเป็น  $(W/cm^3)$  เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f คือ ความถี่เป็น (Hz)

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเป็น (kV/cm)

$\epsilon$  คือ Absolute dielectric constancy of a dielectric (F/m.)

$\epsilon_r$  คือ relative permittivity ของฉนวนไมก้ามีค่าประมาณ 6 - 7.5

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  (F/m)

$tg \delta$  คือ แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 0.03 ซึ่ง

สามารถหาพลังงานสูญเสียได้จากสมการ

$$P = E^2 \omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (W / cm^3)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ Dielectric loss angle (องศา)

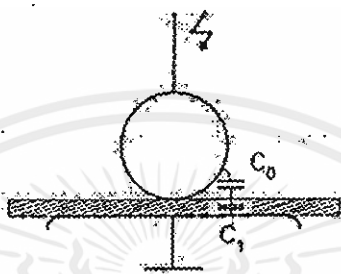
จากสมการถ้ามีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดความร้อนที่แตกต่างกันไปด้วยเนื่องจากค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $tg\delta$ ) มีการเปลี่ยนแปลง คือ ในช่วงที่เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะทำให้ค่า  $tg\delta$  สูงความร้อนที่เกิดก็จะสูงตามแต่ถ้าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะทำให้ค่า  $tg\delta$  ต่ำความร้อนที่เกิดก็จะน้อยตามไปด้วย สำหรับค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $tg\delta$ ) จะใช้เครื่อง Tettex AG 2508 ในการวัดค่า

เมื่อฉนวนแข็งได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นเวลานาน สภาพการฉนวนอาจเสียเนื่องจากร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking)

เนื่องจากมีร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิวฉนวนอันอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเอง และเพราะความชื้นในบรรยากาศประกอบกับความสกปรกบนผิวฉนวน เช่น ผงฝุ่นและเกลือ กระแสรั่วตามผิวไฟฟ้านี้ ทำให้ความชื้นที่ผิวแห้งไปได้ ทำให้เกิดสปาร์คในช่วงที่ผิวนำไฟฟ้าขาดไป ทำให้ผิวฉนวนเสียหาย เช่น กระดาษเบคเคไลต์ การเกิดเสียหายเนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้านี้จะแตกต่างไปจากการเสียหายเพราะดิสชาร์จ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้น (ในก๊าซรอบนอกฉนวน) อย่างน้อยแรงดันที่ป้อนต้องเท่ากันหรือมากกว่าแรงดันต่ำสุดตามกฎของพาสเซน แต่เบรกดาวน์จากร่องรอยนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่านั้นมากและไม่ขึ้นอยู่กับการเบรกดาวน์ของก๊าซรอบๆ

ดิสชาร์จบางส่วนตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนนำสาย ปลายสายเคเบิล หรือดิสชาร์จภายนอกกระทบเข้ากับผิวของฉนวน ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุได้ เช่น แผ่นกั้นระหว่างอิเล็กโทรด ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นที่บริเวณทรงกลมสัมผัส หรือใกล้กับแผ่นแก้วก่อน เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดัน หรือความเครียดสูง

ขึ้น ดิสชาร์ตจะขยายตัวกว้างยาวขึ้นห่างออกไปจากทรงกลมสู่ขอบแผ่นแก้ว ถ้าแผ่นแก้วหนามากพอ และแผ่นแก้วไม่กว้างจนเกินไปจะเกิดวาทไฟข้ามแผ่นแก้วไปหาอิเล็กโทรดระนาบได้ ถ้าแผ่นแก้วไม่หนามาก และแผ่นแก้วใหญ่การเกิดดิสชาร์ตตามผิวก็จะกว้างไประดับหนึ่งแล้วเกิดการเจาะทะลุแผ่นแก้วได้



รูปที่ 5.19 อิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบคั่นด้วยฉนวน

ดิสชาร์ตบางส่วนตามผิวที่เริ่มต้นเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวอาจอธิบายได้ในลักษณะของสมคักย์ หรือศักย์ไฟฟ้าเท่า ในรูปที่ 6.2 กรณีค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงกว่าอากาศหลายเท่า ค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  ย่อมมีค่ามากกว่า  $C_0$  ฉะนั้นตามหลักของโวลเตจดีไวเดอร์ แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่จะอยู่ที่  $C_0$  นั่นหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่ง จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวมีค่าเกินวิกฤต ดิสชาร์ตบางส่วนก็เริ่มเกิดขึ้น เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นสูงกว่าโคโรน่าเริ่มเกิด ดิสชาร์ตจะเปลี่ยนจากโคโรน่าไปเป็นดิสชาร์ตขนแปรงวิ่งตีบหน้าไปตามผิวฉนวนแข็ง ความเข้มของการดิสชาร์ตบางส่วนตามผิวจะขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้าของฉนวนแข็ง  $C_1$  ถ้าค่า  $C_1$  ยิ่งมากดิสชาร์ตบางส่วนตามผิวจะยิ่งเข้มแรงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผล

#### 6.1 สรุปผล

จากผลการทดสอบความทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็งแบบอัดโนมัตติ ซึ่งเป็น การพัฒนาใช้ระบบการทดสอบสารฉนวนแข็งเป็นระบบอัดโนมัตติ ตั้งแต่ขบวนการทดสอบ การควบคุมสภาวะ การวัดค่า การแสดงผลขณะทำการทดสอบ และการประมวลผลโดยไมโคร คอมพิวเตอร์ สามารถสรุปพิกัดของชุดทดสอบความทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของสารฉนวนแข็ง แบบอัดโนมัตติ ได้ดังนี้

ลำดับที่	รายละเอียด	พิกัดเครื่อง
1	ตู้ทดสอบ	35.7x35.7x42.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2	ฮีตเตอร์	1,000 วัตต์
3	อุณหภูมิภายในตู้ทดสอบ	ตั้งแต่สภาพแวดล้อม ถึง 80 องศาเซลเซียส
4	แรงดันอินพุท	0 – 220 โวลท์
5	แรงดันทดสอบฉนวนสูงสุด	80 กิโลโวลท์
6	พิกัดกำลังงานไฟฟ้าของชุดทดสอบ	5 กิโลโวลท์-แอมป์
7	ไมโครคอมพิวเตอร์	รุ่น INTEL หรือ AMD
8	การ์ดอินเตอร์เฟซ	ไอซี เบอร์ 8255
9	อัตราในการแปลงสัญญาณ	ความถี่ 606 กิโลเฮิรตซ์
10	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	IEC 243-1 1998

นอกจากนี้ชุดทดสอบยังสามารถควบคุม และประมวลผลได้ดังนี้

6.1.1 ควบคุมการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ 3 รูปแบบ คือ แบบทันทีทันใด แบบขั้นบันได 20 วินาที และ แบบขั้นบันได 60 วินาที

6.1.2 สามารถควบคุมจากไอคอนเมนูในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการรับคำสั่งของผู้ใช้ และประมวลผลโดยรับค่าแรงดันเบรกดาวน์จากชุดแบ่งแรงดันเป็นรูปภาพฟีด

### 6.1.3 แสดงผลเป็นตัวเลข และรูปภาพแรงดันเบรกดาวน และสามารถปรับผลการทดสอบ ออกจากเครื่องปรินเตอร์ได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบชุดการ์ดอินเตอร์เฟสจะใช้ได้สำหรับคอมพิวเตอร์ นั้นจะใช้ เมนบอร์ดรุ่นที่มี สล็อต ISA เท่านั้น จะใช้แบบ ON BOARD ไม่ได้ ส่วน CPU ใช้ของ INTEL หรือ AMD ก็ได้

ในส่วนของโปรแกรมแสดงผลนั้นจะใช้ได้กับค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงขนาด 220/100,000 โวลท์ เท่านั้นคือจะใช้ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงเป็นตัวคูณ ( $\times 100$ ) แต่ถ้าต้องการเปลี่ยนขนาดของหม้อแปลงให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่กว่านี้ก็ต้องทำการใส่ค่าตัวคูณใหม่ให้ถูกต้องด้วย

เนื่องจากโครงการนี้ได้ออกแบบมาเพื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่แรงดันทางด้านอินพุท 220 โวลท์ จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุทมา 5 โวลท์ เข้าที่ชุด ADC ถ้าหากแรงดันทางด้านอินพุทเกิน 220 โวลท์ จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุทมาเกิน 5 โวลท์ ซึ่งชุด ADC จะรับไม่ได้ทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาด และเกิดความเสียหายต่อชุด ADC ได้

## 6.3 ประโยชน์ และแนวทางการพัฒนางานวิจัย

### 6.3.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

- สามารถทดสอบสารฉนวนแข็งให้กับอุตสาหกรรมภายนอกได้
- เป็นแนวทางในการศึกษาแรงดันเบรกดาวนในสารฉนวนแข็งให้กับนักศึกษาได้อย่างชัดเจน.

### 6.3.2 แนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อ

- ทำให้ควบคุมค่าอุณหภูมิจากการป้อนค่าในคอมพิวเตอร์
- ใช้ชุดยกอิเล็กทรอนิกส์ และชุดคิซาร์ดประจุแบบอัตโนมัติ
- ป้อนข้อมูลต่างๆลงในคอมพิวเตอร์ก่อนการทดสอบ เช่น ชนิดสารฉนวนแข็ง อุณหภูมิที่ต้องการ เวลา และวันที่ทำการทดสอบ
- แสดงค่าอุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิสูงสุดจากหน้าจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล, เอกสารประกอบการสอน “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ “ชุดทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงของสารฉนวนแข็งแบบอัดโนมัติ” หน้า 21-24
- [3] E. Kuffel, and M. Abdullah, “High Voltage Engineering” Pergamon Press, Oxford, 1981
- [4] E. Kuffel, and W.S. Zaengl, “High Voltage Engineering Fundamental” Pergamon Press, Oxford, 1<sup>st</sup> ed., 1984.
- [5] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, “High Voltage Engineering Fundamental” Second Edition, Published by butterworth – heinemann., 2000.
- [6] IEC Publication 60-2, 1996-03, “High Voltage Test Techniques. Part 2: Measuring Systems” , 1994.
- [7] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, and Roshdy Radwan. 2000. High Voltage Engineering Theory and Practice. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York-Basel.
- [8] IEC Standard No.243-1, Methods of test electric strength of solid insulating materials (Part 1: Test at power frequencies)
- [9] ASTM D 149 – 97a, Standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating material at commercial power frequencies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างโปรแกรมสำหรับรับค่าแรงดัน พร้อมแสดงผล

```

unit menu_hv;           //ชื่อหัวโปรแกรมในส่วนแนะนำตัว Unit menu_hv
interface
uses                    //ส่วนประกอบที่ใช้ใน Unit menu_hv
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
    StdCtrls, ExtCtrls;
type                    //ออบเจกต์ที่ใช้
    Tgroup = class(TForm)
    GroupP: TGroupBox;
        name1: TLabel;
        name2: TLabel;
        name3: TLabel;
        name4: TLabel;
        id1: TLabel;
        id2: TLabel;
        id3: TLabel;
        id4: TLabel;
        numb1: TLabel;
        numb2: TLabel;
        numb3: TLabel;
        numb4: TLabel;
        adviser: TGroupBox;
        nameadv: TLabel;
        next1: TButton;
        exit1: TButton;
    procedure next1Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ให้ทำต่อไป
    procedure exit1Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ให้ทำต่อไป
    end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

```

        { Private declarations }

public
    { Public declarations }

end;
var
    //ประกาศตัวแปรโพรซีเจอร์
group: Tgroup;
implementation
    uses kit_hv; //ประกาศใช้ในหน้าต่าง kit_hv
    {$R *.DFM}
    procedure Tgroup.next1Click(Sender: TObject); //ประกาศโพรซีเจอร์ให้ทำต่อไป
    begin
        groupP2.show;
    end;
    procedure Tgroup.exit1Click(Sender: TObject); //ประกาศโพรซีเจอร์ให้ทำต่อไป
    begin
        close;
    end;
end.
-----
unit kit_hv; //ชื่อหัวโปรแกรมในส่วน Unit kit_hv
interface
uses
    //ส่วนประกอบที่ใช้ใน Unit kit_hv
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, Buttons, Menus, ExtCtrls;
type
    //ออบเจกต์ที่ใช้
    TgroupP2 = class(TForm)
        sw1: TBitBtn;
        sw2: TBitBtn;
        sw3: TBitBtn;
        sw4: TBitBtn;
        sw5: TBitBtn;
        MainMenu1: TMainMenu;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

exit1: TMenuItem;
exit2: TMenuItem;

Shape1: TShape;

showcs: TEdit;

showsmax: TEdit;

Label1: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Label8: TLabel;
mage1: TImage;
Label9: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label18: TLabel;

```

```

procedure exit2Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ เมนู exit
procedure sw1Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ start
procedure sw2Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ stop
procedure sw5Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ reset
procedure sw4Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ step by step
procedure sw3Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ short time
private
procedure output(portno:smallint;data:byte); //ประกาศโปรซีเจอร์ ส่ง8255

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานี้ไปจนตลอดไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function inport(portno:smallint):byte;           //ประกาศฟังก์ชัน รับค่า ADC0804
    { Private declarations }

public                                           //ประกาศตัวแปร
portno:smallint;
ata:byte;

    { Public declarations }

end;

var                                             //ประกาศตัวแปร
groupP2: TgroupP2;

implementation
uses stepby;                                   //ประกาศใช้ในหน้าต่าง stepby
    {$R *.DFM}

procedure TgroupP2.outport(portno:smallint;data:byte); //ประกาศโปรซีเจอร์ ส่ง8255
begin
    asm
    push dx
    mov dx,portno
    mov al,data
    out dx,al
    pop dx

end;
end;

function TgroupP2.inport(portno:smallint):byte; //ประกาศฟังก์ชัน รับค่า ADC0804
var
temp:byte;
begin
    asm
    push dx
    mov dx,portno
    in al,dx
    mov temp,al
    pop dx

