

ปีการศึกษา 2543

การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด 100 กิโลโวลต์

A design and construction of a 100 kV DC resistive high voltage divider



โดย

นายเจษฎา ฟ้าเลิศ

นายธนินทร์ อินทร์ประดับ

นายศักดิ์ดา ชาติวิงสากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 42587  
วัน, เดือน, ปี..... 4 ส.ค. 2545

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด  
100 กิโลโวลต์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายเจษฎา ฟ้าเลิศ
  2. นายธนินทร์ อินทร์ประดับ
  3. นายศักดิ์ดาชาติวงศ์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A design and construction of a 100 kV DC resistive high voltage divider

Jetsada Fahlert

Thanin Inpradub

Sakda Chartwungsakool

Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

2000

**ABSTRACT**

This thesis presents a design and construction of a 100 kV DC high voltage divider. The resistance of the high voltage arm is 100 M $\Omega$ . The resistance is made of 1 M $\Omega$  metal film resistors which are protected by resin. Resistors are connected in series on a plane of acrylic in helix shape. These resistors are immersed in the transformer oil. The resistance of the low voltage arm is 100 k $\Omega$ , and is made of parallel metal film resistors. The voltage ratio of the voltage divider constructed is 1000:1. The test results show that, the divider has good characteristics compared with the ICE 60-2 (1994) standard with a scale factor of  $\pm 1\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 เทคนิคการวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง	3
2.2 ตัวแบ่งแรงดัน	4
2.3 ฉนวนของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	6
2.4 พื้นฐานเครื่องมือวัด	7
2.4.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัด	7
2.4.2 ความผิดพลาดเชิงระบบ	8
2.5 สเกลแฟกเตอร์	8
2.5.1 ความหมาย	8
2.5.2 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์	8
2.5.3 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์จากการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง	8
2.6 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	9
บทที่ 3 การออกแบบสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	10
3.1 วงจรแบบง่ายของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	10
3.2 การออกแบบความต้านทานภาคแรงสูง	11
3.2.1 การออกแบบเลือกพิกัดความต้านทานและกระแสด้านแรงสูง	11
3.2.2 การออกแบบระยะห่างระหว่างชั้นของความต้านทานภาคแรงสูง	14
3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรด	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบความต้านทานภาคแรงต่ำ	18
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	20
3.5 สรุปการสร้างตัวแบ่งแรงดัน	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
การทดลองที่ 1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง	28
การทดลองที่ 2 การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการเปรียบเทียบ	30
การทดลองที่ 3 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง	32
การทดลองที่ 4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่ระดับแรงดันต่างๆ	34
การทดลองที่ 5 การทดสอบความต่อเนื่องในการใช้งานเป็นเวลา 30 นาที	37
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุป	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบวัดทั่วไปทางด้านไฟฟ้าแรงสูง	4
รูปที่ 2.2 วงจรแบบง่ายของตัวแบ่งแรงดัน	5
รูปที่ 3.1 วงจรแบบง่ายของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	10
รูปที่ 3.2 แสดงความต้านทานย่อยในแต่ละชั้น	14
รูปที่ 3.3 การกระจายสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนของจุดต่อบัคกรี	15
รูปที่ 3.4 แสดงความต้านทานภาคแรงสูง	16
รูปที่ 3.5 แสดงระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโตรด	17
รูปที่ 3.6 แสดงความต้านทานภาคแรงต่ำ	18
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของอิเล็กโตรดด้านบน	21
รูปที่ 3.8 โครงสร้างของอิเล็กโตรดด้านล่าง	22
รูปที่ 3.9 แสดงหัวอิเล็กโตรดด้านบน	23
รูปที่ 3.10 แสดงหัวอิเล็กโตรดด้านล่าง	23
รูปที่ 3.11 โครงสร้างทั้งหมดของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	25
รูปที่ 3.12 ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	26
รูปที่ 4.1 ชุดภาชนะรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง	28
รูปที่ 4.2 วงจรแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	30
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยใช้โปรแกรม PSPICE	31
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ออกแบบกับค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ย ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ	33
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ออกแบบกับค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ได้จากการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันด้านไฟบวก	35
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ออกแบบกับค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ได้จากการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันด้านไฟลบ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 20 kV ตอนเริ่มต้น	37
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 20 kV เป็นเวลา 30 นาที	38
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 50 kV ตอนเริ่มต้น	38
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 50 kV เป็นเวลา 30 นาที	39
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV ตอนเริ่มต้น	39
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV เป็นเวลา 30 นาที	40
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV ตอนเริ่มต้น	40
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV เป็นเวลา 30 นาที	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สรุปการออกแบบตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	24
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแก๊ปต่างๆ	28
ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	30
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง	32
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานด้านไฟบวก ที่ระดับแรงดันต่างๆ	34
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานด้านไฟลบ ที่ระดับแรงดันต่างๆ	35
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับแรงดัน 20, 50, 100 และ 110 kV	41
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน	42

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยใช้ระบบแรงดันสูง ทำให้วัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สายเคเบิล สวิตช์ตัดตอน จะต้องได้รับการทดสอบ เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานแล้วจะมีความคงทนต่อแรงดันสูง โดยไม่เป็นเหตุให้เกิดความล้มเหลวทางฉนวน (Break Down) ซึ่งแรงดันที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันใช้งานของอุปกรณ์นั้น ๆ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดแรงดันสูงที่สามารถวัดแรงดันทดสอบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เทคนิคที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ก็คือ การใช้ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในการวัด ตัวแบ่งแรงดันเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในระบบด้านแรงสูง โดยใช้เป็นตัววัดแรงดันทดสอบแรงสูงที่ผลิตขึ้น และใช้ในด้านการศึกษาวิจัยปรากฏการณ์ทางด้านแรงสูง ด้วยเหตุนี้ห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูงหลายแห่ง เช่น ในมหาวิทยาลัย โรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า หรือสถานีไฟฟ้าย่อยก็ตาม จึงจำเป็นต้องมีตัวแบ่งแรงดันไว้ใช้งาน ทำให้ต้องมีการสั่งซื้อตัวแบ่งแรงดันจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ในโครงการนี้แสดงให้เห็นถึงการศึกษาค้นคว้าและออกแบบเพื่อจัดสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขึ้นเอง โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถสร้างขึ้นหรือหาซื้อได้ภายในประเทศ

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV สำหรับแรงดันกระแสตรง
2. ใช้วัสดุต่าง ๆ ที่ผลิตได้เองหรือหาซื้อได้ง่ายในประเทศ เพื่อให้ราคาของตัวแบ่งแรงดันต่ำลง
3. ทำให้เกิดความปลอดภัยในการวัดระบบแรงดันสูงมากขึ้น
4. ตัวแบ่งแรงดันที่สร้างขึ้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำของสัญญาณที่จะวัดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด
5. สามารถนำมาใช้งานในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูงของภาควิชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

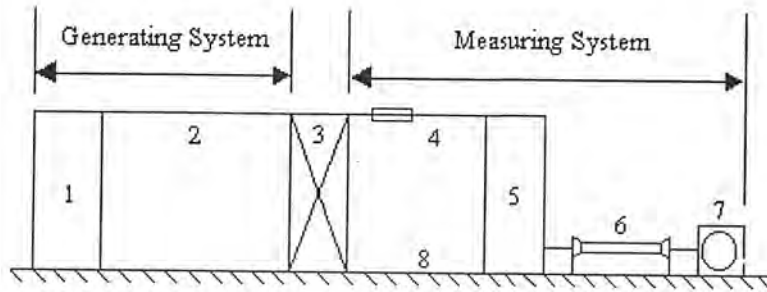
#### 2.1 เทคนิคการวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

เป็นที่ทราบกันดีว่าไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีอันตรายมาก แต่ก็มีความจำเป็นที่จะต้องนำเอาระบบแรงดันสูงมาใช้ การวัดแรงดันสูงมีข้อแตกต่างจากการวัดแรงดันต่ำ คือ อุปกรณ์ตัวชี้ (Indicators) และผู้สังเกตจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย และต้องอาศัยการคำนวณที่ถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่วัด ถ้าแรงดันสูงมากขึ้น ระยะการคำนวณและระยะห่างของผู้วัดจากจุดที่ต้องการวัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดช่วย เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและปลอดภัยแก่ผู้วัด คุณสมบัติที่ต้องการของเครื่องวัดได้แก่ ความถูกต้อง ความไวต่อสัญญาณวัด และความเชื่อถือได้ของเครื่องวัดนั้น

เทคนิคการวัดแรงดันสูงนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่วัดแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันที่วัดอีกด้วย โดยแบ่งชนิดของแรงดันเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Voltage) ซึ่งสามารถใช้เทคนิคการวัดแรงดันสูง วิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

- โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรสแตติกส์ (Electrostatic Voltmeter)
- ช่องว่างทรงกลม (Sphere Gap)
- อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series Impedance)
- ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

เทคนิคการวัดแรงดันสูงทั้งสี่วิธีนี้ วิธีวัดโดยใช้ตัวแบ่งแรงดันเป็นวิธีที่นิยมมาก เพราะวัดได้ง่าย อ่านค่าได้โดยตรง และที่สำคัญ คือ สามารถทราบรูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ การวัดวิธีนี้ โดยทำการแบ่งแรงดันลงมาเพื่อวัด จะต้องคำนึงถึง ความผิดพลาดของค่าที่วัดได้และความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณขาเข้า ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของตัวแบ่งแรงดันเอง ดังนั้นระบบวัดที่ดี จะต้องพัฒนาเพื่อให้ได้ค่าจากการวัดที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ รูปที่ 2.1 แสดงระบบวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 2.1 ระบบวัดทั่วไปทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

1. เครื่องกำเนิดแรงดัน (Voltage Generator)
2. สายต่อไปยังวัสดุทดสอบ (Lead to Test Object)
3. วัสดุทดสอบ (Test Object)
4. สายต่อไปยังตัวแบ่งแรงดัน (Lead to Voltage Divider)
5. ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)
6. เคเบิลวัด (Measuring Cable)
7. เครื่องวัด (Recording Instrument)
8. ระบบดินของระบบวัด (Ground Return of Measuring System)

เนื่องจากที่ระดับแรงดันสูง ความต้องการระยะห่างฉนวนจะต้องมากตาม ดังนั้นตัวแบ่งแรงดันโดยทั่วไป จึงไม่สามารถต่อโดยตรงกับวัสดุทดสอบ จำเป็นจะต้องมีสายต่อระหว่างกัน สำหรับที่ความถี่สูง สเตรย์คาปาซิแตนซ์ (Stray Capacitance) สูดินและความเหนี่ยวนำของสายต่อแรงสูงจะเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง เพราะจะทำให้แรงดันที่วัสดุทดสอบมีค่าแตกต่างจากแรงดันที่ตัวแบ่งแรงดัน

## 2.2 ตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

ตัวแบ่งแรงดันเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดแรงดัน หลักการของการวัดก็คือ จะทำการแบ่งทอนแรงดันสูง ๆ ออกเป็นแรงดันต่ำ พอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแบบอื่นวัดได้ โดยต่ออิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงเข้ากับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำแต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นตัวแบ่งแรงดันจึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับสายต่อแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกปลายหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาของฉนวนเหลว

1. ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
2. การจุดติดไฟ (จุดติดไฟสูงย่อมหมายถึง โอกาสการเกิดการไหม้ย่อมมีน้อย)
3. ความหนืด (ความหนืดต่ำย่อมหมายถึงการระบายความร้อนได้ดี)
4. ความเป็นกรด (ซึ่งแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นกรดผสมอยู่ในของเหลว)
5. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย (จะเป็นตัวชี้ให้ทราบว่าเกิดพลังงานสูญเสียเปล่าเพียงใด)

