



การปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและอายุการใช้งานของแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่มีผลกระทบ  
จากความชื้นที่เกิดในกับดักเสิร์จแรงดันต่ำ

**The Improvement of Electrical Performance and Lifetime of Zinc Oxide Affected  
from Humidity in Low Voltage Surge Arrester**

นายพร้อมศักดิ์ อภิตติกุล  
ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์  
ผศ.ดร.สมหมาย ศิวสะอาด

รายงานการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงบประมาณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2556  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งานวิจัย วช.	ปีงบประมาณ 2556
งานวิจัยเรื่อง	การปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและอายุการใช้งานของแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่มีผลกระทบจากความชื้นที่เกิดในกับดักเสิร์จแรงดันต่ำ
หัวหน้าโครงการฯ	นายพร้อมศักดิ์ อภิรติกุล
ผู้ร่วมโครงการฯ	ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอ การศึกษาและพัฒนาการสร้างแผ่นซิงค์ออกไซด์สำหรับกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยโครงสร้างที่ทำจากโพลีเมอร์ (Polymer Housing) และภายในจะประกอบด้วยแผ่นซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Disk) หลายแผ่น ตามพิกัดแรงดันและพลังงานที่กับดักเสิร์จสามารถรับได้ ตามมาตรฐานกำหนดเช่น IEC, IEEE, JIS โดยลักษณะการใช้งานของกับดักเสิร์จจะผูกต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา จึงทำให้มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า และจากข้อมูลอ้างอิงของทางการไฟฟ้าพบว่าความชื้นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อายุการใช้งานกับดักเสิร์จลดลง เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้า ผู้วิจัยต้องการนำเสนอการปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและอายุการใช้งานของแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่มีผลกระทบจากความชื้นที่เกิดในกับดักเสิร์จแรงดันต่ำ โดยเลือกศึกษาจากผู้ผลิตทางด้านนี้ มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับค่าอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้นจริงที่เกิดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มทร.ธัญบุรี ต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Disk), กับดักเสิร์จแรงดันต่ำ (LV Surge Arrester), คุณลักษณะทางไฟฟ้า (Electrical Performance)

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าและอายุการใช้งานของแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่มีผลกระทบจากความชื้นที่เกิดในกับดักเสิร์จแรงดันต่ำ ได้รับโจทย์ปัญหาจากทางภาคเอกชน ในเรื่องที่ประเทศเรายังไม่มีการนำเทคโนโลยีและกระบวนการผลิตแผ่นซิงค์ออกไซด์ เข้ามา ยังอาศัยการนำเข้ามาประกอบใช้ จึงไม่สามารถทำการพัฒนาได้ทั้งหมด ต้นทุนของอุปกรณ์สูง คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ ที่ให้การสนับสนุนคณะผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา อีกทั้งทางภาคเอกชนคือ บริษัท ฟรีไซด์อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนต่างๆ ด้วยดี คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณอย่างยิ่ง และจะนำข้อมูลวิจัยไปปรับปรุงใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

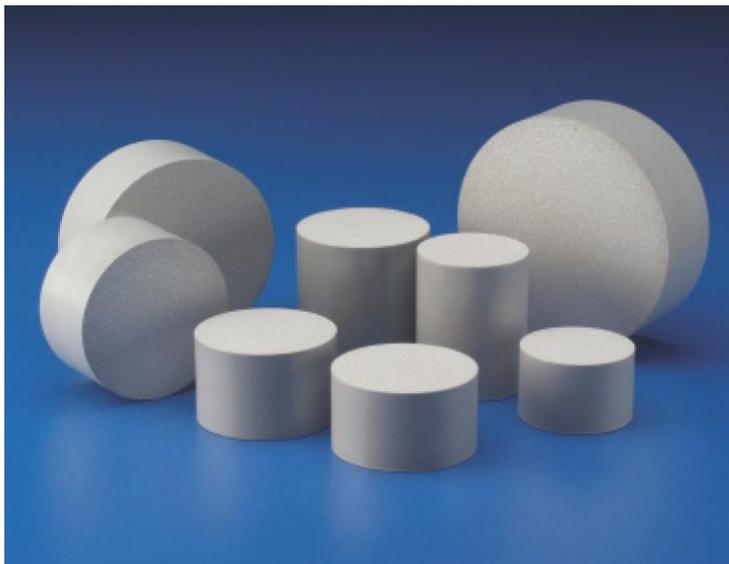
	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	2
2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	3
2.2 ขบวนการซินเตอร์ (Sintering Process)	6
2.3 โครงสร้างทั่วไปของวาริสเตอร์	7
2.4 โครงสร้างแถบพลังงานของวาริสเตอร์	7
2.5 การนำไฟฟ้าของวาริสเตอร์	9
2.6 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)	13
2.7 ผลของสารเจือปน	14
2.8 สมบัติของสาร	15
2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ (Electrical Properties of Materials)	16
2.10 ลักษณะทางไฟฟ้าของสังกะสีออกไซด์วาริสเตอร์	20
2.11 ZnO วาริสเตอร์ ( Model of ZnO Varisters )	21
2.12 กระบวนการสร้างแผ่น ZnO varisters	22
2.13 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ	24
2.14 การเสื่อมสภาพของกั๊บดักเสิร์จ	31
2.15 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเสื่อมสภาพของกั๊บดักเสิร์จ	32
2.16 วิธีการตรวจสอบสภาพของกั๊บดักเสิร์จ	34

บทที่ 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 การออกแบบชุดทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์	40
3.2 วัสดุที่จะนำมาทดสอบ	41
3.3 วงจรและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง	45
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า	49
3.5 แผนผังงาน การทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ในกับดักเล็ร็จ	52
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย	53
4.1 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (A) ด้วยแรงดันกระแสสลับ	53
4.2 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (B) ด้วยแรงดันกระแสสลับ	59
4.3 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (C) ด้วยแรงดันกระแสสลับ	66
4.4 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (A) ด้วยแรงดันกระแสตรง	74
4.5 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (B) ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง	81
4.6 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (C) ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง	87
4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	92
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย	95
5.1 สรุป	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
บรรณานุกรม	96
ภาคผนวก ก	105
ประวัติผู้ทำวิจัย	108

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันปัญหาของผู้ผลิตกับดักเสิร์จที่มีอยู่ในประเทศ จะนำเข้าท่อนซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Block) และแผ่นซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Disk) ที่ผลิตจากต่างประเทศเช่น อเมริกา เยอรมันนี ญี่ปุ่น จีน ฯลฯ มาประกอบเข้ากับโครงสร้างของตัวกับดักเสิร์จ ซึ่งมีราคาสูง ทางคณะผู้วิจัยจึงได้มองเห็นถึงปัญหาที่ผู้ผลิตไม่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้เอง เนื่องจากต้องนำเข้าท่อนซิงค์ออกไซด์จากต่างประเทศ และไม่มีเทคโนโลยีในการผลิตเป็นของตัวเอง การศึกษา การวิจัยและพัฒนาการสร้งท่อนซิงค์ออกไซด์สำหรับใช้ในกับดักเสิร์จนี้ น่าจะเป็นแนวทางของข้อมูลให้ผู้ผลิตในประเทศจะได้นำไปใช้ในการออกแบบและสร้างพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางด้านท่อนซิงค์ออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับมาตรฐานและผลิตภัณฑ์ของประเทศอื่นๆ เหมาะสมกับการนำมาประกอบใช้ในกับดักเสิร์จ และอาจส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตกับดักเสิร์จในประเทศมีค่าลดลง ลดการนำเข้า นำไปสู่แนวทางในการพึ่งพาเทคโนโลยีของประเทศต่อไป

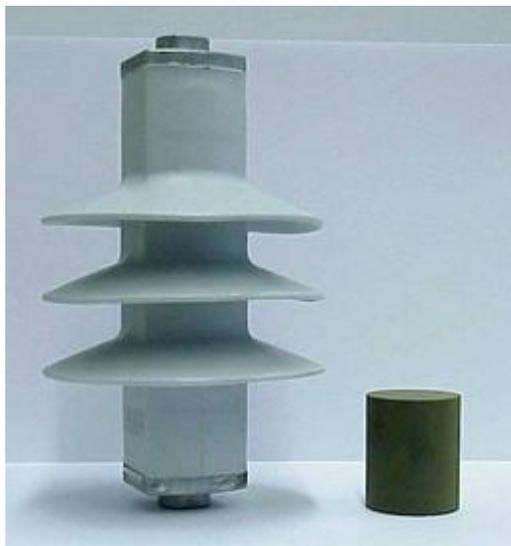


รูปที่ 1 ท่อนซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Blocks) ที่ใช้ในส่วนประกอบของกับดักเสิร์จ

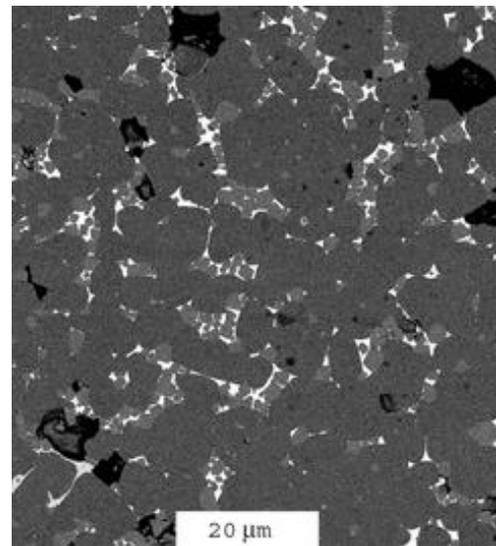
จากข้อมูลของผู้ผลิตจากต่างประเทศ [อ้างอิงจากเอกสารบริษัท ABB] จะใช้สารหลักคือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ประมาณ 90-95% โดยคิดจากน้ำหนัก และมีสารเพิ่มเติมหรือสารเจือปน (metal oxide additive) เช่น บิสมัทออกไซด์ ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), มังกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ), โคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{CoO}$ ) แอนติโมนี

ออกไซด์ ฯลฯ โดยผู้ผลิตแต่ละผลิตภัณฑ์จะไม่อธิบายถึงส่วนผสมที่ผลิตก่อนซึ่งคือออกไซด์ไว้จากสัดส่วนที่ใช้ใน 100% จะคิดค่าเป็นน้ำหนักของโลหะออกไซด์และสารเจือปนต่างๆ จากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการซินเตอร์ (Sintering)

กระบวนการซินเตอร์ (Sintering Process) เป็นที่ทำให้อะตอมของสารมีแรงจับตัว (Coherent bonds) เพิ่มขึ้นและเป็นการกำจัดช่องว่างระหว่างอะตอม โดยอะตอมของผงสารจะเคลื่อนเข้าชิดกัน แต่ไม่ใช่การหลอมตัว ในการเพิ่มแรงจับตัวของสารให้คงรูปอยู่ทำได้โดย การขึ้นรูปที่แรงดันสูงๆ ส่วนการทำให้อะตอมเคลื่อนเข้าชิดกัน ทำได้โดย การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารขึ้นรูปแล้ว แต่อุณหภูมิที่ให้ต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลว การเพิ่มและการลดอุณหภูมิต้องเป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อให้การจับตัวกันของอะตอมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



(a)



(b)

รูปที่ 2 กัปดักเสิร์จไฟฟ้าแรงสูงและท่อนชิงค์ออกไซด์ [งานวิจัยของ DMAT ETH Zurich กับ ABB]

(a) High-voltage surge arrester and "naked" varistor block

(b) Backscattering electron image of a ZnO varistor ceramic

(dark grey: ZnO;

light grey: spinel; white: Bi-rich glass phase)



รูปที่ 3 วาริสเตอร์อนุภาคไมโคร ( $\mu\text{m}$ ) ประเภทซิงค์ออกไซด์ หรือที่เรียกว่า “ท่อนซิงค์ออกไซด์” (ZnO Block) ที่นำมาใช้ในส่วนประกอบของกัปกักเสิร์จในระบบส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

งานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอ การศึกษาและพัฒนาการสร้างแผ่นซิงค์ออกไซด์สำหรับกัปกักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่ใช้อากาศเป็นฉนวนหรือเดินสายส่งและเดินสายจำหน่ายในอากาศ เนื่องจากต้นทุนในการก่อสร้างและติดตั้งต่ำกว่าระบบที่เดินสายใต้ดิน จึงทำให้เกิดปัญหาจากการเกิดแรงดันสูงเหนี่ยวนำในธรรมชาติและในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเกิดฟ้าผ่า การเกิดแรงดันเสิร์จสวิตซ์จากการสับ-ปลดสวิตซ์ในระบบไฟฟ้า จึงได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จหรือเรียกว่า “กัปกักเสิร์จ (Surge Arrester)” ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน จุดต่อระหว่างสายต่างชนิดกัน และสวิตซ์ตัดตอนในอากาศ และ  $\text{SF}_6$  โครงสร้างและส่วนประกอบของกัปกักเสิร์จที่ใช้งานอยู่ปัจจุบันจะมีโครงสร้างที่ทำจากโพลีเมอร์ (Polymer Housing) และภายในโครงสร้างจะประกอบด้วยแผ่นซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Disk) หลายๆ แผ่น ตามพิกัดแรงดันและพลังงานที่กัปกักเสิร์จสามารถรับได้ และมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดเช่น IEC, IEEE, BS, JIS ฯลฯ โดยลักษณะการใช้งานของกัปกักเสิร์จจะถูกต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา จึงทำให้มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า จากข้อมูลของทางการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้มีการเปลี่ยนกัปกักเสิร์จที่ใช้ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการเสียหายต่างๆ เช่น การเกิดอุบัติเหตุจากธรรมชาติ ฟ้าผ่า ฝนตก ลมแรง มีพายุ กิ่งไม้ และอุบัติเหตุจากมนุษย์ ตลอดจนการเกิดเนื่องจากระบบไฟฟ้า เช่น การสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal runaway) ขณะเกิดแรงดันเกินชั่วคราว หรือผลอันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของกัปกักเสิร์จ (Degradation) จากปัจจัยต่างๆ โดยมีสถิติที่ต้องการเปลี่ยนกัปกักเสิร์จในระบบต่อปีเฉลี่ยดังนี้ [รายงานข้อมูลอ้างอิงของกองคลังพัสดุ กฟน. กฟภ.]

กฟน. 9,000-10,000 หน่วยต่อปี เท่ากับงบประมาณประมาณ 15-20 ล้านบาทต่อปี

กฟภ. 210,000-250,000 หน่วยต่อปี เท่ากับงบประมาณประมาณ 315-375 ล้านบาทต่อปี

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและหลักการทำงานของแผ่นชิงค์ออกไซด์ที่ใช้งานในชุดกับดักเล็รัจที่ใช้ในการป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินสวิตซ์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาแนวทางในการออกแบบและสร้างชุดทดสอบกับแผ่นชิงค์ออกไซด์ สำหรับใช้ในการศึกษาของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มทร.ธัญบุรี
3. เพื่อศึกษาการทดสอบคุณสมบัติการทนไฟฟ้าแรงสูงของแผ่นชิงค์ออกไซด์แต่ละชนิดที่ใช้งานอยู่ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย

## 3. ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดทดสอบสำหรับแผ่นชิงค์ออกไซด์ที่ใช้งานของกับดักเล็รัจในระดับแรงดันสูงปานกลางของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย
2. ทำการศึกษามาตรฐานการทดสอบตามมาตรฐานของIEC และ ANSI (IEEE)
3. ทำการทดสอบตามมาตรฐานกำหนดของแผ่นชิงค์ออกไซด์ที่ใช้งานอยู่ในประเทศ อย่างน้อย 3 ผลิตภัณฑ์
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ และนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะในการพัฒนาแผ่นชิงค์ออกไซด์

## 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับหน้าที่การทำงานของกับดักเล็รัจ
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับ คุณสมบัติของกับดักเล็รัจที่ผลิตจากแผ่นชิงค์ออกไซด์และชนิดอื่นๆ รวมไปถึงกระบวนการผลิตขั้นพื้นฐาน
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการทดสอบแผ่นชิงค์ออกไซด์ในกับดักเล็รัจด้วยไฟฟ้าแรงสูง
4. ได้ชุดทดสอบสำหรับแผ่นชิงค์ออกไซด์ในกับดักเล็รัจ

## บทที่ 2

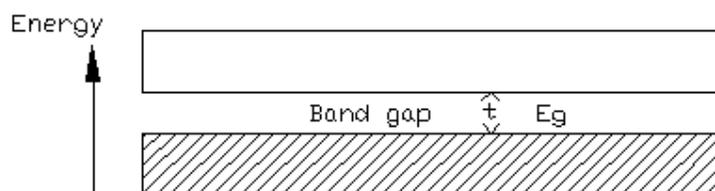
### ทฤษฎี

#### 2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $10^2 - 10^9 \Omega/\text{cm}$ . ที่ อุณหภูมิห้อง แต่ที่ อุณหภูมิ 0 องศาสัมบูรณ์ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic) จะกลายเป็นฉนวน สมบัติต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ผลของสารเจือปนและโครงสร้างของสาร เนื่องจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะนำไฟฟ้าได้ไม่ดีนัก จึงมีการเติมสารเจือลงไปเพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เรียกว่าสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic) ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดต่อไป

##### 2.1.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ มีลักษณะคล้ายกับของของแข็งทั่วๆ ไปเพียงแต่ แถบว่าง (band gap) จะแคบกว่ามากที่อุณหภูมิ 0 องศาสัมบูรณ์ จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มในแถบวาเลนซ์ และจะไม่มีในแถบนำ (Conduction band) ดังรูป 2.1 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนบางตัวจะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบนำ ทำให้เกิดโฮล (Hole) ขึ้นในแถบวาเลนซ์ ในขณะที่เดียวกันในแถบนำก็ยังคงมีที่ว่างเหลืออยู่ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงนำไฟฟ้าได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.1 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

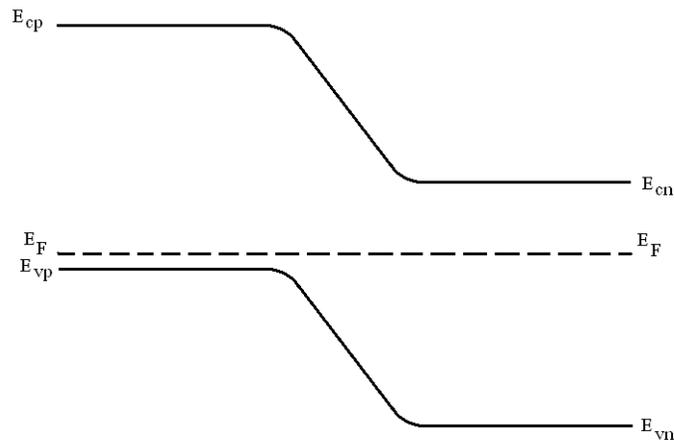
##### 2.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

เกิดจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีสารอื่นปนอยู่ จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลที่เป็นประจุพาหะ (Carrier) มีไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือปน เรียกสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ว่าสารกึ่งตัวนำแบบ Extrinsic เช่น Si มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 4 ตัว ถูกเจือด้วยอะตอมของ As ซึ่งมี วาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 5 ตัว เมื่อ As เข้าไปแทนที่ Si จะมีอิเล็กตรอนเหลืออยู่ 1 ตัว เป็นอิเล็กตรอนอิสระ ที่จะขึ้นไปอยู่ในแถบนำได้ จึงเรียก As ว่าเป็น Donor เพราะจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่ถ้าเติม Ga ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 ลงในซิลิกอน เมื่อเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอน จะทำให้เหลือที่ว่างคือโฮล 1 ที่ เราเรียกสารเจือชนิดนี้

ว่า Acceptor สารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วย Donor เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เจือด้วย Acceptor เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type)

### 2.1.3 รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction)

รอยต่อ พี-เอ็น เกิดจากการเจือ Donors และ Acceptors ลงไปคนละด้านของสารกึ่งตัวนำ จึงเกิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีขึ้นในสารชิ้นเดียวกัน บริเวณรอยต่อพีและเอ็นจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานดังรูป 2.2



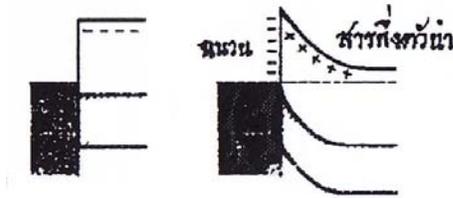
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างพลังงานที่สถานะสมดุลของรอยต่อ พี-เอ็น

เมื่อบริเวณพี และเอ็นมาแตะกัน โสลจะเคลื่อนที่จากบริเวณพีไปเอ็น ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากบริเวณเอ็นไปพี

เนื่องจากบริเวณเอ็นมีอิเล็กตรอนอยู่มาก ระดับพลังงานจึงต่ำกว่าบริเวณพี เมื่อให้ความต่างศักย์ภายนอกเข้าไป โดยต่อบริเวณพีกับขั้วบวก และต่อบริเวณเอ็นกับขั้วลบ เรียกว่า การป้อนตาม (Forward-biased) จะมีผลทำให้กำแพงศักย์ต่ำลง ถ้าเราต่อขั้วบวกเข้ากับบริเวณเอ็น และต่อขั้วลบกับบริเวณพี จะทำให้กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่าการป้อนแบบย้อนกลับ (Reverse biased) จะทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรน้อยมาก ถ้าเพิ่มความต่างศักย์จนมีค่าสูงมากๆ จะทำให้เกิดการพังทะลุได้ โดยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มอย่างกะทันหัน

### 2.1.4 ขอตกั๊แบเรีย (Schottky Barriers)

เป็นกั๊แบเรียที่กั๊เกิดจากการนำเอาโลหะมาสัมผัสกับสารกั๊ตัวนำ ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างผิวของสาร กั๊แบเรียนี้เรียกว่า (Exhaustion layer) ดังรูป 2.3 ซึ่งแสดงการนำสารกั๊ตัวนำชนิดเอ็นมาต่อกับโลหะแล้วทำให้ระดับพลังงานเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.3 แสดงขอตกั๊แบเรียที่กั๊เกิดจากโลหะสัมผัสกับสารกั๊ตัวนำชนิด เอ็น

เมื่อโลหะถูกนำมาสัมผัสกับสารกั๊ตัวนำ การเคลื่อนย้ายของประจุจะเกิดขึ้นจนกระทั่งระดับเฟอร์มีในสารทั้งสองเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุล ในระยะแรกระดับเฟอร์มีของสารกั๊ตัวนำจะสูงกว่าโลหะ เมื่อให้ระดับเฟอร์มีของทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ในสารกั๊ตัวนำต้องถูกยกขึ้น

ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุล มีค่าเท่ากับผลต่างของ Work function ของสาร ทั้งสองอาจถูกเพิ่มหรือลดได้โดยการให้กระแสแบบย้อนกลับ หรือตามเช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นการนำไฟฟ้าของรอยต่อ โลหะกับสารกั๊ตัวนำจึงเป็นแบบ Non-Ohmic

ลักษณะดังกล่าวจะคล้ายกับสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่าวาริสเตอร์ (Varistor) ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกั๊ตัวนำ ที่นำไฟฟ้าเป็นแบบ Non-Ohmic คือ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ วาริสเตอร์จะมีความต้านทานสูง จึงนำไฟฟ้าได้น้อย เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ความต้านทานจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ทำให้นำไฟฟ้าได้ดี โดยทั่วไปวาริสเตอร์จะถูกนำมาใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับป้องกันความเสียหายที่กั๊เกิดจากการเพิ่มความต่างศักย์เกินขีดจำกัด โดยต่อขนานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อความต่างศักย์เพิ่มจะทำหน้าที่ลัดกระแสไฟฟ้าลงคืน ในการสร้างวาริสเตอร์ ทำโดยนำสารที่จะสร้างไปผ่านขบวนการซินเตอร์

## 2.2 ขบวนการซินเตอร์ (Sintering Process)

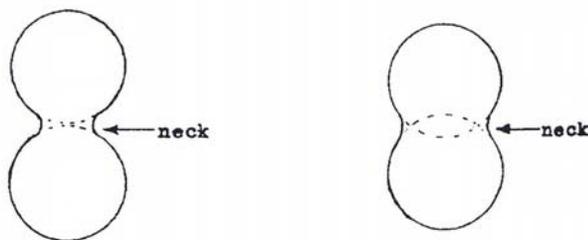
เป็นขบวนการที่ทำให้อะตอมของสารที่แรงจับตัว (Coherent bonds) เพิ่มขึ้น และเป็นการกำจัดช่องว่างระหว่างอะตอม โดยอะตอมของผงสารจะเคลื่อนเข้าชิดกัน แต่ไม่ใช่การหลอมตัวในการเพิ่มแรงจับตัวของสารให้คงรูปอยู่ได้ทำได้โดยการขึ้นรูปที่แรงดันสูงๆ เช่น ส่วนการทำให้อะตอมเคลื่อนเข้าชิดกันทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารที่ขึ้นรูปแล้ว แต่อุณหภูมิที่ให้ต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลว การเพิ่มและการลดอุณหภูมิต้องเป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อให้การจับตัวกันของอะตอมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

### 2.2.1 การอัด

การอัดผงสารตัวอย่าง เป็นการเพิ่มแรงจับตัวของอะตอมให้คงรูปอยู่ได้ แม้ว่าจะไม่แข็งแรงก็ตาม การอัดจะอัดทั้ง 2 ด้านของผิวหน้าด้วยแรงดันสูงโดยใส่สารลงไปในแม่พิมพ์แล้วอัดด้วยแรงดันสูง การอัดต้องให้แรงกระทำสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าโดยแม่พิมพ์ต้องมีผิวเรียบ และจะอัดได้สูงสุดจุดหนึ่งเท่านั้น ถ้าแรงดันสูงเกินไปอาจจะเกิดผลเสียกับเม็ดสารได้ ดังนั้นการอัดจึงเป็นขบวนการที่สำคัญอันหนึ่ง

### 2.2.2 อุณหภูมิ

ผงสารตัวอย่างที่ผ่านการอัด แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดสารยังไม่แข็งแรงมากพอ ถ้าต้องการให้ผงสารตัวอย่างเกาะกันอย่างแข็งแรงมากยิ่งขึ้น จะต้องนำสารไปเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อกระตุ้นให้อะตอมของผงสารตัวอย่างแพร่เข้าหากัน ทำให้จุดสัมผัสที่เรียกว่า คอ (neck) ขยายโตขึ้น พิจารณาการเจริญเติบโตของส่วนที่เป็นคอ ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเจริญเติบโตของคอ

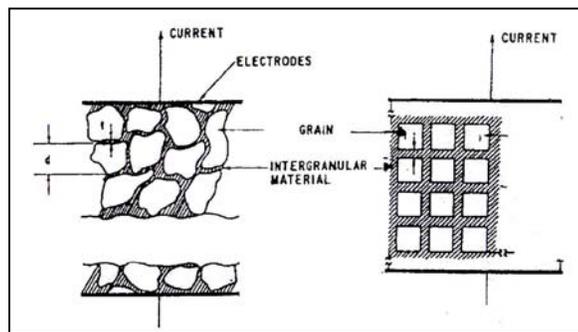
เมื่อคอโตขึ้นจะมีผลทำให้สารตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจากเดิม การให้อุณหภูมิในขบวนการซินเตอร์ต้องควบคุมอย่างสม่ำเสมอ และเหมาะสมคือต้องไปเป็นอย่างช้าๆ และอุณหภูมิที่ให้ไม่ควรสูงเกินไป คือ ต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เพราะถ้าสารหลอมตัวจะทำให้ผิวดัตุประสงค์ของการซินเตอร์ แต่ในกรณีของวาริสเตอร์จะเพิ่มให้อุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวของสารบางตัวเพื่อให้อะตอมเกิดการแพร่อย่างรวดเร็วและไปเคลือบสารที่เป็นสารหลักได้

### 2.2.3 เวลา

เวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในขบวนการซินเตอร์ เพราะเมื่อเวลามากขึ้นสารจะเกิดการซินเตอร์ได้ดีขึ้น ขนาดของเม็ดผลึก (Grain) จะโตขึ้นกว่าเดิม เพราะฉะนั้นเวลาในการซินเตอร์จึงสามารถกำหนดสมบัติของสารได้

### 2.3 โครงสร้างทั่วไปของวาริสเตอร์

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของวาริสเตอร์ พบว่าภายในเนื้อสารจะมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเม็ดผลึก ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารหลัก บริเวณผิวเม็ดผลึก (Grain boundary) จะมีฉนวนไฟฟ้า (Insulator) เคลือบอยู่บางๆ เรียกสารที่เป็นผิวเคลือบนี้ว่า Intergranular material ดังรูป ก. ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถเขียนเป็นแผนผังรูปสี่เหลี่ยมได้ดังรูปที่ 2.5 ข. เมื่อ  $d$  เป็นขนาดของเม็ดผลึก  $t$  เป็นความหนาของสารเคลือบ

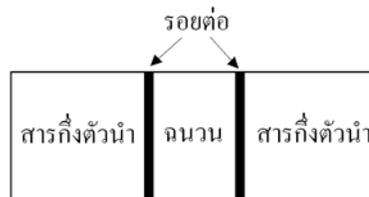


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของวาริสเตอร์

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวาริสเตอร์จะแสดงออกเนื่องจากบริเวณรอยต่อระหว่างเม็ดผลึก และสารเคลือบ

### 2.4 โครงสร้างแถบพลังงานของวาริสเตอร์

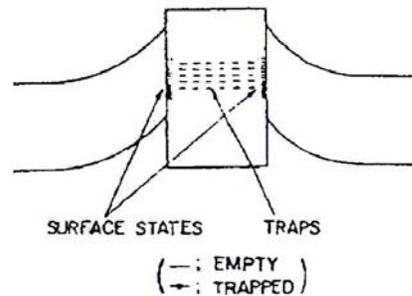
แม้ว่าวาริสเตอร์จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีรอยต่อ พี-เอ็น ก็ตามแต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างภายในจะพบว่า ระหว่างเม็ดผลึก 2 เม็ด จะมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดอยู่ 2 รอยต่อ ดังรูป 2.6



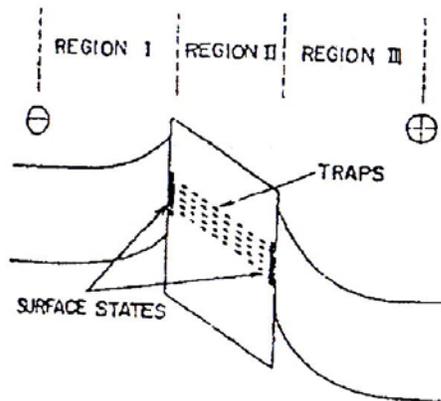
รูปที่ 2.6 แสดงรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวน

เนื่องจากสารที่นำมาใช้ทำสารหลักเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนแก่สารเคลือบ ดังนั้น สารเคลือบที่เป็นฉนวนจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนบางส่วนจากเม็ดผลึก ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อหรือกล่าวว่ามีกำแพงศักย์เกิดขึ้น 2 บริเวณ โดยกำแพงศักย์นี้จะขนาบสารเคลือบหรือ Intergranular layer การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมาเกี่ยวข้องกับของบริเวณดังกล่าวมีลักษณะดังรูป 2.7 และเมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป ระดับพลังงานจะเปลี่ยนไปดังรูป 2.8

### SEMICONDUCTOR INSULATOR SEMICONDUCTOR



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างระดับพลังงานของวาริสเตอร์เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก

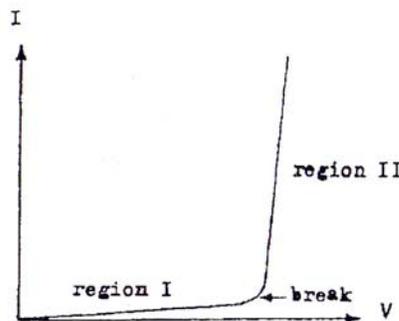


รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างระดับพลังงานของวาริสเตอร์เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก