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end;
inport := temp;
end;
procedure delay(ms:longint); //ประกาศโปรซีเคอร์ในการหน่วงเวลา
var
et:longint;
begin
et:=GetTickCount;
repeat
application.ProcessMessages;
until((GetTickCount-et)>ms);
end;
procedure TgroupP2.exit2Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเคอร์ เมนู exit
begin
close;
end;
procedure TgroupP2.sw1Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเคอร์ start
begin
sw1.enabled:=false;
sw2.enabled:=true;
sw3.enabled:=true;
sw4.enabled:=true;
output($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
output($300,$1); //สั่ง port A ส่ง 00000001B ออกมา
delay(500); //สั่งหน่วงเวลา
output($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
output($300,$0); //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
end;
procedure TgroupP2.sw2Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเคอร์ stop
begin
if sw2.enabled=true then
begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กรุณาแจ้งข้อบกพร่องหรือข้อสงสัยมาที่ [info@mcq.com](mailto:info@mcq.com) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sw1.enabled:=true;
sw2.enabled:=false;
sw3.enabled:=false;
sw4.enabled:=false;
outport($303,$80);           //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
outport($300,$2);           //สั่ง port A ส่ง 00000010B ออกมา
delay(500);                  //สั่งหน่วงเวลา
outport($303,$80);           //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
outport($300,$0);           //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา

end;
end;
procedure TgroupP2.sw5Click(Sender: TObject); //ประกาศโปรซีเจอร์ reset
begin
    if sw1.enabled=false then
    begin
        sw1.enabled:=true;
        sw2.enabled:=false;
        sw3.enabled:=false;
        sw4.enabled:=false;
        outport($303,$80);     //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
        outport($300,$20);     //สั่ง port A ส่ง 00100000B ออกมา
        refresh;               //clear หน้าจอ
        showcs.Text:="";        //ทำให้ช่องแสดงค่าว่าง
        showsmx.Text:="";       //ทำให้ช่องแสดงค่าว่าง
        delay(500);            //สั่งหน่วงเวลา
        outport($303,$80);     //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
        outport($300,$0);     //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา

    end
    else
    begin
        refresh;
        showcs.Text:="";
    end
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

showsmax.Text:="";

end;

end;

procedure TgroupP2.sw4Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เตอร์ step by step
begin
    if sw1.enabled=false then
        if sw3.Enabled=true then

begin
groupP3.show
end;
end;

procedure TgroupP2.sw3Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เตอร์ short time
var
    x,y,ynew,yold,chk:integer;
    ycurrent,ymax:real;

begin
    if sw1.enabled=false then

begin
refresh; //clear หน้าจอ
sw3.Enabled:=false;
outport($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
outport($300,$4); //สั่ง port A ส่ง 00000100B ออกมา
canvas.MoveTo(49,256); //จุดเริ่มต้น plot ค่าแกน y
x:=49; //จุดเริ่มต้นแกน x

ymax:=0;
ycurrent:=0;
showcs.Text:="";
showsmax.Text:="";
ynew:=0;
yold:=0;
chk:=0;

while (sw1.Enabled=false)do //กำหนดการวนลูป

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

begin
    ynew:= inport($30A);           //รับค่าจาก ADC0804
    y:=256-ynew;
    canvas.LineTo(x,y);           //นำค่าที่ได้ไป plot
    x:=x+2;                       //เพิ่มค่าในแกน x
    delay(200);
    output($303,$80);             //ตั้ง port control 8255 ด้วย code 80H
    output($300,$0);             //ตั้ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
    ycurrent:=((((ynew*5)/255)*11)/10)+0.7;
    ycurrent:=ycurrent/(sqrt(2));
    ycurrent:=ycurrent*(220/9)/10;
    showcs.text:=FloatToStr(ycurrent);
    if ycurrent>ymax then         //เก็บค่าสูงสุด
begin
    ymax:=ycurrent;
    showsmax.Text:=FloatToStr(ymax); //นำค่าสูงสุดมาแสดง
end;
    if x>423 then                //เมื่อเกินหน้าจอแสดงกราฟ
begin
    x:=50;
    refresh;
    canvas.MoveTo(50,y);
end;
end;
    y:=256;
end;
end;
end.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 unit stepby; //ชื่อหัวโปรแกรมในส่วน Unit stepbyinterfaceuses  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ต่อสาธารณะอย่างใดจนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 //ส่วนประกอบที่ใช้ใน Unit stepby

Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,

```
StdCtrls, ExtCtrls, Buttons;
```

```
type
```

```
//ออบเจกต์ที่ใช้
```

```
TgroupP3 = class(TForm)
```

```
    Shape1: TShape;
```

```
    showc: TEdit;
```

```
    showmax: TEdit;
```

```
    sws1: TBitBtn;
```

```
    sws2: TBitBtn;
```

```
    sws3: TBitBtn;
```

```
    sws4: TBitBtn;
```

```
    Label1: TLabel;
```

```
    Label2: TLabel;
```

```
    Label3: TLabel;
```

```
    Label4: TLabel;
```

```
    Label5: TLabel;
```

```
    Label6: TLabel;
```

```
    Label7: TLabel;
```

```
    Label8: TLabel;
```

```
    Image1: TImage;
```

```
    Label9: TLabel;
```

```
    Label10: TLabel;
```

```
    Label11: TLabel;
```

```
procedure sws3Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ stop
```

```
procedure sws4Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ reset
```

```
procedure sws1Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ step by step 20sec
```

```
procedure sws2Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ step by step 60sec
```

```
private
```

```
procedure outport(portno:smallint;data:byte); //ประกาศโพธิ์เคอร์ ตั้ง8255
```

```
function inport(portno:smallint):byte; //ประกาศฟังก์ชัน รับค่า ADC0804
```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร { Private declarations } ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า public ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี //ประกาศตัวแปร

```
portno:smallint;
```

```

data:byte;
    { Public declarations }
end;
var
    //ประกาศตัวแปร
groupP3: TgroupP3;
implementation
    uses kit_hv;
    //ประกาศใช้ในหน้าต่าง kit_hv
    {$R *.DFM}
function TgroupP3.inport(portno:smallint):byte;
    //ประกาศฟังก์ชัน รับค่า ADC0804
var
    -
temp:byte;
begin
    asm
        push dx
        mov dx,portno
        in al,dx
        mov temp,al
        pop dx
    end;
    inport := temp;
end;
procedure delay(ms:longint);
    //ประกาศโปรซีเจอร์ในการหน่วงเวลา
var
    et:longint;
begin
    et:=GetTickCount;
    repeat
        application.ProcessMessages;
    until((GetTickCount-et)>ms);
end;
procedure TgroupP3.outport(portno:smallint;data:byte);
    //ประกาศโปรซีเจอร์ ส่ง8255 ให้นำไปใช้
begin

```

```

asm
push dx
mov dx,portno
mov al,data
out dx,al
pop dx

end;

end;

procedure TgroupP3.sws3Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ stop
begin
    outport($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$2); //สั่ง port A ส่ง 00000010B ออกมา
    sws1.enabled:=true;
    sws2.enabled:=true;
    delay(500); //สั่งหน่วงเวลา
    outport($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$0); //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
end;

procedure TgroupP3.sws4Click(Sender: TObject); //ประกาศโพธิ์เคอร์ reset
begin
    outport($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$20); //สั่ง port A ส่ง 00100000B ออกมา
    sws1.enabled:=true;
    sws2.enabled:=true;
    delay(500); //สั่งหน่วงเวลา
    outport($303,$80); //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$0); //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
    close;
    groupP2.sw1.Enabled:=true;
    groupP2.sw2.enabled:=false;
    groupP2.sw3.enabled:=false;
    groupP2.sw4.enabled:=false;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end;
procedure TgroupP3.sws1Click(Sender: TObject);//ประกาศโปรซีเจอร์ step by step 20sec
var
    x,yold,ynew,y,a:integer;
    current,ymax:real;
begin
    if sws2.enabled=true then
begin
refresh;

canvas.TextOut(119,258,'20');           //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(173,258,'40');           //แสดงค่าแกน x
    canvas.TextOut(227,258,'60');       //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(281,258,'80');           //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(335,258,'100');          //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(389,258,'120');          //แสดงค่าแกน x
    sws1.enabled:=false;
    outport($303,$80);                   //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$8);                    //สั่ง port A ส่ง 00001000B ออกมา
    canvas.MoveTo(65,256);
    yold:=0;
    x:=65;
    ymax:=0;
    ycurrent:=0;
    showc.Text:="";
    showmax.Text:="";
    delay(1000);                          //สั่งหน่วงเวลา
    outport($303,$80);                    //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
    outport($300,$0);                    //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
    delay(17200);                          //สั่งหน่วงเวลา
    while sws1.Enabled=false do //กำหนดควนรูป
begin
        ynew:= inport($30A);              //รับค่าจาก ADC0804

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไปขึ้นบนเว็บไซต์ของโรงเรียนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y:=256-ynew;
canvas.LineTo(x,y);
x:=x+4;
delay(1500);
ycurrent:=((((ynew*5)/255)*11)/10)+0.9;
ycurrent:=ycurrent/(sqrt(2));
ycurrent:=ycurrent*(220/9)/10;
showc.Text:=FloatToStr(ycurrent);
if ycurrent>ymax then
begin
ymax:=ycurrent;
showmax.Text:=FloatToStr(ymax);
end;
if x>455 then
begin
x:=65;
refresh;
canvas.MoveTo(65,y);
end;
end;
y:=256;
end;
end;
procedure TgroupP3.sws2Click(Sender: TObject);//ประกาศ โพรซีเจอร์ step by step 60sec
var
x,y,yold,ynew,a:integer;
ycurrent,ymax:real;
begin
if sws1.enabled=true then
begin
refresh;
canvas.TextOut(105,258,'30'); //แสดงค่าแกน x

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

canvas.TextOut(145,258,'60');           //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(185,258,'90');           //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(225,258,'120');          //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(265,258,'150');          //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(305,258,'180');          //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(355,258,'210');          //แสดงค่าแกน x
canvas.TextOut(395,258,'240');          //แสดงค่าแกน x

sws2.enabled:=false;

outport($303,$80);                       //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
outport($300,$10);                       //สั่ง port A ส่ง 00010000B ออกมา
delay(1000);                             //สั่งหน่วงเวลา
outport($303,$80);                       //สั่ง port control 8255 ด้วย code 80H
outport($300,$0);                       //สั่ง port A ส่ง 00000000B ออกมา
canvas.MoveTo(65,256);
x:=65;
yold:=0;
ymax:=0;
ycurrent:=0;
showc.Text:="";
showmax.Text:="";
elay(17200);                             //สั่งหน่วงเวลา
while sws2.Enabled=false do //กำหนดควนรูป
begin
    ynew:= inport($30A);                   //รับค่าจาก ADC0804
    y:=256-ynew;
    canvas.LineTo(x,y);
    x:=x+4;
    delay(3000);
    ycurrent:=((((ynew*5)/255)*11)/10)+0.9;
    ycurrent:=ycurrent/(sqrt(2));
    ycurrent:=ycurrent*(220/9)/10;
    showc.Text:=FloatToStr(ycurrent);

```

```

    if ycurrent>ymax then
begin
    ymax:=ycurrent;
    showmax.Text:=FloatToStr(ymax);
end;

    if x>455 then
begin
    x:=65;
    refresh;
    canvas.MoveTo(65,y);
end;
end;
y:=256;
end;
end;
end.

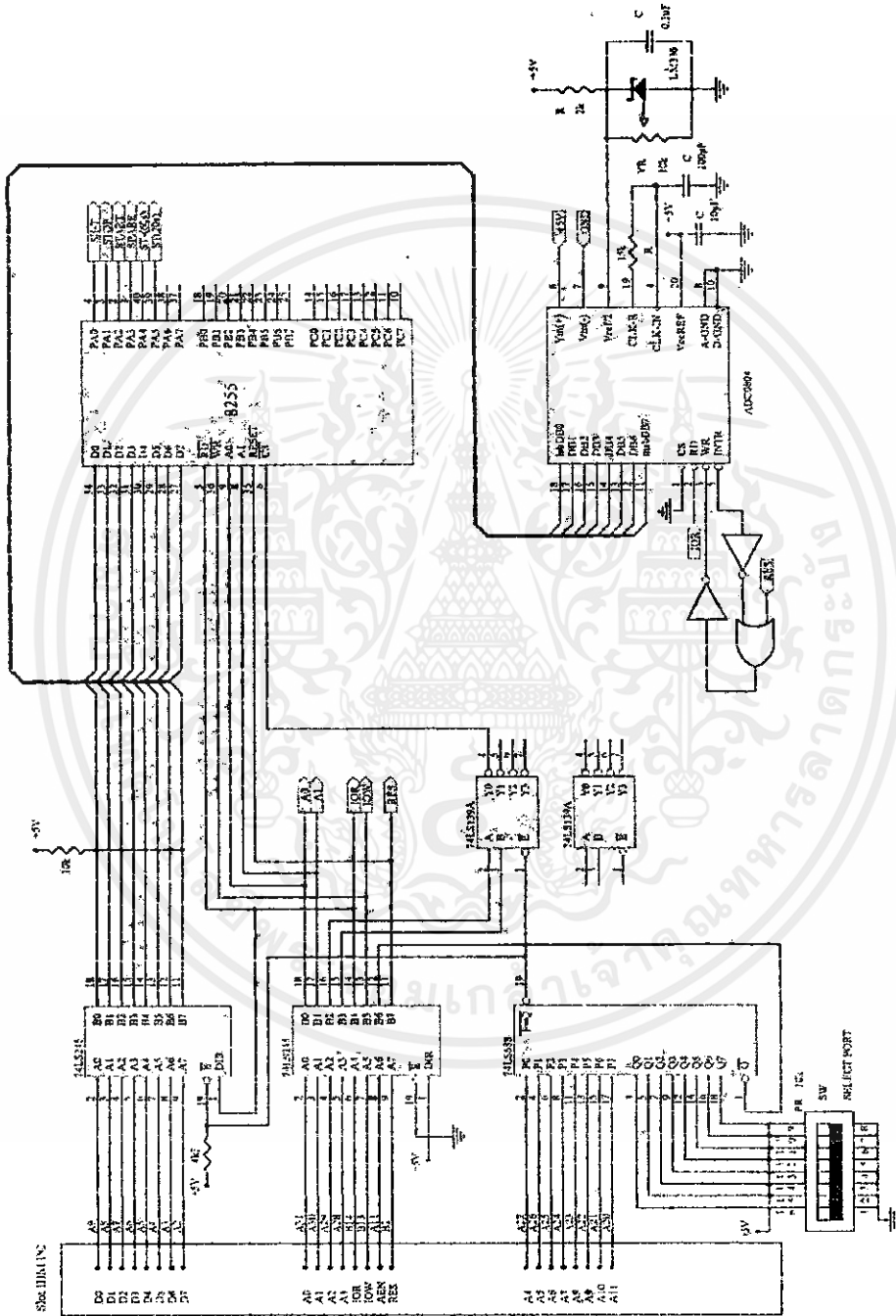
```



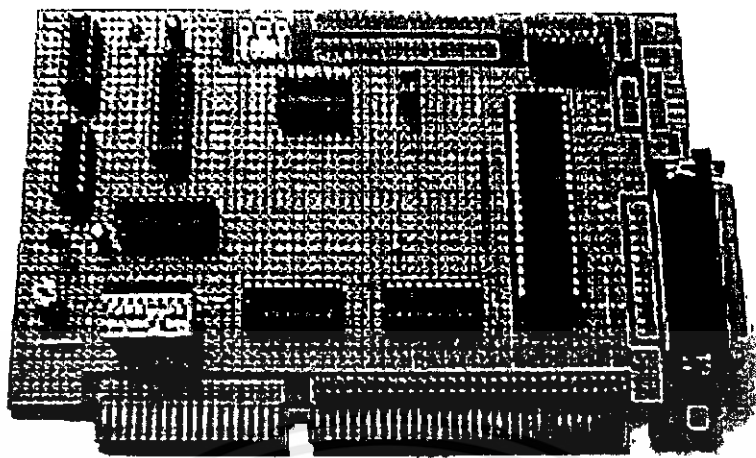
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

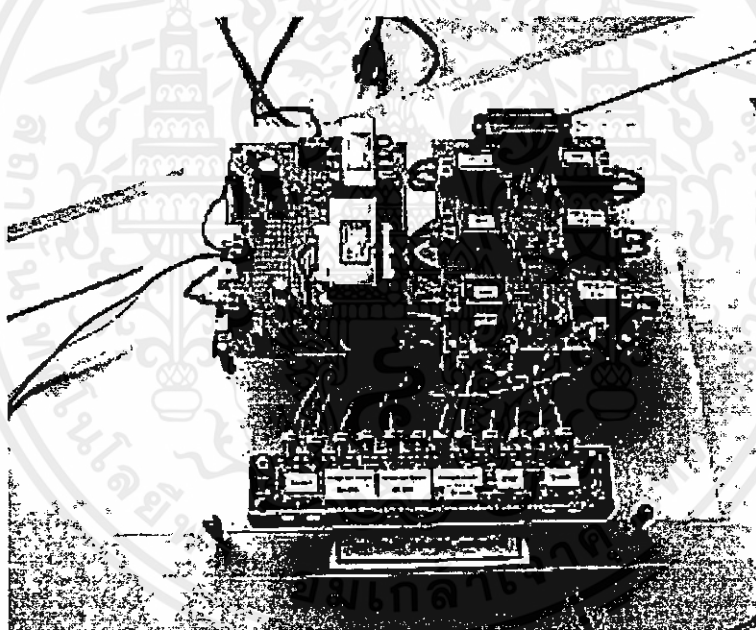
ภาพการออกแบบการ์ดอินเตอร์เฟส, ชุดอุปกรณ์การทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การที่ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**รูปที่ ข.1** วงจรของการอินเตอร์เฟส (Interface Card Circuit)