## 2.2 คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาของฉนวนแข็ง

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)
2. ค่าเปอร์มีตติวิตี ( $\epsilon$ )
3. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ( $\tan \delta$ )
4. ความคงทนต่อแรงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี, ความร้อน

## 2.4 พื้นฐานเครื่องมือวัด

การวัด คือ กระบวนการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนที่ไม่ทราบค่ากับจำนวนที่ทราบค่าและถือว่าเป็นมาตรฐาน ในการวัดถ้าหากค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากเท่าใดก็แสดงว่าการวัดนั้นมีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพดีเยี่ยมขนาดไหนก็ตามก็ไม่จำเป็นว่าค่าที่วัดได้จะตรงกับค่าจริงเสมอไป

### 2.4.1 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัด

ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Error)

$$e = |Y_n - X_n| \quad (2.2)$$

$e$  คือ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์

$Y_n$  คือ ค่าจริง

$X_n$  คือ ค่าที่อ่านจากเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 ความผิดพลาดเชิงระบบ (Percent of Error)

แยกเป็น 2 ชนิดที่สำคัญคือ

### 1. ความผิดพลาดโดยเครื่องมือวัด (Instrumental Error)

เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากโครงสร้างทางกลของการใช้เครื่องมือวัด เช่น การปรับตั้งที่ผิดพลาดตั้งแต่ต้นก็ทำให้การอ่านค่าสูงหรือต่ำเกินความเป็นจริง

### 2. ความผิดพลาดในสภาพแวดล้อม (Environmental Error)

เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยภายนอกเครื่องมือวัด เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น, ความดันอากาศ, สนามไฟฟ้า เป็นต้น

## 2.5 สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor)

### 2.5.1 ความหมาย

ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้นิยามไว้ดังนี้

“สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า”

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ไว้ 2 ประการ คือ ความไม่แน่นอน (Uncertainty) และความมีเสถียรภาพ (Stability)

### 2.5.2 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันสามารถหาได้ดังนี้

1. การวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
2. คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

### 2.5.3 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์จากการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง

วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงนี้ถ้าเป็นไปได้ให้ทดสอบที่แรงดันพิกัด แต่โดยทั่วไประบบวัดอ้างอิงมักมีแรงดันพิกัดที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการวัดเปรียบเทียบอาจทำที่ระบบแรงดัน 20% ของแรงดันพิกัดก็ได้

ในการทดลองต้องอ่านค่าแรงดันจากระบบวัดทั้งสองระบบพร้อมกันแล้ว นำค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จะกำหนดให้เป็นสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F.) การทดสอบจะทำจนกระทั่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลทั้งหมด  $n$  ค่า โดยจำนวนข้อมูลต้องมากกว่า 10 ข้อมูลขึ้นไป และค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้ ( $S.F_m$ ) จะถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ โดยที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $S.D.$ ) ที่คำนวณจาก

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(S.F_i - S.F_m)^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1% ของค่า  $S.F_m$

## 2.6 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดคือ

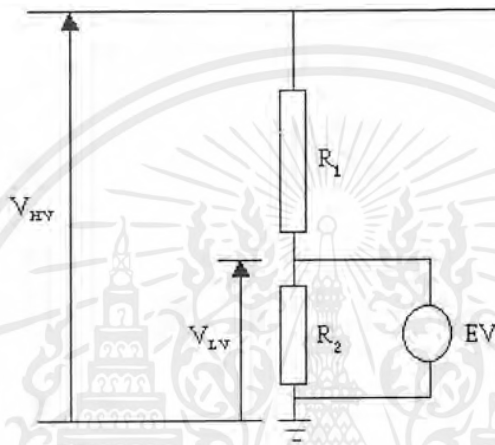
1. แรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ต้องมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 3\%$  และมีความเป็นเชิงเส้น (Linear) ที่ระดับแรงดันต่างๆ
2. สเกลแฟกเตอร์มีค่าผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 1\%$
3. มีความต่อเนื่องในการใช้งานอย่างน้อย 30 นาที และสามารถใช้งานที่แรงดันเกิน 10% ของแรงดันที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

##### 3.1 วงจรแบบง่ายของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน



รูปที่ 3.1 วงจรแบบง่ายของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

- $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง
- $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
- $V_{HV}$  คือ แรงดันที่ต้องการวัด
- $V_{LV}$  คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด
- EV คือ เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูง

จากรูป 3.1 ใช้ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้า อาจคำนวณหาแรงดันที่ต้องการวัดได้จากสมการ

$$V_{HV} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \times V_{LV} \quad (3.1)$$

ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานประกอบด้วย ความต้านทานภาคแรงสูง  $R_1$  และความต้านทานภาคแรงต่ำ  $R_2$  ความต้านทานที่ใช้จะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน, คำนึงถึงสเตรย์คาปาซิแตนซ์ลงดิน, การจนวนวน เป็นต้น สารที่ใช้ทำเป็นความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ควรเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ

ความต้านทานภาคแรงสูง นิยมใช้ตัวความต้านทานจำนวนมากต่ออนุกรมกันจนได้ค่าที่ต้องการ การจนวนระหว่างตัวความต้านทานภาคแรงสูงนี้เป็นสิ่งสำคัญ การจนวนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การระบายความร้อนของตัวความต้านทานภาคแรงสูง, ระดับแรงดันที่วัด, ชนิดของตัวความต้านทานภาคแรงสูง เป็นต้น การต่อความต้านทานภาคแรงสูงบนฐานจนวน และจุ่มอยู่ในจนวนเหลว จะทำให้ค่าคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) สูงมากขึ้น และการระบายความร้อนของตัวความต้านทานจะดีกว่าแบบระบายความร้อนผ่านอากาศ

ความถูกต้องของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ  $R_2$  ซึ่งจะต้องเป็น โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือ โวลต์มิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักดาไฟฟ้าแรงสูง ฉะนั้นจนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะที่เดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันนั้นสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบนคือ จะต้องไม่สูงจนเกินไป กล่าวคือ กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำจนเกินไป ( $I \geq 0.1 \text{ mA}$ ,  $R \leq 100 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ ) ฉะนั้นการเลือกจนวนที่จะนำมาใช้วัดความต้านทานหรือบรรจุความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสม และอาจจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้โดยออกแบบการจัดวางความต้านทานและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออันดับบนแท่งจนวนในลักษณะเป็นเกลียวสว่านจุ่มในน้ำมัน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ  $\text{SF}_6$  เป็นต้น

### 3.2 การออกแบบความต้านทานภาคแรงสูง

#### 3.2.1 การออกแบบเลือกพิคัดความต้านทานและกระแสต้านแรงสูง

การกำหนดค่าความต้านทานภาคแรงสูงนั้น จะต้องคำนึงถึงผลหลายอย่างที่จะเกิดขึ้น เช่น ค่าความต้านทานนี้จะต้องไม่สูงจนเกินไป จนเกิดกระแสรั่วตามผิวจนวนมีค่าสูงเมื่อเทียบกับกระแสที่เข้าเครื่องวัด เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด และจะต้องไม่ต่ำเกินไปจนเป็นโหลดต่อเครื่องกำเนิดแรงดัน ค่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทานภาคแรงสูงนี้จะอยู่ในช่วง  $100 \mu\text{A}$  จนถึง 1 หรือ 2 mA [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกค่าความต้านทานในการออกแบบตัวต้านทานในด้านแรงสูง จะเห็นได้จากรูปที่ 3.1 ว่าตัวความต้านทานทางภาคแรงสูงนั้นจะรับแรงดันประมาณ 100 kV ดังนั้นในการออกแบบจะต้องใช้ความต้านทานโอห์มสูงมาก เราควรเลือกค่าความต้านทานที่จะนำมาใช้อย่างต่ำ  $1 \text{ M}\Omega$  1 W ( $1 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ ) [1] เพราะทั้งกระแสที่มีขีดจำกัดและค่าความต้านทานที่มีผลต่อความสูญเสีย ซึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนค่อนข้างมากถ้าหากเราใช้ค่าความต้านทานไม่เหมาะสมกับขนาดแรงดันที่จะตกคร่อมตัวมัน ยิ่งในกรณีที่จะนำไปใช้ในงานที่วัดนานๆ ด้วยแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบให้เหมาะสม

ในโครงการนี้เราจะออกแบบให้ด้านแรงสูงมีแรงดันตกคร่อมประมาณ 100 kV ดังนั้นเราจึงคำนวณค่าความต้านทานที่ใช้ได้ดังนี้

$$(1 \text{ M}\Omega/\text{kV}) \times 100 \text{ kV} = 100 \text{ M}\Omega$$

ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความต้านทานย่อยรวมขนาด 100 M $\Omega$  โดยมีหลักการคือ ความสูญเสียที่เป็นความร้อนไม่มากจนเกินไป ดังสมการที่ 3.2

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 พบว่า ค่าพลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้คือ ถ้าค่าความต้านทานต่ำ พลังงานสูญเสียจะมาก ซึ่งจากค่าความต้านทานดังกล่าวจะเกิดพลังงานสูญเสียจากความร้อนทั้งหมด 100 W ซึ่งอาจเกิดความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป และถ้าใช้ค่าความต้านทานที่น้อยกว่านี้แล้วอาจส่งผลให้ตัวความต้านทานกลายเป็น โหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าได้และยังส่งผลไปถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอันเนื่องมาจากอุณหภูมิอีกด้วย

ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความต้านทานย่อยแบบฟิล์ม โลหะตัวละ  $1 \text{ M}\Omega$  ขนาด 2 W เปอร์เซนต์ผิดพลาด  $\pm 1\%$  โดยมีขนาดกระแส 1 mA

เหตุผลที่เลือกตัวความต้านทานแบบฟิล์ม โลหะเพราะมีค่าผิดพลาดน้อย และที่เลือกใช้ตัวความต้านทานย่อย  $1 \text{ M}\Omega$  ขนาด 2 W จำนวน 100 ตัวเพราะถ้าเลือกความต้านทานที่มีค่ามากเกินไปนั้น ก็จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมตัวความต้านทานสูงขึ้นจะมีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างแถว ถ้ามีค่าสูงมากอาจส่งผลทำให้เกิดการเบรคได้นี้ได้ แต่ถ้าใช้ความต้านทานค่าน้อย จะทำให้ความยาวของการต่ออันดับนั้นมีพื้นที่มากขึ้นไปด้วย ซึ่งจะมีผลต่อการจัดวางชั้นของตัวความต้านทานและมีผลกระทบต่อความยาวของท่อด้วย ส่วนเหตุผลที่เลือกใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 2 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากตัวความต้านทานสามารถทนต่อแรงดันตกคร่อมและมีค่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 3.2 ได้

ให้ตัวความต้านทานย่อยแต่ละตัวรับแรงดันสูงสุด (โดยสมมุติว่าการกระจายแรงดันสม่ำเสมอ) จากสมการที่ 3.2 จะได้