## 2.5 การนำไฟฟ้าของวาริสเตอร์

สารกึ่งตัวนำวาริสเตอร์จะมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) เรียกว่า เป็น Non-ohmic กล่าวคือเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าน้อย ความต้านทานของวาริสเตอร์มีค่ามาก ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มากถึงค่าหนึ่ง ความต้านทานของวาริสเตอร์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เราเรียกความต่างศักย์ค่านั้นว่า ความต่างศักย์ที่ทำให้เกิดการพังทะลุ (Breakdown voltage)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าลักษณะกราฟจะมีการหักที่ความต่างศักย์ค่าหนึ่ง เรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์พังทะลุ (Breakdown voltage) โดยช่วงแรกเป็นการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่ำ จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้น จะหลุดมาจากแถบวาเลนซ์ไปอยู่ในแถบนำ เรียกว่าเป็น Thermionic emission ส่วนช่วงที่ 2 เป็นการนำไฟฟ้าหลังจากเกิดการพังทะลุแล้ว เป็นการนำไฟฟ้าแบบ Zener breakdown หรือ Field emission tunneling การพิจารณาการนำไฟฟ้าของวาริสเตอร์จะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ขั้นตอน คือ การนำไฟฟ้าก่อนการพังทะลุ และการนำไฟฟ้าหลังการพังทะลุ โดยอาศัยรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
ของวาริสเตอร์

### 2.5.1 การนำไฟฟ้าก่อนการพังทะลุ

พิจารณาการนำไฟฟ้าเนื่องมาจากพลังงานความร้อน (Thermionic emission type conductance) จากทฤษฎีการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนในของแข็ง โดยใช้ Fermi dirac distribution เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f(E) = 1/[1 + \exp(E - E_F) / K_B T] \quad (2.1)$$

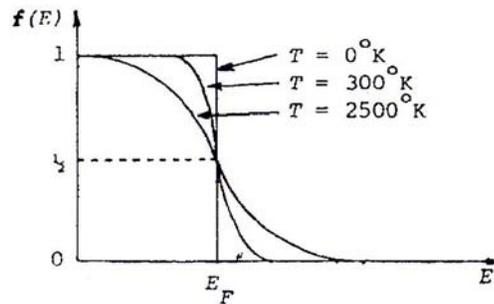
เมื่อ  $f(E) =$  โอกาสการพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานหนึ่งๆ

$K_B =$  ค่าคงที่ Boltzman

$T =$  อุณหภูมิสัมบูรณ์

$E_F =$  Fermi level

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f(E)$  และพลังงาน สามารถเขียนได้ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการกระจายแบบ Fermi-Dirac

จากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 0 องศาเคลวิน โอกาสการพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำกว่าระดับเฟอร์มิจะน้อยลง และจะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าระดับ Fermi ได้ด้วย แสดงว่าความร้อนที่ให้แก่สารทำให้อิเล็กตรอนของสารมีระดับพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้น ถ้าเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนมากจนถึงค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนก็จะสามารถหลุดออกมาจากสารได้ ซึ่งพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมนี้ เรียกว่า Work function ( $E_w$ ) ของสาร เช่น ในไส้หลอด (Filament) เมื่อถูกทำให้ร้อนโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนในเนื้อโลหะบางตัวหลุดจากผิวโลหะได้ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการใช้ความร้อนกระตุ้นนี้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = SA^\circ T^a \exp(-E_w / K_B T) \quad (2.2a)$$

เมื่อ  $S =$  พื้นที่ของไส้หลอด

$A^\circ =$  ค่าคงที่ ( $A/m^2 K^a$ )

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป สมการที่ 2a เขียนใหม่ได้เป็น

$$I = SA^\circ T^a \exp(-E_w / K_B T) \quad (2.2b)$$

ในการทำงานเดียวกัน สำหรับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากพลังงานความร้อน และใส่สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ของบริเวณที่ 1 ในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นการนำไฟฟ้าแบบ Forward biased จะเป็นไปตามสมการ

$$I = SA^0 T^a \exp(-E_B / K_B T) \exp(E / K_B T - 1) \quad (2.3)$$

เนื่องจาก  $A^0$ ,  $T$  และ  $E$  มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I \propto \exp(E / K_B T) \quad (2.4)$$

ส่วนในบริเวณที่ 2 ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า จะมีการนำไฟฟ้าเล็กน้อย เป็นไปตามสมการ Frenken-Poole emission

$$I \propto \exp[-(E_t - \beta_t F_t^{1/2}) / K_B T] \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F_t$  = Field strength

$E_t$  = พลังงานกระตุ้น

$\beta_t$  = ค่าคงที่

ในบริเวณที่ 3 เป็นการนำไฟฟ้าแบบ Reverse-biased ซึ่งอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะกระโดดไปยังอะตอมของฉนวนอธิบายโดยใช้สมการ Reverse-biased Schottky barrier

$$I \propto \exp\{(-E_B - \beta' F^{1/2}) / K_B T\} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $F$  = ค่าสนามไฟฟ้า

$\beta'$  = ค่าคงที่

### 2.5.2 การนำไฟฟ้าเมื่อเกิดการพังทะลุ (Breakdown)

การพังทะลุเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณที่มีการนำไฟฟ้าแบบ Reverse-biased จะเกิดเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงพอ เพราะความต่างศักย์ที่ให้แก่วิสดอร์จะเข้าไปลดกำแพงศักย์ให้แคบลง และทำให้พันธะระหว่างประจุที่เกาะกัน (Filled traps) แตกออก ประจุอิสระจึงมีมากขึ้น อิเล็กตรอนสามารถลอดทะลุผ่านกำแพงศักย์ ไปยังสารกึ่งตัวนำ แล้วชนกับอะตอมสารประจุอิสระเพิ่มอย่างฉับพลัน กระแสไฟฟ้าจึงไหลได้ดีขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงแบบฉับพลันเช่นเดียวกัน ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (v) ได้จาก สมการของ Reverse-biased Schottky barrier

$$I \propto \exp \{-(1/V)^{1/2}\} \quad (2.7)$$

จากทฤษฎีการกระจายอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานใดๆ จะได้ Density of state State ของอิเล็กตรอนในของแข็ง

$$N(E) = \{(1/2) [8m_n^m/h^2]^{3/2} E^{1/2}\} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $N(E)$  = ความหนาแน่นของ State ที่อยู่ในช่วงพลังงาน  $E$  และ  $E+dE$

$m_n^m$  = Effective mass

$E$  = ระดับพลังงาน

จากสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$N(E) \propto E^{1/2} \quad (2.9)$$

เนื่องจากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ ( $V$ )

$$E \propto V \quad (2.10)$$

จาก (2.9) และ (2.10) จะได้

$$N(E) \propto V^{1/2} \quad (2.11)$$

จากทฤษฎีของ Levene ได้ว่า หลังจากเกิดการพังทะลุแล้ว density of state อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exponential ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$N(E) \propto \exp(E/E_0) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นพลังงานก่อนการพังทะลุ

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V^{1/2} &\propto \exp(E/E_0) \\ V^{E_a/ax_B T} &\propto \exp(E/K_B T) \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.4) และ (2.13) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} I &\propto V^{E/2x_B T} \\ \text{ถ้าให้} \quad \alpha &= E_0 / 2K_B T \end{aligned} \quad (2.14)$$

สมการที่ (2.14) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} I &\propto V^\alpha \\ I &= kV^\alpha \end{aligned} \quad (2.15)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่

ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก  $V_1$  เป็น  $V_2$  อัตราส่วนของกระแส  $I_2/I_1$  จะเป็นไปตามสมการ

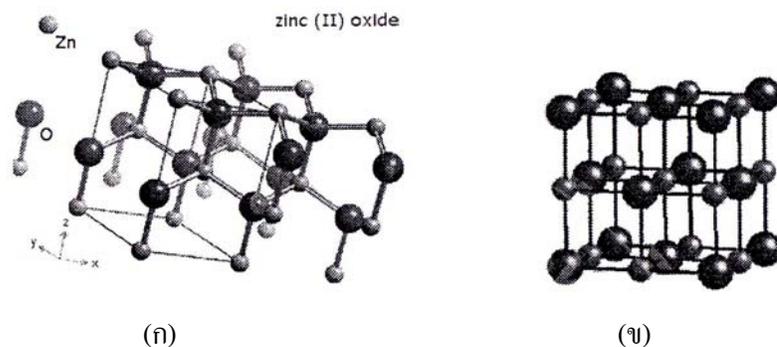
$$\begin{aligned} I_2 / I_1 &= (K_2 / K_1) (V_2 / V_1)^\alpha \\ &= (V_2 / V_1)^\alpha \\ \log(I_2 / I_1) &= \alpha \log(V_2 / V_1) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \log I_2 - \log I_1 &= \alpha (\log V_2 - \log V_1) \\ \Delta \log I &= \alpha \Delta \log V \\ \alpha &= (\Delta \log I / \Delta \log V) \end{aligned} \quad (2.17)$$

ค่า  $\alpha$  นี้ เรียกว่าเป็นค่า Nonlinear coefficient ซึ่งได้จากผลการทดลองโดยเป็นค่า slope ตรงปลายกราฟที่เป็นเส้นตรงของกราฟระหว่าง  $\log I$  กับ  $\log V$

## 2.6 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าที่ดี ( $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ) ที่อุณหภูมิแถบพลังงานช่องว่างของ ZnO มีค่าประมาณ 3.2 eV ความหนาแน่นของ ZnO มีค่า 5.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 2070 K โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นแบบ Hexagonal wurtzite โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ a เท่ากับ 3.2531 Å และแลตทิซพารามิเตอร์ c เท่ากับ 5.2131 Å ภายใต้อุณหภูมิสูง โครงสร้างจะเกิดเปลี่ยนแปลงไปแบบ Rock salt ซึ่งมีการจัดเรียงตัวที่แน่นกว่า Hexagonal wurtzite ดังรูป 2.12



รูป 2.11 โครงสร้างของ ZnO (ก) Hexagonal wurtzite (ข) Rock salt [23, 24]

นอกจากจะเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานช่องว่างที่สูงแล้ว ZnO ยังเป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-V ที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งส่งผลให้ยากต่อการสลายตัวเมื่อเทียบกับสารประกอบตัวอื่นในสภาวะเดียวกัน การประยุกต์ใช้ ZnO อาทิเช่น ใช้ผลิตวาริสเตอร์เพื่อเป็นอุปกรณ์ป้องกันวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนผสมในสี เป็นส่วนผสมในสารกันแดด เป็นต้น [2]

## 2.7 ผลของสารเจือปน

สำหรับวาริสเตอร์ที่ทำด้วยสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นสารหลักแล้วเจือด้วยบิสมัทออกไซด์ MnO, CoO, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> พบว่าจะมีผลต่อค่า d ของวาริสเตอร์นั้น กล่าวคือเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของ MnO พบว่าจุด Breakdown ของสารจะเปลี่ยนไปคือเมื่อให้ปริมาณของ MnO มากขึ้นจะได้กราฟที่ชันขึ้น และค่า Breakdown voltage จะมากขึ้นด้วย สำหรับค่าความจุ (Capacitance) ของวาริสเตอร์ก็จะมีผลในทำนองเดียวกัน แสดงว่า MnO ที่เจือเข้าไปจะทำให้ Schottky barrier มีความสูงมากขึ้น ดังนั้น สมบัติที่เป็น Non-Ohmic จะมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการยืนยันว่า Schottky barrier เป็นสิ่งที่มีบทบาทในผลการนำไฟฟ้าของวาริสเตอร์ และถ้า MnO ทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนฟอร์มตัวที่บริเวณผิวเม็ดผลึก จะทำให้ค่าแรงศักย์สูงขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกจับกับ traps นั้นเอง ถ้าใช้ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แทน ZnO ปฏิกิริยาที่เกิดจะเปลี่ยนไป ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไป Mn และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะเป็นองค์ประกอบของสารประกอบเฟอร์ไรท์ (Ferrite) เรียกว่ามันกานีสเฟอร์ไรท์ มีสูตรเคมีทั่วไปว่า Mn<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> โดย x จะมีค่าเป็น 0 < x < 3 ดังนั้น MnO หรือ MnO<sub>2</sub> จะไปรวมตัวกับ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยจะไปอยู่ในเม็ดผลึกของสาร ส่วนสารอื่นที่เจือยังคงอยู่ที่ผิวของเม็ดผลึก

## 2.8 สมบัติของสาร

### 2.8.1 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับออกซิเจน มีมวลโมเลกุล 159.69 จุดหลอมเหลว  $1565^\circ\text{C}$  ปกติมีสีแดง พบในธรรมชาติเป็นสินแร่เฮมาไทท์ หรือเหล็กแดง จะปรากฏอยู่ในรูปผลึกแบบ Rhombihedral หรือบางครั้งพบเป็นปริซึมของ Hexagonal มักจะอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์ไรต์ เช่น มังกานีส-สังกะสีเฟอร์ไรต์ และแบเรียมเฟอร์ไรต์ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารแม่เหล็ก ยกเว้นบางตัว เช่น สังกะสีเฟอร์ไรต์ ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) เหล็กออกไซด์จะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เมื่อรวมตัวกับไอออนที่มีประจุบวก +4

### 2.8.2 บิสมัทออกไซด์ ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )

มวลโมเลกุล 465.96 เกิดจากการเผาไหม้บิสมัทในบรรยากาศของออกซิเจน ดังสมการ



จากสมการจะเห็นว่าเกิดการเกิดบิสมัทออกไซด์จะไม่มีอิเล็กตรอนเกิดขึ้น มีสมบัติไม่นำไฟฟ้า มีจุดหลอมเหลวที่  $820^\circ\text{C}$  ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นออกไซด์ที่เป็นฉนวน (Insulating oxide) สำหรับในการทดลองนี้ จะนำมาเป็นฉนวนที่เคลือบเม็ดผลึกของสารหลัก

### 2.8.3 แบเรียมออกไซด์ ( $\text{BaO}$ )

มวลโมเลกุล 153.31 เป็นสารที่มีสีขาวมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปลูกบาศก์ และรูป หกเหลี่ยม (Hexagonal) มีจุดหลอมเหลวที่  $1923^\circ\text{C}$  จุดเดือดประมาณ  $2000^\circ\text{C}$  ทำปฏิกิริยาได้ดีกับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ จะเปลี่ยนรูปเป็นไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนตเมื่ออยู่ในอากาศ เมื่อรวมกับน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่บรรยากาศชั้น Atmosphere จะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วแล้วปล่อยพลังงานความร้อนออกมาจำนวนมาก

แบเรียมออกไซด์เตรียมได้โดยเผาคาร์บอเนต กับคาร์บอนในลักษณะของถ่านโค้ก ปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ



ในทางการค้าแบเรียมออกไซด์ จะมีลักษณะเป็นผงสีขาวและเทา ซึ่งจะมีสิ่งเจือปนอยู่ เช่น แบเรียมซิลิเกต แบเรียมคาร์บอเนต และคาร์บอน ซึ่งปะปนมาในกระบวนการผลิต

#### 2.8.4 แอนติโมนีออกไซด์ ( $Sb_2O_3$ )

มวลโมเลกุล 291.50 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $656^{\circ}C$  จุดเดือดที่อุณหภูมิ  $1425^{\circ}C$  มีสมบัติเป็นฉนวน มีสีขาว โครงสร้างผลึกมี 2 รูปแบบ คือ Orthorombic และลูกบาศก์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $570^{\circ}C$  จะฟอร์มตัวเป็นรูปลูกบาศก์ มีสูตรเป็น  $Sb_4O_5$  ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า  $570^{\circ}C$  จะฟอร์มตัวเป็น Orthorombic มีสูตรเป็น  $Sb_2O_3$

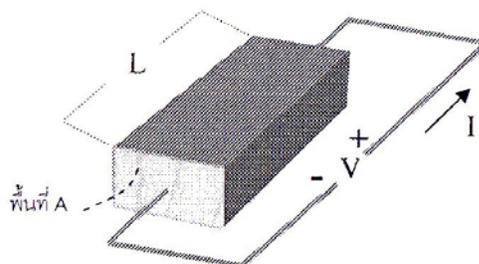
#### 2.8.5 มังกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ )

มวลโมเลกุล 86.94 มีสีดำ ที่อุณหภูมิ 500 ถึง  $600^{\circ}C$  จะมีการสูญเสียออกซิเจนบางส่วนไป ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็น  $Mn_2O_3$  โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วย  $Mn^{+4}$  ซึ่งยึดเกาะกับอ็อกซิเจนของออกซิเจน 6 อ็อกซิเจน มีโครงสร้างเป็นแบบ Orthorhombic

### 2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ (Electrical Properties of Materials)

#### 2.9.1 ความนำไฟฟ้า (Electrical conductance)

การนำไฟฟ้าในโลหะเกิดจากการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอน แต่การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮล เรียกว่าการนำไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar) กระแสอาจเกิดจากอิเล็กตรอนหรือโฮลอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นส่วนใหญ่ โดยการเติมสารเจือในสารกึ่งตัวนำนั้นๆ การเคลื่อนไหวของพาหะอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ เมื่อได้รับอิทธิพลจากกระแสลอยเลื่อน (Drift current) และเมื่อเกิดมีเกรเดียนของความร้อนเข้มข้น (Concentration gradient) ขึ้นในวัสดุถ้าแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.10 ได้รับแรงดันและเกิดกระแสแล้ว กระแสจะกระจายไปตามพื้นที่ภาคตัดของสารกึ่งตัวนำ ขนาดของความหนาแน่นกระแส (Current density,  $J$ ) ณ ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่ภาคตัดขวางจะเป็นดังสมการ 2.1-2.4



รูป 2.12 แท่งสารกึ่งตัวนำเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

และ

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.2)$$

จะได้ว่า

$$J = \sigma E \quad (2.3)$$

และ

$$\sigma = I \left( \frac{L}{AV} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแส หน่วยเป็น แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

$I$  คือ กระแส หน่วยเป็น แอมแปร์

$A$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง หน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

$E$  คือ สนามไฟฟ้า หน่วยเป็น โวลต์ต่อตารางเซนติเมตร

$V$  คือ ความต่างศักย์ หน่วยเป็น โวลต์

$L$  คือ ความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำ หน่วยเป็น เซนติเมตร

$\sigma$  คือ สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ  
หน่วยเป็นต่อโอห์มเซนติเมตร

### 2.9.2 ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance)

วัตถุทุกชนิด จะต้องมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ความต้านทานจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่าง อุณหภูมิ เป็นต้น ค่าความต้านทานนั้นสามารถหาได้จากสมการ 2.5

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม

$L$  คือ ความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำ หน่วยเป็น เซนติเมตร

$A$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง หน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

$\rho$  คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) มีหน่วยเป็น โอห์ม เซนติเมตร เป็นส่วนกลับกับสภาพความนำไฟฟ้า ดังสมการ 6

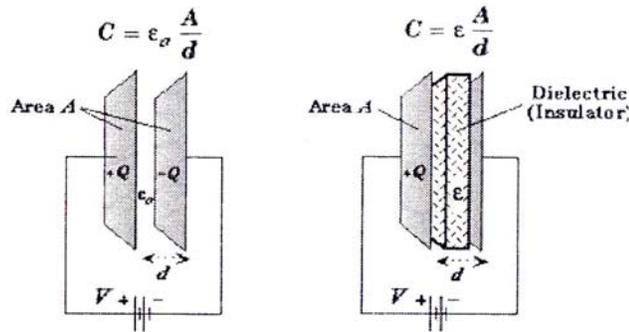
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.6)$$

### 2.9.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

สมบัติไดอิเล็กทริก คือ สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุโดยเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติ จะไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระในเนื้อสาร แต่เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศของสนาม ส่วนกลุ่มประจุลบถูกผลักไปในทิศตรงกันข้าม ทำให้โมเมนต์ของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ขึ้นมา สมบัติไดอิเล็กทริก มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่สำคัญ คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และแฟกเตอร์การสูญเสีย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.9.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity or dielectric constant)

พิจารณาตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitor) ที่ ประกอบด้วยแผ่นโลหะ ที่มีพื้นที่  $A$  และแยกห่างกันเป็นระยะ  $d$  ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูป 2.13 แสดงถึงตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitor) [3]

เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  คร่อมแผ่นขนาน แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ  $+q$  และอีกแผ่นหนึ่งเป็น  $-q$  ประจุ  $q$  นี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $V$  ดังสมการ 2.7

$$q = CV \quad (2.7)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าคงตัวเรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อ โวลต์หรือฟารัด

ค่าความจุไฟฟ้าบ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้า ยิ่งมีความจุไฟฟ้ามากเท่าใด ก็ยิ่งเก็บประจุได้มากเท่านั้น ถ้าหากตัวเป็นประจุมีขนาดพื้นที่ขนานมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน มากๆ จะได้ว่าความจุไฟฟ้า มีค่าดังสมการ

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ สภาพยอม (permittivity) ในสุญญากาศ มีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร

ในกรณีที่มีไดอิเล็กทริกวางอยู่ระหว่างแผ่นขนาน ดังแสดงในรูป 2.10 ความจุไฟฟ้าจะมีค่า เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่า เท่ากับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ของเซรามิกนั้น ดังสมการที่ 2.9

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กทริก

$A$  คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าบนผิวสารไดอิเล็กทริก หน่วยเป็น ตารางเมตร

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า หน่วยเป็น เมตร

### 2.9.3.2 ค่าแฟกเตอร์สูญเสียพลังงาน (energy loss factor or dielectric loss)

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของวัสดุจะ แตกต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้า กระแสสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพล ภายในวัสดุไดอิเล็กทริก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ ณ ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามที่ให้ เมื่อไดโพลกลับตัวไม่ทันไดโพลจึงไม่กลับตัวแต่ยังรับ พลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆสะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้น ถ้าป้อนศักย์ไฟฟ้า ให้แก่ไดอิเล็กทริกที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย ศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีรูปคลื่นแบบไซน์แบบเดียวกันกับ กระแสสลับ กระแสไฟฟ้าจะนำหน้าศักย์ไฟฟ้าอยู่ 90 องศา แต่ในความเป็นจริงสำหรับไดอิเล็กทริกทั่วไป มุมต่างเฟสจะน้อยกว่า 90 องศา เสมอ ถ้าให้  $\delta$  คือค่ามุมที่นำไปลบออกจาก 90 องศา ปริมาณ  $\tan\delta$  จะ หมายถึง แฟกเตอร์สูญเสียพลังงานในไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุเมื่อใช้งานกับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

## 2.10 ลักษณะทางไฟฟ้าของสัณฐานไอโซทรอปิก

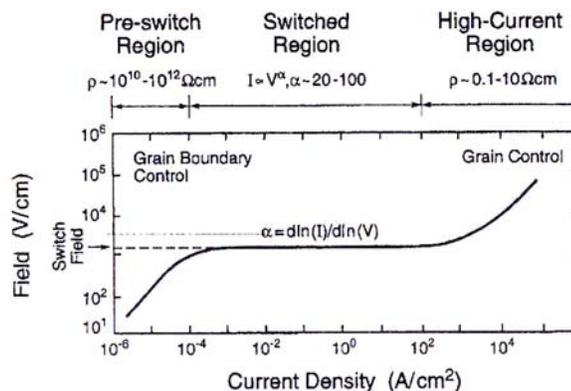
### 2.10.1 ลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวาริสเตอร์คือการมีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์สูง โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของวาริสเตอร์สามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วนสำคัญดังรูป 2.14

1. **บริเวณที่มีค่ากระแสต่ำ (low current linear region)** โดยมีค่าความต่างศักย์ต่ำกว่าความต่างศักย์ที่กระแสไหลผ่านประมาณ  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  หรือเรียกว่า บริเวณก่อนเบรกดาวน์ (prebreakdown region) ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์จะเป็นแบบเชิงเส้น และความสัมพันธ์บริเวณนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก

2. **บริเวณไม่เป็นเชิงเส้นช่วงกลาง (intermediate nonlinear region)** โดยมีค่าอยู่ระหว่างค่าความต่างศักย์ต่ำกว่า ความต่างศักย์ที่กระแสไหลผ่านประมาณ  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  และค่าความต่างศักย์ที่กระแสไหลผ่านประมาณ  $10^2 - 10^3 \text{ A/cm}^2$  โดยบริเวณนี้เป็นส่วนแสดงลักษณะที่สำคัญของวาริสเตอร์ นั่นคือเป็นบริเวณที่มีการนำกระแสปริมาณมากอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสความต่างศักย์บริเวณนี้แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

3. **บริเวณที่มีค่ากระแสสูง (high current linear region)** หรือเรียกว่าบริเวณผันกลับ (uptum region) โดยมีค่ากระแสประมาณ  $10^2 - 10^3 \text{ A/cm}^2$  ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์จะเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับบริเวณที่มีค่ากระแสต่ำ



รูป 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของวาริสเตอร์

### 2.10.2 สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient : $\alpha$ )

พารามิเตอร์ (Parameter) สำคัญที่ใช้เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของวาริสเตอร์คือ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ( $\alpha$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ โดยมีค่าเท่ากับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\alpha = \frac{d \ln I}{d \ln V} \quad (2.10)$$

ในการหาค่า  $\alpha$  จะต้องบอกช่วงของกระแสที่ใช้อย่างชัดเจน โดยทั่วไปมักจะใช้ค่ากระแสอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 – 100 mA นอกจากนี้ อุณหภูมิและความดันระหว่างการใช้งานอุปกรณ์ก็มีผลต่อค่า  $\alpha$  โดยจะทำให้ค่า  $\alpha$  มีค่าลดลง

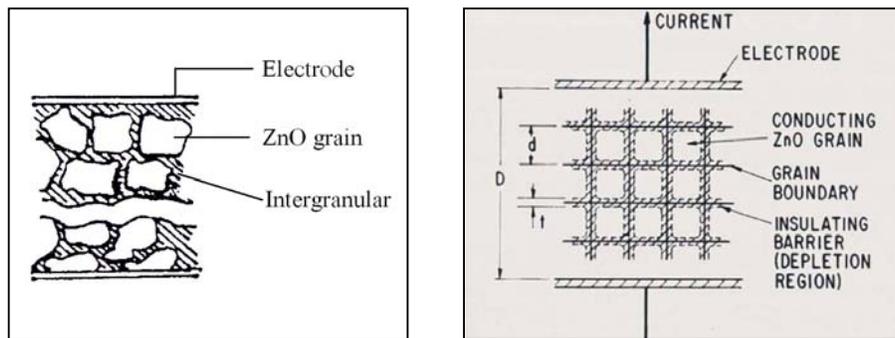
### 2.11 ZnO วาริสเตอร์ ( Model of ZnO Varistors )

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยสังกะสีออกไซด์เป็นสารหลัก และผสมด้วยออกไซด์ของโลหะอื่นในปริมาณเล็กน้อย หลอมรวมกันโดยกระบวนการ sintering ดังนั้น ZnO varistors จึงประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก (grains) เป็นผลึกของสังกะสีออกไซด์ และมีสารเจือ (intergranular) เป็นออกไซด์ของโลหะอื่นเคลือบอยู่หรือแทรกอยู่ระหว่าง ZnO grains สารผสมที่ได้นี้อาจกล่าวได้ว่าอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (solid solution) เนื่องจากออกไซด์ของโลหะที่เข้าจับตัวกับ ZnO โดยการ sinter นี้ ไม่ได้ทำให้โครงสร้างหลักของผลึก ZnO เปลี่ยนไป เพียงแต่แทรกอยู่ระหว่างผลึกของ ZnO หรืออาจแทนที่บางโมเลกุลที่ผิวของผลึก ออกไซด์ของโลหะที่เติมเหล่านี้ จะทำให้สภาพความต้านทานของ ZnO varistors มีค่าสูง สำหรับ voltage ช่วงหนึ่ง แต่เมื่อ voltage สูงขึ้นไปจากช่วงดังกล่าวแล้ว สภาพความต้านทานของ ZnO varistors จะลดต่ำลง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของ ZnO varistors ทั่ว ๆ ไปจะอยู่ในรูปของสมการที่ 2.1 คือ

$$I = k \cdot V^\alpha \quad 2.1$$

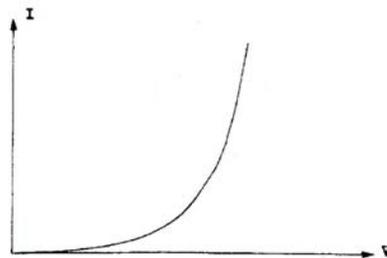
- เมื่อ  $I$  = กระแสที่ผ่าน ZnO varistors  
 $V$  = ความต่างศักย์ระหว่างขั้วของ ZnO varistors  
 $k$  = ค่าคงที่การแปรผัน  
 $\alpha$  = non-ohmic exponent

โครงสร้างทั่วไปของ ZnO varistors แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.15 แสดง model โครงสร้างของ ZnO varistors

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ จะได้กราฟดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.16 แสดง I-V characteristic curve of ZnO varistors

จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่า ในช่วง breakdown นั้น ค่า จะสูงขึ้น ดังนั้น varistors ที่จะต้องมีค่าสูงๆ และในช่วงก่อน breakdown นั้น จะต้องมีการเสถียรน้อยๆ

## 2.12 กระบวนการสร้างแผ่น ZnO varistors

### กระบวนการสร้าง

การผลิตสารประกอบชนิดหนึ่ง varistors สังกะสี สังกะสีสารประกอบชนิดหนึ่ง varistors เซรามิก มีสารกึ่งตัวนำอุปกรณ์กับสูงที่ไม่ใช่เชิงเส้นปัจจุบัน-แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะและเหลือแอสแตติพลังงาน ความสามารถ. ภายภาคคุณสมบัติเหล่านี้รวมกับต้นทุนการผลิตที่มีประสิทธิภาพได้ทำให้ที่ไม่มีช่องโหว่ ฟรังก์เจอร์ arrester กับสังกะสีสารประกอบชนิดหนึ่ง varistors กลายเป็นมาตรฐานสำหรับทุก overvoltage ป้องกันพลังงานระบบ voltages

Zinc สารประกอบชนิดหนึ่ง varistors consist หลักของสังกะสีสารประกอบชนิดหนึ่ง (ประมาณ 90% โดยน้ำหนัก) และขนาดเล็กจำนวนมากโลหะอื่นๆ oxides (additives) เช่นบิสมัท-, โคบอลต์-,พลวงและแมงกานีส-สารประกอบชนิดหนึ่งโลหะ-varistorsสารประกอบชนิดหนึ่งที่ผลิตเซรามิคดั้งเดิมด้วยกระบวนการเทคโนโลยี



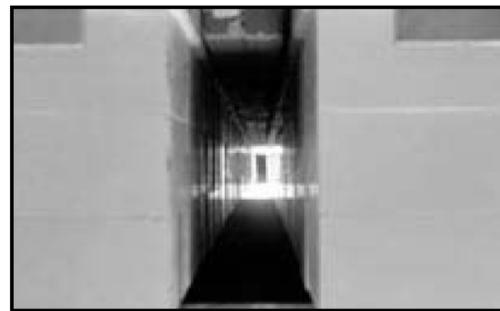
การเตรียมผงโดยซึ่งส่วนผสมสารประกอบชนิดหนึ่งที่แตกต่างกัน



การอบแห้งแป้งโลหะสารประกอบชนิดหนึ่ง



เครื่องอัดขึ้นรูปลงในดิสก์ให้จับกันแน่นก่อนนำไปเผา



เครื่องเตาเผาของดิสก์สำหรับหลายชั่วโมงที่อุณหภูมิ 1100-1200 เซลเซียส



เครื่องสำรวจและทำให้พื้นผิวของดิสก์มีความเรียบแบน



ทดสอบและแบ่งประเภทของดิสก์

รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของ กระบวนการสร้างแผ่น ZnO varistors

คุณภาพในทุกขั้นตอนการผลิตเป็นที่จำเป็นต้องมีสำหรับผลกายภาพคุณสมบัติของ varistors ส่วนใหญ่ที่สำคัญมีกระบวนการเตรียมผงและ กระบวนการ sintering

### 2.13 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ

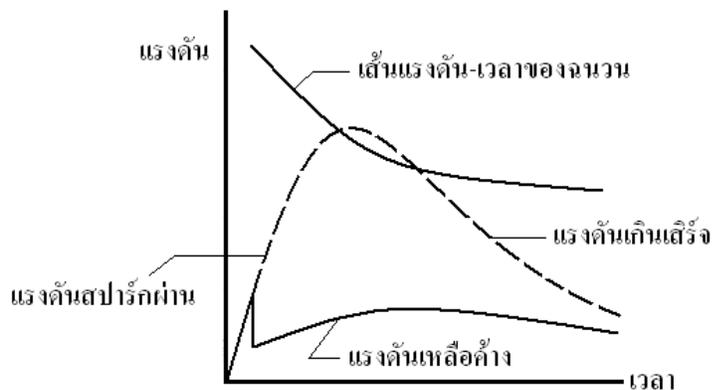
อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ ได้แก่ แก๊ปแท่ง (rod gap) และกั๊บดักเสิร์จ (surge arresters) โดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการได้รับการป้องกัน