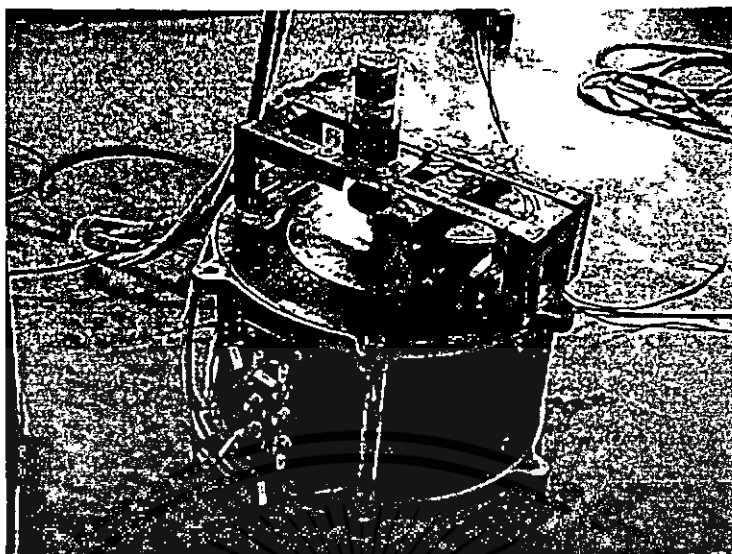


รูปที่ ข.2 ชุดการ์ดอินเทอร์เฟซ

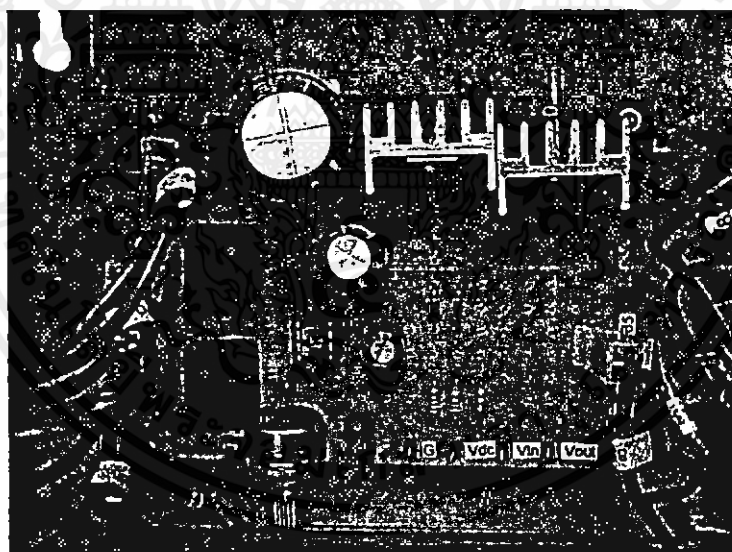


รูปที่ ข.3 ชุดควบคุมรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

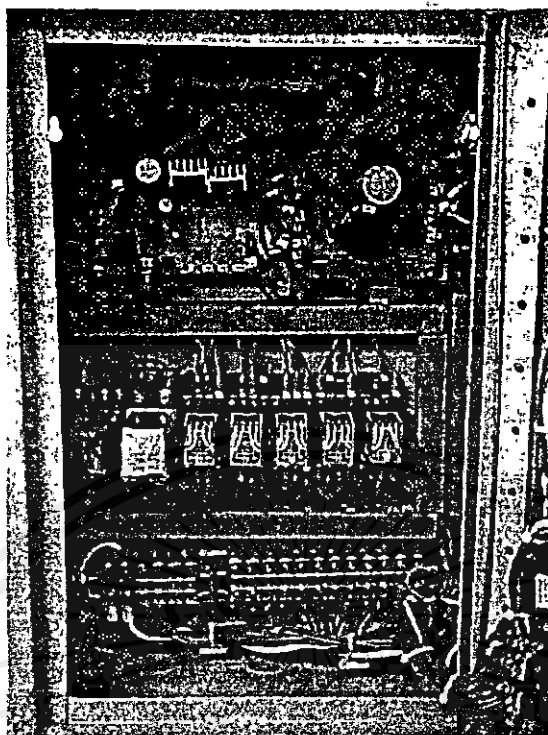


รูปที่ ข.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมการจ่ายแรงดัน

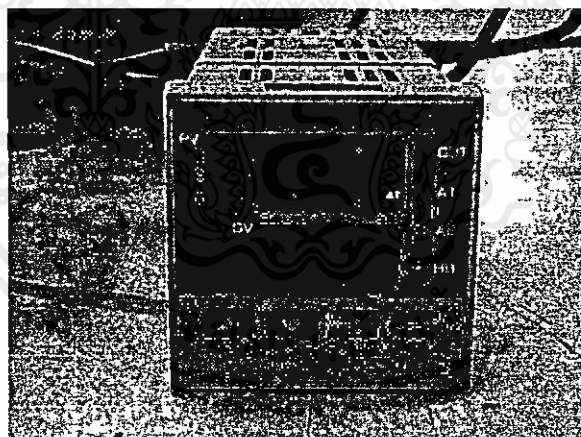


รูปที่ ข.5 ชุดป้องกันแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

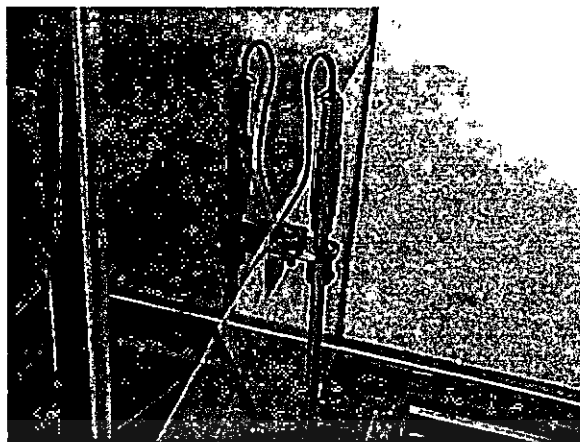


รูปที่ ข.6 ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

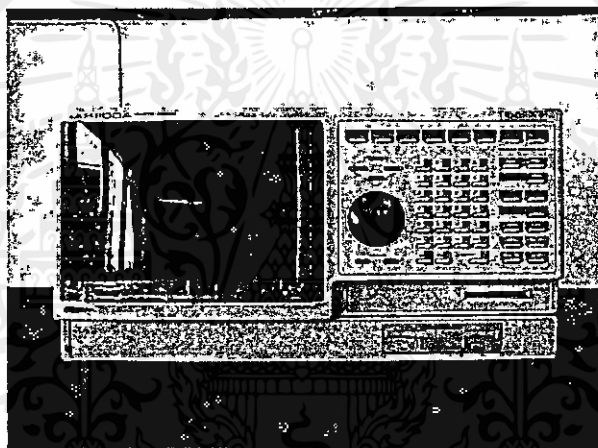


รูปที่ ข.7 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

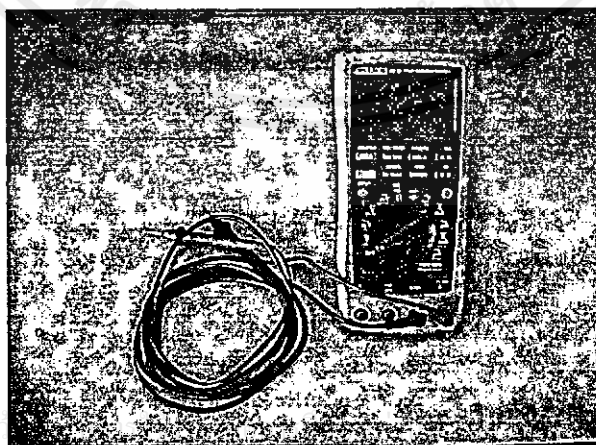
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.8 เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบสารฉนวนแข็ง



รูปที่ ข.9 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Analyzing Recorder YOGOGAWA AR 1100 A



รูปที่ ข.10 เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า Volt meter Fluke 89 VI True Digital Multi meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 Variable voltage transformer CTSB-5M 1 kVA



รูปที่ ข.12 Temperature & Humanity T-1 M MINOLTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



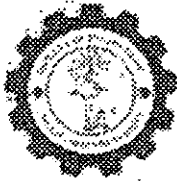
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

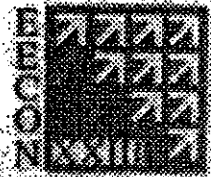
## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



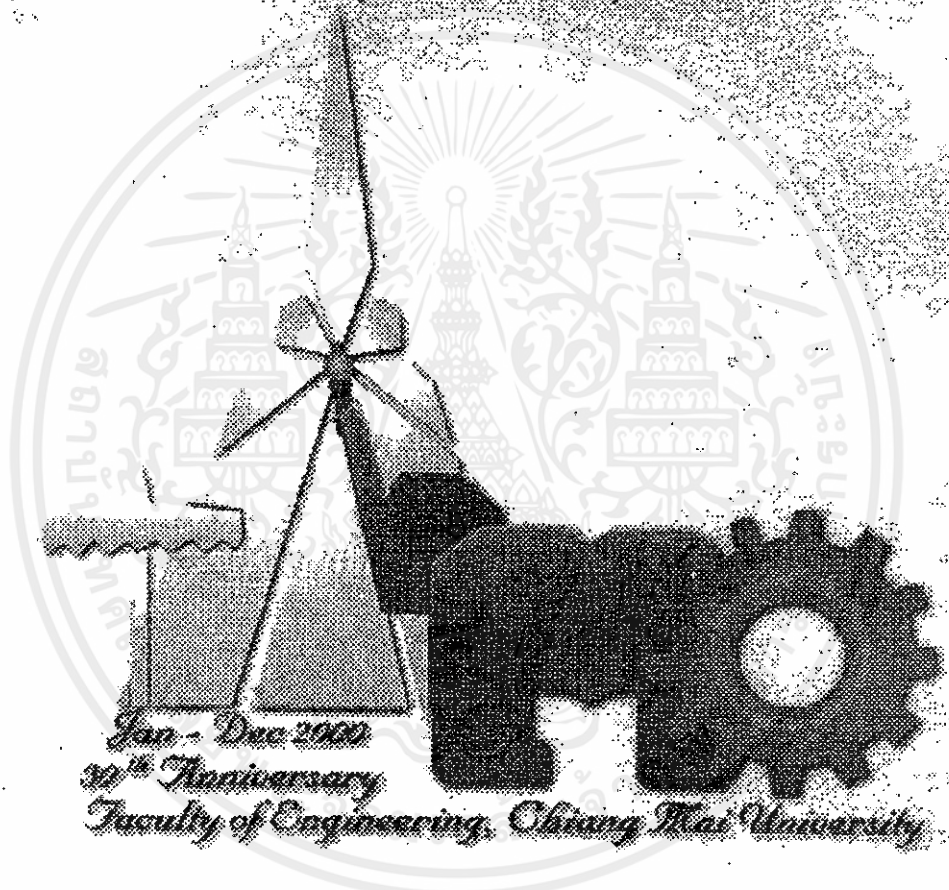
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ  
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23



23<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference  
(EECON-23)



วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

# ชุดทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูงของสารฉนวนแข็งแบบอัตโนมัติ

## Automatic High Voltage Electrical Insulator Material Test Set

พงษ์ศักดิ์ จารุวรรณชัย\* มินเรศน์ เตชะวงศ์\*\* ศิริวัฒน์ โทธิระวฤต\*\*

\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530 โทร 988-3655 ต่อ 151 Email : jpongsak@mut.ac.th

\*\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนน ลาดกระบัง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 326-9902, 737-3000 ต่อ 3518 Email : minaread@thaimail.com

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการสร้างชุดทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูง ของ สารฉนวนแข็งแบบอัตโนมัติที่สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิสารฉนวน ของแข็งก่อนการทดสอบ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกควบคุมให้ ทำงานอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถทดสอบการ เบรคความได้ทั้ง การปรับค่าแบบทันทีทันใด และแบบขั้นบันได ซึ่งใช้ รูปทรงอิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบ ตามเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน IEC 243-1 1998 ในขบวนการทดสอบสามารถปรับอุณหภูมิภายในผู้ ทดสอบ ได้ตั้งแต่อุณหภูมิแวดล้อม จนถึงค่าสูงสุด 100 องศาเซลเซียส เป็นประโยชน์สำหรับทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อ สารฉนวนของแข็งก่อนเลือกนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ : สารฉนวนของแข็ง, เบรคความ, อิเล็กโทรด

### Abstract

This paper proposes the construction of high-voltage Test set which can investigate electrical strength of solidly insulating materials. Temperature can be automatically changed before the process is launched. High voltage source is spontaneously controlled by microcontroller. Break down test procedure comprises of short time test and step by step test which utilize sphere-plane electrode follow IEC 243-1 1998 standard. While the temperature in test unit can be adjusted from ambient temperature to 100 °C. This is advantage for studying the effect of temperature alteration on solidly authentic utilization in power system.