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$V = \sqrt{P \cdot R}$$

$$= \sqrt{2 \times 1 \times 10^6}$$

$$= 1414.21 \quad V$$

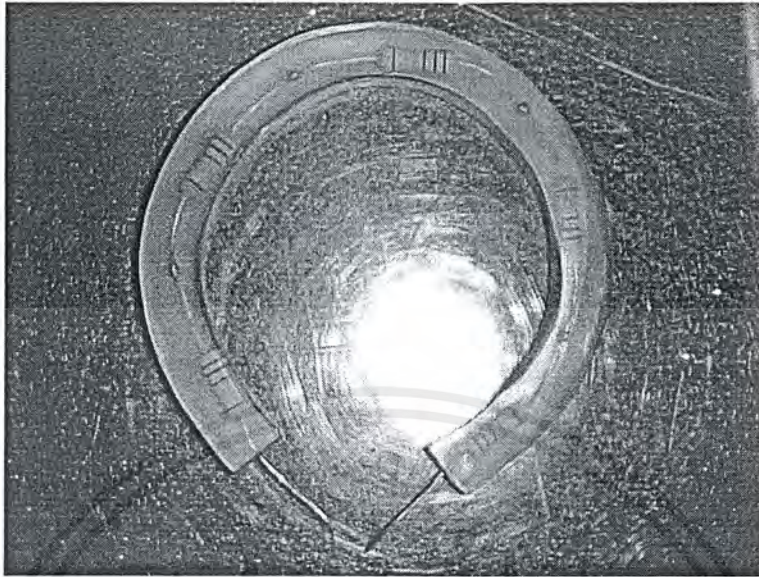
ดังนั้น ตัวความต้านทานย่อยแต่ละตัวสามารถรับแรงดันสูงสุดได้ถึง 1414.21 V แต่ในการปฏิบัติงานจริง ตัวความต้านทานย่อยแต่ละตัวจะรับแรงดัน (โดยสมมุติว่าการกระจายแรงดันสม่ำเสมอ)

$$= \frac{100 \times 10^3}{100}$$

$$= 1 \times 10^3 \quad V$$

ดังนั้น ในการปฏิบัติงานจริง ตัวความต้านทานย่อยแต่ละตัวจะรับแรงดันเพียง  $1 \times 10^3$  V ซึ่งต่ำกว่าแรงดันที่ตกคร่อมสูงสุดคือ 1414.21 V ทำให้ตัวความต้านทานย่อยแต่ละตัวสามารถทนต่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันและมีกำลังเพียงพอที่จะทนทานต่อความร้อนที่เกิดขึ้นได้

จากค่าที่คำนวณได้ สรุปคือ ความต้านทานภาคแรงสูง จะประกอบด้วยตัวความต้านทานย่อยแบบฟิล์มโลหะ ขนาด  $1 \text{ M}\Omega$  2 W จำนวน 100 ตัว โดยแบ่งตัวความต้านทานย่อยที่ต่อออกเป็นชั้นๆ ชั้นละ 5 ตัว ซึ่งในแต่ละชั้นจะทำการหล่อทับด้วยเรซิน ดังรูปที่ 3.2 ในแต่ละชั้นจะต่ออนุกรมกันบนแผ่นอาคริลิกใสแล้วจึงใช้น้ำมันหม้อแปลงในการฉนวน

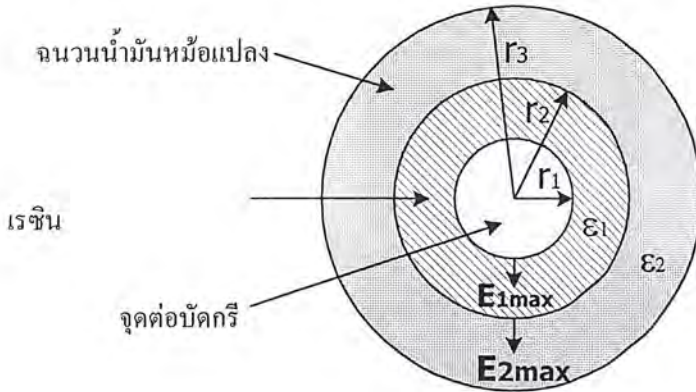


รูปที่ 3.2 แสดงความต้านทานย่อยในแต่ละชั้น

### 3.2.2 การออกแบบระยะห่างระหว่างชั้นของความต้านทานภาคแรงสูง

เนื่องจากในโครงการนี้ได้ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ระหว่างแผ่นอาคริลิกใสที่จัดวางตัวความต้านทานย่อย แต่เนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงมีผลทำให้ตัวความต้านทานย่อยที่ต่ออนุกรมอยู่ภายในเกิดความเสียหายได้ เช่น น้ำมันหม้อแปลงซึมเข้าไปในตัวความต้านทานย่อยนั้นทำให้ค่าความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อทับตัวความต้านทานย่อยด้วยเรซิน โดยเราต้องคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวความต้านทานและความเครียดของสนามไฟฟ้าด้วย

ในการออกแบบระยะห่างระหว่างชั้นในแต่ละชั้นของแผ่นอาคริลิกใส่นั้นจะมีรูปแบบการคำนวณดังต่อไปนี้



$$E_{1max|_{r=r_1, \epsilon=\epsilon_1}} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \tag{3.3}$$

$$E_{2max|_{r=r_2, \epsilon=\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \tag{3.4}$$

โดย  $E_{1max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนเรซิน

$E_{2max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

$r_1$  คือ รัศมีของจุดบัดกรี

$r_2$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดต่อบัดกรีถึงฉนวนเรซิน

$r_3$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดต่อบัดกรีถึงฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

$U$  คือ ความต่างศักย์ของจุดบัดกรีระหว่างชั้น

$\epsilon_1$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนเรซิน

$\epsilon_2$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

จากตาราง Siemens Technical, 1982 [1]

$$\epsilon_1 = 3.9$$

$$\epsilon_2 = 2.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_0(\text{เรซิน}) = 20\text{-}45 \text{ kV/mm}$$

จากการทดสอบ

$$E_0(\text{น้ำมันหม้อแปลง}) = 34.30 \text{ kV/cm}$$

โดยจะทำการจัดวางตัวความต้านทานย่อย ซึ่งเป็นตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะตัวละ 1 M $\Omega$  ขนาด 2 W บนแผ่นอาคริลิกใส ชั้นละ 5 ตัว

$$\text{ดังนั้น} \quad U = 10 \text{ kV}$$

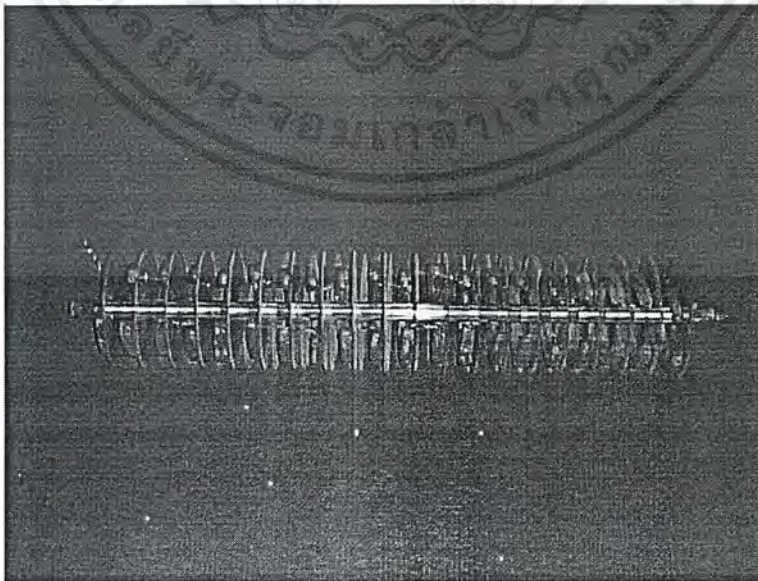
$$r_1 = 0.3 \text{ cm}$$

$$r_2 = 1.5 \text{ cm}$$

$$r_3 = 3.0 \text{ cm}$$

จากการคำนวณโดยใช้สมการ (3.3) และ (3.4) จะได้อ่า  $E_{1\text{max}} = 28.54 \text{ kV/cm}$  และ  $E_{2\text{max}} = 8.9 \text{ kV/cm}$

โดยเมื่อนำค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{\text{max}}$ ) ที่คำนวณได้ดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ( $E_0$ ) แต่ละชนิดแล้ว ปรากฏว่า  $E_{\text{max}} < E_0$  เพราะฉะนั้นการออกแบบระยะห่างระหว่างแผ่นอาคริลิกใสเป็น 3 cm จึงสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย จะเห็นได้ว่าเราต้องทำการเลือกระยะห่างระหว่างชั้นและจำนวนตัวความต้านทานแต่ละชั้น โดยต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและโครงสร้างภายนอกด้วย ดังรูปที่ 3.4

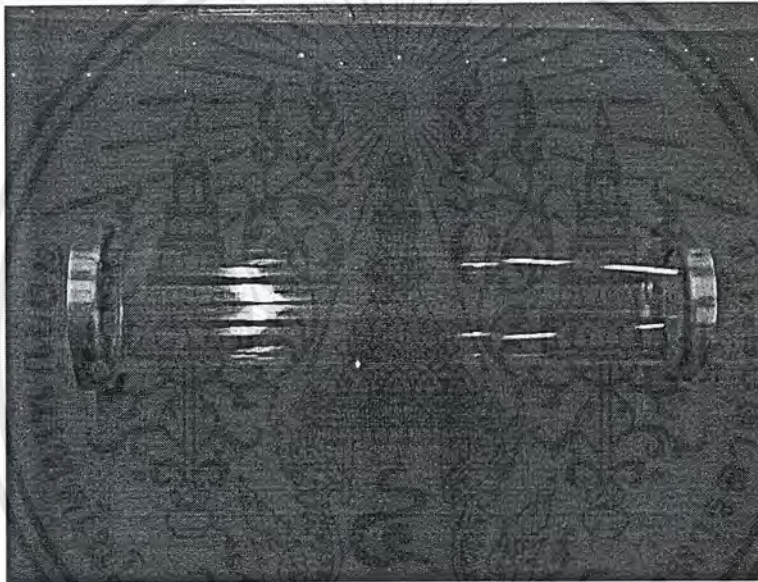


รูปที่ 3.4 แสดงความต้านทานภาคแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การหาระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรด

เนื่องจากองค์ประกอบด้านแรงสูงจะต้องรับแรงดันสูงมาก ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงระยะของฉนวนที่คงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวที่ฉนวน โดยในสภาวะความชื้นน้อยในกรณีของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นระยะฉนวนไม่ควรเกิน 3 kV/cm สำหรับฉนวนอากาศ [3] ภาคแรงสูงมีแรงดันตกคร่อมประมาณ 100 kV ดังนั้นระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรดทั้งสองควรจะห่างประมาณ 33.3 cm เป็นอย่างน้อย แต่เนื่องจากเรากำหนดถึงผลของความชื้นและโครงสร้างภายในเราจึงใช้ระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรดประมาณ 66 cm ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงระยะห่างระหว่างหัวอิเล็กโทรด

### 3.3 การออกแบบความต้านทานภาคแรงต่ำ

เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ จะมีแรงดันต่ำพอที่จะสามารถใช้เครื่องวัดแรงดันวัดได้ การฉนวนจึงเป็นแบบธรรมดา ไม่ต้องใช้เทคนิคการฉนวนแรงสูง โดยต่ออนุกรมความต้านทานภาคแรงต่ำนี้กับความต้านทานภาคแรงสูง ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำจะใช้ชนิดเดียวกับที่ใช้ทำความต้านทานภาคแรงสูง คือเป็นแบบฟิล์มโลหะ โดยมีค่าความต้านทานตัวละ 1 MΩ ขนาด 2 W เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ

สำหรับค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ สามารถออกแบบได้โดยคำนึงถึงเครื่องวัดภาคแรงต่ำ,

อันตรายต่อผู้วัดและความสะดวกในการคำนวณหาแรงดันสูงที่จะวัด โดยโครงการนี้ได้ทำการออกเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