#### 2.13.1 การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จด้วยกั๊บดักเสิร์จ

กั๊บดักเสิร์จหรือกั๊บดักฟ้าผ่า (lightning arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าและแรงดันเกินเสิร์จสวิตซ์ซึ่ง กั๊บดักเสิร์จจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน คือต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน กั๊บดักเสิร์จจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  มี 2 ชนิด คือ SiC และ ZnO

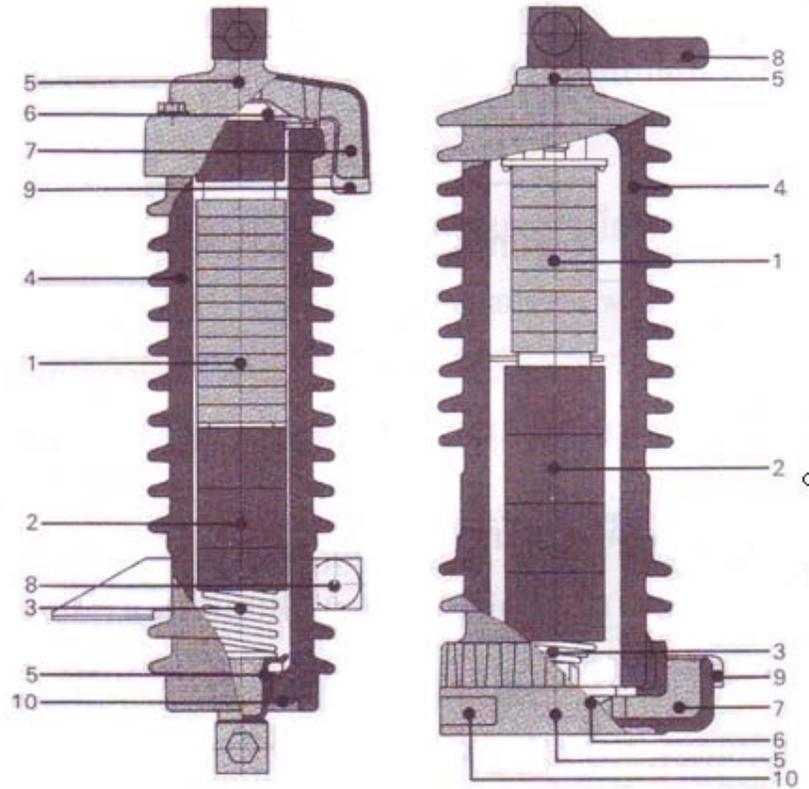
#### 2.13.2 กั๊บดักเสิร์จชนิด SiC

กั๊บดักเสิร์จชนิด SiC จะมีสปาร์กแก๊ปต่ออนุกรมกับความต้านทาน  $R_{non}$  สปาร์กแก๊ปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคัพของกั๊บดักเสิร์จ ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้งานที่แรงดันปรกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ เมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จ สปาร์กแก๊ปจะเกิดแบรกดาวน์โดยเร็วที่สุด แรงดันที่กั๊บดักเสิร์จเกิดแบรกดาวน์เรียกว่า แรงดันสปาร์กผ่าน (sparkover voltage)  $U_s$  เมื่อเกิดสปาร์กผ่านแล้วแรงดันที่คร่อมกั๊บดักเสิร์จจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกั๊บดักเสิร์จ เรียกว่า แรงดันที่เหลือ (residual voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบ



รูปที่ 2.18 แรงดันสปาร์กผ่านและแรงดันที่เหลือของกั๊บดักเทียบกับแรงดันเกินเสิร์จของการฉนวน

ตัวอย่าง โครงสร้างและส่วนประกอบของกั๊บดั๊กเสี๊รจัชนีด SiC

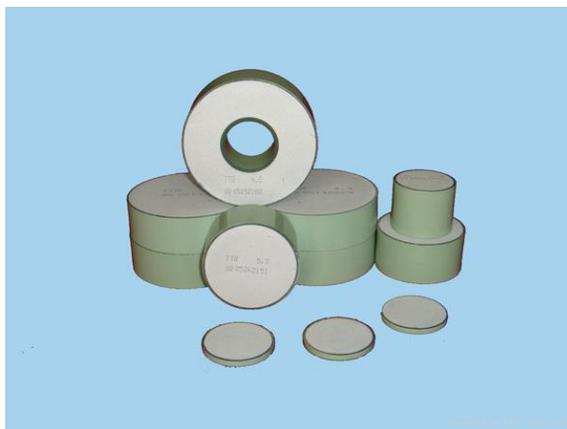
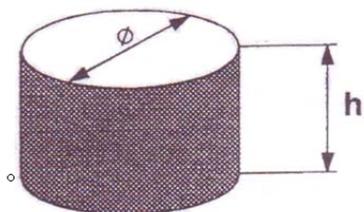


- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 1 Spark-gaps with grading resistors | 6 Pressure relief membrane |
| 2 Non-linear discharge resistors    | 7 Deflecting nozzle        |
| 3 Compression spring                | 8 Arc-electrode            |
| 4 Porcelain housing                 | 9 Blow-out indicator       |
| 5 Fittings                          | 10 Rating plate            |

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างกั๊บดั๊กเสี๊รจัชนีด SiC

2.13.3 กั๊บดั๊กเสี๊รจัชนีด MO (ZnO)

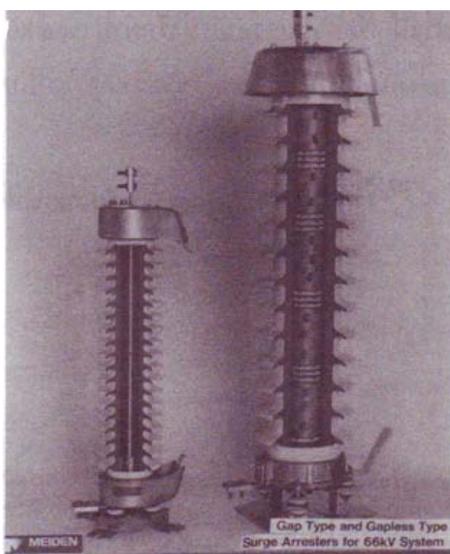
กั๊บดั๊กเสี๊รจัชนีดออกไซโลหะ (metal oxide = MO) จะใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  ทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวนดั่งรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง ZnO เป็นตัวกำหนดขนาดกระแส หรือพลังงานเสี๊รจัที่ยอมให้ผ่านส่วนความสูง  $h$  เป็นตัวกำหนดแรงดัน



MO – block

h กำหนดแรงดัน

Ø กำหนดกระแสหรือพลังงาน



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของกับดักเสิร์จชนิด

### 12.3.4 คุณสมบัติของกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จ ประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{non}$  เมื่อมีกระแสเสิร์จไหลผ่านเพิ่มขึ้น ความต้านทานกลับลดลง ฉะนั้น แรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จจะเพิ่มไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแส

### 2.13.4.1 ลักษณะเส้นแรงดัน – กระแส (U-I) ของกั๊บดั๊กเล็ร้จ

ความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทาน  $R_{non}$  ที่ชนิด SiC และ ZnO ทำให้กระแสไหลผ่าน I และ กระแสตกคร่อมความต้านทาน  $R_{non}$  มีลักษณะที่อาจเขียนแทนได้ความสัมพันธ์ คือ

$$I = kU^\alpha$$

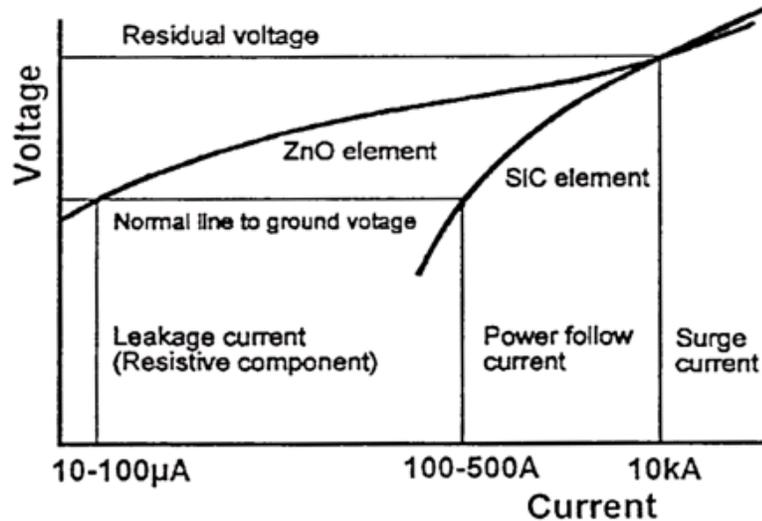
โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของ  $R_{non}$

$\alpha = 4-6$  สำหรับ SiC

$\alpha = 20-50$  สำหรับ ZnO

k คือค่าคงตัว ขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน  $R_{non}$  ถ้าเกรนยิ่งเล็กความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น

ที่แรงดันใช้งาน กระแสรั่วไหลผ่าน  $R_{non}$  ของกั๊บดั๊กชนิด ZnO มีค่าต่ำ คือ น้อยกว่า 1 mA จึงไม่ต้องมีแกปอนุกรมกับ  $R_{non}$  เรียกว่า กั๊บดั๊กไร้แกป (gapless arrester) ส่วนชนิด SiC จะมีกระแสไหลผ่านในช่วง 100-500 A จึงต้องใส่แกปอนุกรมกับความต้านทาน  $R_{non}$  ลักษณะ U-I ของกั๊บดั๊กทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกันดังรูป

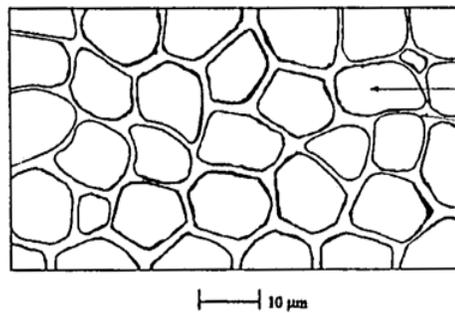
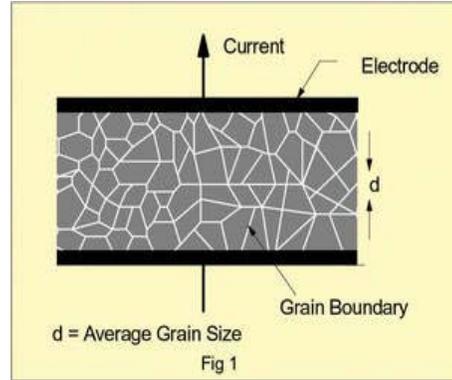
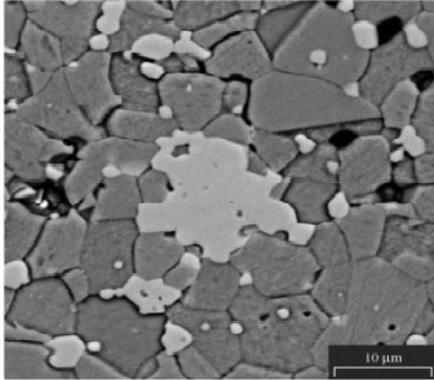


รูปที่ 2.21 ลักษณะเส้นแรงดัน – กระแสของกั๊บดั๊กชนิด SiC เปรียบเทียบกับ ZnO

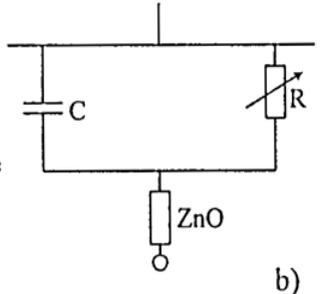
### 2.13.4.2 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง

UC (IEC) หรือ MCOV (ANSI) เป็นค่าแรงดันความถี่พลังงานค่า rms สูงสุดที่ยอมให้กับฉักเสิร์จต่อที่ขั้วต่อได้อย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลผ่านกับฉักเสิร์จที่ UC เป็นกระแสประจุน้อยกว่า 1 mA

สาร ZnO มีความต้านทานจำเพาะน้อย แต่สารเคลือบภายนอก ZnO มีความต้านทานจำเพาะสูงถึง  $10^{10} \Omega\text{-cm}$  และมี  $\epsilon_r = 500\text{-}1000$



ZnO  
สารเจือออกไซด์โลหะ  
( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )  
(bismuth oxide)



a) อนุภาคสารออกไซด์  $R_{non}$  ของ MO

b) วงจรสมมูลของแท่งบล็อก MO

- R : ความต้านทานสารเคลือบรอบอนุภาค ZnO มีค่าแปรไม่เป็นเชิงเส้น
- C : ค่าเก็บประจุของสารเคลือบรอบอนุภาค ZnO

### 2.13.5 การประสานสัมพันธ์การฉนวน

ในระบบไฟฟ้าแรงดันเกินเสิร์จมีขนาดสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันระบบ การออกแบบจะทำให้ฉนวนทนแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่าระดับนั้นจะอาศัยอุปกรณ์ป้องกันเป็นตัวทำให้ระดับแรงดันเกินเสิร์จลดลงต่ำพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวน

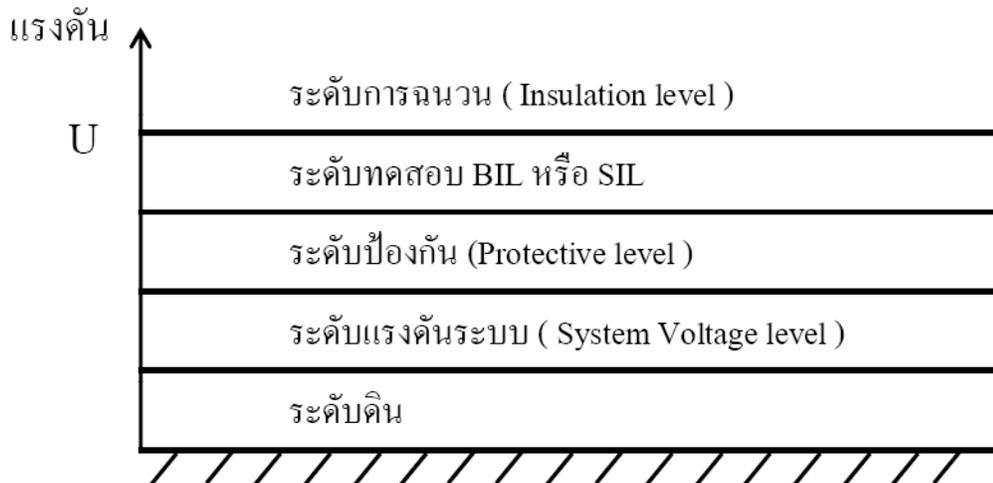
จึงมีการประสานสัมพันธ์การฉนวน คือเลือกระดับการฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบให้สัมพันธ์กับระดับลักษณะสมบัติของกัปดักเสิร์จ

การเลือกพิกัดแรงดัน  $U_n$  ของกัปดักจะต้องทราบ

- 1) MCOV หรือ UC ให้สอดคล้องกับ TOV ปกติ  $U_n \approx 25\% > UC$
- 2) แรงดันที่เหลือ  $U_r$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันระบบ  $U_p$
- 3) BIL = Basic Impulse Insulation Level ของฉนวนอุปกรณ์

#### ความสัมพันธ์ของ BIL

ระดับป้องกัน ระดับการฉนวน และแรงดันระบบ  $< 300$  kV ระดับแรงดันฉนวนจะต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้จะกำหนดด้วยค่า BIL จากระดับแรงดันระบบ



รูปที่ 2.22 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของฉนวนหรืออุปกรณ์ระบบ

### การเลือกระดับ MCOV หรือ UC

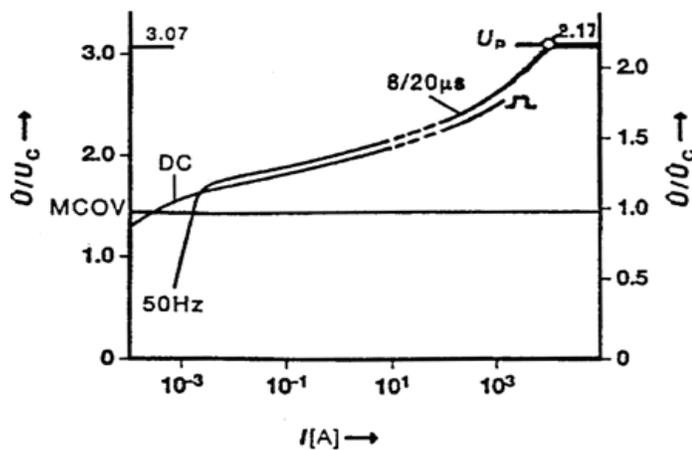
การเลือกระดับ UC ควรให้ต่ำกว่าจุดหักมุมของเส้นลักษณะ U-I ซึ่งค่าสูญเสียจะต่ำ เพราะกระแสจะเป็นกระแสประจุ

การเลือกขนาดกักต้องพิจารณาการต่อลงดินของระบบ

#### 2.13.5.1 นวัตกรรมระบบไม่ต่อลงดิน (insulated network)

นวัตกรรมไม่ต่อลงดิน UC จะมีค่าสูงสุด

$$UC \geq Um$$



$I$  = ค่ากระแส Amp

$U$  = คือค่ายอดแรงดันป้องกัน  $U_p$  คิดค่าเทียบกับค่า  $U_e$  หรือ  $U_c$

รูปที่ 2.23 คุณลักษณะการป้องกันของกักตัวเสีจระบบจำหน่าย

#### 2.13.5.2 นวัตกรรมต่อลงดินยังผล (effectively grounding system)

นวัตกรรมต่อลงดินยังผล หมายถึง เมื่อเกิดผิดพ่วงลงดิน ขจัดได้ในเวลาที่กำหนด เช่น 3 วินาที คือทนต่อ TOV ได้ 3 วินาที

$$U_c \geq 1.1 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

### 2.13.5.3 ค่าแรงดัน UC เมื่อคำนึงถึง TOV

เมื่อคำนึงถึง TOV factor และ (fault factor ke) สูตรโดยทั่วไปของค่า UC จะเป็น

$$U_c \geq \frac{k_e U_m}{T \sqrt{3}}$$

เมื่อ ke = earth fault factor

= 1.4 สำหรับ solidly grounded

= 1.73 สำหรับนิวทรัลไม่ต่อลงดิน

T = TOV factor = UTOV / UC ในเทอมเวลาของ TOV

## 2.14 การเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจ

การเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจ หรือการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งทำให้ขนาดกระแสรั่วของกัปดักเล็รจมีค่าสูงขึ้น โดยภายหลังจากที่กัปดักเล็รจทำงานดิสชาร์จพลังงานจากแรงดันเก็คอิมพัลส์ หรือ AC (TOV) พบว่าอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกระแสไฟฟ้า (V-I characteristic) ในช่วง Pre-breakdown region หรือช่วงกระแสต่ำๆ โดยเฉพาะกรณีที่กัปดักเล็รจรับกระแสที่มีขนาดค่ายอดสูงกว่ากระแสปกติของกัปดักเล็รจ จะส่งผลให้กัปดักเล็รจเกิดการเสื่อมสภาพและมีปริมาณของกระแสรั่วเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจในขณะที่ใช้งานนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท อย่างง่ายดังนี้ [1]

### 2.14.1 การเสื่อมสภาพภายใต้สภาวะการทำงานที่ระดับแรงดันปกติอย่างต่อเนื่อง

เป็นการเสื่อมสภาพตามปกติของ ZnO block หากมีการใช้งานไปนานๆ ภายใต้สภาวะแรงดันปกติ ซึ่งการเพิ่มของปริมาณกระแสรั่วและระยะเวลาของการเสื่อมสภาพนี้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบองค์ประกอบต่างๆ และขั้นตอนการผลิต ZnO block ของบริษัทผู้ผลิต

### 2.14.2 การเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า

(V-I characteristic) เนื่องจากกระแสดิสชาร์จขณะรับแรงดันเกินฟ้าผ่าและแรงดันเกินสวิตซ์ชิ่ง หรือเรียกว่า Impulse Degradation ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับเล็รจบ่อยครั้ง หรือเกิดจาก ZnO block มีขนาดไม่เหมาะสมกับปริมาณพลังงานที่ได้รับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ได้รับมีขนาดมากกว่ากระแสดิสชาร์จปกติของกัปดักเล็รจ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในช่วงกระแสต่ำเท่านั้น (Low current region) สำหรับที่กระแสสูงๆ ขนาดของแรงดันคงค้าง (Residual voltage) ยังมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจะอยู่บริเวณใกล้เคียงกับแรงดัน  $U_c$  (Continuous operating

voltage) และกระแสรั่วภายหลังการดีสชาร์จจากกระแสอิมพัลส์ในชั่วที่ตรงกันข้ามจะมีขนาดสูงกว่า ภายหลังการดีสชาร์จกระแสอิมพัลส์ชั่วเดียวกัน

### 2.14.3 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า

(V-I characteristic) เนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Chemical reactions) เช่น การทดลองของระดับ Oxygen ที่บริเวณขอบรอบๆ ของ ZnO block โดยอาจเป็นผลจากดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านในของโครงสร้างภายนอก (Housing) ส่งผลทำให้จำนวนที่ขอบของ grain ของ ZnO มีขนาดลดลง จึงทำให้ปริมาณของกระแสรั่วภายใต้แรงดันพังทลาย (Breakdown or reference voltage) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

## 2.15 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจ

### 2.15.1 อุณหภูมิภายนอก (Ambient temperature)

เนื่องจากปริมาณกระแสที่ไหลผ่านกัปดักเล็รจในช่วงก่อนการเบรกดาวน์นั้น (Pre-breakdown region) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของกัปดักเล็รจเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากคุณลักษณะความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I Characteristic) ดังนั้นหากกัปดักเล็รจทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ก็จะทำให้การระบายความร้อนของกัปดักเล็รจทำได้ไม่ดี และมีความร้อนสะสมภายในส่งผลให้อุณหภูมิของกัปดักเล็รจสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสรั่วมีขนาดสูงขึ้น และเป็นตัวเร่งอายุการใช้งานของกัปดักเล็รจ

### 2.15.2 ระดับแรงดันที่ใช้งาน (Working voltage)

ปริมาณกระแสรั่วที่ไหลผ่านกัปดักเล็รจ จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่ใช้งานโดยตรง แม้ว่ากัปดักเล็รจทำงานภายใต้แรงดันใช้งานปกติ แต่การเสื่อมสภาพก็ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนในบางกรณีก็นำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อนได้ โดยเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันใช้งาน ซึ่งยังรวมถึงชนิดของแรงดันด้วย เช่น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ เป็นต้น

### 2.15.3 การออกแบบและลักษณะทางกายภาพของกัปดักเล็รจ

ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจ คือ ความสามารถในการระบายความร้อนของโครงสร้างภายนอกและการกระจายแรงดันผิวของ ZnO block โดยความไม่สม่ำเสมอของการกระจายแรงดันเกิดขึ้นเนื่องจากความจุไฟฟ้าแฝงของโครงสร้างภายนอก ผลของความเสียหายของโครงสร้างภายนอก และสิ่งเปราะเปื้อน อาจทำให้เกิดการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของกัปดักเล็รจ

#### 2.15.4 มลภาวะและความเปื้อน (Pollution and contamination)

ผลกระทบจากสิ่งเปื้อนซึ่งสัมพันธ์กับแถบแห้ง (Dry band) ที่เป็นสาเหตุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและโคโรนา โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสียหายของผิวที่ของกัณฑ์เสิร์จและวัสดุที่หุ้ม ZnO block นอกจากนั้นดิสชาร์จบางส่วนยังทำให้ปริมาณออกซิเจนของกัณฑ์รอบๆ ZnO block ลดลงกลายเป็นกัณฑ์ซึ่งสามารถทำลายกัณฑ์เสิร์จ และเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของกัณฑ์เสิร์จได้อีกทางหนึ่ง

#### 2.15.5 สิ่งแวดล้อม (Environment)

สภาพแวดล้อมที่ติดตั้งกัณฑ์เสิร์จที่ต่างกัน เช่น ภายในอากาศ, SF<sub>6</sub>, หรือของเหลว จะส่งผลกระทบต่อช่วงอายุการใช้งานของวัสดุต่างๆ แตกต่างกัน โดยพบว่า ZnO ที่ติดตั้งภายในบริเวณที่บรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีการเสื่อมสภาพมากกว่าติดตั้งในอากาศ นอกจากนั้นไอน้ำหรือความชื้นยังส่งผลทำให้มีกระแสรั่วสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ หรือกัณฑ์เสิร์จที่ติดตั้งภายในหม้อแปลงชนิดน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง (~95 °C) พบว่ามีอัตราการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว

#### 2.15.6 ความสามารถในการรองรับเสิร์จในรูปแบบต่างๆ (Surge absorption capability)

##### 1) ดิสชาร์จจากแรงดันเกินฟ้าผ่า (Lighting discharge)

การเสื่อมสภาพจากการดิสชาร์จจากแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า จะขึ้นอยู่กับขนาดของค่ายอดของกระแสดิสชาร์จมากกว่าปริมาณของพลังงานที่ได้รับ โดยกระแสเสิร์จฟ้าผ่าที่มีขนาดสูงจำนวนไม่มากก็สามารถสร้างความเสียหายให้กับกัณฑ์เสิร์จได้มากกว่ากระแสเสิร์จที่มีพลังงานสูง แต่มีขนาดของกระแสต่ำและมีจำนวนครั้งมากกว่าได้ เช่น แรงดันเกินชั่วคราวกระแสกลับที่ความถี่กำลังไฟฟ้า โดยความคงทนต่อจำนวนของเสิร์จที่ดิสชาร์จผ่านกัณฑ์เสิร์จฟ้าผ่าในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ของ V-I characteristic ทำให้ปริมาณของกระแสรั่วมีขนาดสูงขึ้น

##### 2) ดิสชาร์จจากแรงดันเกินสวิตซ์ (Switching discharge)

การเสื่อมสภาพของกัณฑ์เสิร์จจากการดิสชาร์จแรงดันเกินสวิตซ์ จะให้ผลในลักษณะเดียวกับแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดค่ายอดสูงสุดของกระแสดิสชาร์จมากกว่าพลังงาน โดยพบว่ากัณฑ์เสิร์จภายหลังได้รับสวิตซ์เสิร์จที่มีพลังงานสูง มีการเปลี่ยนแปลงของกัณฑ์เสิร์จน้อยมาก ในทางปฏิบัติอาจจะเลยผลการเสื่อมสภาพจากพลังงานที่กัณฑ์เสิร์จได้รับในการพิจารณาอายุการใช้งานของกัณฑ์เสิร์จ แต่อย่างไรก็ตามพลังงานที่มีค่าสูงอาจทำให้เกิดการพังทลาย (Puncture) ของ ZnO block ได้ เนื่องจากการเกิดการหลอมเหลวของ Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> บริเวณจุดที่มีระดับอุณหภูมิสูง (Hot spot)

### 3) ดิสชาร์จจากแรงดันเกินชั่วคราว (Discharge from TOV)

การดิสชาร์จจากแรงดันเกินชั่วคราว ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น อาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal runaway) ถ้าแรงดันเกินที่ได้รับยังคงอยู่และมีพลังงานที่สูงกว่าความสามารถในการรองรับแรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ เป็นต้น

#### 2.15.7 องค์ประกอบของ ZnO block และกระบวนการผลิต

การเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานของกัปดักเสิร์จนั้น สัมพันธ์กับการเคลื่อนย้ายของประจุ ออกซิเจนในแนวตั้งฉากกับ grain boundary ซึ่งส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของ ZnO นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของกระแสรั่วในระยะยาวยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ ZnO และกระบวนการผลิต ZnO ของแต่ละบริษัทผู้ผลิต แม้ว่ากัปดักเสิร์จจะมีคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V-I characteristic) ตอนเริ่มต้นเหมือนกันก็ตาม

#### 2.15.8 ความเป็นเนื้อเดียวกันของ ZnO (Homogeneity)

ความไม่สม่ำเสมอของความนำไฟฟ้าของเนื้อ ZnO ทำให้ทางเดินของกระแสดิสชาร์จถูกจำกัดไว้บริเวณใดบริเวณหนึ่งมากกว่าจุดอื่นๆ ส่งผลให้เกิดจุดที่มีความร้อนสูง (Hot spot) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกัปดักเสิร์จ หรือการเสื่อมสภาพภายหลังการดิสชาร์จที่เกิดขึ้น

### 2.16 วิธีการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ

การตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จแบบไม่ทำลายเพื่อประเมินความเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ทั้งที่เป็นแบบตรวจสอบขณะที่ยังคงติดตั้งอยู่ในระบบ (On-line monitoring) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Off-line monitoring) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การวัดด้วยวิธีและข้อพิจารณาต่างๆ ดังนี้

#### 2.16.1 การวัดขนาดของแรงดันอ้างอิง (Measurement of reference voltage)

การวัดแรงดันระหว่างขั้วของกัปดักเสิร์จ ขณะที่มิกระแสไหลผ่านกัปดักเสิร์จเท่ากับกระแสอ้างอิง (Reference current) ปกติจะมีค่าอยู่ประมาณ 1-10 mA ซึ่งจะถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต (ปกติจะใช้ที่ 1 mA) โดยกระแสอ้างอิงจะอยู่ในบริเวณ breakdown region ใกล้เคียงกับจุด Breakdown ซึ่งมีสัดส่วนของกระแสที่ประจุน้อยกว่ากระแสความดันต้านทานมาก โดยจุดทำงานบนเส้นกราฟความสัมพันธ์ V-I Characteristic และกระแสอ้างอิงทั้งก่อนและหลังได้รับอิมพัลส์ดิสชาร์จจะอยู่ใกล้ๆ กับจุด Break down โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงจากผลของการเสื่อมสภาพ อาจเป็นไปได้ทั้งค่าบวก, ลบ, หรือไม่เปลี่ยนแปลงอะไรเลย ในบางกรณีอาจพบว่าอาจยังมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วที่แรงดัน

อ้างอิง จึงไม่เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือมากนัก สำหรับมาตรฐาน AS 1307.2 (Australian Standard) [26] ได้มีการแนะนำว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงกระแสสลับที่วัดได้หลังจากได้รับ Impulse Stress ต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 5\%$  จึงจะถือว่ากับดักเสิร์จยังคงอยู่ในสภาพดี

### 2.16.2 การวัดคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (Measurement of V-I characteristic)

การวัดคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จนั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุด ซึ่งแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยรวมจริงของกับดักเสิร์จ โดยมีขนาดในช่วงตั้งแต่ 0.5 Uc (Continuous Operation Voltage) จนถึงระดับแรงดันอ้างอิง (Reference voltage) วิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งแหล่งจ่ายกระแสตรงและกระแสสลับ แต่หากใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับ จะต้องขจัดองค์ประกอบของกระแสรีวเก็บประจุออกจากกระแสรีวที่วัดได้จนเหลือเพียงกระแสรีวความต้านทานเท่านั้น โดยใช้วิธีการต่างๆ

แต่หากนำวิธีนี้ไปใช้ประยุกต์ใช้กับกับดักเสิร์จที่ยังคงติดตั้งอยู่ในระบบ จะเป็นการวัดค่าของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพียงจุดเพียงของ V-I Characteristic เท่านั้น โดยอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้านั้นต้องไม่มีความคลาดเคลื่อนของการเลื่อนเฟส จึงจะนำไปวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง เพื่อนำรูปคลื่นที่ได้ไปจัดกระแสรีวเก็บประจุต่อไป หรืออาจประยุกต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาสร้างกระแสรีวเก็บประจุเสมือนจากรูปคลื่นกระแสรีวของกับดักเสิร์จที่วัดและบันทึกมาจากการทดสอบ เพื่อนำไปจัดออกจากกระแสรีวรวมต่อไป โดยไม่จำเป็นต้องวัดรูปคลื่นของแรงดันมาด้วย ซึ่งวิธีนี้จะเรียกว่า “Virtual reference method”