Key Word : Insulator Material, Breakdown , Electrode

### 1. บทนำ

การฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นการป้องกันการลัดวงจร ระหว่างส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน และทำหน้าที่ระบายความร้อนใน ขณะเดียวกัน ฉนวนแต่ละชนิดมีขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิ การเลือกใช้

ฉนวนควรเลือกใช้ฉนวนที่เหมาะสมกับงาน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อ บุคคล และทรัพย์สิน ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามีการใช้ฉนวนแข็ง มาก เช่นเซรามิกเบรคเกอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้า สายเคเบิล ฯลฯ จำเป็น ต้องมีการทดสอบฉนวน เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ โดยเฉพาะ อย่างยิ่งในการใช้งานที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ในบทความนี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้างชุดทดสอบสารฉนวน ของแข็ง เพื่อศึกษาลักษณะสารฉนวนของแข็งว่ามีคุณสมบัติเป็นอย่างไร ในสภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งปัจจุบันการป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบยังเป็นแบบใช้การปรับด้วยมือ [4, 5] ค่าที่ทดสอบได้ในแต่ละครั้งจะไม่เที่ยงตรง จึงได้พัฒนาการป้อนแรงดันให้เป็นระบบอัตโนมัติ โดยใช้ชุด ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อจับแหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้าให้สามารถตั้งโปรแกรมทดสอบได้ตรงตามมาตรฐาน ซึ่ง จะมีความเที่ยงตรงสูงกว่า

### 2. ทฤษฎี

- กลไกการเบรคความในสารฉนวนแข็ง ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข และกระบวนการป้อนแรงดัน และที่สำคัญขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของ แรงดัน หรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรคความในสารฉนวนแข็งแบ่ง ได้ตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อน และปรากฏการณ์ของการเบรคความ [2] คือ

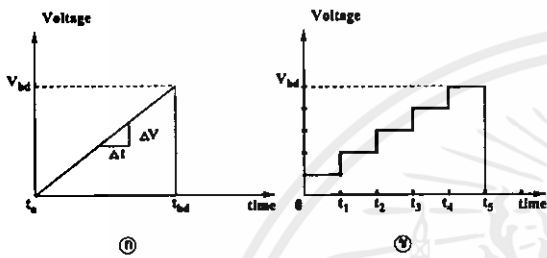
1. เบรคความแบบบริสุทธี หรือแบบไอออนิก
2. เบรคความเนื่องจากแรงดันไฟฟ้า
3. เบรคความแบบสตรีมเมอร์
4. เบรคความแบบเทอร์นัล
5. เบรคความเนื่องจากผลทางเคมี
6. เบรคความเนื่องจากคิสซาร์ภายใน

การทดสอบในโครงการวิจัยนี้ได้ทดสอบเกี่ยวกับอุณหภูมิที่มี ผลทำให้สารฉนวนของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อป้อนไฟฟ้าแรงดันสูง เกิดสนามไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลผ่านเนื้อสารฉนวน กระแสนี้ทำให้มี อุณหภูมิความร้อนภายในเนื้อสารฉนวนของแข็งสูงขึ้น ฉนวนยังคงสภาพ การเป็นฉนวนอยู่ได้ หากอุณหภูมิความร้อนที่เกิดสามารถระบายออกสู่

ตัวกลางได้ทันที แต่ถ้าอุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้นจากปกติความร้อนในสาร  
 ผนวของแข็งไม่สามารถระบายออกไปได้ จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการ  
 เบรคควานน์ง่ายขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมจะเข้าเสริมความร้อนให้กับ  
 สารผนวของแข็ง

-การทดสอบหาค่าแรงดันเบรคควานน์สารผนวของแข็งตาม  
 มาตรฐาน IEC 243-1 [4, 5] แบ่งกระบวนการเบรคควานน์ออกเป็น 2 ขั้นตอน  
 คือ

1. แบบทันทีทันใด (Short time Breakdown test)
2. แบบขั้นบันได (Step By Step test)



รูปที่ 1. ก. แรงดันทดสอบแบบทันทีทันใด  
 ข. แรงดันทดสอบแบบขั้นบันได

การทดสอบแบบทันทีทันใดเป็นการปรับแรงดันเพิ่มขึ้นตั้งแต่  
 0 โวลท์ จนกระทั่งถึงแรงดันเบรคควานน์  $V_{bd}$  โดยจะต้องเพิ่มแรงดันให้  
 อยู่ในเวลาที่สั้นๆ ซึ่งจะตั้งอยู่ในช่วง  $t_0$  ถึง  $t_{bd}$  เวลาไม่ควรเกิน 20  
 วินาที

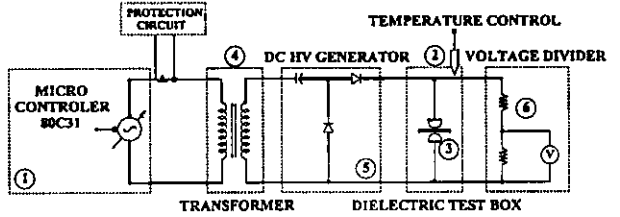
ส่วนการทดสอบแบบขั้นบันได เลือกแรงดันเริ่มต้น  $V_s$  โดย  
 เริ่มจาก 50% ของแรงดันเบรคควานน์ในการทดสอบแบบทันทีทันใด  
 (Short-Time Test) เป็นการปรับแรงดันเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งขั้นแล้วหยุดรอ  
 เวลาจนถึง  $t_1$  แล้วปรับแรงดันเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งขั้น ทำการเพิ่มแรงดันตาม  
 กราฟในรูปที่ 1. (ข) จนกระทั่งถึง  $V_{bd}$  หรือเกิดเบรคควานน์

### 3. การออกแบบ

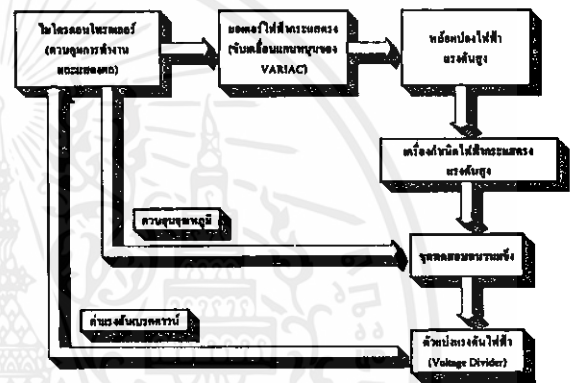
วัตถุประสงค์ของการออกแบบ และสร้างชุดทดสอบนี้ เพื่อใช้  
 ทดสอบสารผนวของแข็ง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักในแต่ละส่วน  
 ดังนี้

1. ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการจ่ายแรงดัน
2. ชุดทดสอบแบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ขั้วอิเล็กโทรด
4. หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง
5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
6. ชุดแบ่งแรงดัน

อุปกรณ์ลำดับที่ 4, 5, 6 มีอยู่แล้ว



รูปที่ 2. วงจรการทำงานของชุดทดสอบสารผนวของแข็ง



รูปที่ 3. โค้ดแกรมการทำงานของชุดทดสอบสารผนวของแข็ง

หลักการการทำงานของชุดทดสอบนี้เริ่มที่ผู้ควบคุมแรงดัน เป็น  
 การพัฒนาการควบคุมแรงดันจากการใช้มือหมุนแหล่งจ่ายแรงดัน เป็น  
 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เลือกแรงดันได้แบบทันทีทันใด และแบบขั้น  
 บันได ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ แรงดันไฟฟ้าทางคาน์อินพุทผ่าน  
 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงขนาด 220/22000 โวลท์ เข้าสู่  
 เครื่องกำเนิด ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ  
 เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ ซึ่งมีสาร  
 ผนวของแข็งตั้งอยู่ระหว่างกลาง เข้าสู่ขบวนการเบรคควานน์ในสาร  
 ผนวของแข็ง แรงดันเบรคควานน์จะถูกปรับโดยชุดแบ่งแรงดันแสดงผล  
 เป็นค่าดิจิตอล เมื่อมีการเบรคควานน์เกิดขึ้น วงจรควบคุมจะทำงานแบบ  
 อัตโนมัติ โดยมีชุดป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้า จะทำหน้าที่ตั้งให้วงจรควบคุม  
 ทำงานตั้งใหม่โดยอัตโนมัติ

#### 3.1 การออกแบบชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการจ่ายแรงดัน

ออกแบบโดยใช้ CPU เบอร์ 80C31 วงจร WATCHDOG เป็น  
 ตัวเชื่อมต่อกับ RAM 62256 ซึ่งสามารถจัดการหน่วยความจำได้ 64 กิโล  
 ไบท์ แบ่งเป็น SOCKET U2 โปรแกรมบนอนิเตอร์ 32 กิโลไบท์ และ

SOCKET U3 เก็บข้อมูล 32 กิโลไบต์ U3 นี้สามารถพัฒนาโปรแกรมบนบอร์ดผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

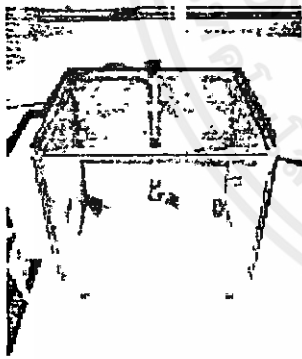
8255 อินพุท/เอาต์พุท จะมีหน่วยอินพุท/เอาต์พุทอยู่ 1 ตัว ขั้วต่อเป็นแบบ 26 หัวอ่าน โดยสามารถใช้อินพุทขาอินพุทในตระกูล EX-SERIES ได้ การใช้งาน 8255 จำเป็นต้องส่งรหัสควบคุมไปยังพอร์ทควบคุมก่อนเสมอ ซึ่งเป็นการกำหนดคุณสมบัติของพอร์ท A, B, C

LCD PORT จะมีพอร์ท LCD ให้ สามารถต่อเข้ากับ LCD โมดูลแบบ Dot Matrix ได้ทันที ซึ่งใช้ขาสัญญาณ 14 ขา การใช้งาน LCD พอร์ท มีการจัดวางวงจรแบบ Memory Map ช่วยในการเขียนโปรแกรมได้ง่ายขึ้น, SERIAL PORT ใช้ต่อตรงได้จากชิป 8031 โดยผ่าน DS 275

ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นชุดที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการใส่ตั้งสัญญาณไปส่งให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงาน เพื่อจับแกนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Variac 0-240 V.) ทางด้านอินพุท ได้มีการสร้างชุดวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งได้ทำการสร้างชุดป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแรงดันเบรคคาวาน์ ซึ่งได้ทำการต่อร่วมกับชุดควบคุมการปรับแรงดันแบบอัตโนมัติโดยต่อทางด้านอินพุทของแหล่งจ่ายไฟ

### 3.2 การออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ตู้ทดสอบ หรือพื้นที่ที่ใช้ทดสอบจะมีขนาดที่เพียงพอที่จะบรรจุอุปกรณ์ทดสอบ และสามารถป้องกันอุบัติเหตุจากการสัมผัสกับไฟฟ้าแรงสูง



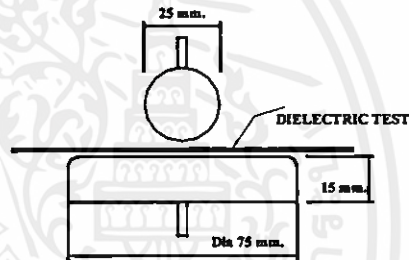
รูปที่ 4. ตู้ทดสอบแบบควบคุมอุณหภูมิ

- ตู้ทดสอบแบบควบคุมอุณหภูมิวัสดุที่ใช้สร้างทำคือกระจกทนความร้อนสูงสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลง และการเบรคคาวาน์ของฉนวนแข็งขณะทำการทดสอบ
- ฝาปิดกล่องชุดทดสอบ ตรงกลางจะเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อรับความร้อนจากฮีตเตอร์ และใช้เปลี่ยนสารฉนวน, ขั้วอิเล็กโทรด

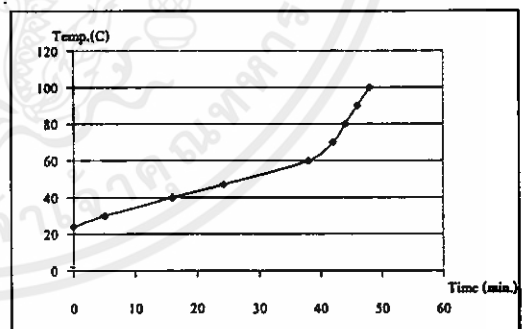
ตู้ทดสอบ สามารถให้ความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิแวดล้อม ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวช่วยให้ความร้อน มีชุดควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวควบคุมระดับของอุณหภูมิ โดยการออกแบบขนาดตู้ทดสอบ ในรัศมี 3.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางอิเล็กโทรดทรงกลมจะต้องไม่มีโลหะ หรือตัวนำใดๆ [2] ซึ่งทรงกลมมีขนาด 2.5 ซม. จะได้  $(3.5 \times 2.5) = 8.75$  ซม. แต่ออกแบบเพื่อติดตั้งฮีตเตอร์เข้าในตู้ด้วยจึงมีขนาดรวมทั้งหมัด 20x20x30 ซม. ดังรูปที่ 4.

### 3.3 การออกแบบขั้วอิเล็กโทรด

ความมาตรฐาน IEC 243-1 ขั้วทดสอบทางไฟฟ้าแบบทรงกลม - ระบาย ซึ่งทรงกลมมีขนาด 25 มม. ± 1 มม. และระบายมีขนาด 75 มม. ± 1 มม. หน้า 15 มม. แกนขั้วอิเล็กโทรด เป็นตัวขั้ว อิเล็กโทรด มี 2 ด้านคือด้านขั้วทดสอบ และด้านที่สามารถปรับเลื่อนได้ วัสดุที่ใช้ทำคือทองเหลือง โดยความหนาของฉนวนที่ทดสอบมีขนาดไม่เกิน 3 มม.

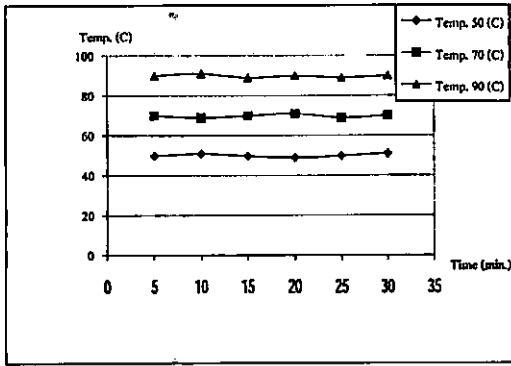


รูปที่ 5. พิกัดอิเล็กโทรดทรงกลม-ระบาย



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์อุณหภูมิเทียบกับเวลา

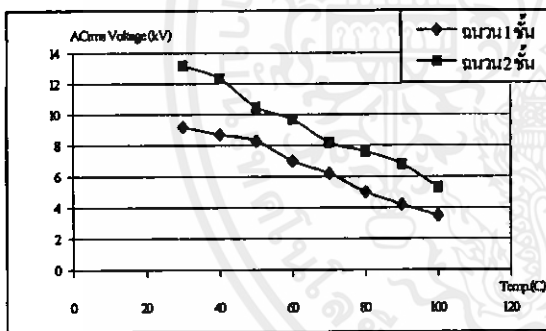
ในรูปที่ 6. เป็นเวลาที่ใช้ในการปรับระดับความร้อนจากชุดควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบให้เพิ่มขึ้นจากสภาวะแวดล้อมจนถึง 100 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 7. เป็นการแสดงให้เห็นถึงความถี่ของอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบในช่วงเวลา 30 นาที



รูปที่ 7. ระดับความถี่ของแรงดันของอุณหภูมิ

#### 4. การทดลองการวิเคราะห์ผลการทดลองการเบรคความถี่

งานวิจัยชุดทดสอบทางไฟฟ้าของสารฉนวนของแข็ง โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับชุดทดสอบฉนวนของแข็ง เพื่อทดสอบค่าความคงทนของสารฉนวน และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคความถี่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือสามารถควบคุมการปรับแรงดันแบบอัตโนมัติโดยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งมีความเที่ยงตรงในการป้อนแรงดันทดสอบในแต่ละครั้งได้เท่ากัน



รูปที่ 8. แรงดันเบรคความถี่สารฉนวนแข็งที่อุณหภูมิแวดล้อมจนถึง 100 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อเรานำค่าของแรงดันเบรคความถี่ของการทดสอบมาเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบที่ความหนาของสารฉนวนของแข็ง ระหว่างฉนวนไมก้า 1 ชั้น กับฉนวนไมก้าซ้อนกัน 2 ชั้น พบว่าค่าแรงดันเบรคความถี่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง จะเกิดกระแสไหลผ่านทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นในสารฉนวนของแข็ง สารฉนวนของแข็งยังคงสภาพได้หากความร้อนที่เกิดระบายนอกตัวกลางได้ทันเมื่ออัตราความร้อนที่สูงขึ้นกว่าที่ระบายออกไปจะทำให้เกิดการเสียหาย มีพลังงานจลน์ที่สูง นำไปสู่การเกิดเบรคความถี่ต่อไป สมการที่ 1

$$W_{ac} = \frac{E^2 \cdot f \cdot \epsilon \cdot \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} \quad \frac{w}{cm^3} \quad (1)$$

ส่วนแรงดันเบรคความถี่สารฉนวนของแข็งที่ความหนา 1 ชั้น กับ 2 ชั้น นั้นสารฉนวนของแข็ง 2 ชั้นมีค่าแรงดันเบรคความถี่มากกว่า 1 ชั้น เนื่องจากผลของค่าความต้านทานจำเพาะของสารฉนวนของแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในการทดสอบสามารถเลือกสารฉนวนของแข็ง ก่อนไปใช้งานในทางอุตสาหกรรมได้