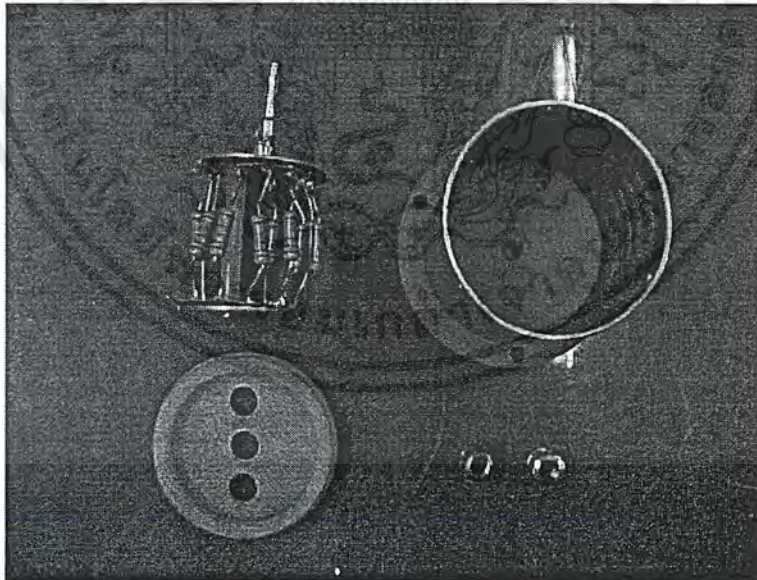
แบบให้สัญญาณที่คร่อมภาคแรงต่ำ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 100 V เมื่อแรงดันสูงที่วัดเท่ากับแรงดันกำหนด 100 kV

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad V &= IR \\ R &= \frac{V}{I} \\ &= \frac{100}{1 \times 10^{-3}} \\ &= 100 \times 10^3 \quad \Omega \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น จะต้องใช้ตัวความต้านทานต่อขนานกัน

$$\begin{aligned} &= \frac{1 \times 10^6}{100 \times 10^3} \\ &= 10 \quad \text{ตัว} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการออกแบบความต้านทานภาคแรงต่ำจะใช้ตัวความต้านทานย่อยแบบฟิล์มโลหะขนาด 1 M $\Omega$  2 W จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำเป็น 100 k $\Omega$



รูปที่ 3.6 แสดงความต้านทานภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) สามารถหาได้ดังนี้  
จากสมการ (3.1)

$$V_{HV} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \times V_{LV}$$

เนื่องจาก

$$S.F. = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$V_{HV} = S.F. \times V_{LV} \quad (3.6)$$

เพราะฉะนั้น จะได้

$$S.F. = \frac{V_{HV}}{V_{LV}} \quad (3.7)$$

โดยที่

S.F. คือ สเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดัน

$R_1$  คือ ค่าความต้านทานภาคแรงสูงของตัวแบ่งแรงดัน

$R_2$  คือ ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำของตัวแบ่งแรงดัน

$V_{HV}$  คือ แรงดันที่ต้องการวัด

$V_{LV}$  คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด

จะได้

$$S.F. = \frac{100 \times 10^6}{100 \times 10^3} + 1$$

$$= 1001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันที่สร้างขึ้นได้ออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 1001 แต่ในการสร้างจริงจะพยายามให้ค่าอัตราส่วนแรงดันมีค่าเท่ากับ 1000 พอดี โดยเลือกหาตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะที่มีค่าสูงกว่าปกติ นำมาทำเป็นความต้านทานภาคแรงต่ำ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการแปลงแรงดัน แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ เราไม่สามารถสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานนี้ให้มีค่าสเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 1000 ได้พอดี ทำได้แค่เพียงให้ค่าใกล้เคียง 1000 มากที่สุด

### 3.4 การออกแบบอิเล็กโตรด

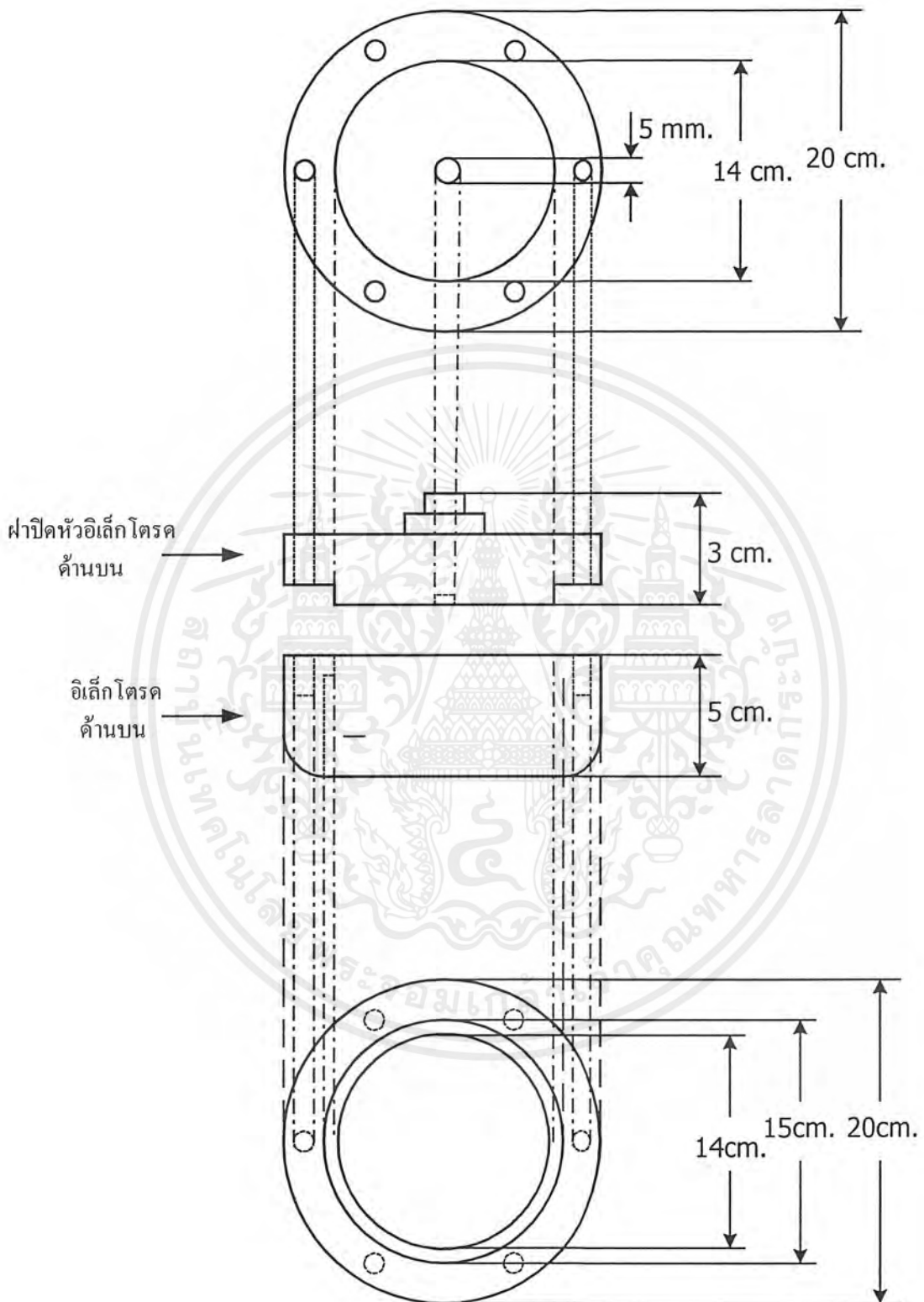
การออกแบบฝาปิดอิเล็กโตรดจะมีผลโดยตรงต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ดังนั้นเราต้องออกแบบให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยสร้างอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.0 cm เพราะขนาดท่อที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15.0 cm โดยขอบโค้งของอิเล็กโตรดต้องมีความสม่ำเสมอไม่มีเหลี่ยมเกิดขึ้น ซึ่งเราจะสร้างอิเล็กโตรดระนาบของโรกอฟสกี (Rogowski Profile) ซึ่งอิเล็กโตรดระนาบของโรกอฟสกีเป็นอิเล็กโตรดที่มีขอบตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าที่ ทำให้สนามไฟฟ้านอกแผ่นมีค่าน้อยกว่าค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอภายในระหว่างอิเล็กโตรด

รูปแบบอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหมายถึงมีความเครียดสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad (3.8)$$

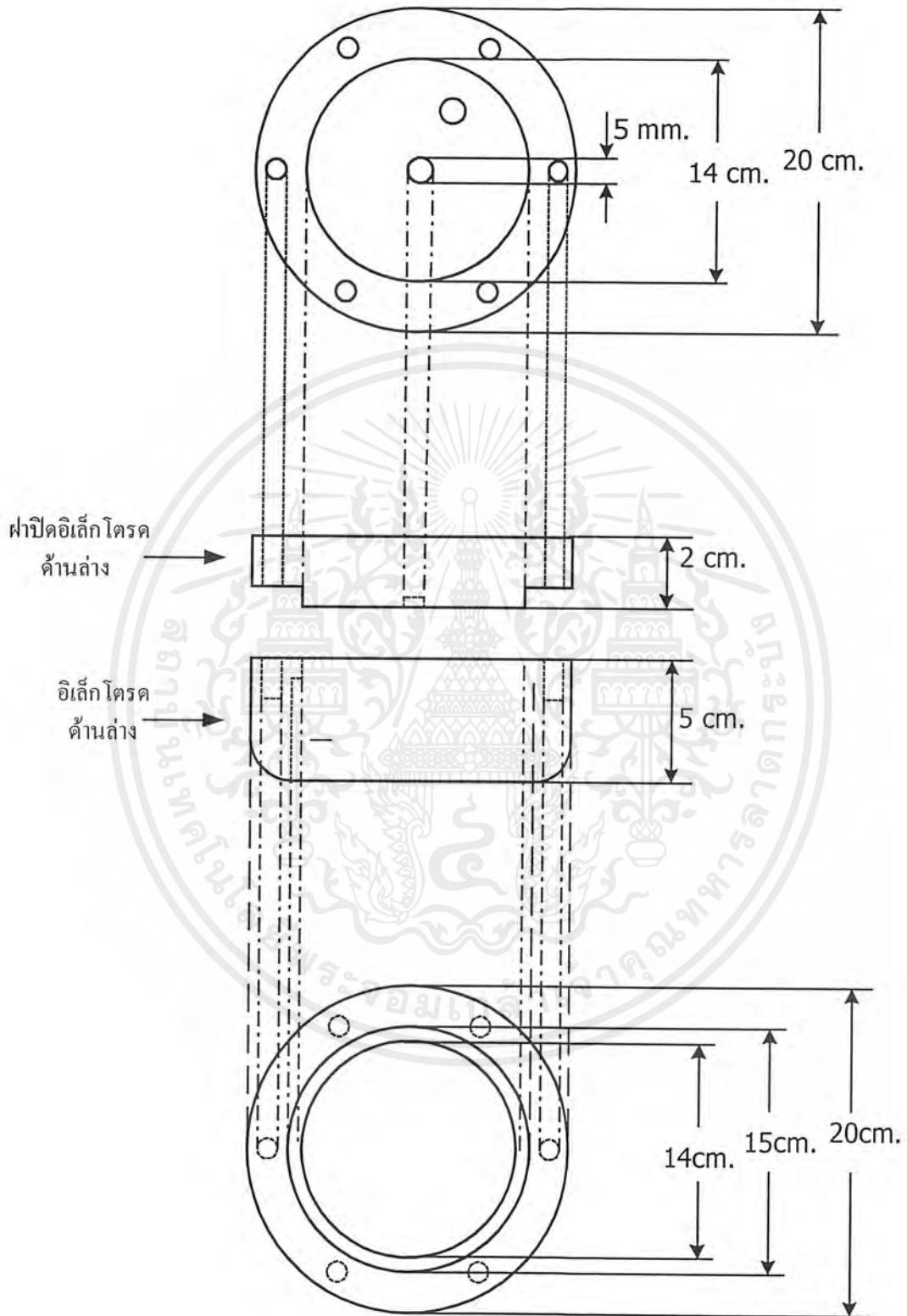
เมื่อ	U	คือ แรงดันที่ป้อนเข้าระหว่างอิเล็กโตรด
	d	คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
	E	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

อิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดแตกต่างกันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอิเล็กโตรดเป็นสำคัญ ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดเราต้องกึ่งอิเล็กโตรดให้สม่ำเสมอที่สุดเพื่อที่จะป้องกันการเบรคควานระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง



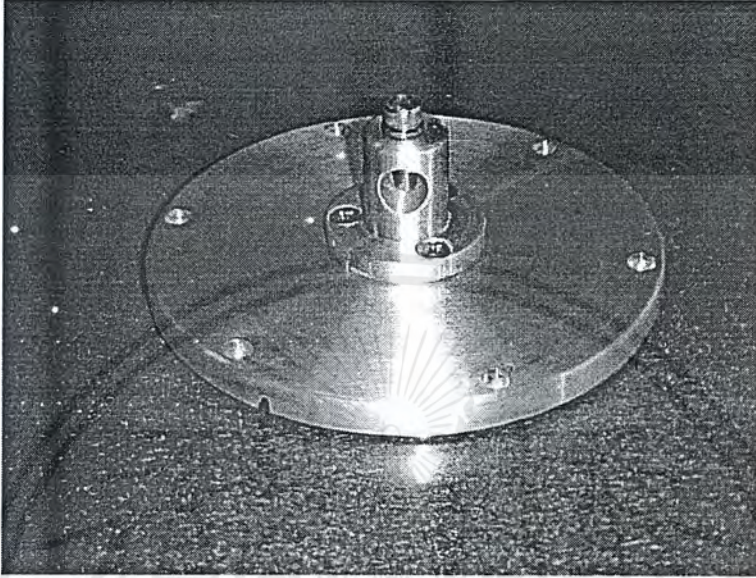
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

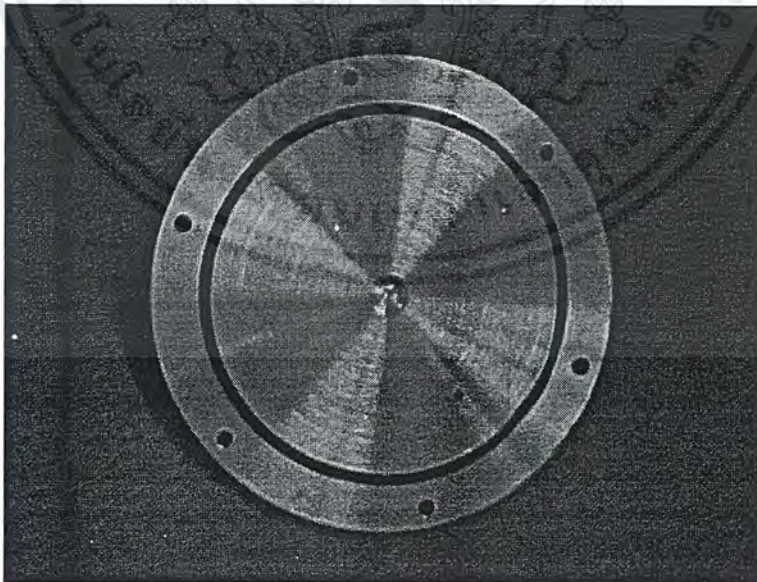


รูปที่ 3.8 โครงสร้างของอิเหล็ก ไตรศด ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงหัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านบน



รูปที่ 3.10 แสดงหัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 รูปการสร้างตัวแบ่งแรงดัน

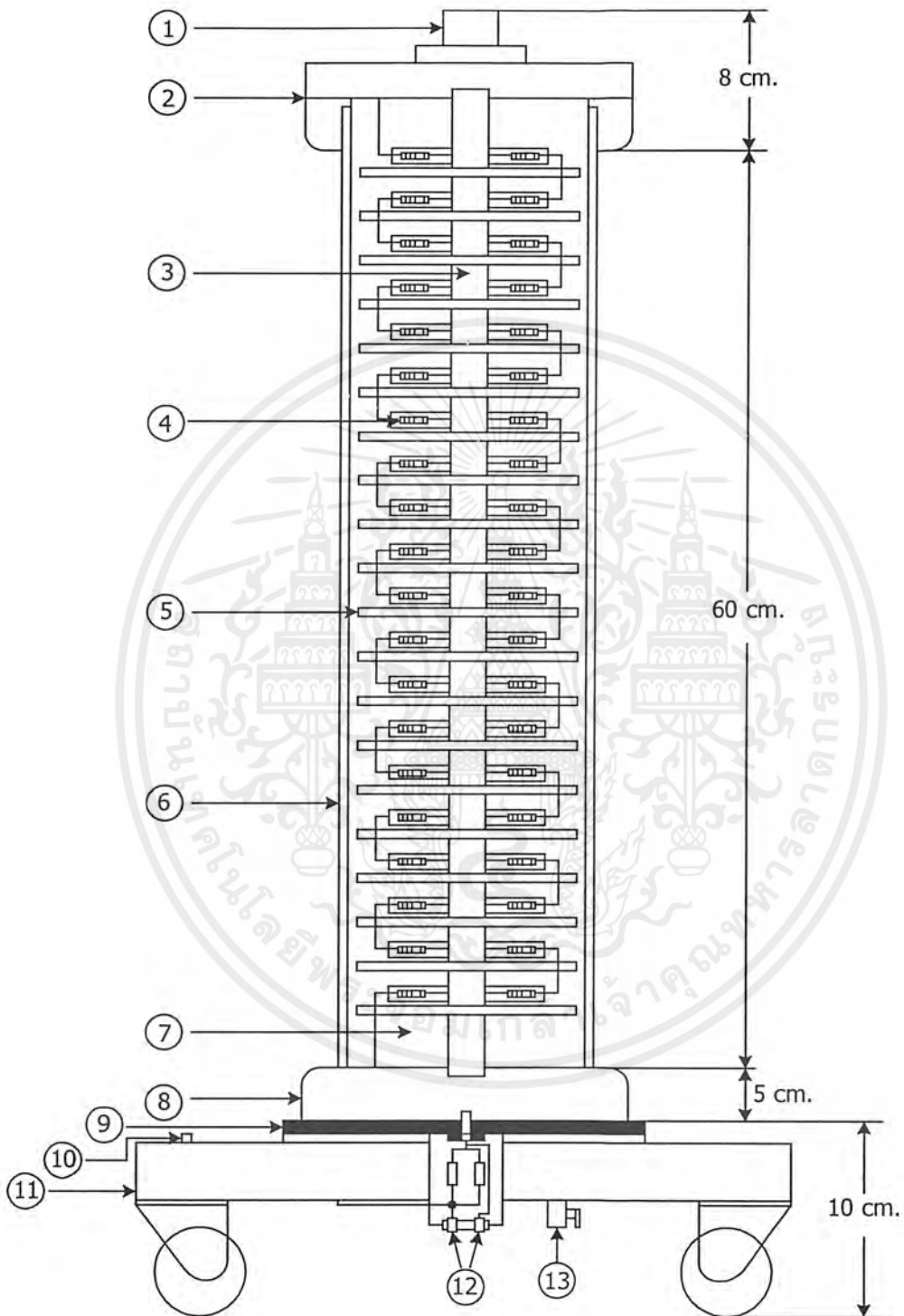
ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานนี้ จะประกอบไปด้วยการนำตัวความต้านทานมาต่ออนุกรมกันบนแผ่นอาคริลิกใสซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 cm โดยวางตัวความต้านทานชั้นละ 5 ตัว ซึ่งทำการหล่อเรซินเคลือบตัวความต้านทานทั้งชั้น ลักษณะการจัดวางเป็นแบบกั้นหอย เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความเหนียวน้ำที่เกิดขึ้น ระยะห่างแต่ละชั้น 3 cm จำนวน 20 ชั้น ยึดแผ่นอาคริลิกใสด้วยแท่งอาคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 mm ทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่ออาคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 cm หนา 5.0 mm ปิดหัวท้ายด้วยอลูมิเนียมที่ลึงจนเรียบสม่ำเสมอซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรดภายในท่ออาคริลิกใสบรรจุด้วยน้ำมันหม้อแปลงที่ได้มาตรฐาน โดยขั้นตอนการบรรจุน้ำมันหม้อแปลงดังกล่าวต้องไม่ทำให้เกิดฟองอากาศ

ส่วนด้านแรงต่ำจะประกอบไปด้วยตัวความต้านทานจำนวน 10 ตัวต่อขนานกันอยู่ในกล่องทองเหลือง ภายในต้องมีระบบสายดินต่อออกมาข้างนอกด้วย โดยจะต้องนำด้านแรงต่ำนี้ต่ออนุกรมกับด้านแรงสูง

ส่วนประกอบ	ขนาด	หน่วย
ความต้านทานภาคแรงสูง	100	เมกะโอห์ม
ความต้านทานภาคแรงต่ำ	100	กิโลโอห์ม
พิกัดแรงดันสูง	100	กิโลโวลต์
พิกัดกระแส	1	มิลลิแอมแปร์
อัตราส่วนสเกลเฟกเตอร์	1000	-
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออาคริลิกใส	15.0	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอาคริลิกใส	15.0	มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นอาคริลิกใส	12.5	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอิเล็กโตรด	20.0	เซนติเมตร
ความยาวของท่ออาคริลิกใส	65.0	เซนติเมตร
ความสูงของตัวแบ่งแรงดัน	90.0	เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 รูปการออกแบบตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

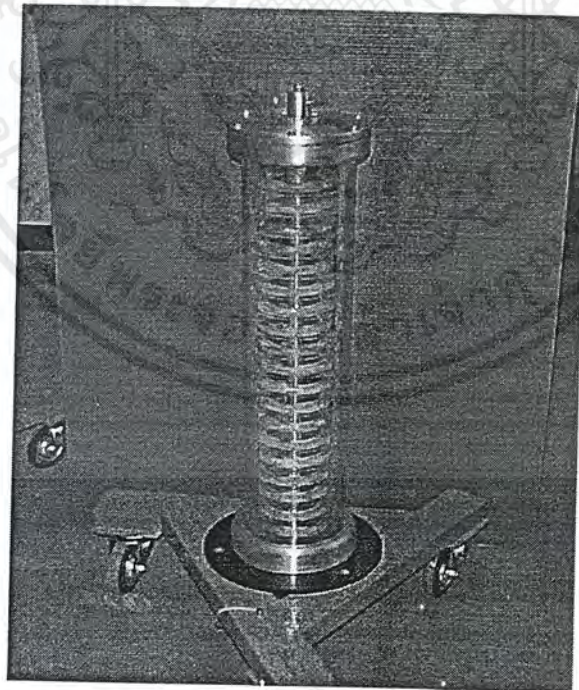


รูปที่ 3.11 แสดง โครงสร้างทั้งหมดของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

1. จุดเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง
2. อิเล็กโตรดด้านบน
3. แกนยึดแผ่นอะคริลิกและตัวต้านทาน
4. ตัวต้านทานที่หล่ออยู่ในเรซิน
5. แผ่นอะคริลิก
6. ท่ออะคริลิกใส
7. น้ำมันหม้อแปลง
8. อิเล็กโตรดด้านล่าง
9. แผ่นเมกาไลต์
10. จุดเชื่อมต่อกาวานต์
11. ฐานล้อย
12. จุดต่อเข้ากับเครื่องวัด
13. ท่อเดรน



รูปที่ 3.12 ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทดลองเกี่ยวกับการสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยส่วนนี้จะทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลมาใช้ในการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ซึ่งจะทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และในส่วนที่สองคือ ส่วนที่ทดลองเกี่ยวกับการทดสอบในการใช้งานของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานให้ได้ตามมาตรฐาน โดยส่วนนี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานว่าได้มาตรฐานตามที่กำหนดหรือไม่ (มาตรฐาน IEC 60-2 (1994)) ซึ่งในส่วนนี้จะต้องไปทำการทดสอบที่แผนกทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) มีรายละเอียดเกี่ยวกับการทดลองดังนี้

#### 1. การทดลองเกี่ยวกับการสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

1.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

1.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการเปรียบเทียบ

2. การทดลองเกี่ยวกับการทดสอบในการใช้งานของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