### 2.16.3 การวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้าง (Discharge residual voltage)

ในมาตรฐาน AS.1307.2 กำหนดให้การตรวจสอบสภาพของกับดักเสิร์จสามารถทำได้โดยใช้การวัดแรงดันดิสชาร์จคงค้างค่ายอด เมื่อจ่ายกระแสรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 us  $\pm 20\%$  ที่ขนาดค่ายอดเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 เท่าของพิกัดของกระแสดิสชาร์จของกับดักเสิร์จ โดยระยะเวลาระหว่างการทดสอบแต่ละครั้ง ให้รอจนอุณหภูมิของกับดักเสิร์จเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดิสชาร์จคงค้างที่วัดได้หลังจากได้รับ Impulse Stress ต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 5\%$  จึงจะถือว่ากับดักเสิร์จยังคงอยู่ในสภาพดี

#### 2.16.4 การวัดกระแส Polarization และ Non-polarization

เป็นการทดสอบเพื่อดูผลตอบสนองของ Dielectric ส่วนที่เป็นเนื้อฉนวนของ ZnO Block โดยสังเกตจากการเกิด Polarization ขณะป้อนแรงดันแบบขั้น (Step) ขนาดเท่ากับ  $U_0$  ภายหลังจากป้อนแรงดันนั้น กระแส Polarization ก็จะเกิดขึ้น โดยมีลักษณะความสัมพันธ์ตามสมการที่ (20)

$$i_p(t) = C_o U_o \left[ \frac{\sigma}{\epsilon_o} + f(t) \right] \quad (20)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง (dc conductivity)

$\epsilon_o$  คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศ

$f(t)$  คือ ฟังก์ชันผลตอบสนอง (response function)

$C_o$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าเชิงเรขาคณิต (geometric capacitance) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ต่อค่า relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) ของสารที่เป็นฉนวน

หลังจากนั้น เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันแบบขั้นมีแรงดันเท่ากับศูนย์ หรือแทนด้วยการลัดวงจรนั้น กระแส depolarization ก็จะเกิดขึ้น โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสที่เกิดขึ้นก่อนหน้า ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (21)

$$i_d(t) = -C_o U_o [f(t) - f(t+t_1)] \quad (21)$$

สำหรับฟังก์ชันผลตอบสนองทางเวลา  $f(t)$  ของกัปดักเสิร์จ จากการทดลองพบว่าสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (22)

$$f(t) = m.t^{-n} \quad (22)$$

เพื่อที่จะประมาณฟังก์ชันความสัมพันธ์  $f(t)$  จึงสมมติให้ค่าของฟังก์ชันลดลงตามเวลาอย่างต่อเนื่อง และถ้าช่วงของ polarization นั้นมีระยะเวลานานพอ หรือ  $f(t+t_p) \cong 0$  ซึ่งทำให้ฟังก์ชันผลตอบสนอง  $f(t)$  ก็จะมีขนาดสัดส่วนเท่ากับกระแส polarization โดย  $f(t)$  ก็จะมีค่าประมาณได้ตามสมการที่ (23)

$$f(t) \approx \frac{-i_d(t)}{C_o U_o} \quad (23)$$

ค่าของความนำไฟฟ้ากระแสตรง (do conductivity,  $\sigma$ ) ของ ZnO ที่ประมาณได้ก็จะนำไปใช้พิจารณาสภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อฉนวนของ ZnO Block หรือการเสื่อมสภาพ ซึ่งพบว่า หากกับดักเสิร์จเสื่อมสภาพค่าของความนำไฟฟ้านี้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 2.16.5 การวัดแรงดันย้อนกลับ (Return Voltage)

การวัดแรงดันย้อนกลับปัจจุบันมีการนำมาใช้ตรวจสอบฉนวนของสายเคเบิล และหม้อแปลงกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น และเนื่องจากกับดักเสิร์จชนิด ZnO ก็มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับฉนวนที่แรงดันใช้งานปกติ จึงสามารถนำการวัดแรงดันย้อนกลับมาวิเคราะห์สภาพของกับดักเสิร์จได้เช่นกัน หลักการของการทดสอบแรงดันย้อนกลับ คือ การทำให้เกิด polarization และ depolarization ในภายหลังของ dipoles ภายในเนื้อฉนวนเช่นเดียวกับการ charging และ discharging ของ grain boundaries และผลกระทบของ space charge โดยขั้นตอนการวัดแรงดันย้อนกลับมีอยู่ 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) อัดประจุ (charge) ให้กับ ZnO Block ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $U_c$ ) ซึ่งต้องมีขนาดน้อยกว่าแรงดันพิทช์ของ ZnO ภายในช่วงระยะเวลา  $t_c$
- 2) คายประจุ (discharge) ออกจาก ZnO Block ในช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่า  $t_c$  (ปกติจะให้มีความเป็นครึ่งหนึ่งของเวลา  $t_c \cdot t_d = t_c/2$ )
- 3) เป็นวงจรออก แล้ววัดรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อม ZnO ( $U_r$ ) ซึ่งจะมีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วตกลงในภายหลัง โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายหลังนี้ เราเรียกว่า แรงดันย้อนกลับ (Return voltage)

ผลการทดสอบแรงดันย้อนกลับที่ได้ สามารถนำมาวิเคราะห์สภาพของเนื้อฉนวนโดยพิจารณาจาก 3 ปัจจัย คือ ค่าของแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Maximum return voltage,  $U_{max}$ ), เวลาที่ถึงจุดแรงดันสูงสุด (Central time constant, CTC) และ ความชันตอนช่วงเริ่มต้น (Initial slope,  $S_i$ ) โดยจะพบว่า ค่า  $U_{max}$  และ CTC จะมีค่าลดลงภายหลังกับดักเสิร์จมีการเสื่อมสภาพ ซึ่งแรงดันย้อนกลับสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (25) สำหรับ  $t_2 < t < \infty$  และ  $U_r(t=t_2) = 0$

$$i_r(t) = \sigma U_r(t) + \epsilon_o \epsilon_r \frac{dU_r(t)}{dt} + \epsilon_o \frac{d}{dt} \int_{t_2}^t (t - \tau) U_r(\tau) d\tau \quad (25)$$

### 2.16.6 การวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกัปดักเสิร์จ (Power loss measurement)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้พื้นฐานทางทฤษฎี เช่นเดียวกับการวัดปริมาณกระแสรั่ว โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดได้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสเฉลี่ยทั้งสองขั้วของรูปคลื่น AC สำหรับการทดสอบ จะต้องทำการวัดทั้งรูปคลื่นของกระแสรั่วและแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วของกัปดักเสิร์จ นอกจากนี้วิธีการวัดกำลังไฟฟ้ายังสามารถนำไปใช้ได้กับระบบซึ่งไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ หรือแรงดันไฟตรง เช่น การวัดกำลังสูญเสียของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งอยู่ในระบบ HVDC วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการ แต่อาจทำได้ยากในภาคสนาม

### 2.16.7 การวัดอุณหภูมิของ ZnO Block และอุณหภูมิที่ผิวของกัปดักเสิร์จ (Measurement of the temperature of ZnO and arrester surface)

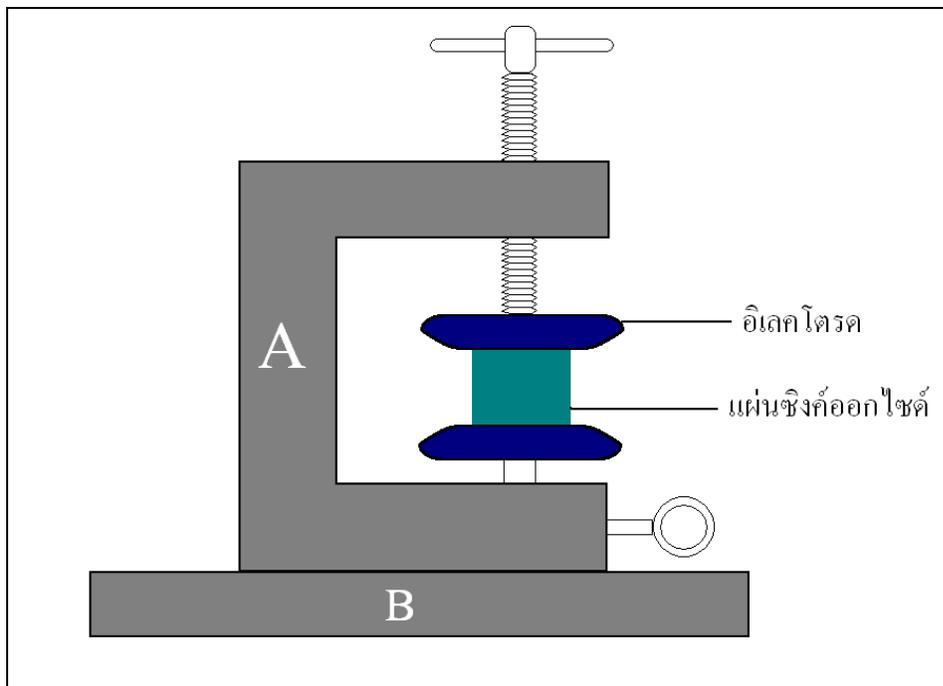
เนื่องจากผลจากปัจจัยต่างๆ เช่น การดีสชาร์จกระแสรั่ว, สภาพแวดล้อม และปัจจัยอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ล้วนส่งผลต่ออุณหภูมิของกัปดักเสิร์จทั้งสิ้น ดังนั้นการวัดอุณหภูมิจึงเป็นพื้นฐานของการตรวจสอบสภาพของกัปดักเสิร์จ การวัดอุณหภูมิยังเป็นปัจจัยที่ใช้กำหนดสภาพความพร้อมในการทำงานของกัปดักเสิร์จด้วย เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อปัจจัยด้านอื่นๆ ด้วย เช่น ความสามารถในการรับพลังงาน หรือปริมาณของกระแสรั่วของกัปดักเสิร์จ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะใช้งานจริง ดังนั้นอุณหภูมิของ ZnO block และอุณหภูมิที่ผิวของกัปดักเสิร์จ เป็นตัวกำหนดว่ากัปดักเสิร์จยังมีความเสถียรภาพทางความร้อนหรือไม่ โดยการวัดอุณหภูมิภายใน Housing ของกัปดักเสิร์จ สามารถทำได้ด้วยการใช้ optical fiber หรือใช้ passive sensors ต่อกับ ZnO Block โดยตรง และสำหรับการวัดความร้อนที่ผิวของกัปดักเสิร์จ ปัจจุบันนิยมใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความเสื่อมสภาพภายในได้เช่นกัน

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาถึงสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่เป็นแผ่นซีงค์ออกไซด์ซึ่งถูกบรรจุอยู่ภายในกับดักเสิร์จ (Search Arresters) ซึ่งมีใช้งานอยู่ในประเทศไทย โดยจะสุ่มใช้ตัวอย่างของวัสดุที่ทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น จาก 3 บริษัทผู้ผลิต นำมาทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ ผ่านวงจรไฟฟ้าแรงสูง ตามมาตรฐาน IEC Standard เพื่อสรุปและวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติหลายๆด้านที่เกิดจากขั้นตอนและกระบวนการผลิตที่ใช้ส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยผลที่ได้จากการทดสอบ จะนำไปวิเคราะห์สรุปและหาค่าความเป็นฉนวนของการทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงก่อนการเกิดเบรกดาวน์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแผ่นซีงค์ออกไซด์ทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ ที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีคุณสมบัติการทำงานได้มาตรฐานหรือไม่ , มีความแตกต่างกันอย่างไร และสามารถบอกได้ว่า ผลิตภัณฑ์ของบริษัทใดดีกว่ากัน

### 3.1 การออกแบบชุดทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบเพื่อที่จะนำไปทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์

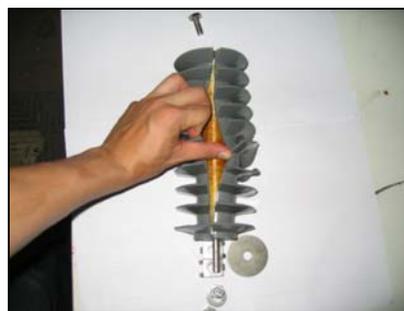
### 3.1.2 ข้อกำหนดในการออกแบบ

1. ที่วัสดุ A และ B ต้องเป็นฉนวน
2. การออกแบบอิลেকโตรด ต้องคำนึงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของแผ่นซิงค์ออกไซด์ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC and ANSI Arrester กำหนดไว้ที่ เส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ระหว่าง  $32 \pm 0.8$  ถึง  $41 \pm 0.8$  mm. และความสูงอยู่ระหว่าง  $22.0 \pm 0.6$  ถึง  $36.0 \pm 1.0$  mm.
3. การยึดจับหน้าสัมผัสระหว่างอิลেকโตรดกับแผ่นซิงค์ออกไซด์ต้องแนบสนิท เพื่อให้กระแสไหลผ่านได้เต็มพื้นที่หน้าสัมผัส

## 3.2 วัสดุที่จะนำมาทดสอบ

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นซิงค์ออกไซด์

การเตรียมแผ่นซิงค์ออกไซด์ได้มีการนำ Arrester ทั้งตัวมาผ่าเพื่อที่จะนำ แผ่นซิงค์ออกไซด์ ไปทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ





รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผ่าเพื่อนำเอาแผ่นฉิ่งออกไซด์ไปทดสอบ

### 3.2.2 วัสดุที่ได้จากการผ่า Arrester

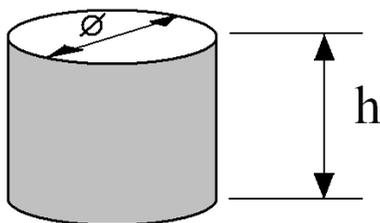
#### 3.2.2.1 แผ่นฉิ่งออกไซด์ A (ผลิตภัณฑ์จาก บริษัท A )

จากการผ่าArrester ของผลิตภัณฑ์จาก บริษัท A พบว่ามีแผ่นฉิ่งออกไซด์วางเรียงอยู่จำนวน 5 ชั้น



รูปที่ 3.3 แผ่นฉิ่งออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ A

ขนาดของแผ่นฉิ่งออกไซด์ A



-ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $\varnothing$ ) = 30.3 mm.

-ความสูงเท่ากับ ( $h$ ) = 24.2 mm.

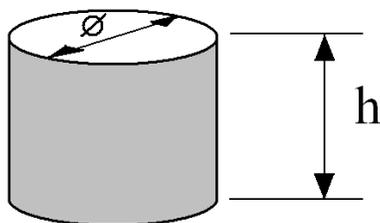
### 3.2.2.2 แผ่นฉิ่งค้อออกไซด์ B (ผลิตภัณฑ์จาก บริษัท B)

จากการผ่า Arrester ของผลิตภัณฑ์จาก บริษัท B พบว่ามีแผ่นฉิ่งค้อออกไซด์วางเรียงอยู่จำนวน 4 ชั้น



รูปที่ 3.4 แผ่นฉิ่งค้อออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ B

ขนาดของแผ่นฉิ่งค้อออกไซด์ B



-ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $\varnothing$ ) = 32.45 mm.

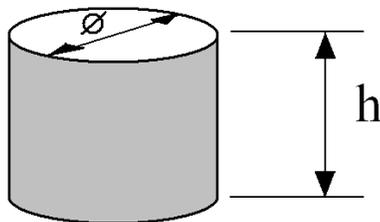
-ความสูงเท่ากับ (h) = 35.65 mm.

### 3.2.2.3 แผ่นซิงค์ออกไซด์ C (ผลิตภัณฑ์จาก บริษัท C)



รูปที่ 3.5 แผ่นซิงค์ออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ C

ขนาดของแผ่นซิงค์ออกไซด์ C



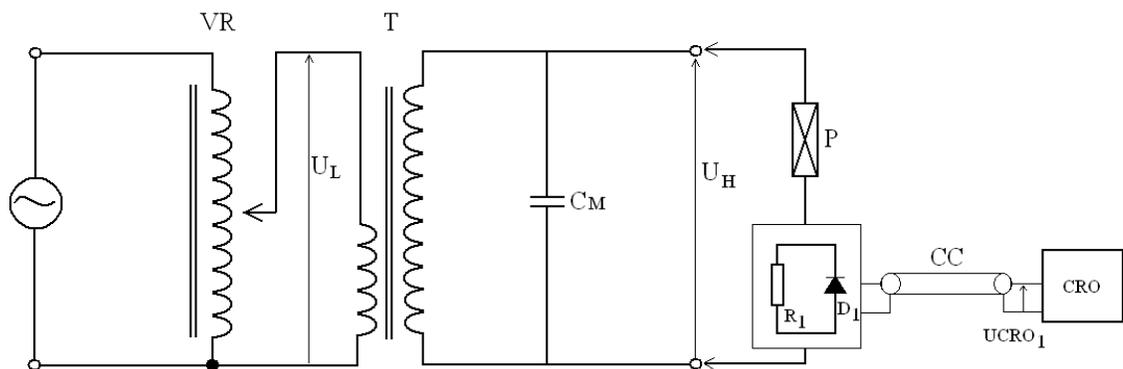
-ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $\varnothing$ ) = 31.1 mm.

-ความสูงเท่ากับ ( $h$ ) = 40.25 mm.

### 3.3 วงจรและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง

#### 3.3.1 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

การสร้างแรงดันสูงกระแสสลับความถี่พลังงานในห้องปฏิบัติการหรือห้องทดสอบ จะใช้ชุดเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง ที่ระดับแรงดันที่ปรับได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 kV เพื่อใช้ในการทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในระดับแรงดันไม่เกิน 9kV



รูปที่ 3.6 การต่อวงจรทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

UR คือ ตัวปรับควบคุมแรงดัน ( ที่ผู้ควบคุม AC HIGH VOLTAGE TESTER )

UL คือ แรงดันด้านแรงต่ำ

T คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง ( HIGH VOLTAGE TRANSFORMER )

UH คือ แรงดันด้านแรงสูง

CM คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ( HIGH VOLTAGE DIVIDER )

P คือ วัสดุทดสอบ

R1 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์

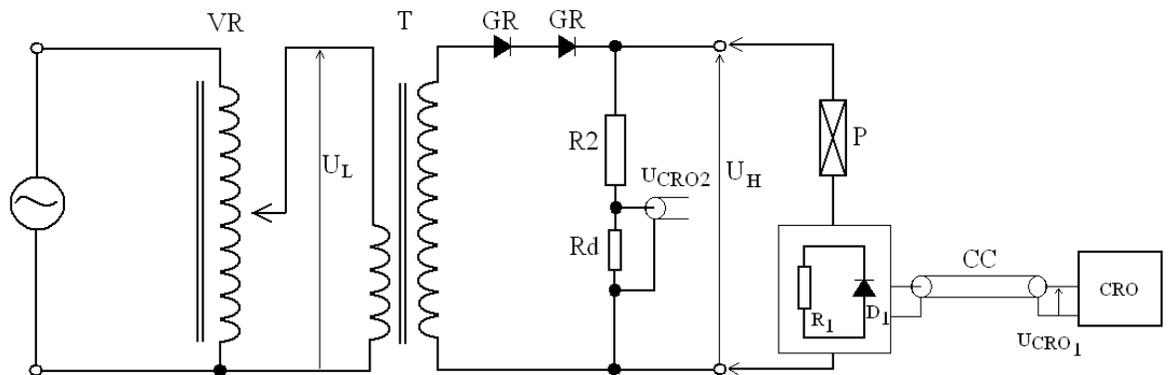
D1 คือ ไดโอดภาคแรงต่ำ

CC คือ เคเบิลวัด

UCRO1 คือ แรงดันแรงต่ำ

### 3.3.2 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงเพื่อสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ จะใช้วิธีแปลงจากแรงดันสูงกระแสสลับ ด้วยวงจรเรกติฟลายเออร์ที่มีไดโอดเป็นตัวเรียงกระแส จะเป็นแบบครึ่งคลื่น



รูปที่ 3.7 การต่อวงจรทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง

VR คือ ตัวปรับควบคุมแรงดัน ( ที่ผู้ควบคุม AC HIGH VOLTAGE TESTER )

UL คือ แรงดันด้านแรงต่ำ

T คือ หม้อแปลงทดสอบแรงสูง ( HIGH VOLTAGE TRANSFORMER )

UH คือ แรงดันด้านแรงสูง

CM คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ( HIGH VOLTAGE DIVIDER )

P คือ วัสดุทดสอบ

R1 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

D1 คือ ไดโอดแรงต่ำ 1 W.

R2 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง 280 mΩ

Rd คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ 15 kΩ

GR คือ ไดโอดแรงสูง 100 kV

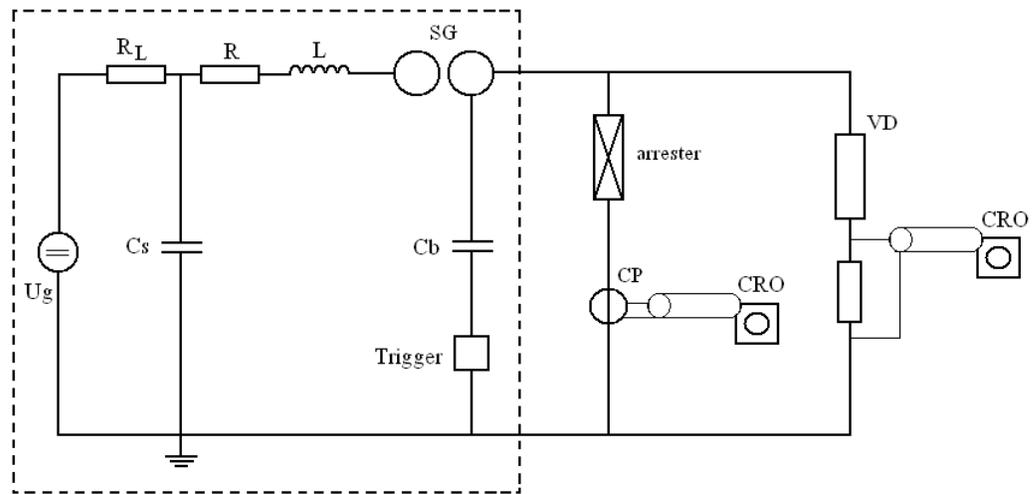
CC คือ เกเบิ้ลวัต

UCRo1 คือ แรงดันแรงต่ำ

UCRo2 คือ แรงดันแรงต่ำ

### 3.3.3 การทดสอบด้วยกระแสพัลส์

การสร้างกระแสพัลส์ จะอาศัยหลักการทรานเซียน คือ เก็บประจุหรือพลังงานไฟฟ้าด้วยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_s$  แล้วปล่อยให้ดีสชาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ก็จะเกิดการออกซิเลตแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำนั้น จะมีความต้านทานโดยธรรมชาติ และถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วย ก็จะทำให้เกิดการหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูป [1]



รูปที่ 3.8 การต่อวงจรทดสอบแผ่นชิ่งค้อกไซค์ด้วยเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์

ลำดับขั้นตอนการทดสอบแผ่นชิ่งค้อกไซค์

สำหรับลำดับขั้นตอนในการทดสอบแผ่นชิ่งค้อกไซค์ จะมีลักษณะการทดสอบเหมือนกัน โดยมีวิธีปฏิบัติดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมแผ่นชิ่งค้อกไซค์ จาก บริษัทฯ A , B และ C
- 2) ต่อวงจรตามรูปวงจร 3.1 แรงดันสูงกระแสสลับ โดยใช้อุปกรณ์ที่กำหนดให้
- 3) บันทึกสภาวะบรรยากาศของห้องทดลอง ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
- 4) ป้อนแรงดันให้กับชุดทดสอบแผ่นชิ่งค้อกไซค์ ของบริษัทฯ A ให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่ระบุ

ประกอบมากับ Work Sheet หรือ Data Sheet แต่ละผลิตภัณฑ์ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง พร้อมบันทึกข้อมูล กระแส , แรงดัน , และค่ามาตรฐานอื่นๆ ( ซึ่งอาจมีบางผลิตภัณฑ์เกิดการเบรกดาวน์ หรือทนแรงดันสูงตามมาตรฐานกำหนดไม่ได้ ) และทำการทดสอบซ้ำแบบเดิม จำนวน 5 ครั้ง

5) ทำการทดสอบโดยใช้วงจรเดิม โดยเปลี่ยนแผ่นซิงค์ออกไซด์ เป็นของบริษัทฯ B และ C

ตามลำดับ

6) เปลี่ยนวงจรการทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ ดังนี้

6.1) ต่อวงจรตามรูปที่ 3.2 วงจรทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันบวกและ แรงดันลบ

6.2) ทำการทดสอบตามข้อ 3 และ 4 และ 5

6.3 ) ต่อวงจรตามรูป 3.3 วงจรทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ด้วยกระแสอิมพัลส์

6.4 ) ทำการทดสอบตามข้อ 3 , 4 และ 5

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า

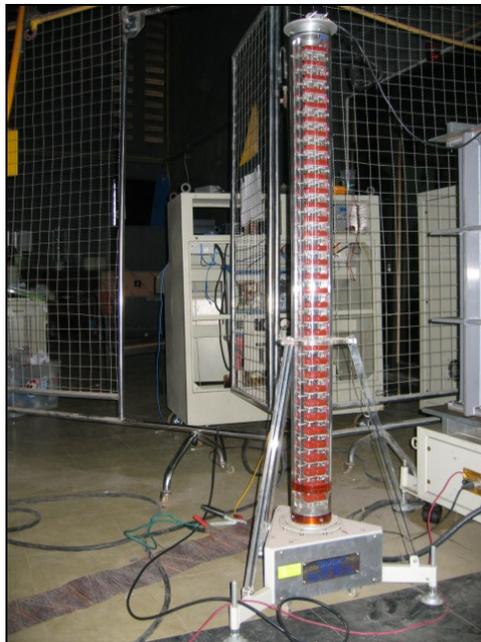
ตู้ Control AC HIGH VOLTAGE TESTER สามารถเลือกกระดับแรงดันการจ่ายที่ 0-30 kV และ 150 kV



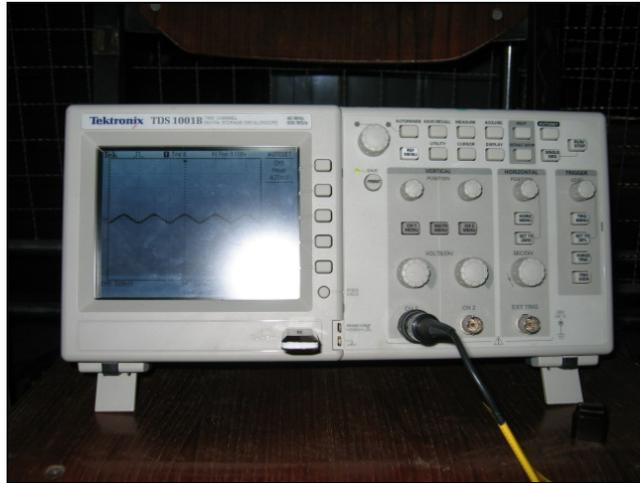
รูปที่ 3.9 AC HIGH VOLTAGE TESTER SYSTEM 3 CO.,LTD



รูปที่ 3.10 HIGH VOLTAGE TRANSFORMER SYSTEM 3 CO., LTD



รูปที่ 3.11 HIGH VOLTAGE DIVIDER SYSTEM 3 CO., LTD

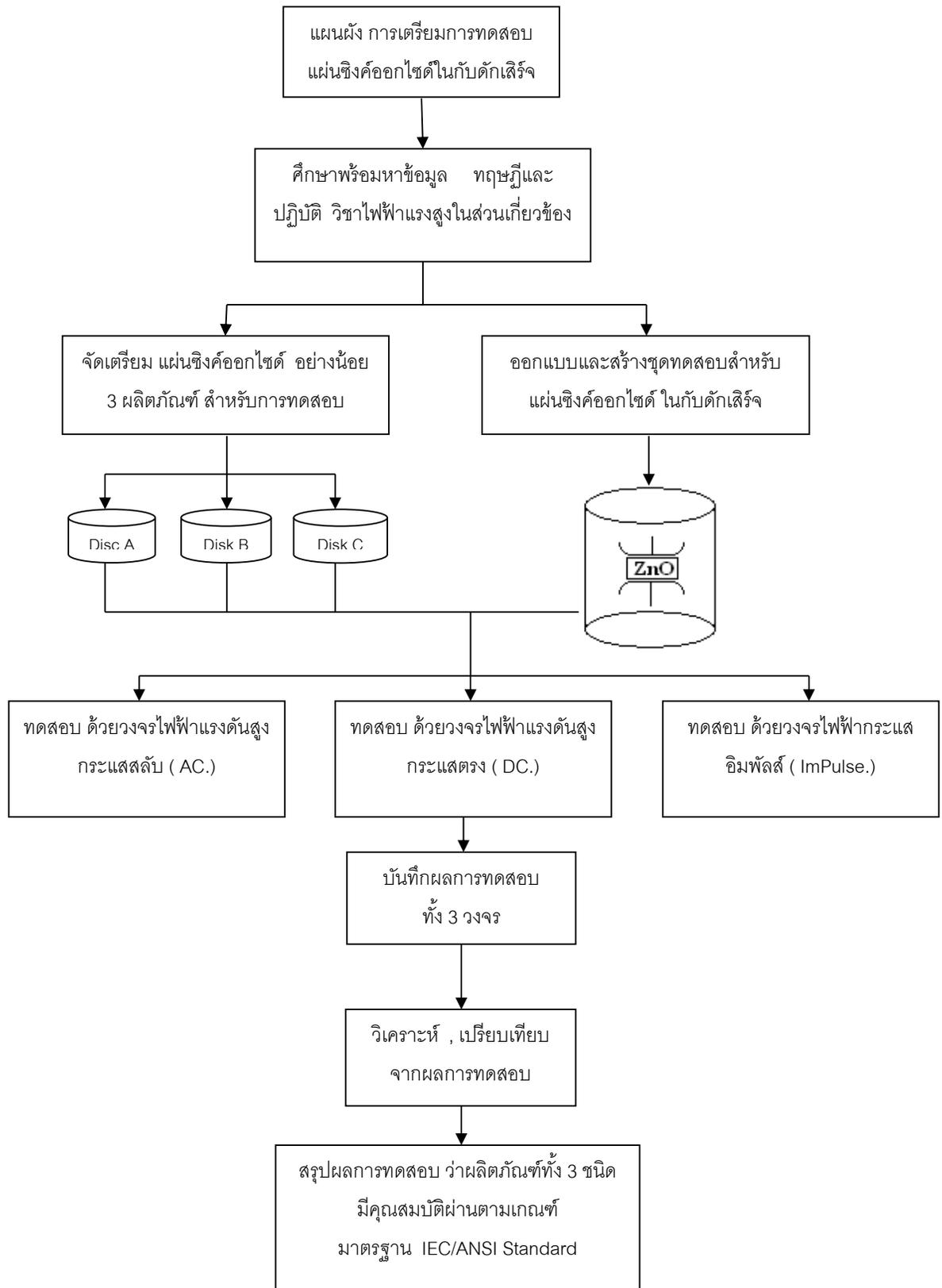


รูปที่ 3.12 Oscilloscope Tektronix TDS 1001B



รูปที่ 3.13 กล่องความต้านทานภาคแรงต่ำ ของโวลต์เดจิติไวเดอร์

### 3.5 แผนผังงาน การทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ในกับดักเล็ร็จ



## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการนำ Arrester ทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ มาทำการผ่าเพื่อนำแผ่นซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ภายใน มาทำการทดสอบ ซึ่งพบว่าแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีจำนวนและขนาดไม่เท่ากัน และได้มีการวัดรายละเอียดแผ่นซิงค์ออกไซด์ จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับตารางมาตรฐาน IEC และ ANIS ( IEEE ) พบว่า แต่ละผลิตภัณฑ์ มีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าว จึงได้ทำการปรับเทียบหาค่า Suggested Rating (Ur) และ Suggested MCOV ( Uc ) จาก Nameplate ของArrester ขึ้นนั้น ซึ่งสามารถสรุปผลและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน ได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (A) ด้วยแรงดันกระแสสลับ