#### 5. สรุปผลการทดลอง

ชุดทดสอบสารฉนวนของแข็งสร้างขึ้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 243-1 มีพิกัดแรงดันอินพุท 22 kV AC และ 100 kV DC พิกัดอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิแวดล้อมจนถึง 100 องศาเซลเซียส ค่าผิดพลาดจากการทดสอบอุณหภูมิภายในชุดทดสอบ  $\pm 1\%$  สามารถทดสอบสารฉนวนของแข็ง ที่มีขนาดหน้าไม่เกิน 3 มม. ฉนวนไมก้าที่นำมาทดสอบ 1 ชั้น หนา 0.13 มม. ที่ค่าแรงดันเบรคความถี่ที่อุณหภูมิหนึ่ง ทำการทดลอง 10 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งการออกแบบสร้างชุดทดสอบเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นใช้เองในประเทศไทย ผลการนำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีราคาแพงรองรับการทดสอบสารฉนวนของแข็งตามมาตรฐานอนาคตสามารถพัฒนาการควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และแสดงผลเป็นรูปกราฟที่คิดได้

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

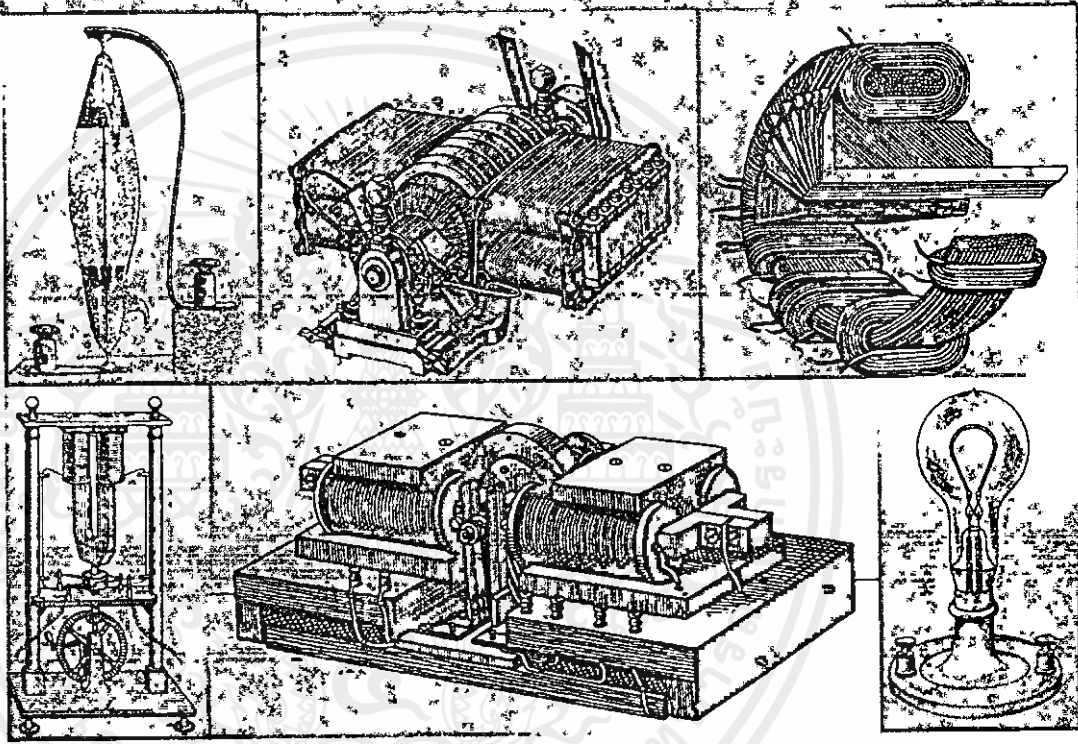
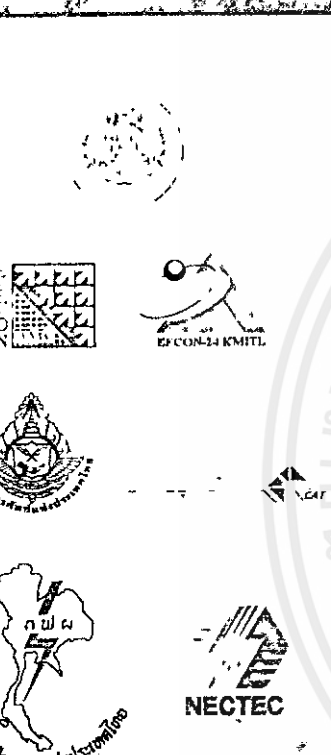
งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ด้วยความร่วมมือของ นายอดิกร เสวีพัฒนานนท์ และคณะ ขอขอบพระคุณไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Stephen A. Sebo, John D.Sakich, " POLYMER INSULATOR TEST PROCEDURES AND TECHNIQUES FOLLOWED DURING FOG CHAMBER TEST SERIES NO. 734-737, IEEE 1997
- [2] Kuffel, E. and W.S. Zaengl "HIGH-VOLTAGE ENGINEERING 1984
- [3] S. Sedra, C. Smith, "MICROELECTRONIC CIRCUITS," NEW YORK OXFORD, OXFORD UNIVERSITY, NO 148-151, 1991.
- [4] IEC standard No.243-1,METHODS OF TEST ELECTRIC STRENGTH OF SOLID INSULATING MATERIALS (PART 1 : TEST AT POWER FREQUENCIES)
- [5] IEC standard No.243-2,METHODS OF TEST ELECTRIC STRENGTH OF SOLID INSULATING MATERIALS (PART 2 : ADDITIONAL REQUIREMENTS มา TEST USING DIRECT VOLTAGE

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

## 24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-24)



### Volume 2

- งานทดลอง
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัด (CF)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ
- วิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

สนับสนุนโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปใช้  
เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการนำเอกสารไปใช้ กรุณาติดต่อขอสงวนลิขสิทธิ์

# การพัฒนาตัวความต้านทานแบ่งแรงดันสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบฉนวนแข็ง

## A development of solid insulation voltage divider using resistance for measuring high voltage direct current

พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก มินเรศน์ เตชะวงศ์ วงศ์พันธ์ ทัศนางกูร และศิริวัฒน์ โทษิเวชกุล\*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 10530

โทร/โทรสาร : (02) 988-3655 ต่อ 149 Email: Pongtep@mut.ac.th

\* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร : (02) 737-3000 Email: kpsiriwa@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการศึกษาค้นคว้าเพื่อพัฒนาและสร้างตัวความต้านทานแบ่งแรงดันสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชนิดฉนวนแข็ง ฉนวนที่ใช้เป็นฉนวนเรซิน โดยให้สามารถวัดได้ที่พิกัดแรงดัน 100 กิโลโวลท์ ใช้ตัวความต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ โดยภาคแรงดันสูงมีความต้านทาน 220 เมกโอห์ม และความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 220 กิโลโอห์ม มีอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเท่ากับ 1,000 : 1 โดยได้จัดสร้างและทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60-2 และมีค่าผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์  $\pm 1\%$  เป็นประโยชน์ในการลดผลกระทบจากสถานะแวดล้อมที่มีต่อตัวความต้านทานแบ่งแรงดันที่ใช้ฉนวนเป็นแบบฉนวนเหลว และฉนวนอากาศที่มีราคาแพง สามารถเคลื่อนย้ายสะดวก ขนาดเล็ก และราคาถูก

คำสำคัญ : ฉนวน, ความต้านทานแบ่งแรงดัน

### ABSTRACT

This paper reported about the development and construction of a solid insulation voltage divider using resistance for measuring high voltage direct current. The solid insulation used in this project is resin. The purpose is to reduce problem, which come from poor environmental that might effect to liquid insulation and high cost of gas insulation. Rated voltage of the voltage divider is 100 kV. Metal film resistors have been used, the resistance of high voltage arm is 220 M $\Omega$  and the resistance of low voltage arm is 220 k $\Omega$ . The scale factor of the voltage divider is 1,000 : 1. The voltage divider has character corresponding to IEC 60-2 standard and has percent error with in  $\pm 1\%$

Keyword : Insulator, Resistance Voltage Divider

### 1. บทนำ

การสร้าง และการส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงมีประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนาในด้านอุตสาหกรรม วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการสร้างและส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง เช่น ฉนวนลูกถ้วย สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์ตัดคอน ต้องมีการทดสอบตามแรงดันที่ใช้ทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดแรงดันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ชุดแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในการวัด โดยตัวแบ่งแรงดันที่สั่งซื้อจากต่างประเทศนั้นมีราคาสูง ในโครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดแบ่งแรงดันแบบความต้านทานแบบฉนวนแข็ง โดยใช้วัสดุที่สามารถหาซื้อได้สะดวกในประเทศ

จากปัญหาของฉนวนของเหลวที่มีสารเจือปน ความชื้น และมีอายุการใช้งานระยะหนึ่ง และก๊าซ (Gas) ที่มีราคาแพงและมีโอกาสรั่วออกสู่บรรยากาศ ซึ่งทำให้เกิดการเบรคดาวน์ (Breakdown) ขึ้นในเครื่องมือวัดแรงดันสูงได้ โครงการวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบใช้ชุดแบ่งแรงดันที่ใช้ฉนวนเป็นฉนวนชนิดของแข็ง

ฉนวนแข็งมีหลายชนิด นอกจากใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังใช้เป็นตัวรองรับแรงทางกล ไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนความอายุการใช้งาน เคลื่อนย้ายได้สะดวกจึงสามารถนำไปใช้วัดแรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการได้ง่าย แต่ต้องระวังในเรื่องสารเจือปนในเนื้อสารฉนวนแข็งในขั้นตอนของการสร้าง ซึ่งถ้าสร้างฉนวนแข็งได้ดีในครั้งแรก ก็จะเป็นเครื่องมือที่สมบูรณ์และมีอายุการใช้งานนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Keyword : Insulator, Resistance Voltage Divider

## 2. ทฤษฎี

ชุดแบ่งแรงดันเป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำ วัดได้ ชุดแบ่งแรงดันแบบใช้ตัวความต้านทาน ประกอบด้วยตัวความต้านทานสองชุดต่อกันอยู่คือ ตัวความต้านทานภาคแรงดันสูง และตัวความต้านทานภาคแรงดันต่ำ ตัวความต้านทานภาคแรงดันสูงของชุดแบ่งแรงดันจะรับแรงดันเกือบทั้งหมด ตัวความต้านทานภาคแรงดันต่ำรับแรงดันต่ำที่จะนำไปเข้าโวลต์มิเตอร์ โดยโวลต์มิเตอร์ที่นำมาต่อต้องมีอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงๆ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดของค่าที่วัดได้จากผลของอัตราส่วนความต้านทานของชุดแบ่งแรงดัน ซึ่งสำหรับความสัมพันธ์ค่าความต้านทานกับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง สามารถอธิบายได้จากสมการดังนี้

$$v(t) = R i(t) \quad (1)$$

หรือ

$$V = IR \quad (2)$$

## 3. การออกแบบ

### 3.1 การสร้างความต้านทานภาคแรงดันสูง

ในการออกแบบ “ความต้านทานควรมีค่าโอห์มสูงมากพอที่จะจำกัดกระแสไหลผ่านที่แรงดันกำหนดอยู่ในช่วงเป็นร้อยๆ ไมโครแอมป์ อย่างมากที่สุดไม่ควรเกิน 1 มิลลิแอมป์ นั่นคือใช้ความต้านทานอย่างค่า  $1 \text{ M}\Omega / 1 \text{ W}$  ( $1 \text{ M}\Omega / \text{kV}$ )” [1] ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือกระแสรั่วไหลตามผิว ซึ่งอาจทำให้ผลของการวัดผิดพลาดได้ถ้าหากค่าความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันนั้นมีค่าสูงเกินไป “ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบนคือ จะต้องไม่สูงจนเกินไป กล่าวคือกระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำจนเกินไป ( $I \geq 0.1 \text{ mA}$ ,  $R \leq 10 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ )” [1]



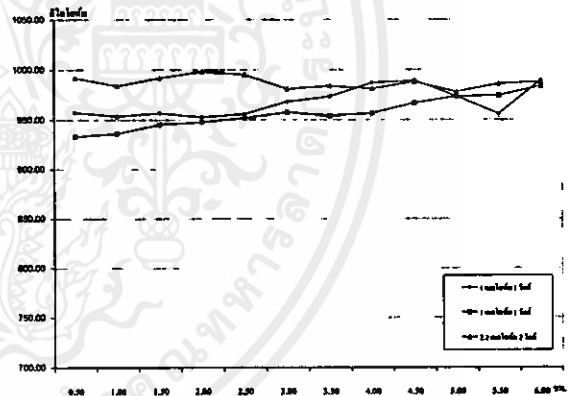
รูปที่ 1 ความต้านทานที่หล่อด้วยเรซิน

ในโครงการวิจัยนี้ใช้ตัวความต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยกว่าตัวความต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์ม [4] มาต่อ

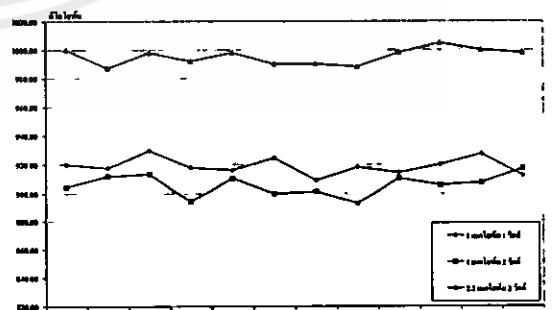
กันเพื่อให้สามารถรองรับแรงดัน 100 kV ได้ โดยเลือกใช้ตัวความต้านทานขนาดเล็กที่สุดที่สามารถใช้ได้คือเลือกใช้ค่าความต้านทาน  $1 \text{ M}\Omega$  ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความต้านทานรวมได้ดังนี้

$$\frac{100 \text{ kV}}{1 \text{ kV}} \times 1 \text{ M}\Omega = 100 \text{ M}\Omega \quad (4)$$

จากที่กล่าวมา ขนาดที่เล็กที่สุดของตัวความต้านทานที่นำมาใช้ได้คือ  $1 \text{ M}\Omega / 1 \text{ W}$  พบว่าต้องใช้ตัวความต้านทานจำนวน 100 ตัวมาต่ออันดับกัน แสดงว่าตัวความต้านทานแต่ละตัวต้องรับแรงดันตกคร่อมที่ 1,000 V และจากค่า Safety factor ที่ 200% ดังนั้นความต้านทานแต่ละตัวจะต้องสามารถรับแรงดันตกคร่อมได้ที่ 2,000 V ได้ด้วย จากการทดสอบป้อนแรงดันให้ตัวความต้านทานที่หล่อในเรซินหนา 3.5 cm. พบว่าตัวความต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega / 1 \text{ W}$  และ  $1 \text{ M}\Omega / 2 \text{ W}$  มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานมาก เมื่อทดสอบที่ระดับแรงดัน 1,000 V นาน 6 ชั่วโมง แสดงว่าไม่สามารถนำตัวความต้านทานทั้งสองขนาดมาสร้างชุดแบ่งแรงดันนี้ได้ จากนั้นทดสอบเพิ่มจำนวนของตัวความต้านทานแล้วทำการทดสอบที่ระดับ 1,000 V นาน 6 Hr. พบว่าไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากที่ ตัวความต้านทานมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงมาก



รูปที่ 2. การเปลี่ยนแปลงค่า คคท.ต่อเวลา ที่แรงดัน 1,000 โวลต์



รูปที่ 3. การเปลี่ยนแปลงค่า คคท.ต่อเวลา ที่แรงดัน 500 โวลต์

เอกสารนี้เป็นงานวิจัยที่ใช้ตัวความต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงทดสอบนำตัวความต้านทาน 2.2 MΩ 2 W 2 ตัวมาต่อขนานกันเป็นค่า 1.1 MΩ แล้วหล่อด้วยเรซินหนา 3.5 cm. จากนั้นทดสอบป้อนแรงดัน พบว่าค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงที่ระดับแรงดัน 1,000 V เมื่อทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังนั้นจึงกำหนดให้ที่ระดับแรงดัน 1,000 V เป็นค่าแรงดันที่คำนวณรวม Safety factor 200% แล้ว ส่วนค่าแรงดันตกคร่อมตัวความต้านทานแต่ละคู่จะใช้งานปกติคือ 500 V แสดงได้ดังรูปที่ 2-3

ในการเลือกใช้ตัวความต้านทานในการสร้างชุดแบ่งแรงดัน จึงเลือกใช้ตัวความต้านทาน 2.2 MΩ 2 W 2 ตัวมาต่อขนานกันเป็นค่า 1.1 MΩ ทั้งหมดจำนวน 200 คู่ และนำมาต่ออันดับกัน ทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมของภาคแรงดันสูงเท่ากับ 220 MΩ และค่าความสูญเสียสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเป็นไปดังสมการ

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

จากสมการพบว่าค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นของวงจรมีค่าประมาณ 45 W ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวชุดแบ่งแรงดัน การเลือกใช้ตัวความต้านทานฟิล์มโลหะที่มีค่าความต้านทาน 2.2 MΩ 2 W เปรอร์เซ็นต์ผิดพลาด ±1% นั้นแสดงว่าตัวความต้านทานแต่ละตัวที่ใช้มีค่าความต้านทานไม่เท่ากับ 2.2 MΩ เสียทีเดียว

### 3.1.1 การออกแบบการจัดวางตัวความต้านทานภาคแรงสูง

การจัดวางตัวความต้านทานใช้ตัวความต้านทาน 2 ตัวต่อขนานกันและนำแต่ละคู่มาต่ออันดับกัน โดยจัดวางเรียงเป็นชั้น ชั้นละ 10 คู่ บนแท่งอะคริลิกที่จัดเรียงเป็นรูปครึ่งวงกลม ทำให้ได้ชั้นที่จัดวางตัวความต้านทานทั้งหมดเท่ากับ 20 ชั้น จึงได้ค่าความต้านทานประมาณ 220 MΩ

และจากการใช้ฉนวนแข็งเป็นเรซินเป็นตัวช่วยป้องกันการเกิดเบรคความระหว่างชั้นของตัวความต้านทาน ซึ่งในการออกแบบจัดวางตัวความต้านทานต้องมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ต่ำกว่าค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า ( $E_v$ ) ของฉนวนเรซิน ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเกิดที่ผิวทรงกลม (จุดบักกรี) ( $x = r_2$ ) คือ

$$E_{max} \approx \left[ \frac{Q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{(d-r_2)^2} \right] = \frac{V \left[ \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{(d-r_2)^2} \right]}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2}{d}} \quad (6)$$

กำหนด  $V$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างจุดบักกรีทั้งสอง

$r_1$  คือ รัศมีของจุดบักกรีที่หนึ่ง

$r_2$  คือ รัศมีของจุดบักกรีที่สอง

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดบักกรีทั้งสอง

$E_{max}$  คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อคำนวณจากสมการที่ (4) จะได้ระยะห่างระหว่างตัวความต้านทาน ใช้สูตรหาความเครียดสนามไฟฟ้าแบบทรงกลม - ทรงกลมวางห่างกัน โดยทรงกลมทั้งสองแทนจุดบักกรีที่ขั้วตัวความต้านทานระหว่างชั้นที่อยู่ใกล้กัน โดยให้จุดบักกรีมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 0.25 cm และมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวความต้านทานระหว่างชั้นสูงสุดคือ 10 kV

ในการสร้างจริงได้ใช้ระยะห่างระหว่างชั้นที่ 2.5 cm และใช้ระยะห่างระหว่างแถวที่ 1 cm ระยะห่างระหว่างจุดบักกรีทั้งสองของตัวความต้านทานที่ระยะ 4.5 cm เพื่อความสะดวกในการบักกรี และจากการที่จุดบักกรีมีขนาดที่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25 cm จึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเรซินมาก และจากจำนวนชั้นทั้งหมด 20 ชั้น มีระยะเท่ากับ 57.5 cm ถ้าสำหรับแรงดันที่ตกคร่อมตัวความต้านทานแต่ละตัวมีค่า 500 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นและระหว่างแถวมาก ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดบักกรีของตัวความต้านทานที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยมาก ซึ่งในการสร้างจริงไม่สามารถทำได้เนื่องจากโครงสร้างของตัวความต้านทานที่มีขนาดใหญ่ จึงใช้



รูปที่ 4. ความต้านทานภาคแรงดันสูง

### 3.2 การออกแบบและการสร้างภาคแรงดันต่ำ

คุณลักษณะที่ต้องการ ในภาคแรงดันต่ำเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณลักษณะของชุดแบ่งแรงดัน ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานเหล่านี้

3.2.1 ค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำต้องมีค่าไม่มากจนเกินไป เพื่อให้มีความผิดพลาดของแรงดันที่วัดได้ที่เกิดจากจากค่าความต้านทานน้อยที่สุดเมื่อนำโวลต์มิเตอร์มาต่อขนานเข้ากับความต้านทานภาคแรงดันต่ำ

3.2.2 แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำจนเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น กระแสที่ไหลในเปลือกนอกของสายเคเบิลที่ใช้กับเครื่องมือวัด

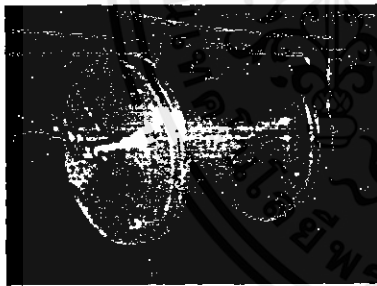
ในการออกแบบชุดแบ่งแรงดันให้มีค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเท่ากับ 1,000 ตามข้อกำหนด สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำได้จากสมการ

$$F = \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad (7)$$

เมื่อ  $F$  คือ สเกลแฟกเตอร์ของชุดแบ่งแรงดัน  
 $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงดันสูง  
 $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงดันต่ำ

$$R_2 = \frac{R_1}{F-1} = \frac{220 \text{ M}\Omega}{(1000-1)} \approx 220 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

ดังนั้นในการสร้างตัวความต้านทานด้านที่มีค่า 2.2 M $\Omega$  2 W ขนาดกัน 10 ตัว ที่เป็นชนิดเดียวกับด้านแรงดันสูงคือชนิดฟิล์มโลหะ เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ และลดค่าความเหนี่ยวนำในค่าความต้านทาน



รูปที่ 5. ค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำ

## 4. การทดสอบ

### 4.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดัน

(Determination of the scale factor)

การหาค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของชุดแบ่งแรงดันทำได้หลายวิธี ในที่นี้ใช้วิธีการหาอัตราส่วนของค่าความต้านทานภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำ โดยให้ค่าที่วัดได้จริงมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 2\%$  จากค่าที่ออกแบบ

การหาค่าความต้านทานของภาคแรงดันสูงทำได้โดยใช้วิธีขนานความต้านทานที่มีค่าสูงสุดที่สามารถใช้โอห์มมิเตอร์วัดได้ หากเลือกค่าความต้านทานที่นำมาขนานยังมีค่าน้อย ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้น โดยในที่นี้ใช้ค่า 20 M $\Omega$  และใช้ Digital Multimeter Fluke 8842A ซึ่งมีย่านการวัดค่าความต้านทานสูงสุดที่ 20 M $\Omega$  เพื่อวัดค่าความต้านทานรวม จากนั้นจึงคำนวณค่าความต้านทานจริง

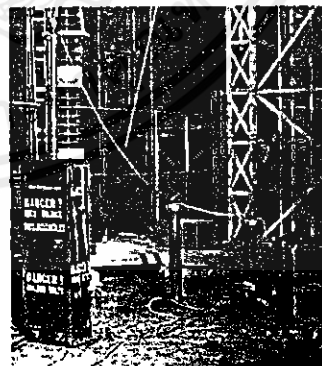
ส่วนค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำทำได้โดยการวัดค่าความต้านทานโดยตรง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30  $^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

ตารางที่ 1. ผลการทดสอบอัตราส่วนการลดทอน (รวมวัดแรงดัน)

	ค่าที่ออกแบบ	ค่าที่วัดได้จริง	เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด (%)
ค่าความต้านทานภาคแรงดันสูง	220 M $\Omega$	222.24 M $\Omega$	1.018
ค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำ	220 k $\Omega$	214.44 k $\Omega$	-2.527
ค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดัน	1,000	1,037.37	3.737

### 4.2 การทดสอบค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity test)

ทดสอบโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเปรียบเทียบกับชุดแบ่งแรงดันที่เป็นมาตรฐานที่ระดับแรงดัน 5 ระดับ โดยมีค่าแรงดันอินพุตคือ 10, 32.5, 55, 77.5 และ 100 kV ทำการวัด 5 ครั้งในแต่ละระดับแรงดันให้แรงดันที่วัดได้มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 2\%$  จากค่าแรงดันอินพุต โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30  $^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6-7



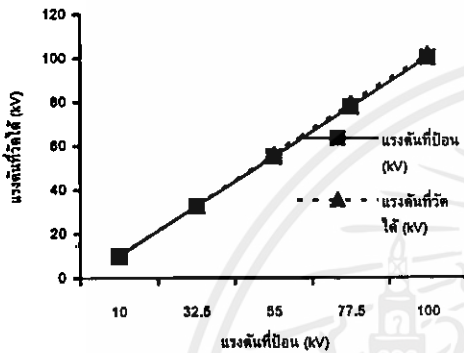
รูปที่ 6. การทดสอบค่าความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นของสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่แรงดัน 100 kV

วัดครั้งที่	ค่าแรงดันที่วัดได้ (kV)	ค่าผิดพลาด (%)
1	101.48	1.480
2	101.49	1.490
3	101.51	1.510
4	101.51	1.510
5	101.49	1.490
ค่าเฉลี่ย	101.50	1.500



รูปที่ 7. ความเป็นเชิงเส้นของระดับแรงดันที่วัดได้

4.3 การทดสอบความคงที่ของผลการวัดแรงดัน (Short term stability test)

เพื่อทดสอบค่าความคงที่ของแรงดันที่วัดได้ก่อนและหลังการให้แรงดันที่ระดับแรงดันที่กักเก็บแรงดันแบบจนวนแข็งเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยให้ค่าอัตราการลดทอนแรงดันของการวัดทั้งสองครั้งแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 1\%$

ตารางที่ 3. ผลการทดสอบความคงที่ของผลการวัดแรงดันที่ 20 kV

วัดครั้งที่	ค่าแรงดันที่วัดได้ก่อนป้อนแรงดันที่กัก (kV)	ค่าแรงดันที่วัดได้หลังป้อนแรงดันที่กัก (kV)
1	20.373	20.239
2	20.369	20.229
3	20.387	20.230
4	20.397	20.230
5	20.398	20.229
ค่าเฉลี่ย	20.385	20.231

ทำการวัดแรงดันที่ระดับ 20 kV จำนวน 5 ค่าแล้วหาค่าเฉลี่ยแล้วทำการป้อนแรงดัน 100 kV ซึ่งเป็นแรงดันที่กักเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นภายในระยะเวลา 10 นาทีหลังจากหยุดป้อนแรงดันที่กักให้กับโวลเตจดีไวเซอร์ ให้ป้อนแรงดันที่ระดับ 20 kV แล้ววัดแรงดันอีก 5 ค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย นำค่าทั้งสองครั้งมาเปรียบเทียบกัน การทดสอบครั้งนี้ทำที่อุณหภูมิ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

#### 4.4 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Withstand test)

ทดสอบโดยป้อนแรงดันที่ระดับ 110% ของแรงดันที่กัก ในที่นี้คือ 110 kV เพื่อดูว่าโวลเตจดีไวเซอร์สามารถรองรับในกรณีที่แรงดันเกินที่ 110% ของแรงดันที่กักได้ โดยการป้อนระดับแรงดันที่เกินที่กักนี้ให้กับโวลเตจดีไวเซอร์เป็นเวลา 1 นาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ผลการทดสอบปรากฏว่าโวลเตจดีไวเซอร์สามารถรองรับแรงดันที่ 110% ของแรงดันที่กักได้

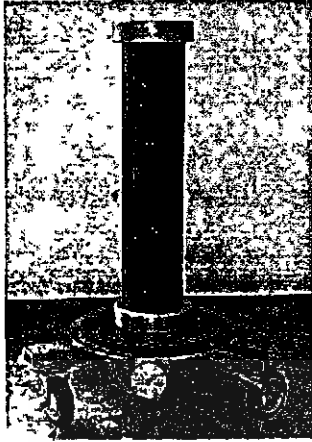
### 5. สรุป

ความต้านทานภาคแรงดันสูงใช้ตัวความต้านทานที่มีความต้านทานตัวละ 2.2 MΩ 2 W มาต่อขนานกันสองตัว ให้มีความต้านทานต่อละ 1.1 MΩ และนำมาต่ออันดับกันจนครบ 200 คู่ จึงทำให้มีความต้านทานรวมเท่ากับ 220 MΩ ต่อเรซินเป็นรูปทรงกระบอกกลวงที่มีระยะหนาประมาณ 2.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับ 14 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในเท่ากับ 7 cm และมีระยะความสูง 57.5 cm

ชุดความต้านทานภาคแรงดันต่ำใช้ตัวความต้านทานที่มีค่าความต้านทาน 2.2 MΩ 2 W 10 ตัวขนานกัน ต่อเข้ากับตัวความต้านทานภาคแรงดันสูง และอีกปลายหนึ่งต่อเข้ากับกระป๋องอลูมิเนียมลงกราวด์ชุดแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้น โดยใช้ ฉนวนเป็นแบบจนวนแข็งชนิดเรซิน

อิเล็กทรอนิกส์บนและด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 cm เพื่อประโยชน์ในการรับแรงกลและทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีความสม่ำเสมอ โดยที่ตรงกลางได้ทำช่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm ตามรูปร่างของการหล่อเรซิน ส่วนที่อิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างก่อนเข้าภาคแรงดันต่ำใช้แผ่นเบกาไลต์ความหนา 2 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm เป็นฉนวนกันระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างกับตัววัดซึ่งเป็นกราวด์ และที่ด้านล่างของแผ่นเบกาไลต์ได้ติดตั้งหัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inc เพื่อประโยชน์ในการระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9. ชุดแบ่งแรงดันแบบฉนวนแข็ง

พิกัดของความต้านทานแบ่งแรงดันแบบฉนวนแข็ง  
แรงดันสูงสุดที่สามารถวัดได้ 100 kV (DC)  
ความต้านทานภาคแรงดันสูง 222.24 MΩ  
ความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 214.44 kΩ  
อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน 1037.37  
ค่าผิดพลาด ± 2.5%  
มาตรฐาน IEC 60-2

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงในขั้นต้นไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของ นายเชาวลิต ติณรัตน์ภักดิ์, นายชัยสิทธิ์ สุขทรัพย์, นายวิศรุต ประวัติ, นายจตุร คงวัดใหม่ ต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- [2] Kuffel, E. and W.S. Zaengl "HIGH-VOLTAGE ENGINEERING 1984 P.112-206
- [1] คร.ตำราวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [2] รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- [3] จักรินทร์ เมือกเล็ก, กัมพล จุลเวช, สันติภรณ์ ชันติการุณ และอนุชา แซ่เตียว, "ความต้านทานแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV, ปรียญานันท์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2541

Reference for Project Builder", 1992



รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโท จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2525 และปี พ.ศ. 2528 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งการออกแบบและควบคุมระบบไฟฟ้า



พงษ์เทพ เกิดคอนแม่ก จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ. 2537 และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และระบบไฟฟ้ากำลัง



มินารต์ เสงววงศ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2537 และกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นหัวหน้าศูนย์ออกแบบ และควบคุมระบบไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางด้าน การออกแบบ และควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง



วงศ์พันธ์ ทักตนาถูร จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2540 และกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

[4] ว่าการ Delton T.Horn, "Electronic Components, A Complete" และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# มาตรฐาน IEC 243-1

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## ELECTRICAL STRENGTH OF INSULATING MATERIALS – TEST METHODS –

### Part 1: Tests at power frequencies

#### 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 co-operation 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 express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are 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.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60243-1 has been prepared by subcommittee 15E: Methods of test, of IEC technical committee 15: Insulating materials.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1988 and constitutes a technical revision.