2.1 การทดลองที่ 3 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง

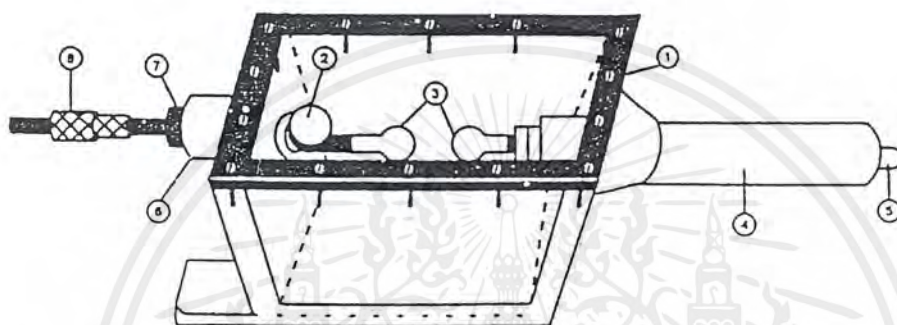
2.2 การทดลองที่ 4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่ระดับแรงดันต่างๆ

2.3 การทดลองที่ 5 การทดสอบความต่อเนื่องในการใช้งานเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลองที่ 1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

เป็นการทดลองหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อจะนำค่าที่ได้ไปเป็นข้อมูลในการออกแบบระยะห่างระหว่างชั้นของความต้านทานภาคแรงสูง คือระยะห่างระหว่างชั้นในแต่ละชั้นจะต้องมากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ โดยใช้ชุดภาชนะรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดตามมาตรฐาน IEC 156 ในการทดสอบ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดภาชนะรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ใช้ในการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

เมื่อ

1. ตัวภาชนะ
2. ช่องเติมน้ำมัน
3. อิเล็กโตรดแบบทรงกลม
4. ปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูง
5. ปลายแรงสูง
6. ปลอกนำสายไฟด้านต่อลงดิน
7. น็อตล็อกแกนตัวนำ
8. ปลายด้านต่อลงดิน

ผลการทดลอง

ที่อุณหภูมิ 28 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 80%

ระยะ แกป (mm)	แรงดันเบรคดาวน์ (kV)					แรงดันเบรค- ดาวน์ต่อระยะ แกป (kV/mm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
2	9.3	10.5	7.5	9.3	9.15	4.58
3	9.9	8.1	9.6	9.9	9.38	3.13
4	9.6	9.3	11.7	10.8	10.35	2.59
ค่าเฉลี่ยของความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ ( $E_b$ )						3.43

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะแกปต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

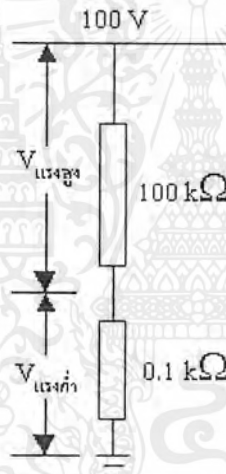
### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.1 จะได้ค่าเฉลี่ยของความคงทนต่อแรงดันเบรคควาน์สำหรับฉนวนน้ำมัน หม้อแปลงประมาณ 3.43 kV/mm หรือ 34.3 kV/cm โดยตามมาตรฐาน คุณสมบัติของฉนวนน้ำมัน หม้อแปลงจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคควาน์ ที่อุณหภูมิ 20 °C เท่ากับ 10-25 kV/mm [1] ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานแล้ว จะพบว่ามีย่าน้อยกว่ามาตรฐาน ดังนั้นในการออกแบบสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ต้องออกแบบค่าความเครียดสนาม ไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ระหว่างชั้นให้มีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคควาน์ ( $E_b$ ) ของฉนวนน้ำมัน หม้อแปลงที่ได้จากการทดลอง จึงจะไม่เกิดการเบรคควาน์ระหว่างชั้น รายละเอียดการออกแบบหาระยะห่างระหว่างชั้นแสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.2



## การทดลองที่ 2 การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยใช้ โปรแกรม PSPICE ในการเปรียบเทียบ

ก่อนที่จะทำการจัดสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV สำหรับแรงดัน กระแสตรงนั้น จะต้องมีการทำการทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขึ้น ก่อน ว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามทฤษฎีแบ่งแรงดันหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการเปรียบเทียบ เพื่อจำลองการทำงานและคุณสมบัติของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ซึ่งแบบจำลองที่ จัดสร้างขึ้นนั้นได้ทำการย่อส่วนลงมา 1000 เท่าจากตัวแบ่งแรงดันที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดย ความต้านทานภาคแรงสูงมีค่า 100 k $\Omega$  และความต้านภาคแรงต่ำมีค่า 0.1 k $\Omega$  ซึ่งมีวงจรดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

### ผลการทดลอง

คุณสมบัติ	METER	PSPICE
ศักดาต้านแรงต่ำ (mV)	98.9	99.9
กระแส (mA)	0.99	0.99

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

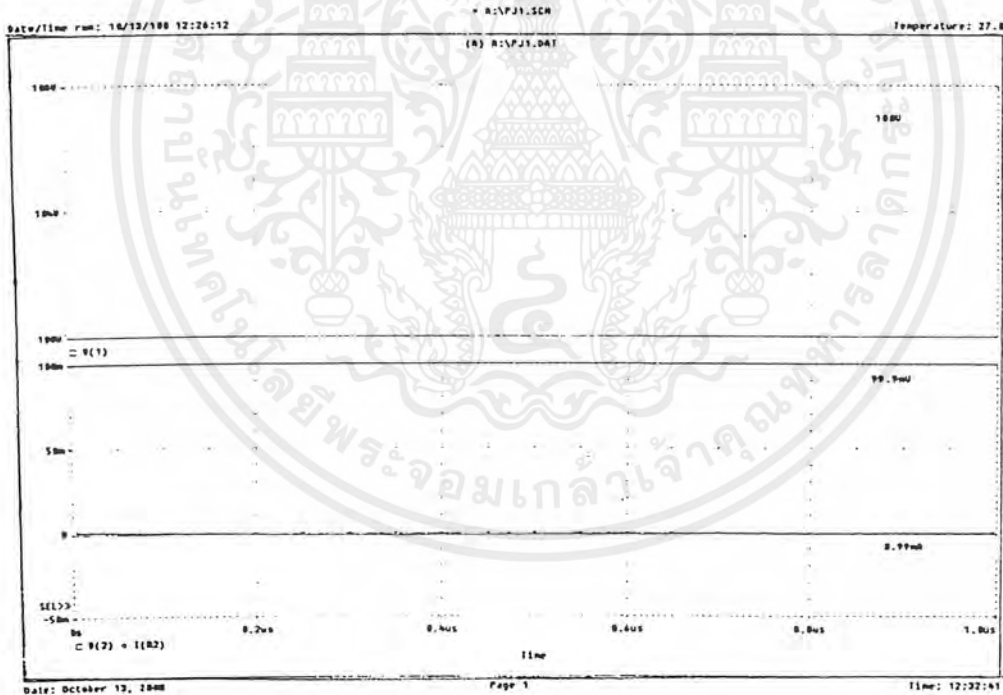
วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตาราง จะได้

$$\% \text{ความผิดพลาด} = \frac{|\text{ศักาด้านแ รงต่ำจาก METER} - \text{ศักาด้านแ รงต่ำจาก PS PICE}|}{\text{ศักาด้านแ รงต่ำจาก PS PICE}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$= \frac{1}{99.9} \times 100 = 1\%$$

ดังนั้นจากค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้ของแบบจำลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่จะทำการสร้างเกิดความผิดพลาดในการวัดไม่มากนักและมีคุณสมบัติเป็นไปตามทฤษฎีแบ่งแรงดัน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน โดยใช้โปรแกรม PSPICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลองที่ 3 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง

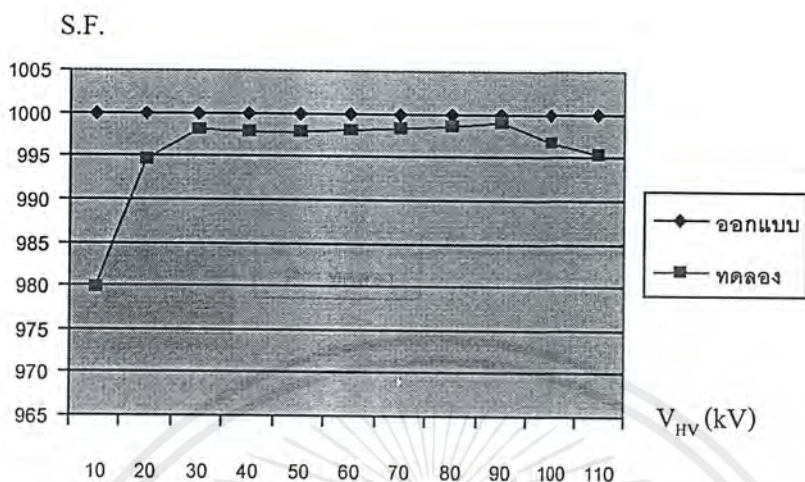
เมื่อทำการจัดสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานแล้ว จะต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยนำตัวแบ่งแรงดันนี้ไปวัดเทียบกับระบบแรงดันอ้างอิงที่ได้มาตรฐาน (แผนกทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี)) ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของสเกลแฟกเตอร์ตามสมการที่ (2.3) ที่คำนวณได้ต้องมีค่าน้อยกว่า 1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ( $S.F_m$ ) ตามสมการที่ (3.7) ดังที่ได้กำหนดไว้ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) โดยข้อมูลในการทดลองที่ระดับแรงดันต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข

#### ผลการทดลอง

$V_{HV}$ (เฉลี่ย) (kV)	$V_{LV}$ (เฉลี่ย) (V)	$S.F_m$	S.D.
10.02	10.23	979.76	1.43
20.00	20.10	994.53	2.81
30.00	30.10	998.04	5.98
40.10	40.20	997.76	1.42
50.10	50.20	997.81	1.14
60.00	60.10	998.17	1.45
70.00	70.10	998.29	1.13
80.00	80.10	998.63	0.92
90.10	90.20	999.00	0.97
100.10	100.40	996.70	0.67
110.00	110.50	995.22	0.64
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ย			995.81
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ย			9.96
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย			1.69

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ออกแบบกับค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ย ที่ระดับแรงดันต่างๆ

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ระดับแรงดันต่างๆ ทำให้สามารถหาค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยได้เท่ากับ 995.81 ซึ่งถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้น และจากการทดลองหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำให้ได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 1.69

เนื่องจากมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดไว้ว่า ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานต้องมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) น้อยกว่า 1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F<sub>m</sub>) โดยค่า 1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F<sub>m</sub>) เท่ากับ 9.96

ดังนั้นสรุปได้ว่า ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้นมีค่าสเกลแฟกเตอร์ 995.81 ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV  
ที่ระดับแรงดันต่างๆ

เป็นการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่ระดับแรงดันต่างๆ โดยจะทำการป้อนแรงดันทั้งไฟบวกและไฟลบ แล้ววัดค่าแรงดันด้านแรงดันเปรียบเทียบกับค่าแรงดันด้านแรงดันที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งจะต้องมีค่าเปอร์-เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 3\%$  ตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดไว้

โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ความผิดพลาด} = \frac{|V_{LV(\text{ที่วัดได้})} - V_{LV(\text{ออกแบบ})}|}{V_{LV(\text{ออกแบบ})}} \times 100 \quad (4.2)$$