##### 4.1.1 การทดสอบพร้อมกราฟแสดงผลการทดสอบ

ในการทดสอบ ได้ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าแรงดันพิกัดของแต่ละชั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยเฉลี่ยค่าแรงดันขึ้น คือ แรงดันพิกัดของ Arrester (ตามNameplate)หารด้วยจำนวนชั้นวัสดุ ซึ่งได้จากการคำนวณ ซึ่งจากการคำนวณ หาค่า Uc และ Ur ของวัสดุแต่ละชั้น จะได้เท่ากับ

$$U_c = \frac{17kV}{5} = 3.4kV$$

$$U_r = \frac{21kV}{5} = 4.2kV$$

เนื่องจากผู้ผลิต

หมายเหตุ : ค่า TOV จะมีค่าเท่ากับ  $U_r > U_c$  ประมาณ 19.05 %

ซึ่งจากการคำนวณ จะได้

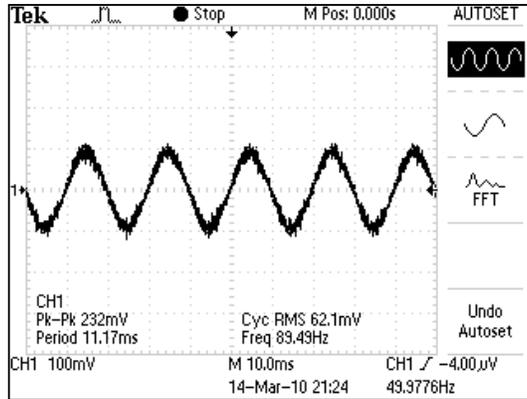
$$\frac{21kV - 17kV}{21kV} = 19.05\%$$

ซึ่งตามมาตรฐาน IEC พิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ  $U_n$  ( Rating of surge arrester ) ปกติ จะให้

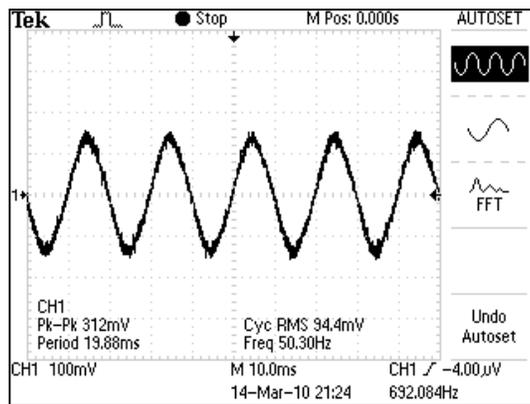
$U_r > U_c$  ประมาณ 15-30 % [1]

จึงกำหนดค่า แรงดันที่จะทำการทดสอบต่อจากนี้ คือ 0.5 kV , 1.0 kV , 1.5 kV , 2.0 kV , 2.5 kV 3.0 kV , 3.4 kV( Uc ) , 3.5 kV , 4.0 kV , 4.2 kV( Ur) เมื่อกำหนดค่าแรงดันสำหรับการทำสอบแล้ว จึงได้เริ่มต่อวงจรพร้อมจ่ายแรงดันการทดสอบวัสดุ ทำให้ได้ผลดังนี้

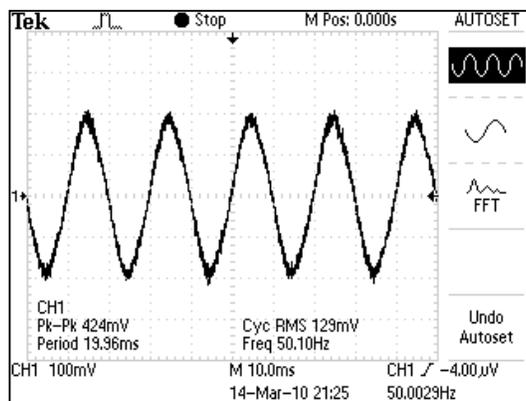
ตัวอย่าง การทดสอบผลิตภัณฑ์ ยี่ห้อ ( A ) ชั้นที่ 1 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( AC Test )  
 (หมายเหตุ : สำหรับชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 5 จะมีลักษณะของกราฟคล้ายกัน)



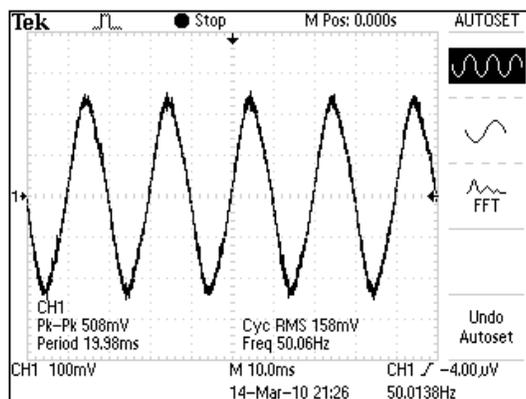
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 0.5 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 89.49 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.062 mA



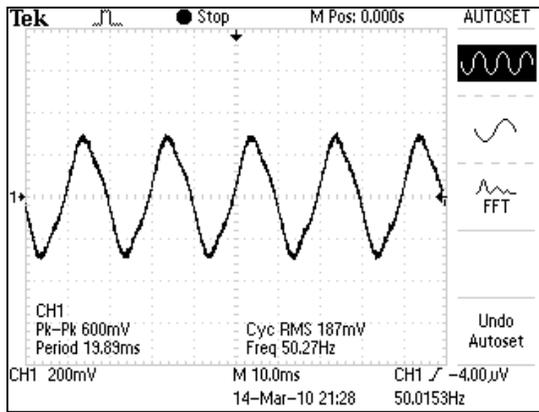
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.0 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 94.4 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.094 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.5 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 129 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.129 mA



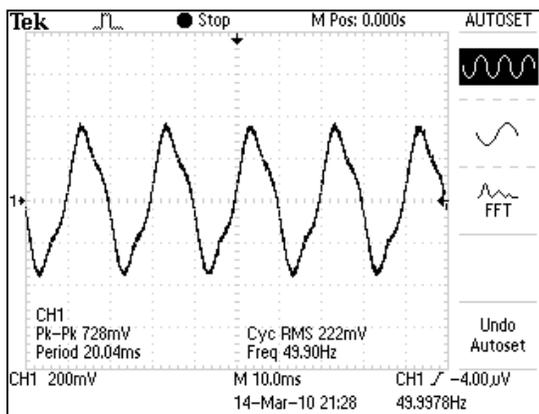
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 158 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.158 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 187 mV

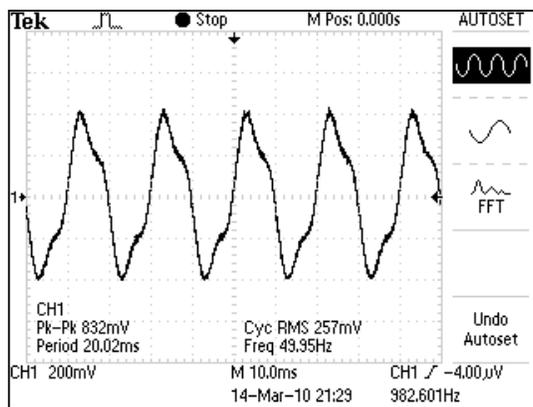
กระแสจากการคำนวณ = 0.187 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 222 mV

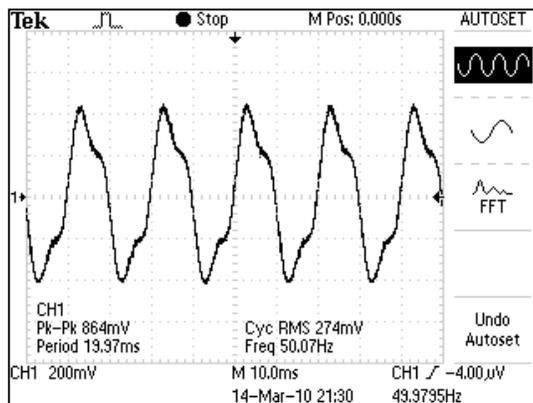
กระแสจากการคำนวณ = 0.222 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) MCOV = 3.4 kV

แรงดันที่วัดได้ = 257 mV

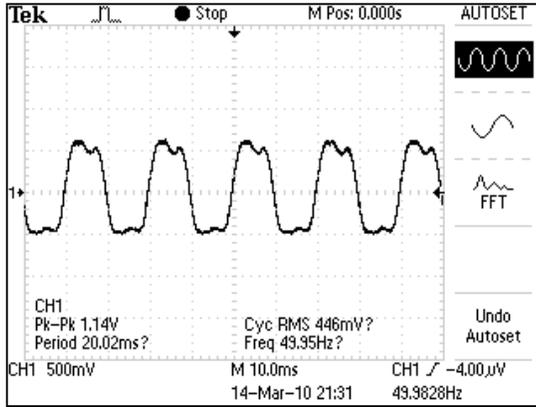
กระแสจากการคำนวณ = 0.257 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 274 mV

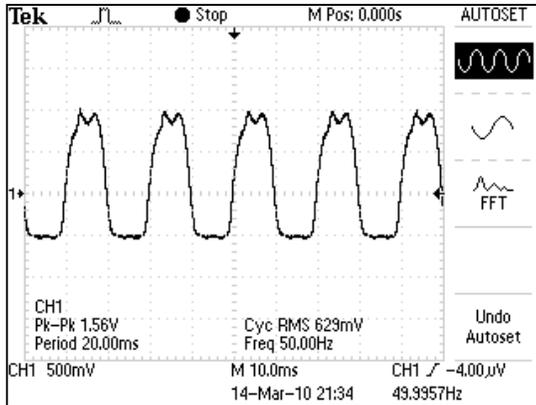
กระแสจากการคำนวณ = 0.274 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 446 mV

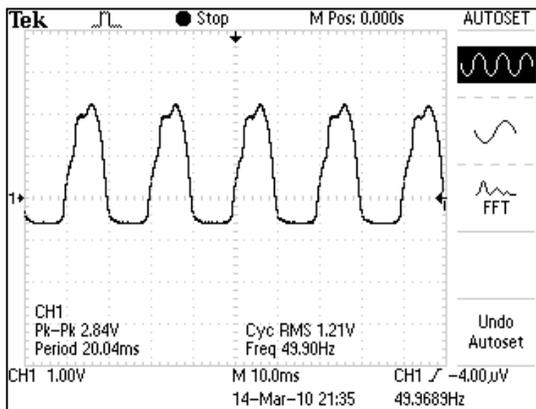
กระแสจากการคำนวณ = 0.446 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC )  $U_r = 4.2$  kV

แรงดันที่วัดได้ = 629 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.629 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.4 kV

แรงดันที่วัดได้ = 1.21 V

กระแสจากการคำนวณ = 1.21mA

จากการคำนวณแรงดันสูงสุดสำหรับการทดสอบ จะได้ถึงแรงดันค่า  $U_r$  คือ 4.2 kV และมีกระแสไหลไม่เกิน 1 mA ได้ตรงตามคุณสมบัติของ Arrester แต่ในการทดสอบ ได้ทำการเพิ่มระดับแรงดันไปจนถึงจุดที่เริ่มนำกระแส และสำหรับผลิตภัณฑ์ A มีจุด Break down ที่ 4.4 kV

#### 4.1.3 การคำนวณหาค่ากระแส I (mA) พร้อมบันทึกผลการทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมา จะได้ค่าของแรงดันที่ ตกคล่อมความต้านทาน  $1\text{ k}\Omega$  เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่ากระแส โดยใช้สูตรการคำนวณหากระแส

$$I_{rms}(A) = \frac{V_{rms}(v)}{R(\Omega)}$$

โดยที่  $V_{rms}$  คือ ค่าแรงดันที่วัดได้ อ่านจากออสซิลอโคป

$I_{rms}$  คือ ค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

R คือ ค่าความต้านทาน มีค่าเท่ากับ  $1\text{ k}\Omega$

ตารางบันทึกผลงานวิจัย

การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ( AC Test )

พร้อมค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

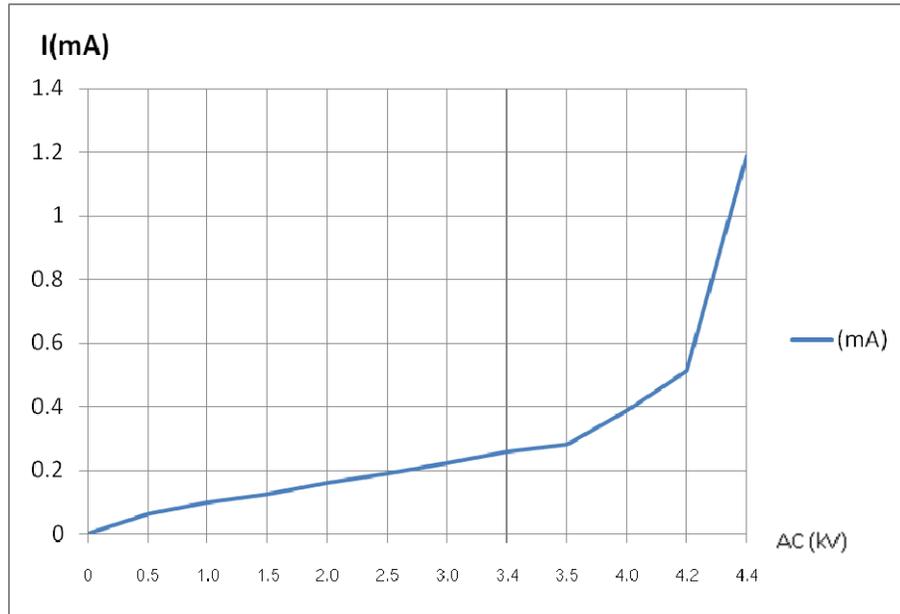
ความชื้นสัมพัทธ์ 44 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg

อุณหภูมิ 30 C°

ตารางที่ 4.1 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ( แผ่นซิงค์ออกไซด์ A ) วัสดุจำนวน 5 ชั้น

ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับ ZnO AC (kV)	ค่ากระแสที่วัดได้ (mA)					ค่าเฉลี่ย (mA)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.062	0.075	0.064	0.051	0.054	0.0612
1.0	0.094	0.104	0.104	0.092	0.094	0.0976
1.5	0.129	0.128	0.127	0.117	0.121	0.1244
2.0	0.158	0.162	0.161	0.154	0.159	0.1588
2.5	0.187	0.193	0.189	0.181	0.195	0.189
3.0	0.222	0.222	0.221	0.218	0.231	0.2228
3.4	0.257	0.254	0.251	0.247	0.269	0.2556
3.5	0.274	0.284	0.273	0.258	0.303	0.2784
4.0	0.446	0.371	0.340	0.355	0.418	0.386
4.2	0.629	0.539	0.425	0.433	0.522	0.5096
4.4	1.210	1.200	1.180	1.190	1.160	1.188



รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

#### 4.2 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (B) ด้วยแรงดันกระแสสลับ

##### 4.2.1 การทดสอบพร้อมกราฟแสดงผลการทดสอบ

ในการทดสอบ ได้ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ ตั้งแต่ 0 kV ไปจนถึงค่า แรงดันพิกัดของแต่ละชั้นวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยเฉลี่ยค่าแรงดันขึ้น คือ แรงดันพิกัดของ Arrester (ตามNameplate)หารด้วย จำนวนชั้นวัสดุ ซึ่งได้จากการคำนวณ ซึ่งจากการคำนวณ หาค่า  $U_c$  และ  $U_r$  ของวัสดุแต่ละชั้นจะได้เท่ากับ

$$U_c = \frac{17kV}{4} = 4.25kV$$

$$U_r = \frac{21kV}{4} = 5.25kV$$

หมายเหตุ : ค่า TOV จะมีค่าเท่ากับ  $U_r > U_c$  ประมาณ 19.05 %

ซึ่งจากการคำนวณ จะได้

$$\frac{21kV - 17kV}{21kV} = 19.05\%$$

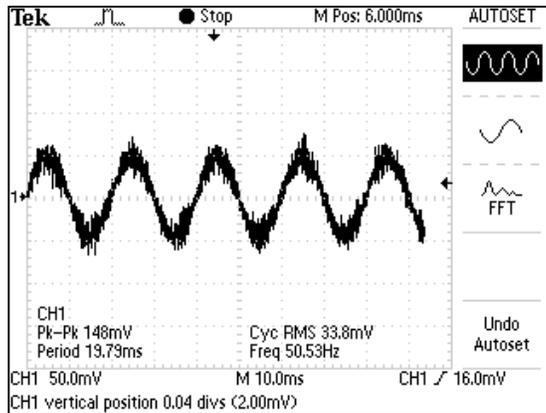
ซึ่งตามมาตรฐาน IEC พิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ  $U_n$  ( Rating of surge arrester ) ปกติ จะให้

$U_r > U_c$  ประมาณ 15-30 % [1]

จึงกำหนดค่า แรงดันที่จะทำการทดสอบต่อจากนี้ คือ 0.5 kV , 1.0 kV , 1.5 kV , 2.0 kV , 2.5 kV 3.0 kV , 3.5 kV , 4.0 kV , 4.25 kV ( $U_c$ ) , 4.5 kV , 5.0 kV , 5.25 kV ( $U_r$ ) แสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

ตัวอย่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ยี่ห้อ ( B ) ชั้นที่ 1 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( AC Test )

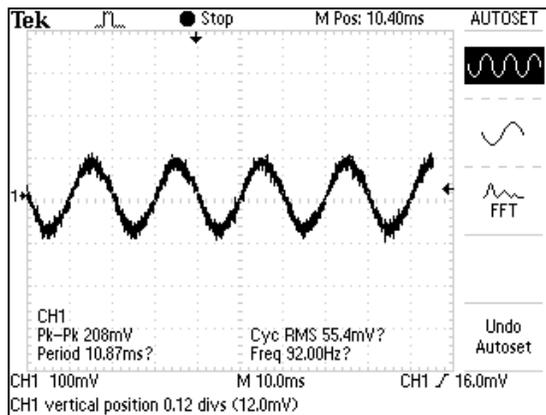
(หมายเหตุ : สำหรับชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 4 จะมีลักษณะของกราฟคล้ายกัน)



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 0.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 33.8 mV

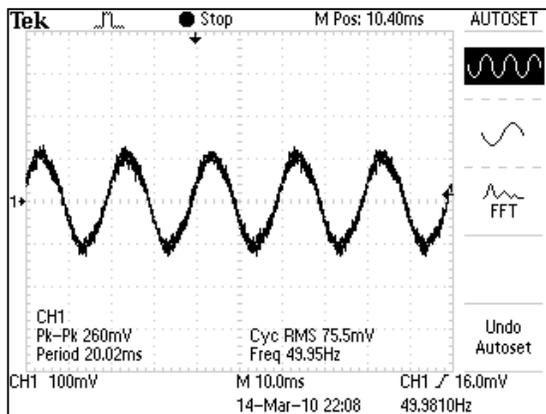
กระแสจากการคำนวณ = 0.034 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 55.4 mV

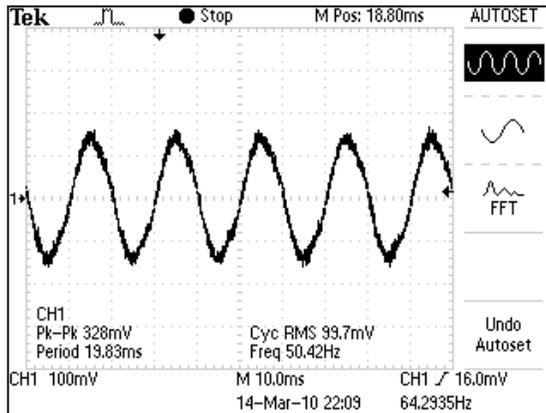
กระแสจากการคำนวณ = 0.055 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 75.5 mV

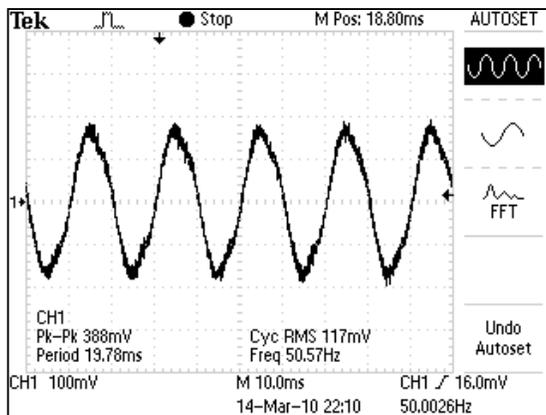
กระแสจากการคำนวณ = 0.076 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 99.7 mV

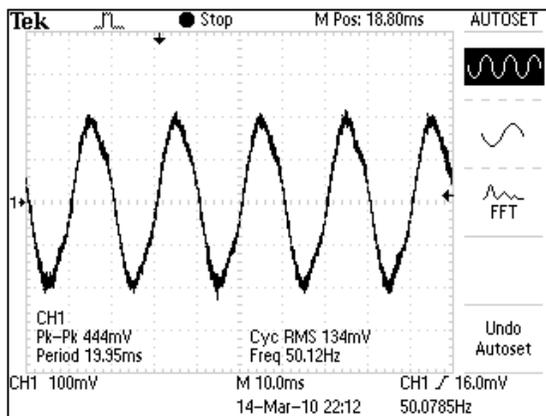
กระแสจากการคำนวณ = 0.099 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 117 mV

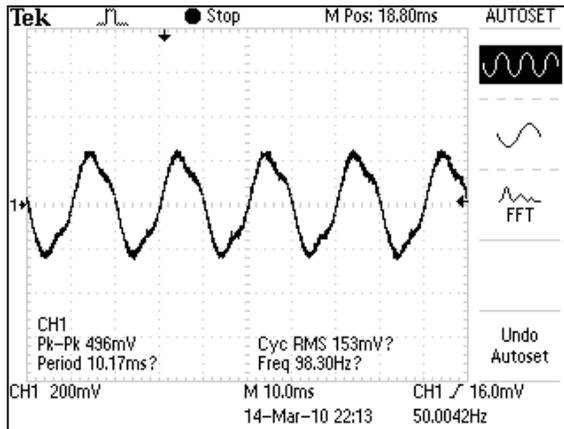
กระแสจากการคำนวณ = 0.117 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 134 mV

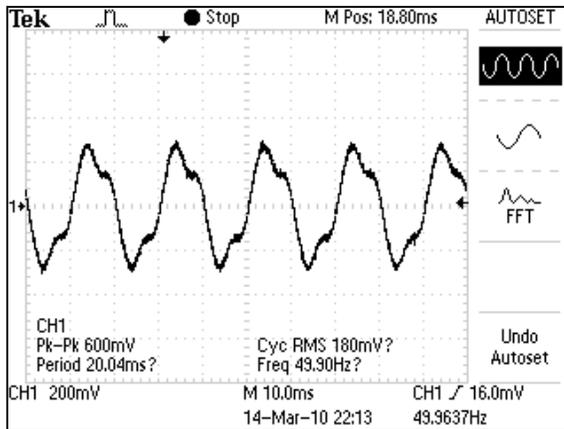
กระแสจากการคำนวณ = 0.134 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 153 mV

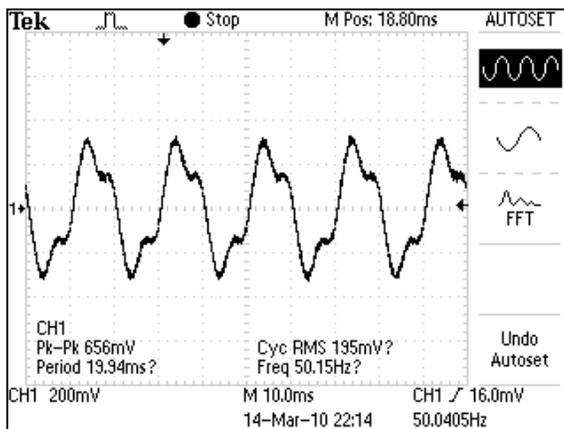
กระแสจากการคำนวณ = 0.153 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 180 mV

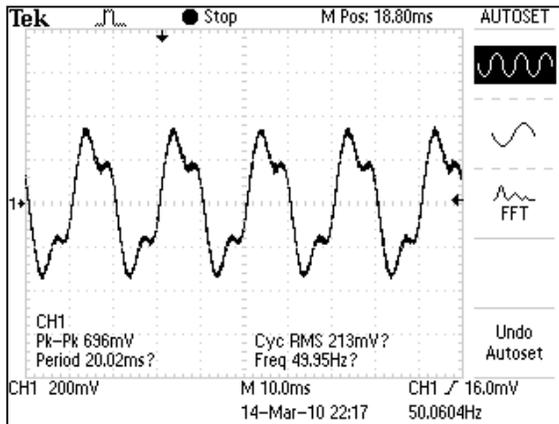
กระแสจากการคำนวณ = 0.018 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.25 kV(Uc)

แรงดันที่วัดได้ = 195 mV

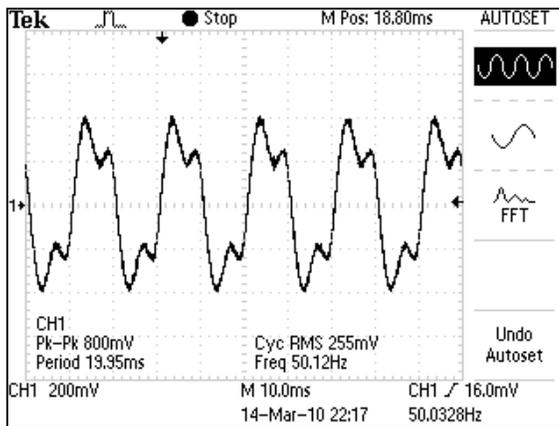
กระแสจากการคำนวณ = 0.195 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.5 kV(Uc)

แรงดันที่วัดได้ = 213 mV

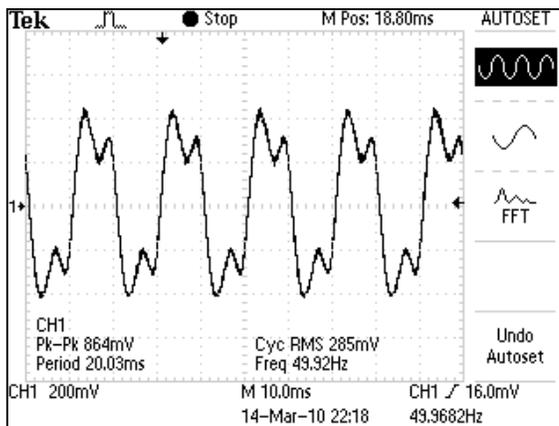
กระแสจากการคำนวณ = 0.213 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 5.0 kV(Uc)

แรงดันที่วัดได้ = 255 mV

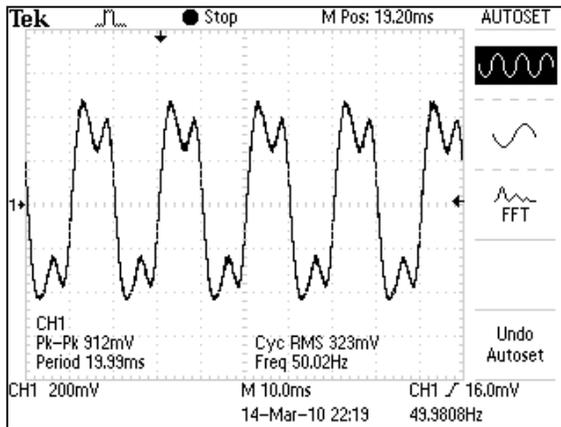
กระแสจากการคำนวณ = 0.255 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 5.25 kV(Ur)

แรงดันที่วัดได้ = 285 mV

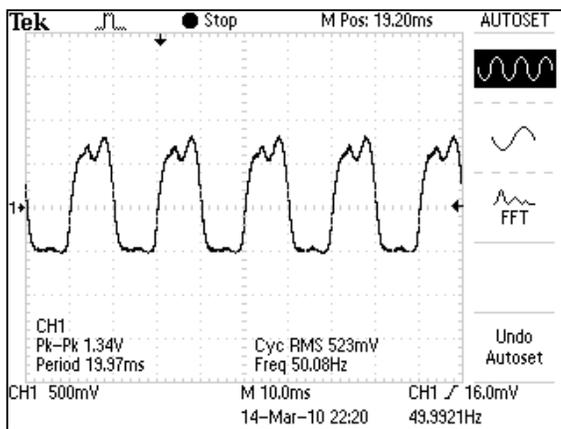
กระแสจากการคำนวณ = 0.285 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 5.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 323 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.323 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 6.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 523 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.523 mA

จากการคำนวณแรงดันสูงสุดสำหรับการทดสอบ จะได้ถึงแรงดันค่า  $U_r$  คือ 4.25 kV และมีกระแสไหลไม่เกิน 1 mA ได้ตรงตามคุณสมบัติของ Arrester แต่ในการทดสอบ ได้ทำการเพิ่มระดับแรงดันไปจนถึงจุดที่เริ่มนำกระแส และสำหรับผลิตภัณฑ์ B มีจุด Break down ที่ 6.5 kV จำนวนกระแสได้ 1.15 mA

#### 4.2.2 การคำนวณหาค่ากระแส I (mA) พร้อมบันทึกผลการทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมา จะได้ค่าของแรงดันที่ ตกคล่อมความต้านทาน 1 k $\Omega$  เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่ากระแส โดยใช้สูตรการคำนวณหากระแส

$$I_{rms}(A) = \frac{V_{rms}(v)}{R(\Omega)}$$

โดยที่  $V_{rms}$  คือ ค่าแรงดันที่วัดได้ อ่านจากออสซิลโลสโคป

$I_{rms}$  คือ ค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

R คือ ค่าความต้านทาน มีค่าเท่ากับ 1 k $\Omega$

ตารางบันทึกผล

การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับ (AC Test)

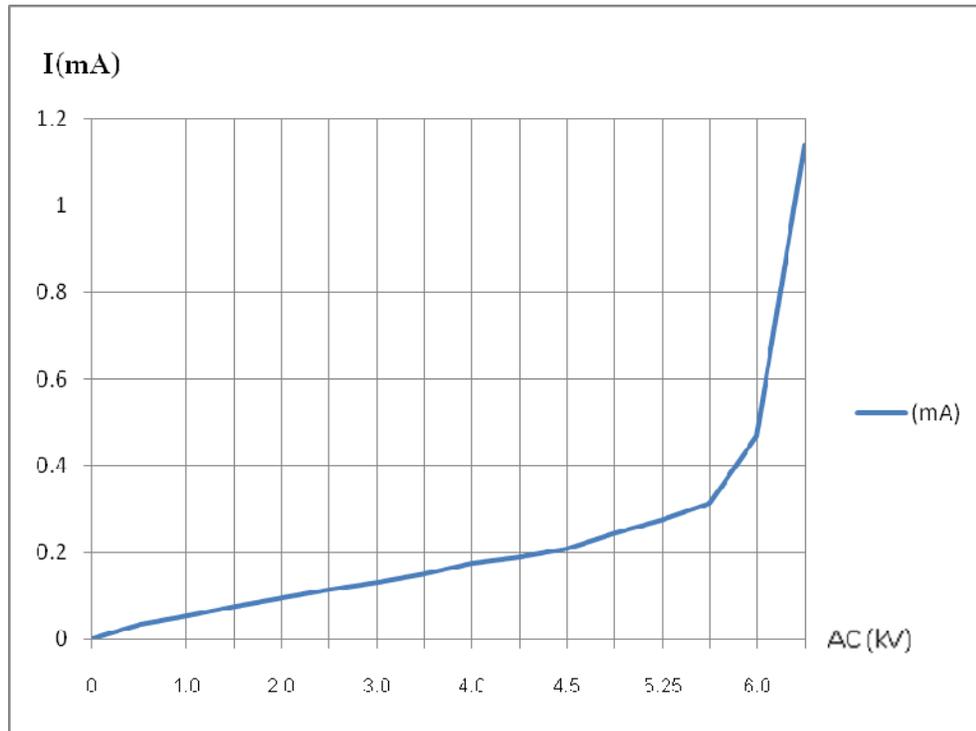
ความชื้นสัมพัทธ์ 44 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg

อุณหภูมิ 30 C°

ตารางที่ 4.2 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับ (แผ่นซิงค์ออกไซด์ B ) มีจำนวน 4 ชั้น

ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับ ZnO AC (kV)	ค่ากระแสที่วัดได้ (mA)				ค่าเฉลี่ย (mA)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
0	0	0	0	0	0
0.5	0.034	0.032	0.031	0.032	0.03225
1.0	0.055	0.054	0.054	0.052	0.05375
1.5	0.076	0.075	0.073	0.074	0.0745
2.0	0.099	0.092	0.092	0.091	0.0935
2.5	0.117	0.112	0.113	0.110	0.113
3.0	0.134	0.126	0.133	0.129	0.1305
3.5	0.153	0.150	0.147	0.152	0.1505
4.0	0.180	0.180	0.171	0.169	0.175
4.25	0.195	0.189	0.184	0.187	0.18875
4.5	0.213	0.209	0.204	0.205	0.20775
5.0	0.255	0.244	0.234	0.245	0.2445
5.25	0.285	0.286	0.258	0.264	0.27325
5.5	0.323	0.325	0.286	0.315	0.31225
6.0	0.523	0.478	0.444	0.425	0.4675
6.5	1.150	1.210	1.110	1.090	1.14



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

### 4.3 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (C) ด้วยแรงดันกระแสสลับ

#### 4.3.1 การทดสอบพร้อมกราฟแสดงผลการทดสอบ

ในการทดสอบ ได้ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ ตั้งแต่ 0 kV ไปจนถึงค่า แรงดันพิกัดของแต่ละชั้นวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยเฉลี่ยค่าแรงดันขึ้น คือ แรงดันพิกัดของ Arrester (ตามNameplate)หารด้วย จำนวนชั้นวัสดุ ซึ่งได้จากการคำนวณ ซึ่งจากการคำนวณ หาค่า  $U_c$  และ  $U_r$  ของวัสดุแต่ละชั้นจะได้เท่ากับ

$$U_c = \frac{17kV}{4} = 4.25kV$$

$$U_r = \frac{21kV}{4} = 5.25kV$$

หมายเหตุ : ค่า TOV จะมีค่าเท่ากับ  $U_r > U_c$  ประมาณ 19.05 %

ซึ่งจากการคำนวณ จะได้

$$\frac{21kV - 17kV}{21kV} = 19.05\%$$

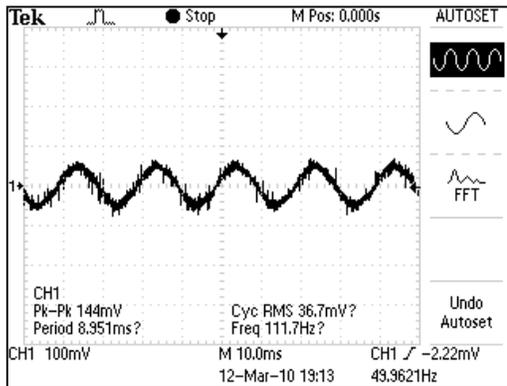
ซึ่งตามมาตรฐาน IEC พิกัดแรงดันของกัปกักเสิร์จ  $U_n$  ( Rating of surge arrester ) ปกติ จะให้

$$U_r > U_c \text{ ประมาณ } 15-30 \% [1]$$

จึงกำหนดค่า แรงดันที่จะทำการทดสอบต่อจากนี้ คือ 0.5 kV , 1.0 kV , 1.5 kV , 2.0 kV , 2.5 kV 3.0 kV , 3.5 kV , 4.0 kV , 4.25 kV ( $U_c$ ) , 4.5 kV , 5.0 kV , 5.25 kV ( $U_r$ ) แสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

ตัวอย่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ ยี่ห้อ ( C ) ชั้นที่ 1 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( AC Test )

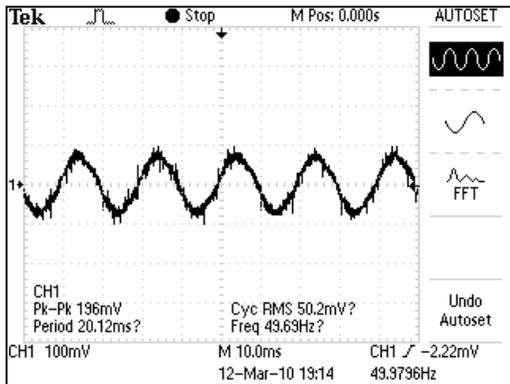
(หมายเหตุ : สำหรับชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 4 จะมีลักษณะของกราฟคล้ายกัน)



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 0.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 323 mV

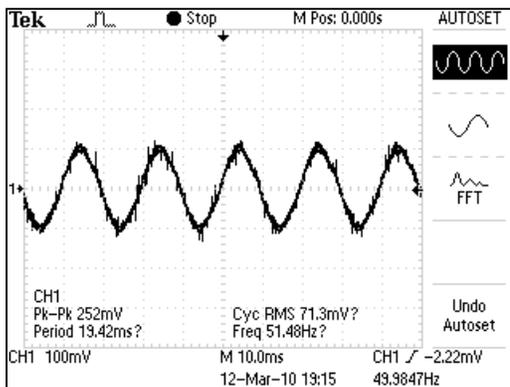
กระแสจากการคำนวณ = 0.323 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 50.2 mV

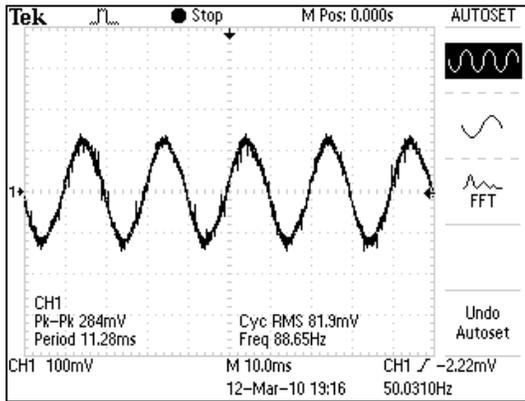
กระแสจากการคำนวณ = 0.050 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 71.3 mV

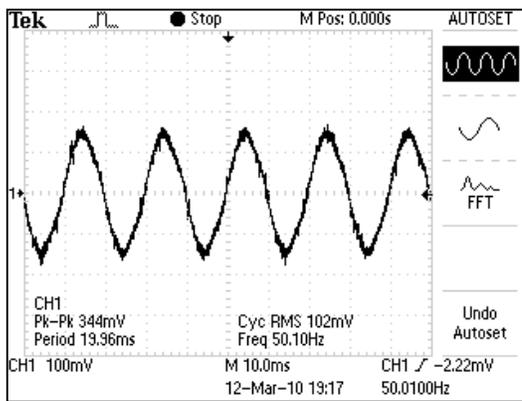
กระแสจากการคำนวณ = 0.071 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 81.9 mV

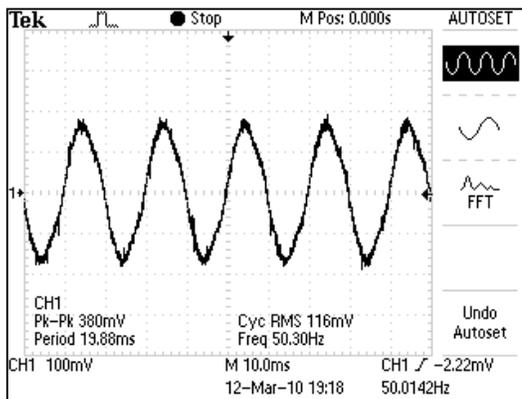
กระแสจากการคำนวณ = 0.082 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 102 mV

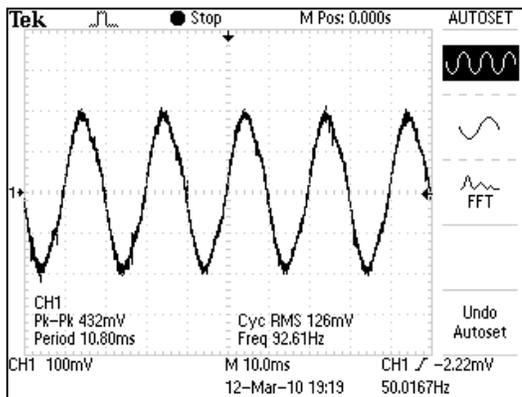
กระแสจากการคำนวณ = 0.102 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 116 mV

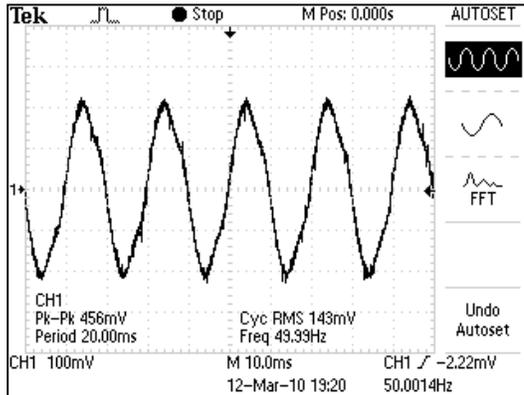
กระแสจากการคำนวณ = 0.116 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 126 mV

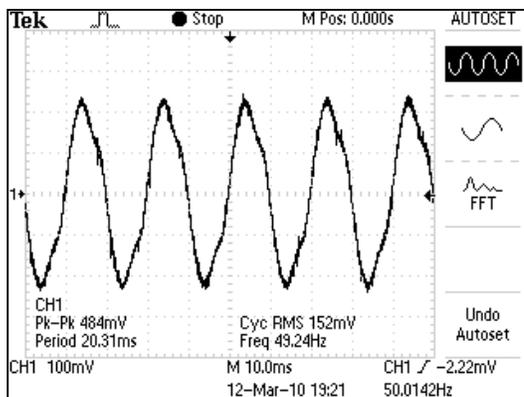
กระแสจากการคำนวณ = 0.126 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 143 mV

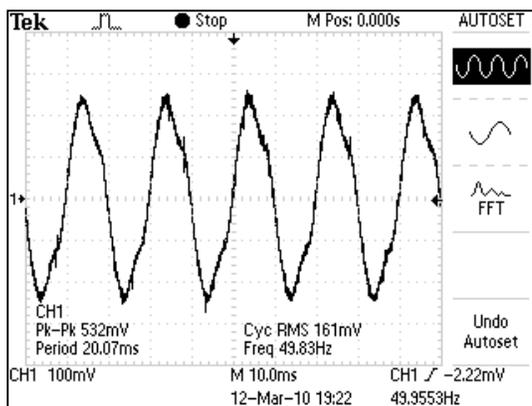
กระแสจากการคำนวณ = 0.143 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC )  $U_c = 4.25$  kV

แรงดันที่วัดได้ = 152 mV

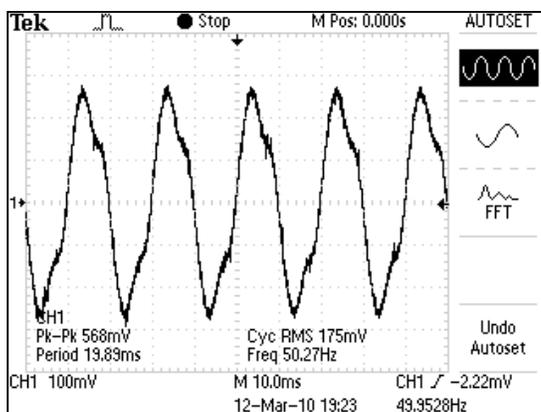
กระแสจากการคำนวณ = 0.152 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 161 mV

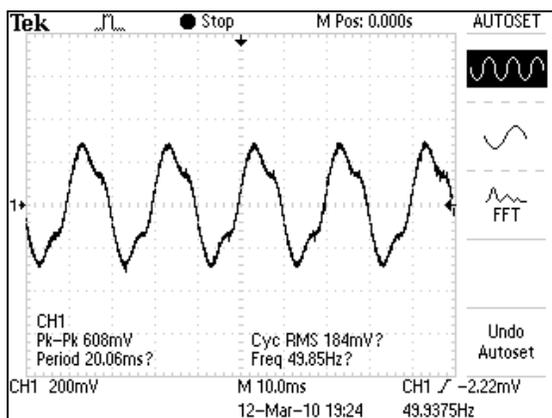
กระแสจากการคำนวณ = 0.161 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 5.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 175 mV

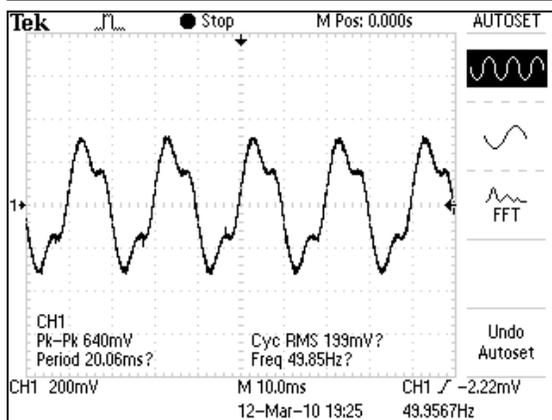
กระแสจากการคำนวณ = 0.175 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC )  $U_r = 5.25 \text{ kV}$

แรงดันที่วัดได้ = 175 mV

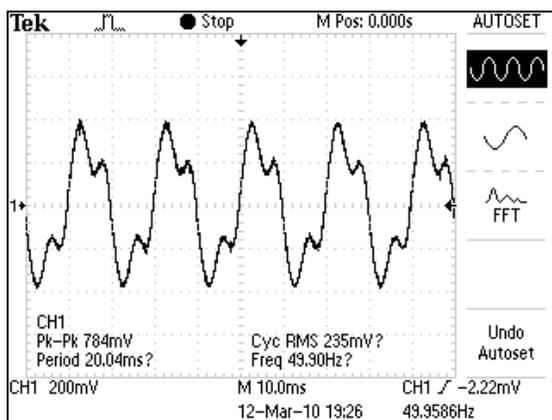
กระแสจากการคำนวณ = 0.175 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 5.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 199 mV

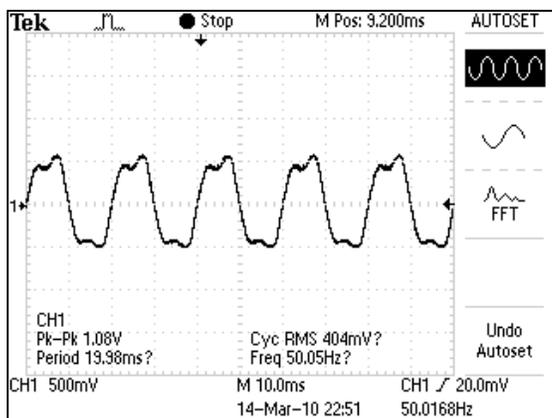
กระแสจากการคำนวณ = 0.199 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 6.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 235 mV

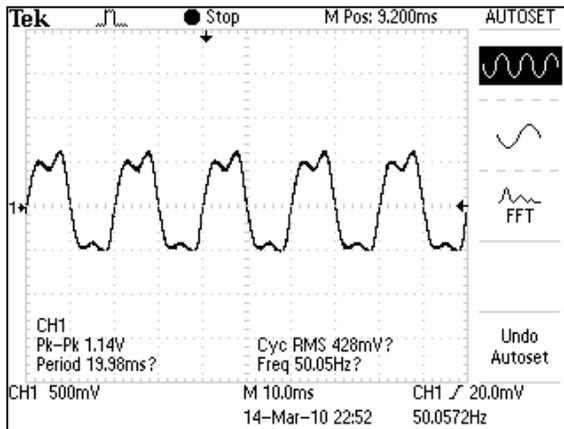
กระแสจากการคำนวณ = 0.235 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 6.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 404 mV

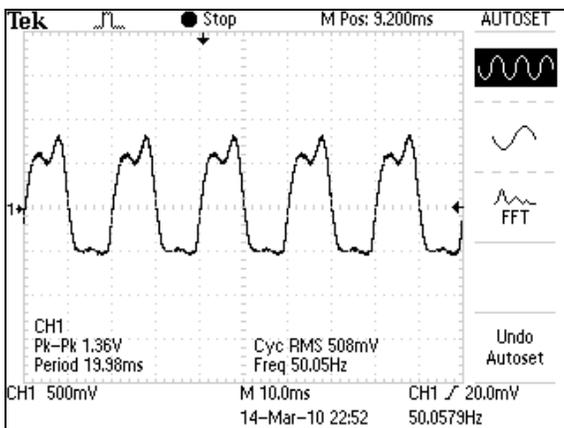
กระแสจากการคำนวณ = 0.404 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 7.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 428 mV

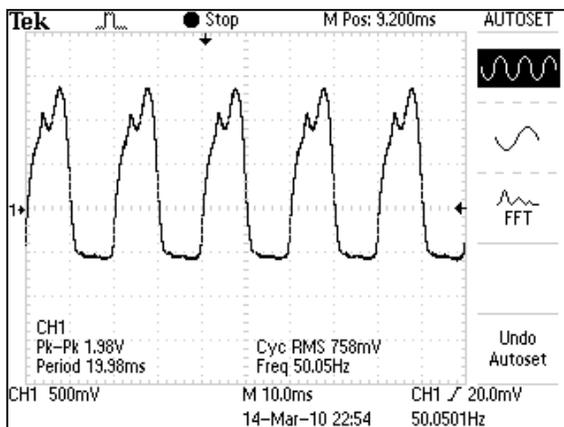
กระแสจากการคำนวณ = 0.428 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 7.5 kV

แรงดันที่วัดได้ = 508 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.508 mA



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 8.0 kV

แรงดันที่วัดได้ = 758 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.758 mA

ตารางบันทึกผล

จากการคำนวณแรงดันสูงสุดสำหรับการทดสอบ จะได้ถึงแรงดันค่า  $U_r$  คือ 4.25 kV และมีกระแสไหลไม่  
เกิน 1 mA ได้ตรงตามคุณสมบัติของ Arrester แต่ในการทดสอบ ได้ทำการเพิ่มระดับแรงดันไปจนถึงจุดที่  
เริ่มนำกระแส และสำหรับผลิตภัณฑ์ C มีจุด Break down ที่ 8.3 kV จำนวนกระแสได้ 1.13 mA

#### 4.3.2 การคำนวณหาค่ากระแส I (mA) พร้อมบันทึกผลการทดสอบ

จากการทดสอบที่ผ่านมา จะได้ค่าของแรงดันที่ ตกต่อมความต้านทาน 1 k $\Omega$  เพื่อที่จะนำมา  
คำนวณหาค่ากระแส โดยใช้สูตรการคำนวณหากระแส

$$I_{rms}(A) = \frac{V_{rms}(V)}{R(\Omega)}$$

โดยที่  $V_{rms}$  คือ ค่าแรงดันที่วัดได้ อ่านจากออสซิลอโคป

$I_{rms}$  คือ ค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

R คือ ค่าความต้านทาน มีค่าเท่ากับ 1 k $\Omega$

การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ ( AC Test )

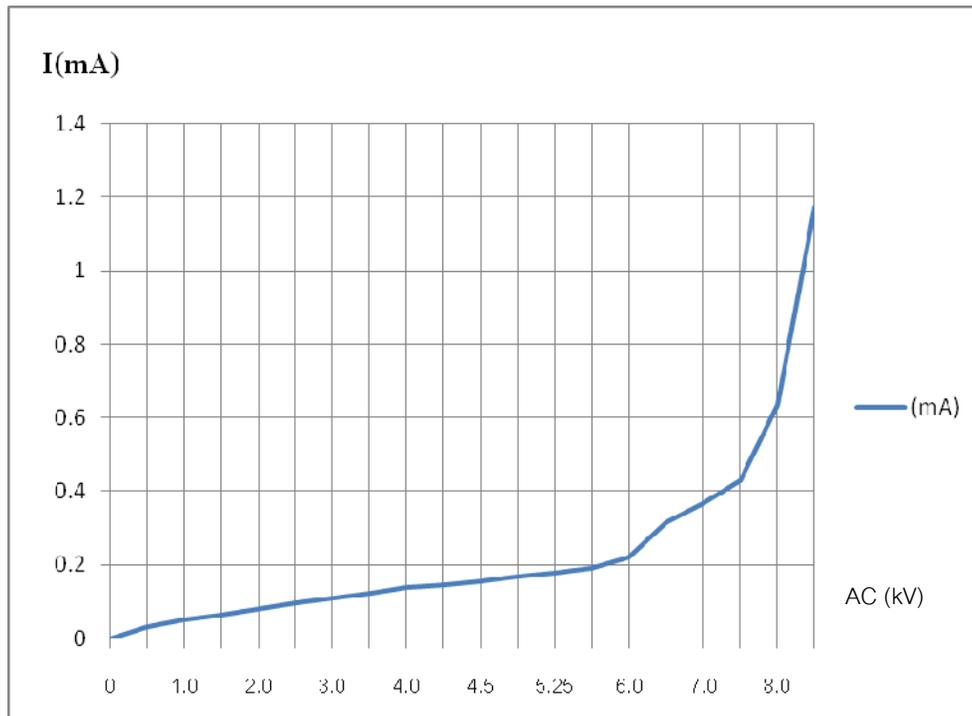
ความชื้นสัมพัทธ์ 44 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg

อุณหภูมิ 30 C°

ตารางที่ 4.3 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ (แผ่นซิงค์ออกไซด์ C ) มีจำนวน 4 ชั้น

ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับ ZnO AC (kV)	ค่ากระแสที่วัดได้ (mA)				ค่าเฉลี่ย (mA)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	
0	0	0	0	0	0
0.5	0.034	0.038	0.031	0.030	0.033
1.0	0.050	0.056	0.051	0.047	0.051
1.5	0.071	0.068	0.062	0.064	0.066
2.0	0.082	0.086	0.084	0.077	0.082
2.5	0.102	0.102	0.095	0.093	0.098
3.0	0.116	0.115	0.109	0.108	0.112
3.5	0.126	0.129	0.125	0.120	0.125
4.0	0.143	0.143	0.140	0.135	0.140
4.25	0.152	0.148	0.145	0.144	0.147
4.5	0.161	0.157	0.155	0.154	0.157
5.0	0.175	0.169	0.170	0.166	0.170
5.25	0.184	0.181	0.175	0.177	0.179
5.5	0.199	0.194	0.185	0.190	0.192
6.0	0.235	0.228	0.213	0.212	0.222
6.5	0.404	0.287	0.280	0.290	0.315
7.0	0.482	0.330	0.321	0.333	0.367
7.5	0.508	0.414	0.407	0.395	0.431
8.0	0.758	0.648	0.596	0.543	0.636
8.3	1.130	1.260	1.190	1.110	1.173



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

#### 4.4 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (A) ด้วยแรงดันกระแสตรง (DC Test)

การทดสอบด้วยวิธีป้อนแรงดันกระแสตรงนั้น มีจุดประสงค์ในการทดสอบเพื่อต้องการหาค่าความเป็นฉนวนของวัสดุทดสอบ และค่า  $\rho$  (ค่าความต้านทานจำเพาะ) จากการทดสอบจึงได้ทำการเปรียบเทียบแรงดัน จากแรงดัน AC เป็น แรงดัน DC เพื่อให้ทราบค่าของแรงดันกระแสตรงที่แท้จริง  $U_{dc}$  (จริง) พร้อมบันทึกผลและคำนวณค่าความต้านทาน

ซึ่งจากการหาค่าความต้านทาน โดยการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับแผ่นซิงค์ออกไซด์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน ซึ่งการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรงนั้น ควรจะทำการทดสอบในขณะที่ซิงค์ออกไซด์ ยังคงมีสภาพความเป็นฉนวน

การคำนวณหาค่าแรงดัน  $U_{dc}$  (จริง) จากการใช้ ออสซิลโลสโคปวัดค่าแรงดัน แล้วนำไปคูณกับค่าสเกลแฟคเตอร์ ที่ได้จากค่า  $R(\text{divider})$  มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$U_{dc} (\text{จริง}) = U_{2dc} (\text{จากเครื่องวัด}) \times \text{Scale factor}$$

$$\text{Scale factor} = \frac{R_1 - R_2}{R_2} = \frac{280M\Omega + 15M\Omega}{15M\Omega} = 18,667.667$$

การคำนวณหาค่ากระแส จะนำค่าของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน  $1\text{ k}\Omega$  นำมาคำนวณหาค่ากระแส โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$I - \text{mean}(A) = \frac{V_{\text{mean}}(v)}{R(\Omega)}$$

โดยที่ V-mean คือ ค่าแรงดันกระแสตรงที่วัดได้ จากออสซิลอสโคป

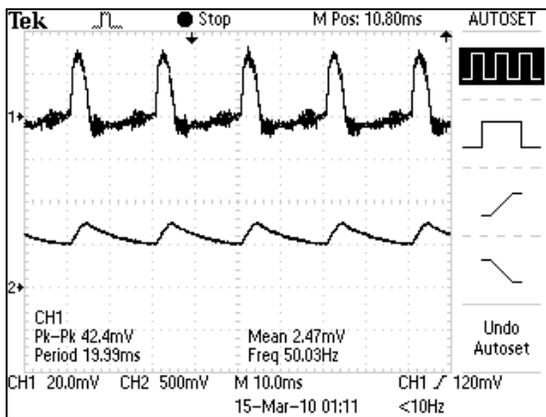
I-mean คือ ค่ากระแสที่ได้จากการคำนวณ

R คือ ค่าความต้านทาน มีค่าเท่ากับ 1 k $\Omega$

และใช้หลักการดังกล่าวข้างต้นทำการทดสอบทุกผลิตภัณฑ์คือ A , B และ C

ตัวอย่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ขี้ห่อ ( A ) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test )

(หมายเหตุ : สำหรับขั้นที่ 2 จะมีลักษณะของกราฟคล้ายกัน)



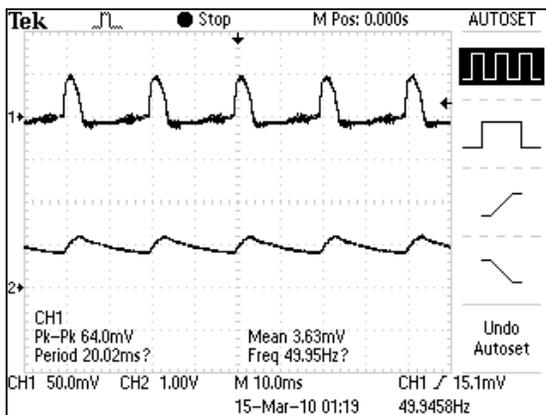
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 0.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 11.2381 kV

แรงดันที่วัดได้ = 2.47 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00247 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 4.598 G $\Omega$



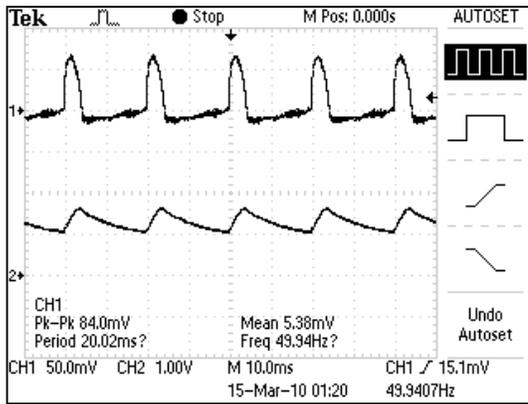
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 17.9392 kV

แรงดันที่วัดได้ = 3.36 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00363 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 4.9419 G $\Omega$



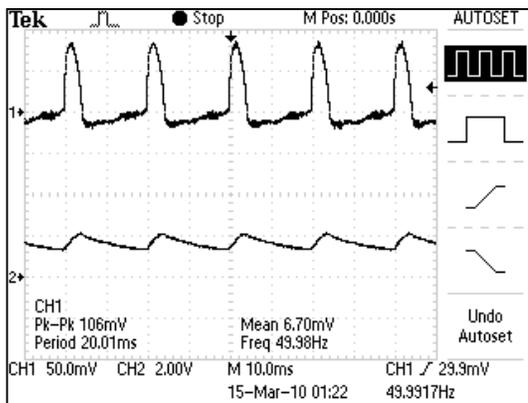
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 24.2701 kV

แรงดันที่วัดได้ = 5.38 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00538 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 4.5112 GΩ



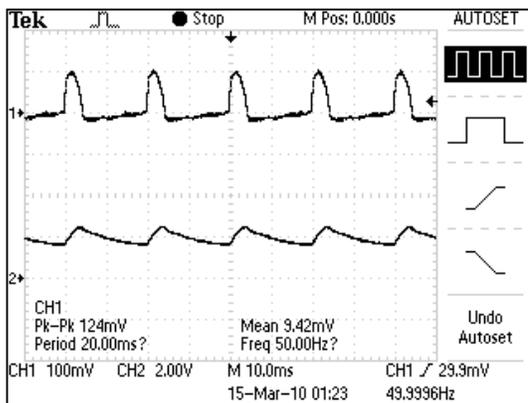
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 31.1745 kV

แรงดันที่วัดได้ = 6.70 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00670 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 4.6529 GΩ



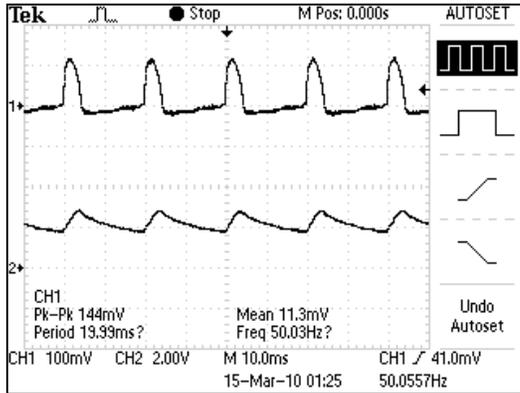
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 36.7748 kV

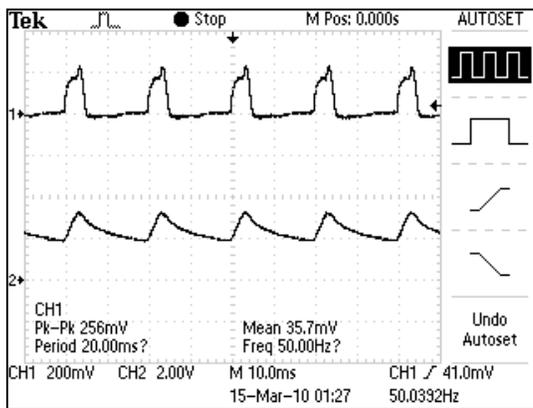
แรงดันที่วัดได้ = 9.42 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00940 mA

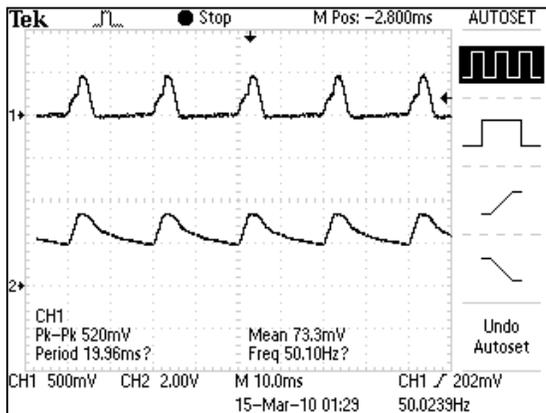
ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 3.9122 GΩ



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 41.0691 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 11.3 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.01130 mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 3.6344 GΩ



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 44.2432 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 35.7 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.03570 mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.2393 GΩ



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.0 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 46.2964 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 73.7 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.07330 mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 0.6316 GΩ

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

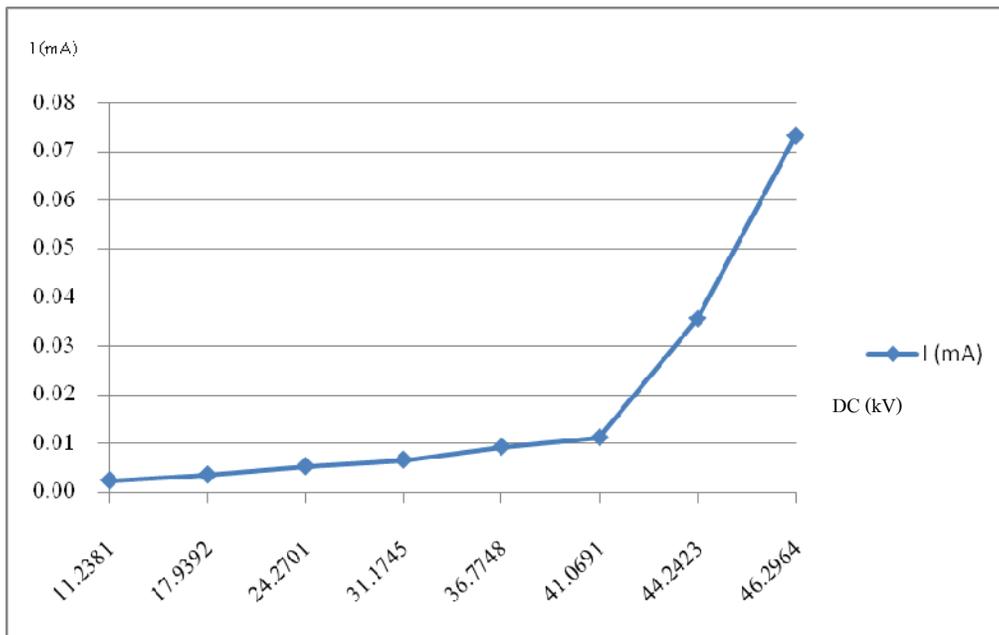
ความชื้นสัมพัทธ์ 48 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg

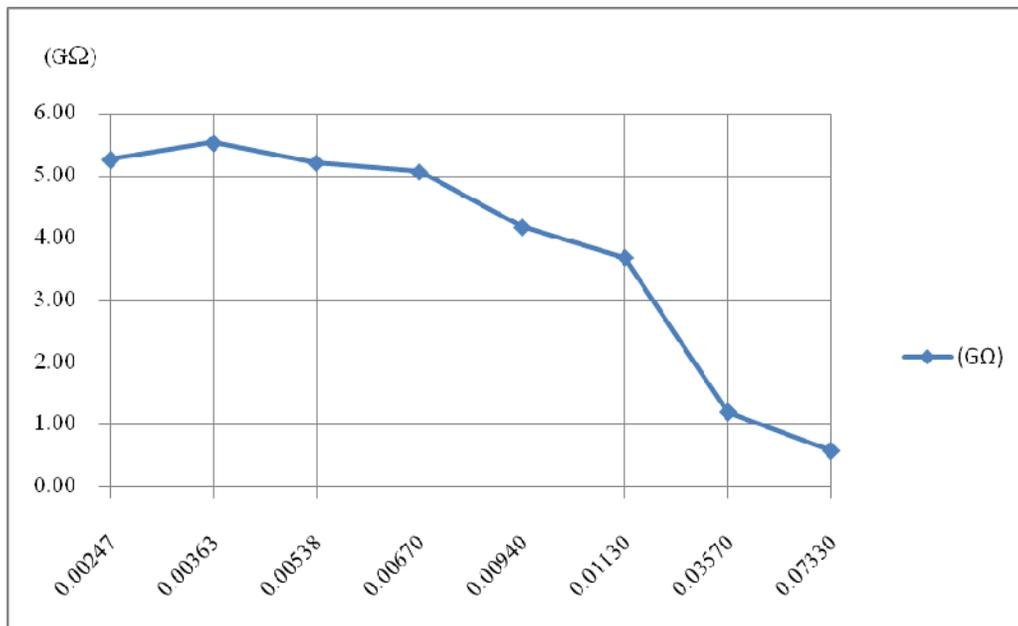
อุณหภูมิ 29 C°

ตารางที่ 4.4 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรง (แผ่นซิงค์ออกไซด์ A )

ค่าแรงดันที่ป้อน ให้กับ ZnO AC (kV)	เปรียบเทียบแรงดัน เป็น DC (kV)		ค่ากระแส I (mA)		ค่าความต้านทาน (GΩ)		ค่าเฉลี่ย ค.ต.ท. (GΩ)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
0.50	11.2381	11.7792	0.00247	0.00197	4.5498	5.9792	5.2645
1.0	17.9392	18.0145	0.00363	0.00924	4.9419	6.1274	5.5347
1.5	24.2701	24.4541	0.00538	0.00413	4.5112	5.9211	5.2162
2.0	31.1745	31.3617	0.00670	0.00572	4.6529	5.4827	5.0678
2.5	36.7748	36.7748	0.00940	0.00827	3.9122	4.4468	4.1795
3.00	41.0691	40.8824	0.01130	0.01090	3.6344	3.7506	3.6925
3.50	44.2423	43.8691	0.03570	0.03700	1.2393	1.1856	1.2125
4.00	46.2964	46.1092	0.07330	0.08410	0.6316	0.5483	0.5900



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน



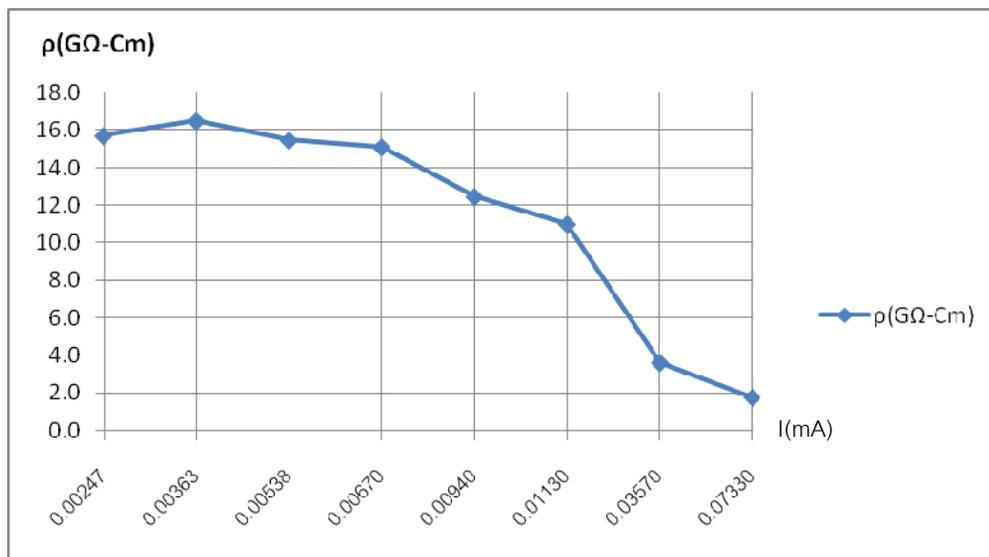
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานและกระแส

ตารางบันทึกผล ค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) (จากการคำนวณ)

สมการสำหรับการคำนวณค่า  $\rho$  (ค่าความต้านทานจำเพาะ)

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad \rho = \frac{RA}{l}$$

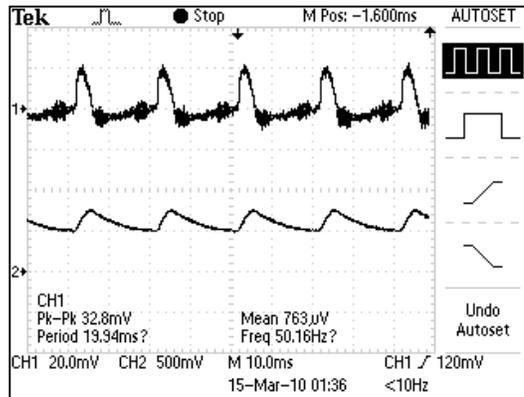
ค่าความต้านทานจำเพาะ		ค่าเฉลี่ย ความต้านทาน จำเพาะ
$\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$		$\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$
ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
13.56210	17.86650	15.7143
14.73090	18.26460	16.4978
13.44700	17.49690	15.4720
13.86940	16.34290	15.1062
11.66150	13.25510	12.4583
10.83350	11.17980	11.0067
3.69410	3.53410	3.6141
1.88270	1.63440	1.7586



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานจำเพาะและกระแส

#### 4.5 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (B) ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง (DC Test)

ตัวอย่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ ยี่ห้อ (B) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



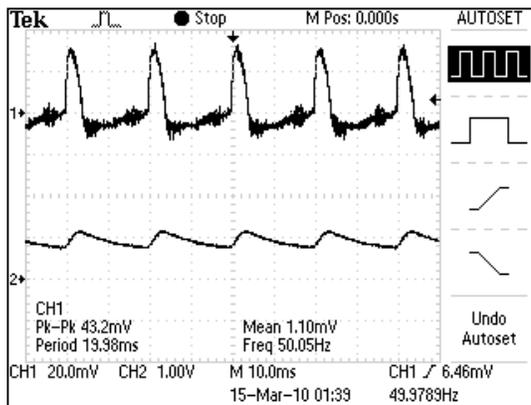
ป้อนแรงดันกระแสสลับ (AC) = 0.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง (DC) ได้ = 11.1072 kV

แรงดันที่วัดได้ = 763  $\mu$ V

กระแสจากการคำนวณ = 0.000677 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 16.4062 G $\Omega$



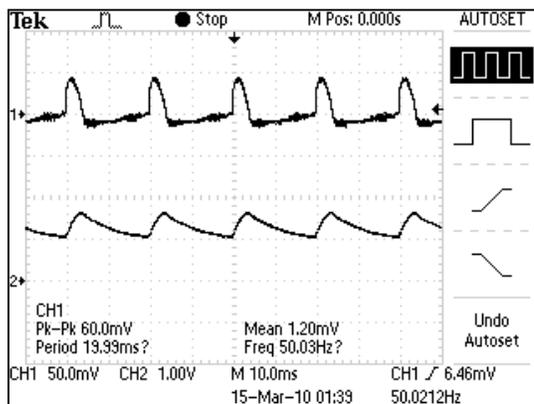
ป้อนแรงดันกระแสสลับ (AC) = 1.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง (DC) ได้ = 17.1565 kV

แรงดันที่วัดได้ = 1.10 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.000960 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 17.8708 G $\Omega$



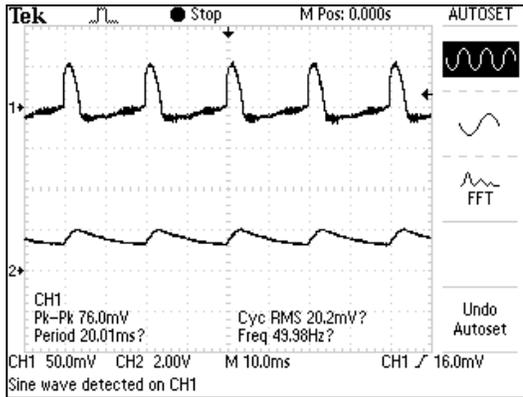
ป้อนแรงดันกระแสสลับ (AC) = 1.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง (DC) ได้ = 24.0819 kV

แรงดันที่วัดได้ = 1.2 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.001320 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 18.2432 G $\Omega$



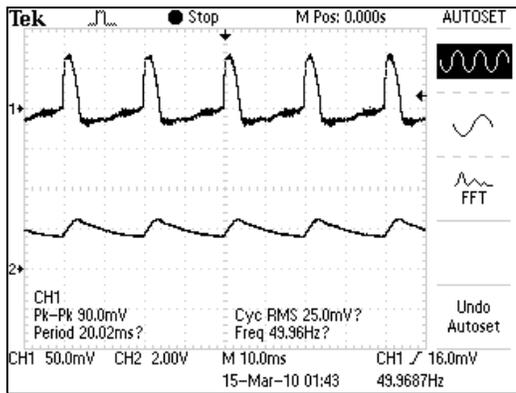
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 30.0553 kV

แรงดันที่วัดได้ = 20.2 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.001690 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 17.7840 GΩ



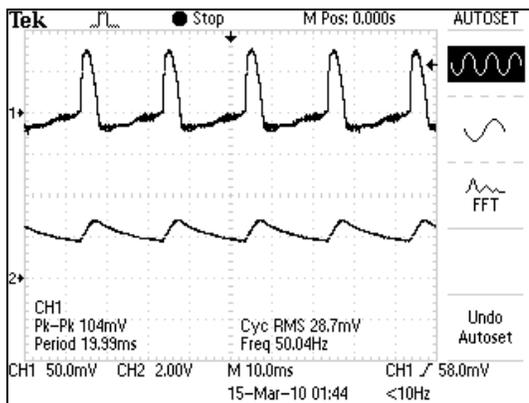
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 36.7748 kV

แรงดันที่วัดได้ = 25.0 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.002080 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 17.6804 GΩ



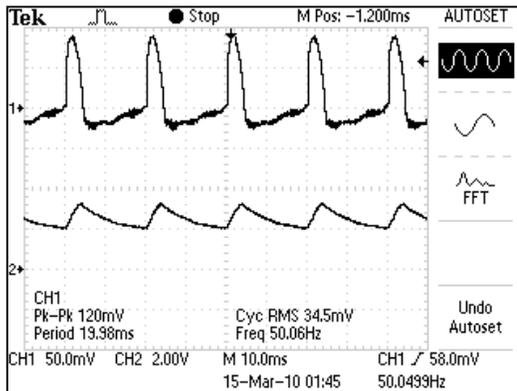
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 41.2567 kV

แรงดันที่วัดได้ = 28.7 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00286 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 14.4252 GΩ



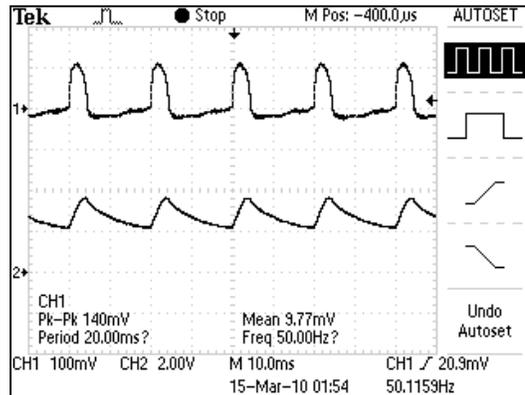
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 46.8569 kV

แรงดันที่วัดได้ = 34.5 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.005560 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 8.4273 GΩ



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 4.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 50.7758 kV

แรงดันที่วัดได้ = 9.77 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.00977 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 5.1971 GΩ

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

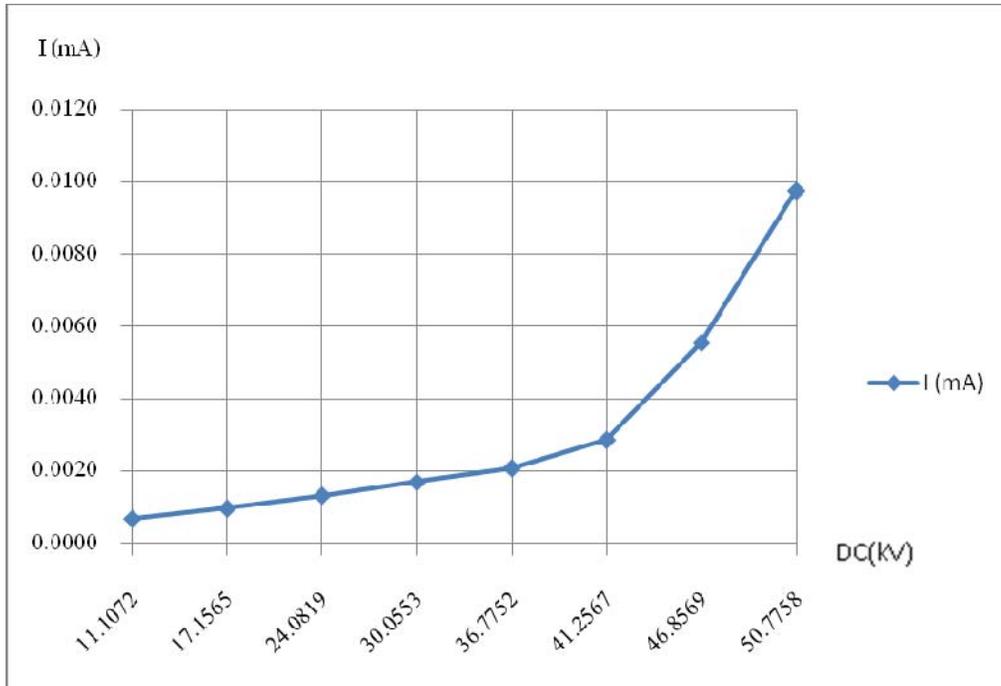
ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg.

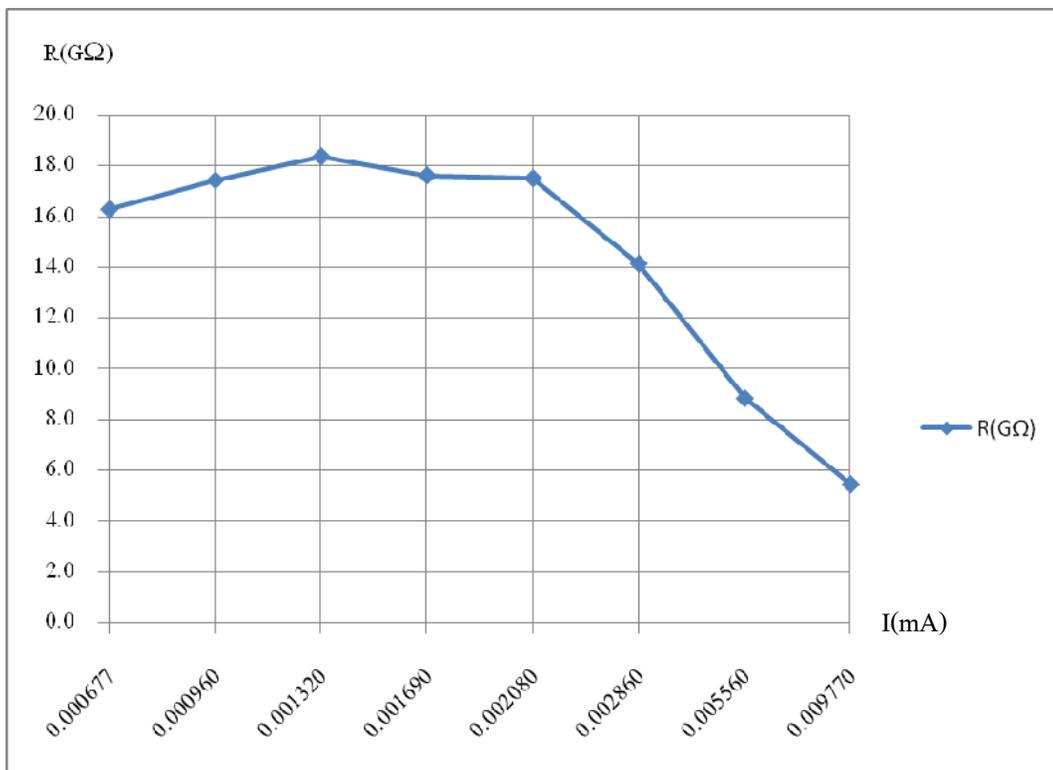
อุณหภูมิ 28 C°

ตารางที่ 4.5 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรง (แผ่นซิงค์ออกไซด์ B)

ค่าแรงดันที่ ป้อน ให้กับ ZnO AC (kV)	เปรียบเทียบแรงดัน เป็น DC (kV)		ค่ากระแส I (mA)		ค่าความต้านทาน (GΩ)		ค่าเฉลี่ย ก.ต.ท. (GΩ)
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
0.50	11.1072	11.3692	0.000677	0.000702	16.4062	16.1954	16.3008
1.0	17.1565	17.3614	0.000960	0.001020	17.8708	17.0210	17.4459
1.5	24.0819	23.8956	0.001320	0.001290	18.2432	18.5237	18.3835
2.0	30.0553	30.4282	0.001690	0.001740	17.7840	17.4875	17.6358
2.5	36.7752	37.3353	0.002080	0.002150	17.6804	17.3653	17.5229
3.00	41.2567	41.8168	0.002860	0.003010	14.4252	13.8926	14.1589
3.50	46.8569	48.3492	0.005560	0.005210	8.4273	9.2801	8.8537
4.00	50.7758	51.1496	0.009770	0.008920	5.1971	5.7343	5.4657



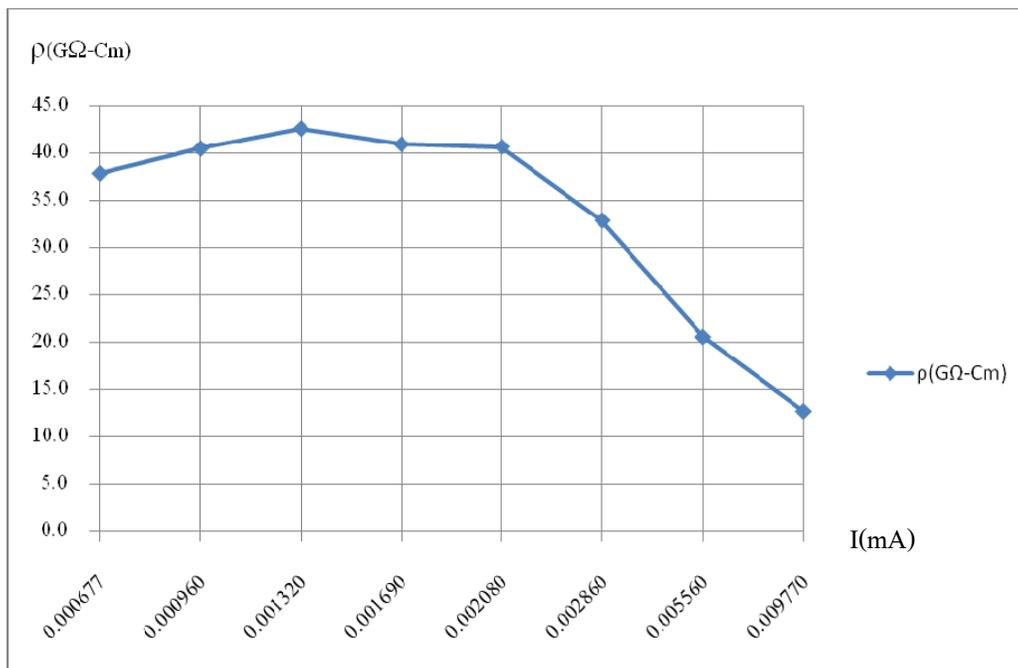
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานและกระแส

ตารางบันทึกผล ค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) (จากการคำนวณ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ $\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$		ค่าเฉลี่ย ความต้านทานจำเพาะ $\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$
ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
38.07520	37.58600	37.8306
41.47420	39.50200	40.4881
42.33850	42.88950	42.6140
41.27280	40.58470	40.9288
41.03240	40.30110	40.6668
33.47780	32.24170	32.8598
19.55790	21.53710	20.5475
12.06130	13.30800	12.6847

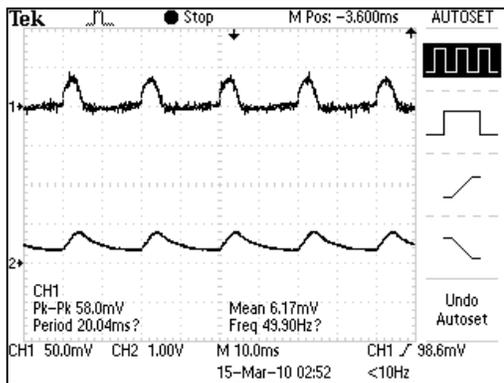


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานจำเพาะกับกระแส

#### 4.6 การทดสอบผลิตภัณฑ์ (C) ด้วยแรงดันสูงกระแสตรง

ตัวอย่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ (C) ชั้นที่ 1 ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

(หมายเหตุ : มีการทดสอบ จำนวน 2 ชั้น สำหรับชั้นที่ 2 จะมีลักษณะของกราฟคล้ายกัน)



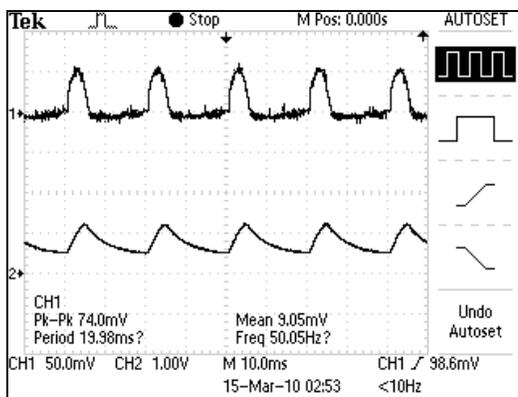
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 0.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 10.3979 kV

แรงดันที่วัดได้ = 6.17 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.0062 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.6771 G $\Omega$



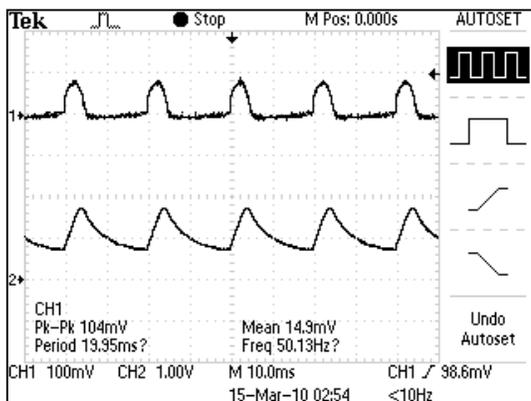
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.0 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 16.2595 kV

แรงดันที่วัดได้ = 9.05 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.0091 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.7868 G $\Omega$



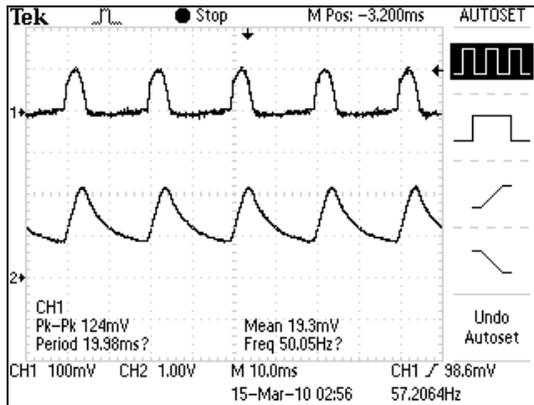
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 1.5 kV

ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 24.0819 kV

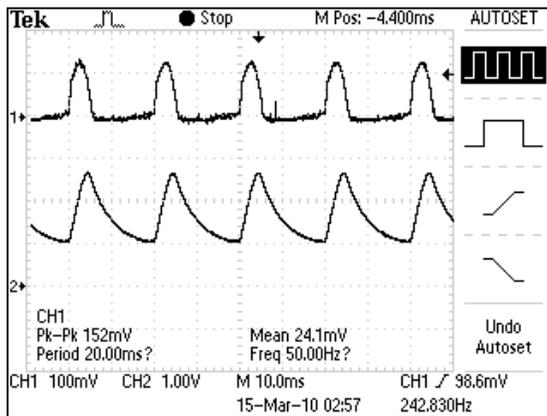
แรงดันที่วัดได้ = 14.9mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.0149 mA

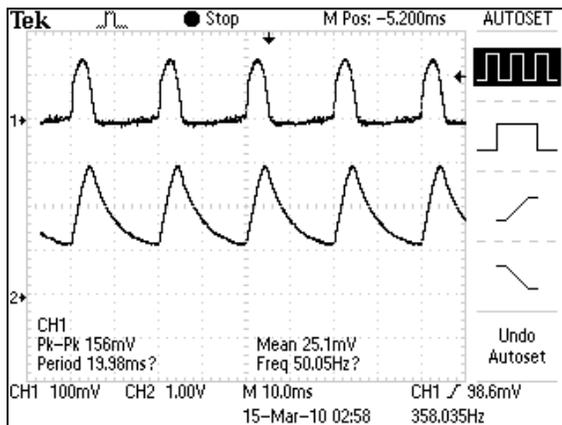
ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.541 G $\Omega$



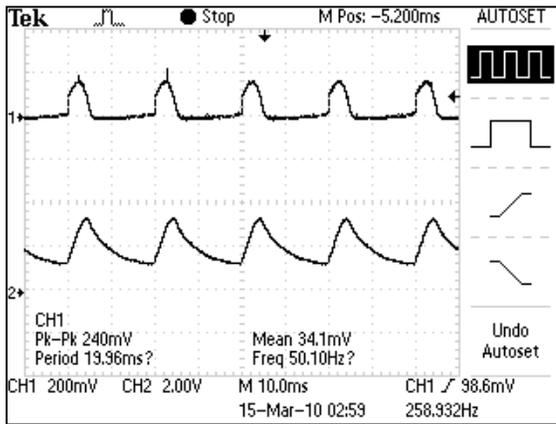
ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.0 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 28.3749 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 19.3 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.0193 mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.4702 G $\Omega$



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 2.5 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 33.7885 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 24.1 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.0241 mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.4020 G $\Omega$



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.0 kV  
 ปรับเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 37.7087 kV  
 แรงดันที่วัดได้ = 25.1 mV  
 กระแสจากการคำนวณ = 0.0251mA  
 ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.5023 G $\Omega$



ป้อนแรงดันกระแสสลับ ( AC ) = 3.5 kV

เปรียบเทียบแรงดันกระแสตรง ( DC ) ได้ = 43.1223 kV

แรงดันที่วัดได้ = 34.1 mV

กระแสจากการคำนวณ = 0.0341 mA

ค่าความต้านทานจากการคำนวณ = 1.2646 G $\Omega$

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

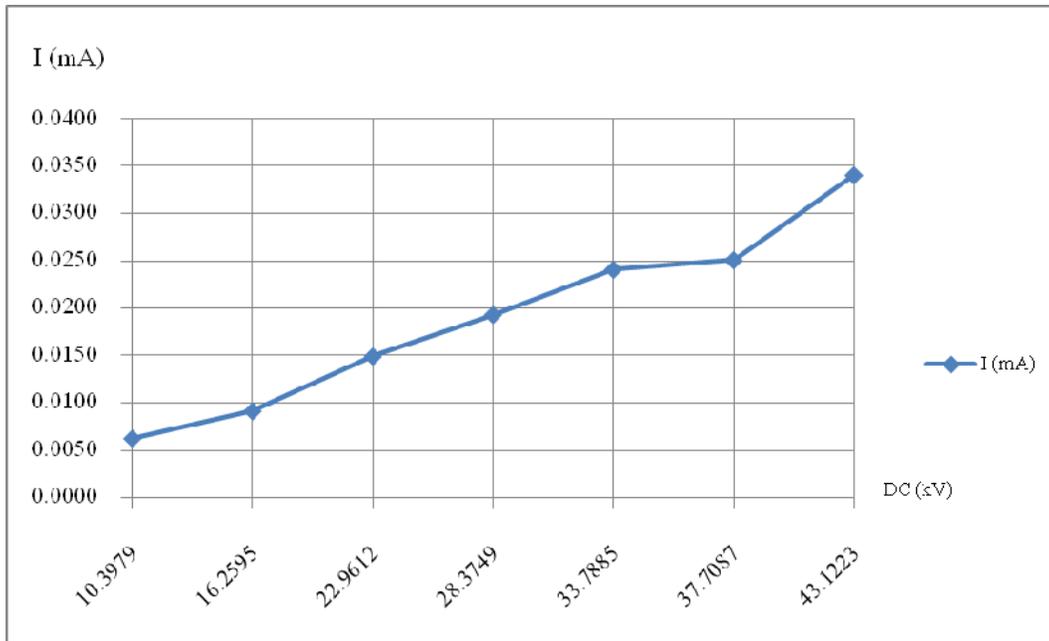
ความชื้นสัมพัทธ์ 51 %

ความดันอากาศ 777.81 mm.Hg.