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

FDIS	Report on voting
15E/86/FDIS	15E/92/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.

Annex A is for information only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## INTRODUCTION

This International Standard is one of a series which deals with tests for electric strength of solid insulating materials. The series consists of three parts under the general title: *Electric strength of insulating materials – Test methods –*

Part 1: Tests at power frequencies (IEC 60243-1);

Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage (IEC 60243-2);

Part 3: Additional requirements for impulse tests (IEC 60243-3).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ELECTRICAL STRENGTH OF INSULATING MATERIALS – TEST METHODS –

### Part 1: Tests at power frequencies

#### 1 General

##### 1.1 Scope

This part of IEC 60243 gives methods of test for the determination of the short-time electric strength of solid insulating materials at power frequencies, that is, those between 48 Hz and 62 Hz. It does not consider the testing of liquids and gases, although these are specified and used as impregnants or surrounding media for the solid insulating materials being tested.

NOTE – Methods for the determination of breakdown voltages along the surfaces of solid insulating materials are included.

##### 1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in the text, constitute provisions of this part of IEC 60243. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 60243 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 available International Standards.

IEC 60212: 1971, *Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials*

IEC 60296: 1982, *Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgears*

IEC 60455-2: 1977, *Specification for solventless polymerizable resinous compounds used for electrical insulation – Part 2: Methods of test*

IEC 60464-2: 1974, *Specification for insulating varnishes containing solvent – Part 2: Test methods*

IEC 60674-2: *Specification for plastic films for electrical purposes – Part 2: Methods of test*

IEC 60684-2 –, *Specification for flexible insulating sleeving – Part 2: Methods of test<sup>1)</sup>*

ISO 293: 1986, *Plastics – Compression moulding of test specimens of thermoplastic materials*

ISO 294-1: 1996, *Plastics – Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials – Part 1: General principles, and moulding of multipurpose and bar test specimens*

<sup>1)</sup> To be published.

243-1 © IEC:1998

ISO 294-3: 1996, *Plastics – Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials – Part 3: Small plates*

ISO 295: 1991, *Plastics – Compression moulding of test specimens of thermosetting materials*

ISO 10724:1994, *Plastics – Thermosetting moulding materials – Injection moulding of multipurpose test specimens*

## 2 Definitions

For the purpose of this standard, the following definitions apply:

### 2.1

#### **electric breakdown**

severe loss of the insulating properties of test specimens while exposed to electric stress, which causes the current in the test circuit to operate an appropriate circuit-breaker

NOTE – Breakdown is often caused by partial discharges in the gas or liquid medium surrounding the test specimen and the electrodes which puncture the specimen beyond the periphery of the smaller electrode (or of both electrodes, if of equal diameter).

### 2.2

#### **flashover**

loss of the insulating properties of the gas or liquid medium surrounding a test specimen and electrodes while exposed to electric stress, which causes the current in the test circuit to operate an appropriate circuit-breaker

NOTE – The presence of carbonized channels or punctures through the specimen distinguishes tests where breakdown occurred, from others where flashover occurred.

### 2.3

#### **breakdown voltage:**

2.3.1 (in tests with continuously rising voltage) Voltage at which a specimen suffers breakdown under the prescribed test conditions

2.3.2 (in step-by-step tests) Highest voltage which a specimen withstands without breakdown for the duration of the time at that voltage level

### 2.4

#### **electric strength**

quotient of the breakdown voltage and the distance between the electrodes between which the voltage is applied under the prescribed test conditions

NOTE – The distance between the test electrodes should be determined as specified in 4.4 of this standard, unless otherwise specified.

## 3 Significance of the test

3.1 Electric strength test results obtained in accordance with this standard can be used for detecting changes or deviations from normal characteristics resulting from processing variables, ageing conditions or other manufacturing or environmental situations but can seldom be used directly to determine the behaviour of insulating materials in an actual application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2 Measured values of the electric strength of a material may be affected by many factors, including:**

**3.2.1 Condition of test specimens:**

- a) the thickness and homogeneity of the specimen and the presence of mechanical strain;
- b) previous conditioning of the specimens, in particular drying and impregnation procedures;
- c) the presence of gaseous inclusions, moisture or other contamination.

**3.2.2 Test conditions:**

- a) the frequency, waveform and rate of rise or time of application of the voltage;
- b) the ambient temperature, pressure and humidity;
- c) the configuration, the dimensions, and thermal conductivity of the test electrodes;
- d) the electrical and thermal characteristics of the surrounding medium.

**3.3 The effects of all these factors should be considered when investigating materials for which no experience exists. This standard defines particular conditions which give rapid discrimination between materials and which can be used for quality control and similar purposes.**

The results given by different methods are not directly comparable but each may provide information on relative electric strengths of materials. It should be noted that the electric strength of most materials decreases as the thickness of the specimen between the electrodes increases and as the time of voltage application increases.

**3.4 The measured electric strength of most materials is significantly affected by the intensity and the duration of surface discharges prior to breakdown. For designs which are free from partial discharges up to the test voltage, it is very important to know the electric strength without discharges prior to breakdown but the methods in this standard are generally not suitable for providing this information.**

**3.5 Materials with high electric strength will not necessarily resist long-term degradation processes such as heat, erosion or chemical deterioration by partial discharges, or electrochemical deterioration in the presence of moisture, all of which may cause failure in service at much lower stress.**

## **4 Electrodes and specimens**

The metal electrodes shall be maintained smooth, clean and free from defects at all times.

**NOTE 1 – This maintenance becomes more important when thin specimens are being tested. Stainless steel electrodes are preferred to minimize electrode damage at breakdown.**

The leads to the electrodes shall not tilt or otherwise move the electrodes or affect the pressure on the specimen, nor appreciably affect the electric field configuration in the neighbourhood of the specimen.

**NOTE 2 – When very thin films (for example < 5 µm thick) are to be tested the standards for those materials should specify the electrodes and special procedures for handling and specimen preparation.**

#### **4.1 Tests perpendicularly to the surface of non-laminated materials and normal to laminae of laminated materials**

##### **4.1.1 Boards and sheet materials, including pressboards, papers, fabrics and films**

###### **4.1.1.1 Unequal electrodes**

The electrodes shall consist of two metal cylinders with the edges rounded to give a radius of  $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . One electrode shall be  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  in diameter and approximately 25 mm high. The other electrode shall be  $75 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  in diameter and approximately 15 mm high. These electrodes shall be arranged coaxially within 2 mm as in figure 1a.

###### **4.1.1.2 Equal diameter electrodes**

If a fixture is employed, which accurately aligns upper and lower electrodes within 1,0 mm, the diameter of the lower electrode may be reduced to  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , the diameters of the two electrodes differing by no more than 0,2 mm. The results obtained will not necessarily be the same as those obtained with the unequal electrodes of 4.1.1.1.

###### **4.1.1.3 Tests on thick sample**

When specified, boards and sheets over 3 mm thick shall be reduced by machining on one side to  $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  and then tested with the high-potential electrode on the non-machined surface.

NOTE - When it is necessary in order to avoid flashover or because of limitations of available equipment, specimens may be prepared by machining to smaller thicknesses as needed.

##### **4.1.2 Tapes, films and narrow strips**

The electrodes shall consist of two metal rods, each  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  in diameter, mounted vertically one above the other in a jig so that the specimen is held between the faces of the ends of the rods.

The upper and lower electrodes shall be coaxial within 0,1 mm. The ends of the electrodes shall form planes at right angles to their axes, with edge radii of  $1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . The upper electrode shall have a mass of  $50 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$  and shall move freely in the vertical direction in the jig.

Figure 2 shows an appropriate arrangement. If specimens are to be tested while extended, they shall be clamped in a frame holding them in the required position relative to the assembly shown in figure 2. Wrapping one end of the specimen around a rotatable rod is one convenient way of achieving the required extension.

To prevent flashover around the edges of narrow tapes, the test specimen may be clamped using strips of film or other thin dielectric material overlapping the edges of the tape. Alternatively, gaskets that surround the electrodes may be used, provided that there is an annular space between electrode and gasket of 1 mm to 2 mm. The distance between the bottom electrode and the specimen (before the top electrode comes in contact with the specimen) shall be less than 0,1 mm.

NOTE - For testing films see IEC 60674-2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### **4.1 Tests perpendicularly to the surface of non-laminated materials and normal to laminae of laminated materials**

##### **4.1.1 Boards and sheet materials, including pressboards, papers, fabrics and films**

###### **4.1.1.1 Unequal electrodes**

The electrodes shall consist of two metal cylinders with the edges rounded to give a radius of  $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . One electrode shall be  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  in diameter and approximately 25 mm high. The other electrode shall be  $75 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  in diameter and approximately 15 mm high. These electrodes shall be arranged coaxially within 2 mm as in figure 1a.

###### **4.1.1.2 Equal diameter electrodes**

If a fixture is employed, which accurately aligns upper and lower electrodes within 1,0 mm, the diameter of the lower electrode may be reduced to  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , the diameters of the two electrodes differing by no more than 0,2 mm. The results obtained will not necessarily be the same as those obtained with the unequal electrodes of 4.1.1.1.

###### **4.1.1.3 Tests on thick sample**

When specified, boards and sheets over 3 mm thick shall be reduced by machining on one side to  $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  and then tested with the high-potential electrode on the non-machined surface.

NOTE - When it is necessary in order to avoid flashover or because of limitations of available equipment, specimens may be prepared by machining to smaller thicknesses as needed.

##### **4.1.2 Tapes, films and narrow strips**

The electrodes shall consist of two metal rods, each  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  in diameter, mounted vertically one above the other in a jig so that the specimen is held between the faces of the ends of the rods.

The upper and lower electrodes shall be coaxial within 0,1 mm. The ends of the electrodes shall form planes at right angles to their axes, with edge radii of  $1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . The upper electrode shall have a mass of  $50 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$  and shall move freely in the vertical direction in the jig.

Figure 2 shows an appropriate arrangement. If specimens are to be tested while extended, they shall be clamped in a frame holding them in the required position relative to the assembly shown in figure 2. Wrapping one end of the specimen around a rotatable rod is one convenient way of achieving the required extension.

To prevent flashover around the edges of narrow tapes, the test specimen may be clamped using strips of film or other thin dielectric material overlapping the edges of the tape. Alternatively, gaskets that surround the electrodes may be used, provided that there is an annular space between electrode and gasket of 1 mm to 2 mm. The distance between the bottom electrode and the specimen (before the top electrode comes in contact with the specimen) shall be less than 0,1 mm.

NOTE - For testing films see IEC 60674-2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 Flexible tubing and sleeving

To be tested according to IEC 60684-2.

#### 4.1.4 Rigid tubes (having an internal diameter up to and including 100 mm)

The outer electrode shall consist of a band of metal foil 25 mm  $\pm$  1 mm wide. The inner electrode is a closely fitting internal conductor, e.g. rod, tube, metal foil or a packing of metal spheres 0,75 mm to 2 mm in diameter, making good contact with the inner surface. In each case, the ends of the inner electrode shall extend for at least 25 mm beyond the ends of the outer electrode.

NOTE – Where no adverse effect will result, petroleum jelly may be used for attaching the foil to the inner and outer surfaces.

#### 4.1.5 Tubes and hollow cylinders (having an internal diameter greater than 100 mm)

The outer electrode shall be a band of metal foil 75 mm  $\pm$  1 mm wide and the inner electrode, a disk of metal foil 25 mm  $\pm$  1 mm in diameter, flexible enough to conform with the curvature of the cylinder. The arrangement is shown in figure 3.

#### 4.1.6 Cast and moulded materials

##### 4.1.6.1 Cast materials

Make test pieces and test according to IEC 60455-2.

##### 4.1.6.2 Moulded materials

Use a pair of spherical electrodes, each 20 mm  $\pm$  0,1 mm in diameter, arranged on a common axis which is normal to the plane of the test specimen (see figure 4).

##### 4.1.6.2.1 Thermosets

Use test specimens of 1,0 mm  $\pm$  0,1 mm thickness, compression moulded in accordance with ISO 295; or injection moulded in accordance with ISO 10724 with lateral dimensions which are sufficient to prevent flashover (see 4.3.2).

NOTE – If it is not possible to use specimens of 1,0 mm  $\pm$  0,1 mm thickness, specimens with a thickness of 2,0 mm  $\pm$  0,2 mm should be used.

##### 4.1.6.2.2 Thermoplastics

Use test specimens injection moulded in accordance with ISO/DIS 294-1 and ISO/DIS 294-3, ISO mould type D1 60 mm x 60 mm x 1 mm. If these dimensions are insufficient to prevent flashover (see 4.3.2) or if compression moulded test specimens are stipulated by the standard for the relevant material, use plates at least 100 mm in diameter and 1,0 mm  $\pm$  0,1 mm thick, compression moulded in accordance with ISO 293.

For the conditions of injection or compression moulding see the standard for the relevant material. If there is no applicable material standard, the conditions must be agreed between the interested parties.

#### 4.2.1.2 Tubes and cylinders

For tests on tubes and cylinders, the test specimen shall be a complete ring or a 100 mm circumferential portion of a ring of  $25 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  axial length. Both edges of the specimen shall be finished as parallel planes at right angles to the axis of the tube or cylinder. The specimen is tested between parallel plates as described in 4.2.1.1 for boards and sheets. Where necessary to support the upper electrode, two or three specimens are used. The electrodes shall be of sufficient size to overlap the edges of the specimens by not less than 15 mm and care shall be taken to ensure good contact over the whole area of the edges of the specimens.

#### 4.2.2 Taper pin electrodes

Two parallel holes are drilled perpendicularly to the surface, with centres  $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  apart and of such a diameter that, after reaming with a reamer having a taper of approximately 2 %, the diameter of each hole at the larger end is not less than 4,5 mm and not greater than 5,5 mm.

The holes shall be drilled completely through the specimen or, in the case of large tubes, through one wall only, and shall be reamed throughout their full length.

When the specimens are drilled and reamed, the material adjacent to the holes shall not be damaged, e.g. split, broken or charred, in any way.