ผลการทดลอง

ไฟบวก

ที่อุณหภูมิ 28 °C

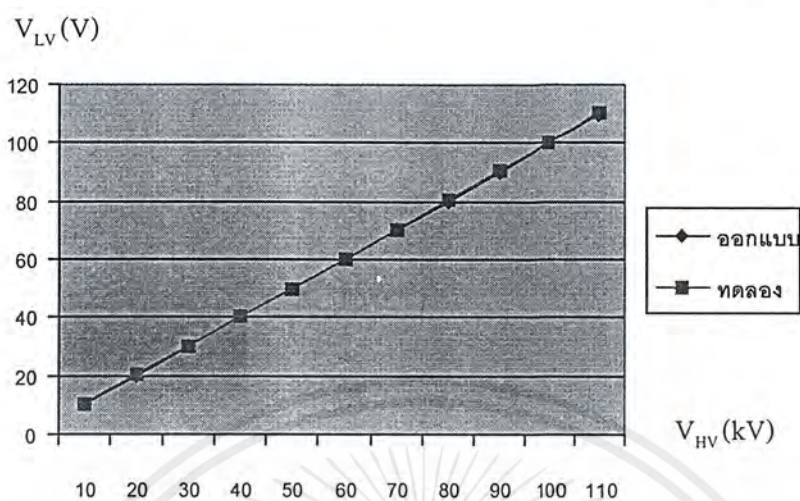
ความชื้นสัมพัทธ์ 78.9%

$V_{LV(\text{ออกแบบ})}$ (V)	$V_{LV(\text{ที่วัดได้})}$ (V)	% ความผิดพลาด
10.02	10.10	0.80
20.10	20.20	0.50
30.00	30.10	0.33
40.10	40.10	0.00
49.90	50.10	0.40
60.20	60.30	0.17
70.00	70.20	0.29
80.01	80.30	0.36
90.10	90.40	0.33
100.05	100.50	0.45
110.00	110.50	0.45
% ความผิดพลาดเฉลี่ย		0.37

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

ด้านไฟบวก ที่ระดับแรงดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ออกแบบกับค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ได้จากการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันด้านไฟบวก

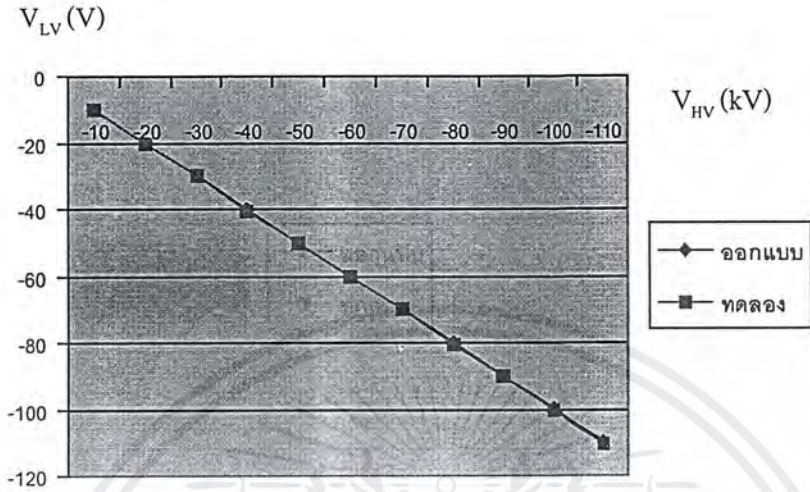
ไฟลบ

ที่อุณหภูมิ 28 °C  
ความชื้นสัมพัทธ์ 78.9%

V <sub>LV</sub> (ออกแบบ) (V)	V <sub>LV</sub> (ที่วัดได้) (V)	% ความผิดพลาด
-10.00	-10.10	1.00
-20.20	-20.30	0.50
-30.00	-30.10	0.33
-40.20	-40.30	0.25
-50.10	-50.40	0.60
-60.00	-60.30	0.50
-69.90	-70.10	0.29
-80.10	-80.30	0.25
-90.00	-90.20	0.22
-99.90	-100.20	0.30
-109.90	-110.50	0.55
% ความผิดพลาดเฉลี่ย		0.38

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานด้านไฟลบ ที่ระดับแรงดันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ออกแบบกับค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ได้จากการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันด้านไฟลบ

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

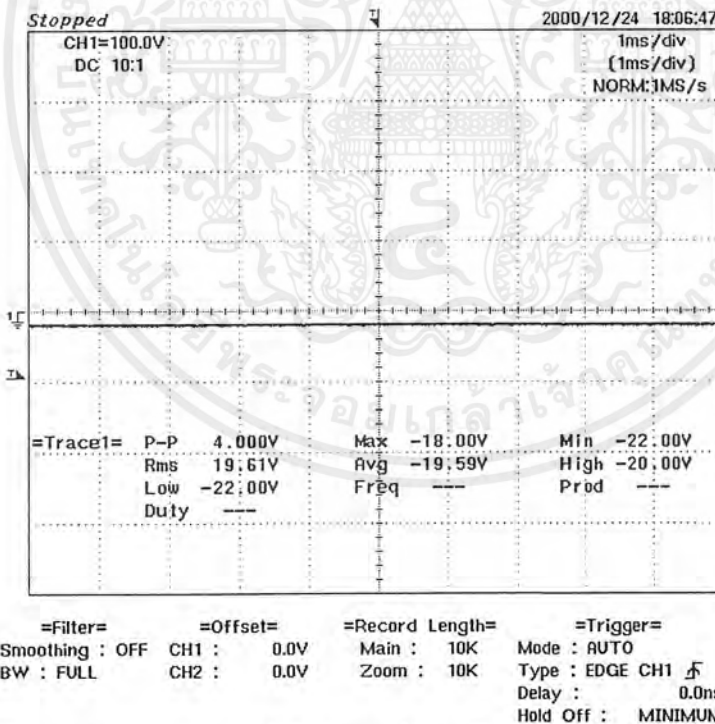
จากผลการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันไฟบวก ค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่วัดได้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.37 และเมื่อป้อนแรงดันไฟลบ ค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่วัดได้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.38 ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้งสองมีค่าไม่เกิน  $\pm 3\%$  ตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดไว้ และจากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นตามที่มาตรฐานกำหนด ทั้งแรงดันไฟบวกและแรงดันไฟลบ

การทดลองที่ 5 การทดสอบความต่อเนื่องในการใช้งานเป็นเวลา 30 นาที

ในการใช้งานเครื่องวัดแรงดันสูงกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้นนี้จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการใช้งานในแต่ละครั้งด้วย ว่าเมื่อใช้ในการวัดอย่างต่อเนื่องแล้ว ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวความต้านทานจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดผิดพลาดเกินค่ามาตรฐานหรือไม่ ดังนั้นจึงทำการทดสอบการใช้งานต่อเนื่องที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นระยะเวลา 30 นาที และบันทึกกราฟโดยใช้ออสซิลโลสโคป ได้ผลการทดลองที่ระดับแรงดัน 20, 50, 100 และ 110 kV ตามลำดับ ดังแสดงในผลการทดลอง ส่วนที่ระดับแรงดันอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ค

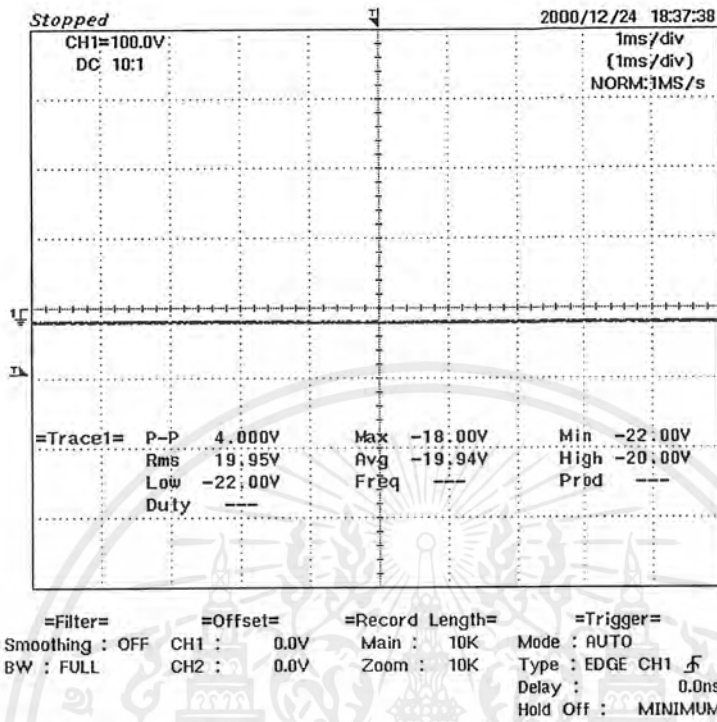
ผลการทดลอง

ที่ระดับแรงดัน 20 kV



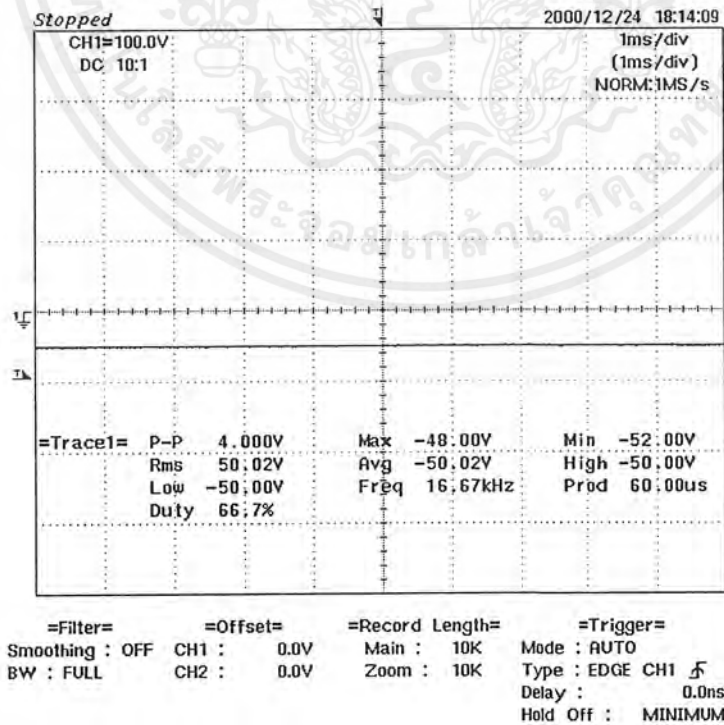
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 20 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



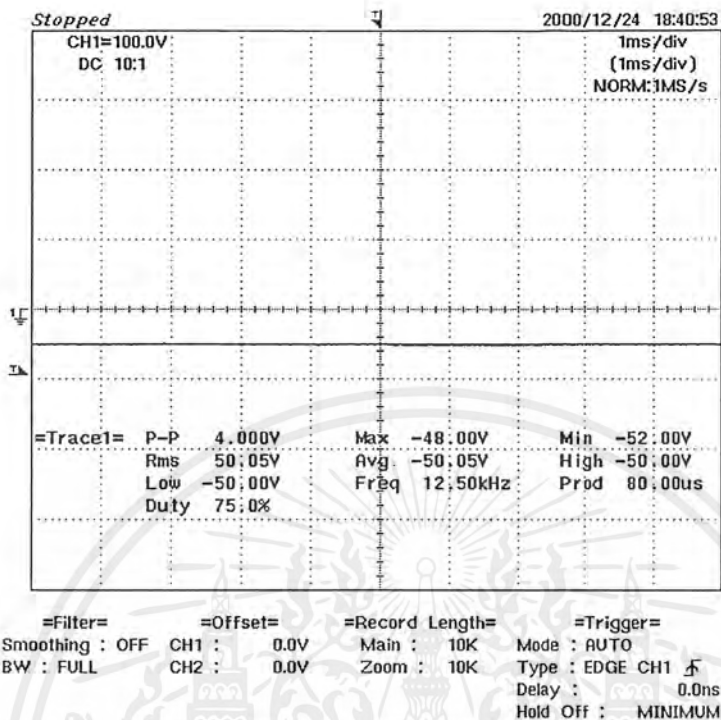
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 20 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 50 kV