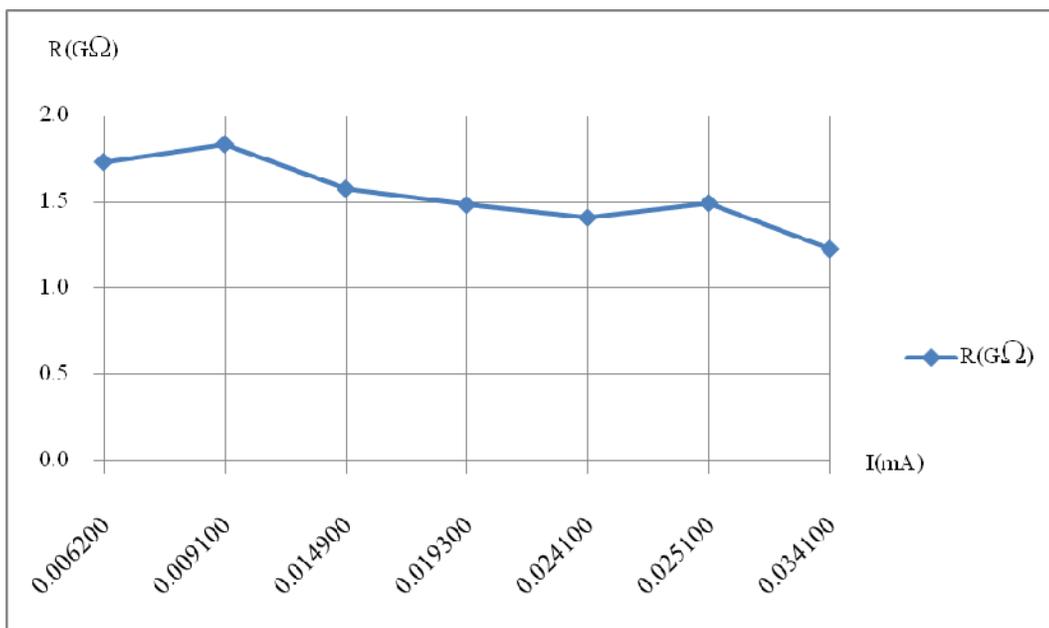
อุณหภูมิ 28 C°

ตารางที่ 4.6 การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสตรง (แผ่นซิงค์ออกไซด์ C )

ค่าแรงดันที่ป้อน ให้กับ ZnO	เปรียบเทียบแรงดัน		ค่ากระแส		ค่าความต้านทาน		ค่าเฉลี่ย ก.ต.ท. R(G $\Omega$ )
	เป็น DC (kV)		I (mA)		R(G $\Omega$ )		
	AC (kV)	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
0.50	10.3979	10.5659	0.006200	0.005900	1.6771	1.7908	1.7340
1.0	16.2595	16.2222	0.009100	0.008600	1.7868	1.8863	1.8366
1.5	22.9612	22.9612	0.014900	0.001420	1.5410	1.6170	1.5790
2.0	28.3749	28.3749	0.019300	0.018900	1.4702	1.5013	1.4858
2.5	33.7885	35.0952	0.024100	0.024700	1.4020	1.4209	1.4115
3.00	37.7087	38.4554	0.025100	0.025800	1.5023	1.4905	1.4964
3.50	43.1223	42.1889	0.034100	0.035200	1.2646	1.1966	1.2306



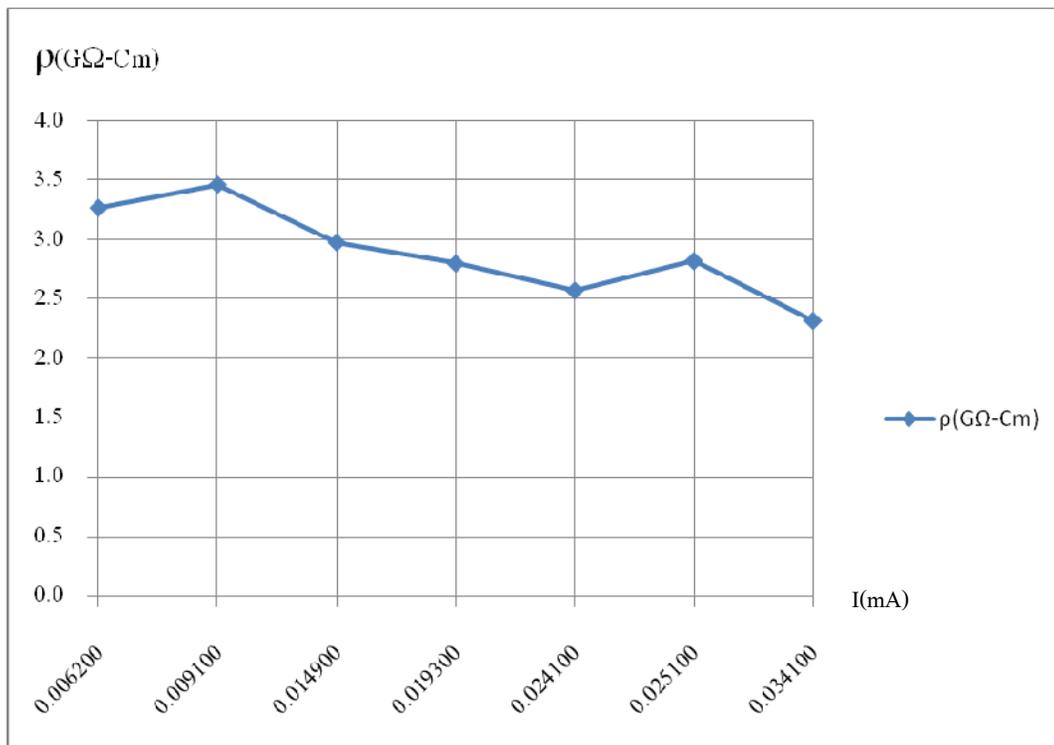
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานและกระแส

ตารางบันทึกผล ค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) (จากการคำนวณ)

ค่าความต้านทานจำเพาะ $\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$		ค่าเฉลี่ย ความต้านทานจำเพาะ $\rho(\text{G}\Omega\text{-Cm})$
ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
3.16650	3.38120	3.2739
3.37360	3.56150	3.4676
2.90950	3.05300	2.9813
2.77580	2.83460	2.8052
2.47100	2.68280	2.5769
2.83640	2.81420	2.8253
2.38770	2.25930	2.3235

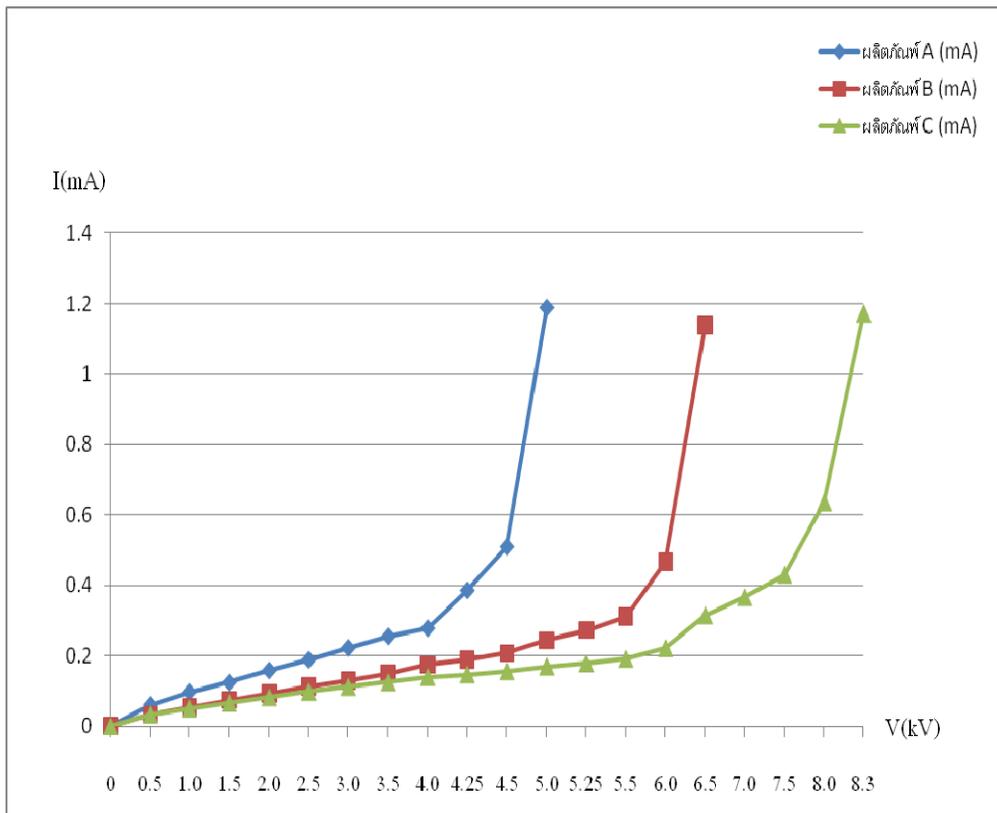


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานจำเพาะกับกระแส

## 4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 4.7.1 วิเคราะห์ การทดสอบแผ่นฉีกออกไซด์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยที่การนำไฟฟ้าเมื่อเกิดการพังทลาย เนื่องจากฉีกออกไซด์ทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์นั้นในแต่ละชั้นวัสดุมีขนาดไม่เท่ากัน อีกทั้งยังมีจำนวนตัวไม่เท่ากัน จึงได้วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าแรงดันให้มีค่าเทียบกับค่าแรงดันทั้งตัวของกับดักเสิร์จ ซึ่งมีการเปรียบเทียบหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการพังทลาย ณ จุด ( Breakdown Voltage) จึงได้คำนวณจากค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการพังทลายต่อชั้น คูณกับจำนวนชั้นวัสดุทั้งหมดที่บรรจุในกับดักเสิร์จ



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด

ผลิตภัณฑ์ A :

$$\begin{aligned} \text{ค่าแรงดันพังทลายต่อตัว} &= \text{ค่าแรงดันพังทลายต่อชั้น} \times \text{จำนวนชั้นวัสดุทั้งหมดในArrester} \\ &= 4.4 \text{ kV} \times 5 \text{ ชั้น} \\ &= 22 \text{ kV ( ที่ค่ากระแสเฉลี่ย 1.172 mA)} \end{aligned}$$

ผลิตภัณฑ์ B :

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแรงดันพังทะลุต่อตัว} &= \text{ค่าแรงดันพังทะลุต่อชั้น} \times \text{จำนวนชั้นวัสดุทั้งหมดในArrester} \\
 &= 6.5 \text{ kV} \times 4 \text{ ชั้น} \\
 &= 26 \text{ kV ( ที่ค่ากระแสเฉลี่ย 1.14 mA)}
 \end{aligned}$$

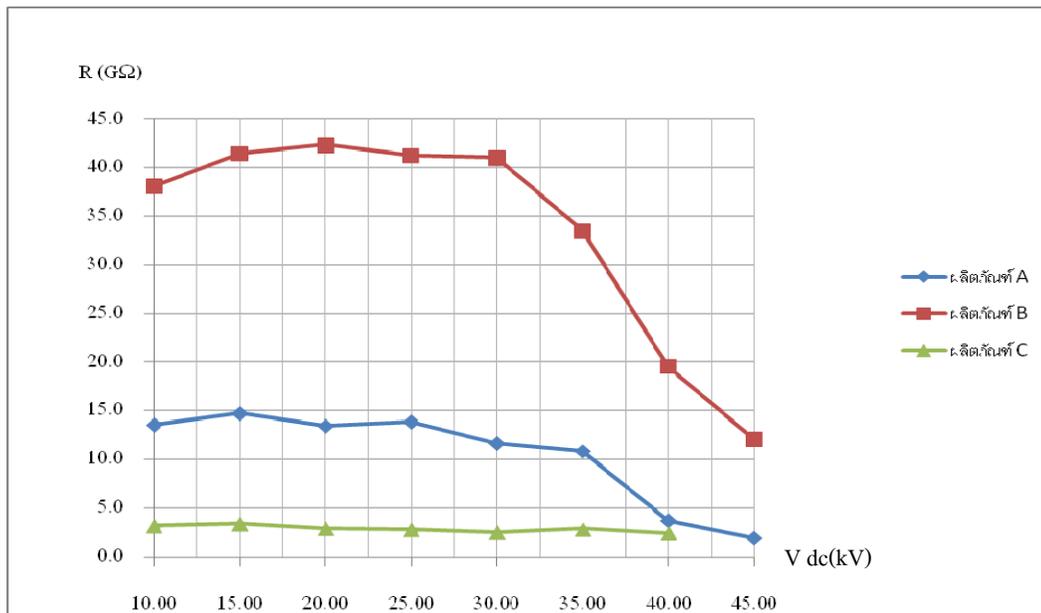
ผลิตภัณฑ์ C :

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแรงดันพังทะลุต่อตัว} &= \text{ค่าแรงดันพังทะลุต่อชั้น} \times \text{จำนวนชั้นวัสดุทั้งหมดในArrester} \\
 &= 8.3 \text{ kV} \times 4 \text{ ชั้น} \\
 &= 33.2 \text{ kV ( ที่ค่ากระแสเฉลี่ย 1.1725mA)}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณและการพิจารณา จากกราฟ V-I จะสังเกตว่า ผลิตภัณฑ์ B มีความเหมาะสมที่จะใช้ในระบบ 22 – 24 (kV) เนื่องจากค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการพังทะลุ (Breakdown Voltage) อยู่ที่ 26 kV

#### 4.7.2 วิเคราะห์ การทดสอบแผ่นชิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับค่าความต้านทาน

จากการใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในการทดสอบ เพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานของแผ่นชิงค์ออกไซด์จะพบว่า ต้องทำการทดสอบที่ค่าแรงดันระดับหนึ่งที่ไม่ทำให้แผ่นชิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติ R-nonlinear และสารเคลือบแผ่นชิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจะมีผลทำให้แผ่นชิงค์ออกไซด์เริ่มนำกระแสมากขึ้น

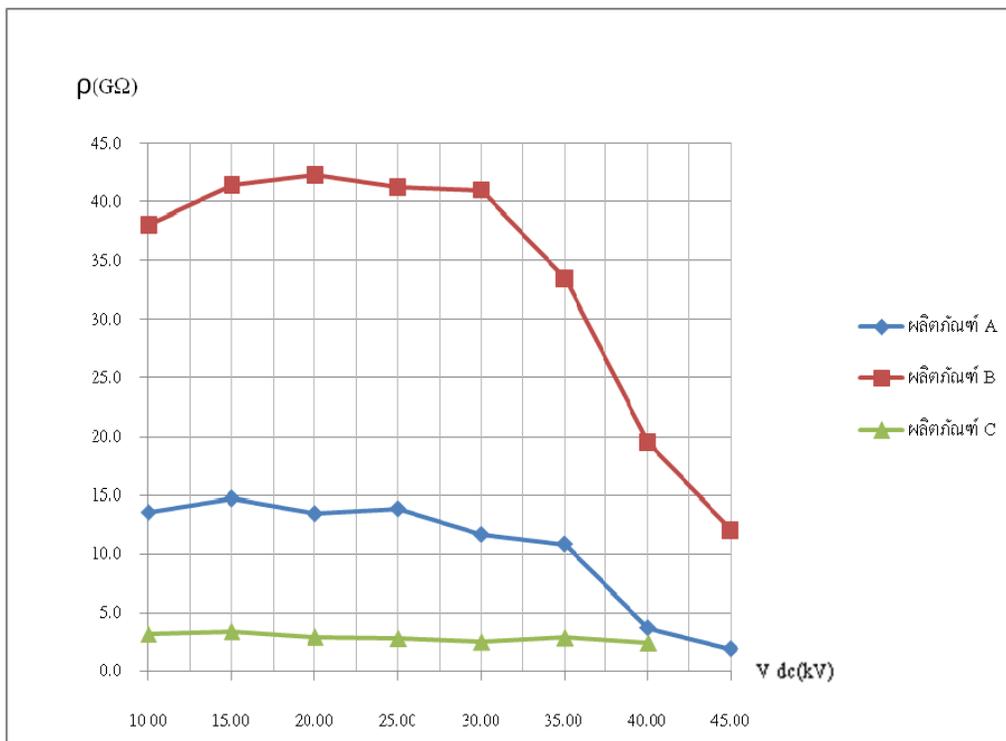


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ ค่าความต้านทาน R-nonlinear ของทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์

จากตารางบันทึกผลการทดสอบและกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทาน R-nonlinear ข้างต้น จะสังเกตเห็นพฤติกรรมของค่าความต้านทาน โดยเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานจะแปรผกผันกับแรงดัน และกระแส ซึ่งจะพบว่า ผลิตรกัณฑ์ B มีค่าความต้านทานสูงที่สุด

#### 4.7.3 วิเคราะห์ การทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะ

จากการใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในการทดสอบ เพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะ ของแผ่นซิงค์ออกไซด์จะพบว่า ต้องทำการทดสอบที่ค่าแรงดันระดับหนึ่งที่ไม่ทำให้แผ่นซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติ R-nonlinear และสารเคลือบแผ่นซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจะมีผลทำให้แผ่นซิงค์ออกไซด์เริ่มนำกระแสมากขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ ค่าความต้านทานจำเพาะ ของทั้ง 3 ผลิตรกัณฑ์

จากตารางบันทึกผลการทดสอบและกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) ข้างต้น จะสังเกตเห็นพฤติกรรมของค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) โดยเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะ ซึ่งจะแปรผกผันกับแรงดันและกระแส ซึ่งจะพบว่า ผลิตรกัณฑ์ B มีค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) สูงที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบของงานวิจัยดังกล่าวมานี้ ในส่วนของแนวทางในการสร้างชุดทดสอบ สำหรับแผ่นซิงค์ ออกไซด์ในกับดักเสิร์จ เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ 3 ผลติภัณฑ์ และวัดค่าที่ได้จากการทดสอบ เพื่อสรุปหาค่าคุณสมบัติในการทำงานของแผ่นซิงค์ออกไซด์ในกับดักเสิร์จ

#### 5.1 สรุป

จากการที่ได้ทำการทดสอบแผ่นซิงค์ออกไซด์ทั้ง 3 ผลติภัณฑ์ ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่ได้เมื่อทำการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดัน (V-I) สรุปได้ว่าผลติภัณฑ์ B มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในระบบไฟฟ้า ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานของแผ่นซิงค์ออกไซด์จะพบว่า ต้องทำการทดสอบที่ค่าแรงดันในระดับหนึ่ง ที่ไม่ทำให้แผ่นซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติ R-nonlinear และสารเคลือบแผ่นซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ จากการทดสอบ สรุปได้ว่าผลติภัณฑ์ B มีค่าคุณสมบัติความต้านทานมากที่สุด และเนื่องจากความต้านทานแปรผันตรงกับค่าความต้านทานจำเพาะ( $\rho$ ) จึงทำให้ค่า ค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) มีค่าขึ้นสูงตาม ดังนั้นผลติภัณฑ์ B จึงมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้งาน และจากการที่ไม่ได้ทำการทดสอบด้วยวงจรมัลติสักระแส จึงไม่ได้ข้อสรุปที่แน่ชัด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในวงจรการทดสอบบางอย่างนั้น เป็นอุปกรณ์ที่ได้จากการสร้างและประกอบขึ้นมาเอง อาจทำให้ไม่ได้มาตรฐาน ดังนั้นผลที่ได้ดังข้อสรุปดังกล่าวข้างต้น อาจมีการคลาดเคลื่อนและผิดเพี้ยนไปบ้าง ซึ่งถ้าหากต้องการทดสอบให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น ควรที่จะใช้อุปกรณ์สำหรับการทดสอบที่มีมาตรฐาน

## บรรณานุกรม

1. K. Pattanapakdee and C. Banmongkol, Ferroresonances during Single Pole Switching in Distribution System (Thailand), IEEE-EIT Joint Symposium on Advanced Technologies in Power Systems, Thailand on November 19-20, 2007.
2. P. Yuthagowith, A. Ametani, K. Pattanapakdee and C. Banmongkol, Survey of Switching Over-Voltages on Distribution Systems in Thailand, The International Conference on Electrical Engineering 2008, Japan on July 6-10, 2008.
3. K. Pattanapakdee and C. Banmongkol, Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service Transformer Ferroresonances, International Conference on Power Systems Transients, France on June 4-7, 2007.
4. K. Al-Anbari, R. Ramanujam, T. Keerthiga and K. Kuppusamy, Analysis of Nonlinear Phenomena in MOV Connected Transformer, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.148, No. 6, November 2001.
5. S. Lam Du, T. Tran-Quoc, H. Vo-V.-Huy, K. Nguyen-Boi and Q. Nguyen, Overvoltages on Distribution Systems, IEEE 1998.
6. L. Pierrat, T. Tran-Quoc and A. Montmeat, Nonlinear Transient Simulation of Transformers, IEEE 1995.
7. R.A. Walling, R.K. Hartana, R.M. Reckard, M.P. Sampat and T.R. Balgie, Performance of Metal-oxide Arresters Exposed to Ferroresonances in Padmount Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 2, April 1994.
8. Christian Heinrich, and Volker Hinrichsen, Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, No. 1 January 2001.
9. A. Haddad and D. Warne, Advances in High Voltage Engineering. IEE Power & Energy Series 40, 2004.
10. M. Kan, S. Nishiwaki, T. Sato, S. Kojima and S. Yanabu, Surge Discharge Capability and Thermal Stability of a Metal Oxide Surge Arrester, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 2, February 1983.

11. S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Satoh, H. Mizoguchi and S. Yanabu, Study of Thermal Runaway/Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, February 1984.
12. S. Tominaga, T. Shibuya, Y. Fujwara, M. Imataki and T. Nitta, Stabillity and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arrester, IEEE Transactions on PowerApparatus and Systems, Vol. PAS-99(4), July/August 1980.
13. M.V. Lat, Thermal properties of Metal Oxide Surge Arresters, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 7, July 1984.
14. M.V. Lat, Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arrester, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.10, October 1984.
15. Guy St- Jean and Adre' Petit, Metal-Oxide Surge Arrester Operating Limits Defined by a Temperature-Margin Concept, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
16. Andre' Petit, Xuan Dai Do and Guy St-Jean, An Experimental Method to determine The Electro-thermal Model Parameters of Metal Oxide Surge Arrester, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991.
17. Andre' Hamel and Guy St-Jean, Comparison of ANSI. IEC and CSA /standardsDurability Requirements on Station-Type Metal Oxide Surge Arresters for EHV Power Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
18. M. Darveniza, D. Roby ans L.R. Tumma, Laboratory and Analytical Studies of the Effects of Multipulse Lightning Current on Metal Oxide Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994.
19. Juan F. Lara and Julio C. Montenegro . Identification of Electro-Thermal Model Parameters for Metal Oxide Surge Arresters Using Auto Regressive Technics, IEEE, 1995.
20. F. R. Stockum, Simulation of The Nonlinear Thermal Behavior of Metal Oxide Surge Arresters Using A Hybrid Finite Difference and Empirical Model, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9 No. 21, January 1994.
21. M. Bartkowiak, M. G. Comber and G.D. Mahan, Failure Modes and Energy Absorption Capabillity of ZnO Varistors, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January, 1991.

## ภาคผนวก ก

มาตรฐาน IEC และ ANSI (IEEE)

มาตรฐาน IEC และ ANSI (IEEE)

TP Type Blocks (for IEC and ANSI Arresters)

Type	Application	Dimensions mm		Suggested Rating kV	Suggested MCOV kV	Maximum Residual Voltage kV	Nominal Discharge Current kA	Current Withstand	
		Diameter	Height					4/10 $\mu$ s	2ms
TP3222FD	IEC 5kA,	32 +/-0.8	22.0+/-0.6	3	2.55	10.1	5	65kA	150A / IEC 75A / ANSI
TP3229FD	ANSI Normal-Duty		29.0+/-0.8	4	3.4	13.5			
TP3236FD	Distribution Class		36.0+/-1.0	5	4.25	16.5			
TP4122FD	IEC 10kA Class 1,	41 +/-0.8	22.0+/-0.6	3	2.55	10.1	10	100kA	250A
TP4129FD	ANSI Heavy-Duty		29.0+/-0.8	4	3.4	13.5			
TP4136FD	Distribution Class		36.0+/-1.0	5	4.25	16.5			

TV Type Blocks (for IEC Arresters)

Type	Application	Dimensions mm		Suggested Rating kV	Suggested MCOV kV	Maximum Residual Voltage kV	Nominal Discharge Current kA	Current Withstand	
		Diameter	Height					4/10 $\mu$ s	2ms
TV3227FE	IEC 5kA	32 +/-0.8	27.0+/-0.8	4.5	3.75	12.4	5	65kA	150A
TV3236FE			36.0+/-1.0	6	5	16.5			
TV4127FE	IEC 10kA Class 1	41 +/-0.8	27.0+/-0.8	4.5	3.75	12.4	10	100kA	250A
TV4136FE			36.0+/-1.0	6	5	16.5			

รายละเอียดของท่อนชิงค้ออกไฟค้อ้างอิงจากบริษัท Cooper Power System ประเทศสหรัฐอเมริกา

General Technical Data

Catalog Number	- Glass Collar - Epoxy Collar		AV3NGPA	AV3NGPB	AV5NGPA	AV5NGPB	AV3HGPA	AV3HGPB	AV5HGPA	AV5HGPB
			AV3NEPA	AV3NEPB	AV5NEPA	AV5NEPB	AV3HEPB	AV3HEPB	AV5HEPA	AV5HEPB
Rated Voltage (U <sub>r</sub> )		kV	3	3.33	4.5	5	3	3.33	4.5	5
Nominal Discharge Current (I <sub>n</sub> )		kA	5	5	5	5	10	10	10	10
Residual Voltage at I <sub>n</sub> Max. (U <sub>res</sub> )		kV	≤10.1	≤10.8	≤15.1	≤16.3	≤10.1	≤10.8	≤15.1	≤16.3
Continuous Operating Voltage (U <sub>c</sub> )		kV	2.63	2.84	3.94	4.26	2.63	2.84	3.94	4.26
Power Loss at 0.551 of V <sub>1mA</sub> /cm <sup>2</sup>		W	0.163	0.173	0.318	0.337	0.212	0.224	0.318	0.337
Reference Current (I <sub>ref</sub> )		mA	3	3	3	3	5	5	5	5
Reference Voltage (V <sub>ref</sub> )		kV	3.48	3.76	5.21	5.64	3.48	3.76	5.21	5.64
Long Duration Current Impulse		A; $\mu$ s	18 x [75; 2000]				18 x [250; 2000]			
High-Current Pulse		kA; $\mu$ s	2 x [65; 4/10]				2 x [100; 4/10]			
Accelerated Aging Test 1000 h, 115C air at U <sub>c</sub>			Power loss decrease throughout the test							
Operating Temperature		C	-40 ... +60							
Storage Temperature		C	-40 ... +80							
Metallization			Aluminum – Full face electrodes							
Collar			Passivated – Glass or Epoxy*							
Diameter		mm	33	33	33	33	41	41	41	41
Thickness		mm	23	23	35	35	23	23	35	35
Weight Approx.		g	110	110	160	160	170	170	250	250

\* Use glass collar disks for over-molded polymer housings. Use glass collar disks with special tape or epoxy collar disks for applications in air.

รายละเอียดของท่อฉนวนเซรามิกออกไซด์อ้างอิงจากบริษัท MEIDEN ประเทศญี่ปุ่น

Application for IEC Standard	Recommended UR (kVrms)	Model	Dimensions (mm)		Range of critical operating voltage (V1mA-DC) (kV-DC)	Max. residual voltage ratio (VxkA/V1mA) (at 8/20µs)	Current withstand capability	
			Diameter	Height			4/10µs (kA)	2ms (A)
5kA Distribution	3.0	ZE32GE20A	31.5±1.0	19.5±1.0	4.55 – 5.40	1.78 (at 5kA)	65	100
	4.5	ZE32GE30A		29.5±1.0	6.80 – 8.10			
	6.0	ZE32GE40A		39.5±1.0	9.10 – 10.80			
10kA Distribution & Class 1	3.0	ZE42GE20A	42.0±1.0	19.5±1.0	4.55 – 5.40	1.83 (at 10kA)	100	250
	4.5	ZE42GE30A		29.5±1.0	6.80 – 8.10			
	6.0	ZE42GE40A		39.5±1.0	9.10 – 10.80			
10kA Class 2	1.5	ZE48G11	48.5±1.0	11.5±1.0	2.10 – 2.40	1.79 (at 10kA)	100	500
	3.0	ZE48G22		22.0±1.0	4.18 – 4.82			
	5.0	ZE48G37		37.0±1.0	6.92 – 8.08			
10kA Class 3	1.5	ZE64G11	64.5±1.0	11.5±1.0	2.10 – 2.40	1.69 (at 10kA)	100	1000
	3.0	ZE64G23		22.5±1.0	4.18 – 4.82			
	6.0	ZE64G45		44.5±1.0	8.42 – 9.58			
20kA Class 4	3.0	ZE74G23	74.5±1.0	22.5±1.0	4.18 – 4.82	1.78 (at 20kA)	100	1300



**Zinc Oxide Blocks**  
for Surge Arresters

PA.70-2018

## ประวัติผู้รับผิดชอบโครงการวิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ: นายพร้อมศักดิ์ อภิรติกุล

Mr. Promsak Apiraktikul

2. เลขหมายประจำตัวประชาชน: 3720400588381

3. ตำแหน่งปัจจุบัน: อาจารย์

4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail:

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0 2549 3429 โทรสาร 0 2549 3422

e-mail: promsaka@rmutt.ac.th, apiratikul@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา:

ระดับการศึกษา	วุฒิการศึกษา	มหาวิทยาลัย	ปีจบ
ปริญญาตรี	B.Eng. (Electrical Eng.)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2542
ปริญญาโท	M.Eng. (Electrical Eng.)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง	2545
ปริญญาโท	M.Eng. (Safety Eng.)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2546
ปริญญาเอก (กำลังศึกษาต่อ)	D.Eng. (Electrical Eng.)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	-

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- High Voltage Engineering
- Electromagnetic Field
- Electrical Safety

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการวางโครงการวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย เป็นต้น

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย :

ชื่อแผนงานวิจัย: -ไม่มี-

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย :

ชื่อโครงการวิจัย: ระบบตรวจสอบแบบฝังตัวสำหรับการจัดการคุณภาพระบบไฟฟ้า  
(โครงการวิจัย วช. 2550)

### ผู้เริ่มแผนงานวิจัยคนที่ 1

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สรพงษ์ ภาวสุปรีย์  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Assist. Prof. Dr. SORAPONG PAVASUPREE
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 6006 00058 76 9
- ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110  
โทรศัพท์ 02-549-3480 โทรสาร 02-549-3483 E-mail address sorapongp@yahoo.com

### ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิกการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2549	Ph.D.	Energy Science	Kyoto University	ญี่ปุ่น
2547	M.Sc	Energy Science	Kyoto University	ญี่ปุ่น
2541	B.Eng.	Plastic Technology (กว.วิศวกรรมอุตสาหกรรม)	มทร. ธัญบุรี	ไทย

### 5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิกการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Nanotechnology, Nanostructured Materials, TiO<sub>2</sub>, Metal Oxides, Photocatalyst, Dye-sensitized Solar Cell, Plastic Processing, Plastic Testing

### 6. ผลงานวิจัย

#### Journal (International Papers)

- S. Pavasupree**, Y. Suzuki, S. Pivsa-Art and S. Yoshikawa  
“Preparation and characterization of mesoporous MO<sub>2</sub> (M = Ti, Ce, Zr, and Hf) nanopowders by a modified sol-gel method” *Ceramics International*, **31** (2005) 959-963.  
(2006 impact factor = **1.128**)
- S. Pavasupree**, Y. Suzuki, S. Pivsa-Art and S. Yoshikawa “Preparation and characterization of mesoporous TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> nanopowders respond to visible wavelength” *Journal of Solid State Chemistry*, **178** (2005) 128-134.  
(2006 impact factor = **2.107**)
- S. Pavasupree**, Y. Suzuki, S. Pivsa-Art, and S. Yoshikawa  
“Synthesis and Characterization of Nanoporous, Nanorods, Nanowires Metal Oxides”  
*Science and Technology of Advanced Materials*, **6** (2005) 224-229.  
(2006 impact factor = **1.124**)
- S. Pavasupree**, Y. Suzuki, A. Kitiyanan, S. Pivsa-Art, and S. Yoshikawa  
“Synthesis and Characterization of Vanadium Oxides Nanorods”  
*Journal of Solid State Chemistry*, **178** (2005) 2152-2158.  
(2006 impact factor = **2.107**)

## ผู้เริ่มแผนงานวิจัยคนที่ 2

- ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ. ดร. สมหมาย ผิวสอาด  
(ภาษาอังกฤษ) Assist. Prof. Dr. Sommai PIVSA-ART
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1701-00269-00-5
- ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8 คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร  
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
หมายเลขโทรศัพท์ 0-2549-3480-5 หมายเลขโทรสาร 0-2549-3483
- ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	วุฒิกการศึกษา	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2541	Ph.D.	Molecular Chemistry	Osaka University	ญี่ปุ่น
2538	M. Eng.	Applied Chemistry	Osaka University	ญี่ปุ่น
2527	วท.บ.	เคมี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย

## 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ

Organic Synthesis using Transition Metal Catalyst, Biodegradable Polymer Synthesis, Molecular Imprinting, Polymer Blends, Polymer Processing, Synthesis and Characterization of Composite Nano-structures for Photo-electrochemical Functional Materials

## 7. ประสบการณ์ในการวิจัย

### 7.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- S. Pivsa-Art, K. Okuro, M. Miura, S. Murata, and M. Nomura, "Acylation of 2-Methoxynaphthalene with Acyl Chlorides in the Presence of a Catalytic Amount of Lewis Acids", J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1, 1703-1707 (1994).
- S. Pivsa-Art, Y. Fukui, M. Miura, and M. Nomura, "Copper-Promoted Reaction of Aryl Iodides with Activated Methine Compounds", Bull. Chem. Soc. Jpn., 69, 2039-2042 (1996).
- S. Pivsa-Art, T. Satoh, M. Miura, and M. Nomura, "Palladium-Catalyzed Reaction of Aryl Bromides with Dialkylacetylenes to Produce Allenic Compounds", Chem. Lett., 823-824 (1997).