The taper pins used as electrodes shall have a taper of  $2 \% \pm 0,02 \%$  and shall be pressed, not hammered into the holes so that they fit tightly and extend on each side of the test specimen by not less than 2 mm (see figures 7a and 7b).

This type of electrode is suitable only for tests on rigid materials at least 1,5 mm thick.

#### 4.2.3 Parallel cylindrical electrodes

For tests on specimens of high electric strength and which are more than 15 mm thick, specimens  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  shall be cut and two holes drilled as shown in figure 8 so that each is not more than 0,1 mm greater in diameter than each cylindrical electrode which shall be  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  in diameter and have hemispherical ends. The base of each hole is hemispherical to mate with the end of the electrode, so that the gap between the end of the electrode and the base of the hole will not exceed 0,05 mm at any point. If not otherwise specified in the material specification, the holes shall be  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  apart, edge-to-edge, throughout their length and extend to within  $2,25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$  of the surface opposite that through which they are drilled. Two alternative forms of vented electrodes are shown in figure 8. When electrodes with slots are used, these slots shall be diametrically opposed to the gap between the electrodes.

#### 4.3 Test specimens

In addition to the information concerning specimens given in the preceding subclauses, the following general points shall be noted.

4.3.1 In the preparation of test specimens from solid materials, care shall be taken that the surfaces in contact with the electrodes are parallel and as flat and smooth as the material allows.

4.3.2 For tests made perpendicularly to the surface of the material, test specimens need only be of sufficient area to prevent flashover under the conditions of test.

4.3.3 In tests made perpendicularly to the surface of the material, the results on specimens of different thicknesses are not directly comparable (see clause 3).

#### 4.4 Distance between electrodes

The value to be used in calculating the electric strength shall be one of the following, as specified for the material under test:

- a) nominal thickness or distance between electrodes (use this value unless otherwise specified);
- b) average thickness of the test specimen or distance between electrodes for tests parallel to the surface;
- c) thickness or distance between electrodes measured immediately adjacent to the breakdown on each test specimen.

### 5 Conditioning before tests

The electric strength of insulating materials varies with temperature and moisture content. Where a specification is available for the material to be tested, this shall be followed. Otherwise, specimens shall be conditioned for not less than 24 h at  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ,  $50 \% \pm 5 \%$  relative humidity, that is, the standard ambient atmosphere of IEC 60212, unless other conditions are agreed upon.

### 6 Surrounding medium

Materials shall be tested in a surrounding medium selected to prevent flashover. In most cases transformer oil according to IEC 60296 will be the most suitable medium. For materials which swell in mineral oil, other liquids, for example silicone liquid, may be more suitable.

Specimens having relatively low breakdown values may be tested in air, particularly if the tests are to be made at elevated temperature. It should be recognized that even at moderate test voltages discharges at the edges of the electrodes may have significant effects on the test values.

If it is intended that the tests evaluate the behaviour of a material in another medium, that medium may be used.

Select a medium which has minimum deleterious effect on the material under test.

The effect of the ambient medium on the results may be great, particularly in the case of absorbent materials such as paper and pressboard, and it is essential that procedures for specimen preparation define fully all necessary steps (e.g. drying and impregnation), and the condition of the ambient medium during test.

Sufficient time shall be allowed for the specimen and the electrodes to attain the required temperature, but some materials may be affected by prolonged exposure to high temperatures.

## 6.1 Tests in air at elevated temperature

Tests in air at elevated temperature may be made in any well-designed oven of sufficient size to accommodate the test specimen and the electrodes without flashover occurring during the tests. Some means of circulating the air within the oven should be provided so that a substantially uniform temperature within  $\pm 2$  K of the specified temperature is maintained around the test specimen, and with a thermometer, thermocouple, or other means for measuring the temperature as near the point of test as practicable.

## 6.2 Tests in liquids

When tests are conducted in an insulating liquid, the liquid used may be transformer oil according to IEC 60296, unless other liquids are more suitable. It is necessary to ensure adequate electric strength of the liquid to avoid flashover. Specimens tested in liquids which have a higher relative permittivity than transformer oil may show a higher dielectric strength than when tested in transformer oil. Contamination which reduces the electric strength of the oil or other liquid may also increase the measured electric strength of test specimens.

Tests at elevated temperature may be made either in a container of liquid in an oven (see 7.1) or in a thermostatically controlled bath using the insulating liquid for heat transfer. In this case, suitable means for circulating the liquid, so that the temperature is substantially uniform and maintained within  $\pm 2$  K of the specified temperature around the test specimen, shall be provided.

## 7 Electrical apparatus

### 7.1 Voltage source

The test voltage shall be obtained from a step-up transformer supplied from a variable sinusoidal low-voltage source. The transformer, its voltage source and the associated controls shall have the following properties.

7.1.1 The ratio of crest to root-mean-square (r.m.s.) test voltage shall be equal to  $\sqrt{2} \pm 5\%$  (1,34...1,48), with the test specimen in the circuit, at all voltages up to and including the breakdown voltage.

7.1.2 The power rating of the source shall be sufficient to meet the requirements of 7.1.1 until electric breakdown occurs. For most materials, using electrodes as recommended, an output current capacity of 40 mA is usually adequate. The power rating for most tests will vary from 0,5 kVA, for testing low-capacitance specimens at voltages up to 10 kV, to 5 kVA for voltages up to 100 kV.

7.1.3 The controls on the variable low-voltage source shall be capable of varying the test voltage smoothly, uniformly, and without overshoots. When applying voltage in accordance with clause 8, the incremental increase produced, e.g. by a variable autotransformer, shall not exceed 2 % of the expected breakdown voltage.

Motor-driven controls are preferable for making short-time or rapid-rise tests.

7.1.4 To protect the voltage source from damage, it shall be equipped with a device which disconnects the power supply within a few cycles on breakdown of the specimen. It may consist of a current-sensitive element in the HV supply to the electrodes.

7.1.5 To restrict damage by current or voltage surges at breakdown, it is desirable to include a resistor with a suitable value in series with the electrodes. The value of the resistor will depend on the damage which can be tolerated on the electrodes.

NOTE – The use of a very high valued resistor may result in breakdown voltages which are higher than those obtained with a lower valued resistor.

## 7.2 Voltage measurement

7.2.1 The voltage values are recorded in equivalent r.m.s. values. It is preferable to use a peak-reading voltmeter and divide the reading by  $\sqrt{2}$ . The overall error of the voltage-measuring circuit shall not exceed 5 % of the measured value including the error due to the response time of the voltmeter. The response-time induced error shall not be greater than 1 % of the breakdown voltage at any rate of rise used.

7.2.2 A voltmeter complying with the requirements of 7.2.1 shall be used to measure the voltage applied to the electrodes. It preferably should be connected directly to them, or via a potential divider or a potential transformer. If a potential winding on the step-up transformer is used for measurement, the accuracy of indication of the voltage applied to the electrodes shall be unaffected by the loading of the step-up transformer and the series resistor.

7.2.3 It is desirable for the reading of the maximum applied test voltage to be retained on the voltmeter after breakdown so that the breakdown voltage can be accurately read and recorded but the indicator shall not be sensitive to transients which can occur at breakdown.

## 8 Procedure

8.1 The document calling for the test shall state the following:

- a) specimen to be tested;
- b) method for measurement of specimen thickness (if not nominal);
- c) any treatment or conditioning prior to test;
- d) number of specimens, if other than five;
- e) temperature of test;
- f) surrounding medium;
- g) electrodes to be used;
- h) mode of increase of voltage;
- i) whether the result is to be reported as electric strength or breakdown voltage.

8.2 Electrodes complying with clause 4 shall be applied to the specimen in such a manner that damage to the specimen is avoided. Using apparatus providing a voltage complying with 7, a voltage is applied between the electrodes and increased in accordance with 9.1 to 9.5. It is observed whether specimens suffer breakdown or flashover (see clause 10).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9 Mode of increase of voltage

### 9.1 Short-time (rapid-rise) test

9.1.1 The voltage shall be raised from zero at a uniform rate until breakdown occurs.

9.1.2 A rate of rise shall be selected for the material under test which will cause breakdown most commonly to occur between 10 s and 20 s. For materials which differ considerably in their breakdown voltage, some samples may fail outside these limits. It is satisfactory if the majority of breakdowns occur between 10 s and 20 s.

9.1.3 The rate of rise shall be chosen from the following:

100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1 000 V/s, 2 000 V/s, 5 000 V/s, etc.

NOTE – For a broad spectrum of materials, a commonly used rate of rise is 500 V/s. For moulded materials, a rate of rise of 2 000 V/s is recommended to obtain comparable data in accordance with IEC 60296.

### 9.2 20 s step-by-step test

9.2.1 A voltage at 40 % of the probable short-time breakdown voltage shall be applied to the specimen. If the probable short-time value is not known, it shall be obtained in accordance with the method in 9.1.

9.2.2 If the test specimen withstands this voltage for 20 s without failure, the voltage shall be increased in incremental steps as defined in table 1. Each increased voltage shall be immediately and successively applied for 20 s until failure occurs.

Table 1 – Increments of voltage increase (kilovolts, peak  $/\sqrt{2}$ )

When start voltage (kV) is	Increment kV
1,0 or less	10 % of start voltage
Over 1,0 to 2,0	0,1
Over 2,0 to 5,0	0,2
Over 5,0 to 10,0	0,5
Over 10 to 20	1,0
Over 20 to 50	2,0
Over 50 to 100	5,0
Over 100 to 200	10,0
Over 200	20,0

NOTE – When specified, smaller voltage increments may be used. In such cases, higher starting voltages are permissible, but breakdown should not occur in less than 120 s.

9.2.3 The increases of voltage shall be made as quickly as possible and without any transient overvoltage, and the time spent in raising the voltage shall be included in the period of 20 s at the higher voltage.

9.2.4 If breakdown occurs in less than six levels from the start of the test, a further five specimens shall be tested, using a lower starting voltage.

9.2.5 The electric strength shall be based on the highest nominal voltage which is withstood for 20 s without breakdown.

### 9.3 Slow rate-of-rise test (120 s... 240 s)

The voltage shall be raised from 40 % of the probable short-time breakdown voltage at a uniform rate such that breakdown occurs between 120 s and 240 s. For materials which differ considerably in their breakdown voltage, some samples may fail outside these limits. It is satisfactory if the majority of breakdowns occur between 120 s and 240 s. The rate of rise of voltage shall be initially selected from the following:

2 V/s, 5 V/s, 10 V/s, 20 V/s, 50 V/s, 100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1 000 V/s, etc.

### 9.4 60 s step-by-step test

Unless otherwise specified, the test shall be carried out in accordance with 10.2 but with a step duration of 60 s.

### 9.5 Very slow rate-of-rise test (300 s... 600 s)

Unless otherwise specified, this test is carried out in accordance with 9.3 but with breakdowns occurring between 300 s and 600 s with a rate of rise of voltage selected from the following:

1 V/s, 2 V/s, 5 V/s, 10 V/s, 20 V/s, 50 V/s, 100 V/s, 200 V/s, etc.

NOTE – The slow rate-of-rise tests of 120 s...240 s in 9.3, and 300 s...600 s in 9.5 produce approximately the same results as the 20 s (see 9.2) or 60 s (see 9.4) step-by-step tests. They are more convenient than the step-by-step tests when using modern automated equipment and they are included to enable such equipment to be used.

### 9.6 Proof tests

When it is required to apply a predetermined proof voltage for the purpose of a proof or withstand test, the voltage shall be raised to the required value as rapidly as possible, consistent with its accurate attainment without any transient overvoltage. This voltage is then maintained at the required value for the duration of the specified time.

## 10 Criterion of breakdown

10.1 Electric breakdown is accompanied by an increase of current flowing in the circuit and by a decrease of voltage across the specimen. The increased current may trip a circuit-breaker or blow a fuse. However, tripping of a circuit-breaker may sometimes be influenced by flashover, specimen charging current, leakage or partial discharge currents, equipment magnetizing current or malfunctioning. It is therefore essential that the circuit-breaker is well co-ordinated with the characteristics of the test equipment and the material under test, otherwise the circuit-breaker may operate without breakdown of the specimen, or fail to operate when breakdown has occurred and thus not provide a positive criterion of breakdown. Even under the best conditions, premature breakdowns in the ambient medium may occur, and observations shall be made to detect them during tests. If breakdowns in the ambient medium are observed, they shall be reported.

NOTE – For materials for which the sensitivity of the fault-detecting circuit is of particular significance, the standard for that material should so specify.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 Where tests are made perpendicularly to the surface of a material, there is usually no doubt when breakdown has occurred and subsequent visual inspection readily shows the actual breakdown channel, whether this is filled with carbon or not.

10.3 If in tests parallel to the surface it is required that failure by puncture and failure across the surface are differentiated (see 4.2), this can be done by examination of the specimen or in some cases by reapplying a voltage less than that of the first apparent breakdown. A convenient practice that has been found is the reapplication of half the breakdown voltage, followed by increasing the voltage until failure is reached by the same procedure as in the first test.

## 11 Number of tests

11.1 Unless otherwise specified, five tests shall be conducted and the electric strength or breakdown voltage determined from the median of the test results, if any test result deviates by more than 15 % from the median, five additional tests shall be made. The electric strength or breakdown voltage shall then be determined from the median of the 10 results.

11.2 When tests are being made for purposes other than routine quality control, larger numbers of specimens will be necessary depending on the variability of the material and the statistical analysis to be applied.

11.3 Refer to annex A for references which may be useful for determining the number of tests needed and the interpretation of data for other than routine quality control tests.

## 12 Report

Unless otherwise specified, the report shall include the following:

- a) a complete identification of the material tested, a description of the specimens and their method of preparation;
- b) the median of the electric strengths in kilovolts/millimetres and/or breakdown voltages in kilovolts;
- c) the thickness of each test specimen (see 4.4);
- d) the surrounding medium during the test and its properties;
- e) the electrode system;
- f) the mode of application of the voltage and the frequency;
- g) the individual values of electric strengths in kV/mm and/or breakdown voltage in kilovolts;
- h) the temperature, pressure and humidity during tests in air or other gas; or the temperature of the surrounding medium when this is a liquid;
- i) the conditioning treatment before test;
- j) an indication of the type and position of breakdown.

When the shortest statement of results is required, the first six items and the lowest and highest values shall be included.

**Annex A**  
**(informative)**

**Treatment of experimental data**

For routine testing the procedure given in clause 12 is ordinarily adequate for analysis and reporting of data. However, many research studies require more information about the response of materials to electric stress, so that larger numbers of specimens and more involved evaluation of test results may be needed.

Procedures for designing test procedures in such cases and for analyzing the resultant data have been published. Among such sources are:

IEC 60727-1: 1982, *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems – Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions*

IEC 60727-2: 1993, *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems – Part 2: Evaluation procedures based on extreme-value distributions*

IEEE 930-1987 (R1995) *IEEE guide for statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data* (Available from IEEE Operations Center, 445 Hoe Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA, or in some countries outside the USA, from local offices of the Global Info Center)

Special Technical Publication 926, *Engineering Dielectrics, Volume IIB: Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques – Chapter 7: Statistical Methods for the Evaluation of Electrical Insulating Systems*, American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นาย มินเรศน์ เตชะวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ.2513 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2537 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงและประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน ปีการศึกษา 2533

ปี พ.ศ. 2538 ทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอสเอ็มพีเอ็นจีนีเยริง

ปี พ.ศ. 2539 ทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปี พ.ศ. 2542 ทำงานในตำแหน่งหัวหน้าศูนย์ออกแบบ และควบคุมระบบไฟฟ้า

ที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จนถึงปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้