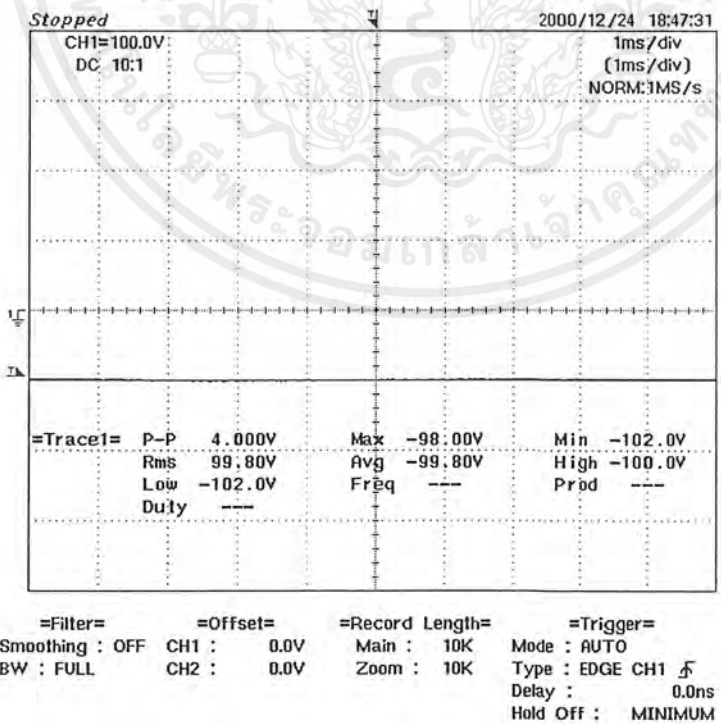
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 50 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



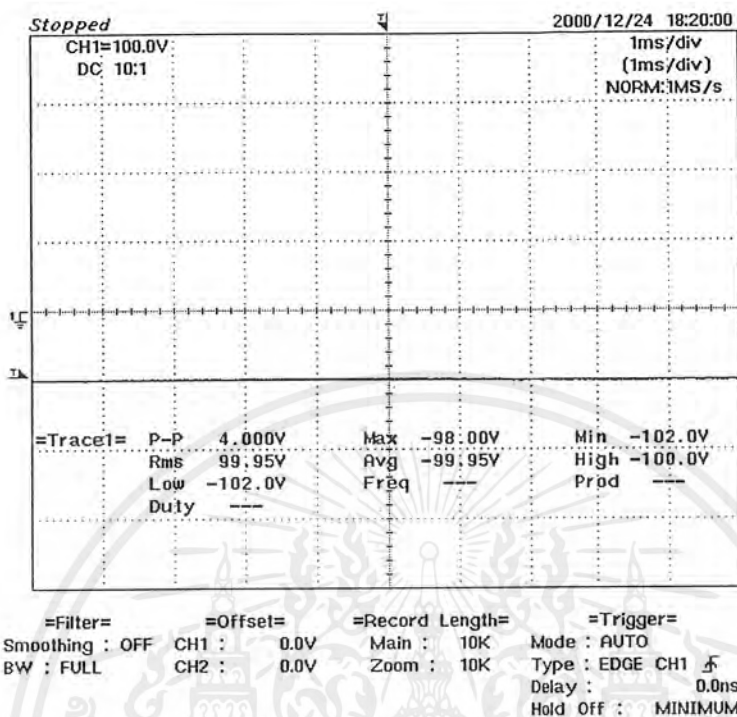
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 50 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 100 kV



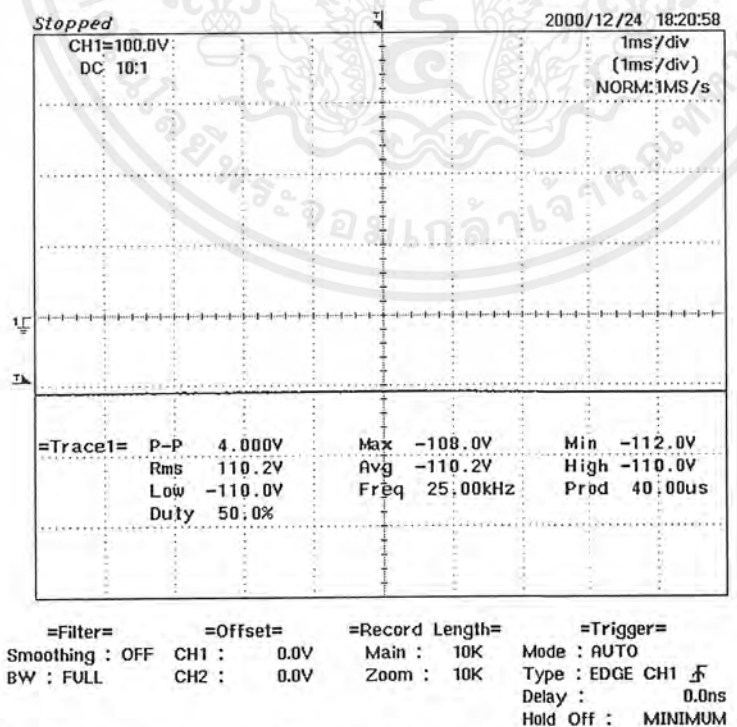
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



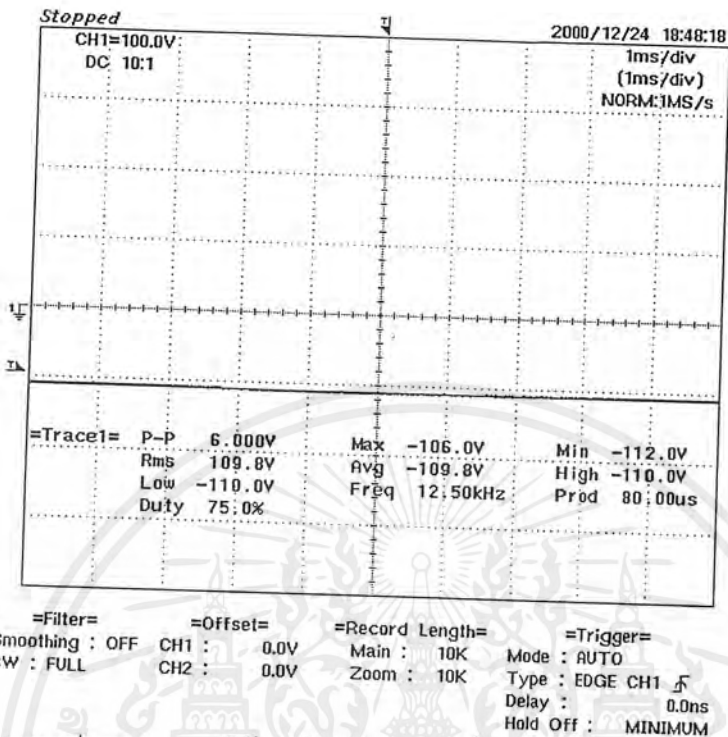
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 110 kV



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV เป็นเวลา 30 นาที

ระดับแรงดัน (kV)	แรงดันด้านแรงต่ำ ตอนเริ่มต้น (V)	แรงดันด้านแรงต่ำ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที (V)	% ความผิดพลาด
20	19.61	19.95	1.73
50	50.02	50.05	0.05
100	99.80	99.95	0.15
110	109.80	110.20	0.36

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับแรงดัน 20, 50, 100 และ 110 kV

**วิเคราะห์ผลการทดลอง**

จากตารางที่ 4.6 จะพบว่า ในการใช้งานตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ที่ระดับแรงดันต่างๆ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน  $\pm 3\%$  ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) แสดงว่าตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานต่อเนื่องได้ 30 นาที โดยไม่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

1. จากการสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV สำหรับแรงดันกระแสตรง นี้ จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ความต้านทานภาคแรงสูงและความต้านทานภาคแรงต่ำ ซึ่งความต้านทานภาคแรงสูงเป็นการนำตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด  $1\text{ M}\Omega$  2 W จำนวน 98 ตัว มาต่ออนุกรมกันบนแผ่นอะคริลิกใส โดยวางตัวความต้านทานชั้นละ 5 ตัวและทำการหล่อเรซินเคลือบตัวความต้านทานทั้งชั้น ลักษณะการจัดวางเป็นแบบก้นหอย เพื่อหักล้างค่าความเหนียวน้ำที่เกิดขึ้น ระยะห่างแต่ละชั้นเท่ากับ 3 cm จำนวน 20 ชั้น ยึดแผ่นอะคริลิกใสด้วยแท่งอะคริลิกใส ทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่ออะคริลิกใส ปิดหัวท้ายด้วยอลูมิเนียมซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรดด้วย ภายในท่ออะคริลิกใสบรรจุด้วยน้ำมันหม้อแปลง ส่วนความต้านทานภาคแรงต่ำจะประกอบไปด้วยตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาด  $1\text{ M}\Omega$  2 W จำนวน 10 ตัวต่อขนานกันอยู่ในกล่องทองเหลือง ภายในมีสายกราวด์ต่อออกมาข้างนอกตรงฐานเพื่อเป็นจุดต่อลงกราวด์

ตัวแบ่งแรงดันกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้นมีข้อมูลทางเทคนิค ดังนี้

คุณลักษณะ	ขนาด	หน่วย
พิกัดแรงดันสูงสุด	100	กิโลโวลต์
พิกัดกระแสสูงสุด	1.008	มิลลิแอมแปร์
ความต้านทานภาคแรงสูง	99.274	เมกะโอห์ม
ความต้านทานภาคแรงต่ำ	0.1	เมกะโอห์ม
อัตราส่วนสเกลแฟคเตอร์	1000 : 1	-
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	$\pm 0.38\%$	-

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

2. จากการทดสอบหาค่าสเกลแฟคเตอร์ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นมีค่าสเกลแฟคเตอร์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1% ของค่าสเกลแฟคเตอร์เฉลี่ย ซึ่งตรงตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันต่างๆ ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.37 ขณะป้อนแรงดันไฟบวก และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.38 เมื่อป้อนแรงดันไฟลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงดันที่วัดได้ผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 3\%$  ในช่วงแรงดันใช้งาน ดังนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

4.จากการทดสอบความต่อเนื่องในการใช้งานของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้น สามารถใช้งานต่อเนื่องได้ 30 นาที

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1.ในการสร้างความต้านทานภาคแรงสูงและความต้านทานภาคแรงต่ำให้ได้ค่าตามที่ออกแบบไว้ จะต้องทำการแยกตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ขนาดตัวละ  $1\text{ M}\Omega$  มีค่าสูงและต่ำกว่า ปกติออกเป็นกลุ่มๆ แล้วพยายามทำการรวบรวมตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะดังกล่าวให้ได้ค่าความต้านทานรวมทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำดังที่ได้ออกแบบเอาไว้ และต้องคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นจากการหล่อเรซินเคลือบความต้านทานแบบฟิล์มโลหะในแต่ละชั้นของภาคแรงสูงด้วย เพราะจะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม

2.ในขั้นตอนของการหล่อเรซินเคลือบความต้านทานแบบฟิล์มโลหะในแต่ละชั้นต้องพยายามไม่ให้เกิดฟองอากาศภายใน เพราะฟองอากาศจะทำให้เกิดการเบรคความถี่ได้

3.ก่อนการใช้งานต้องมีการอุ่นน้ำมันหม้อแปลงเพื่อไล่ฟองอากาศและความชื้นก่อน โดยนำตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นไปตากแดดก่อน

4.ลักษณะโครงสร้างของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานมีปัญหาต่อการเคลื่อนย้าย ทำให้น้ำมันหม้อแปลงรั่วซึมได้ ดังนั้นควรออกแบบโครงสร้างให้มีที่จับยึดในการเคลื่อนย้ายให้สะดวกขึ้น

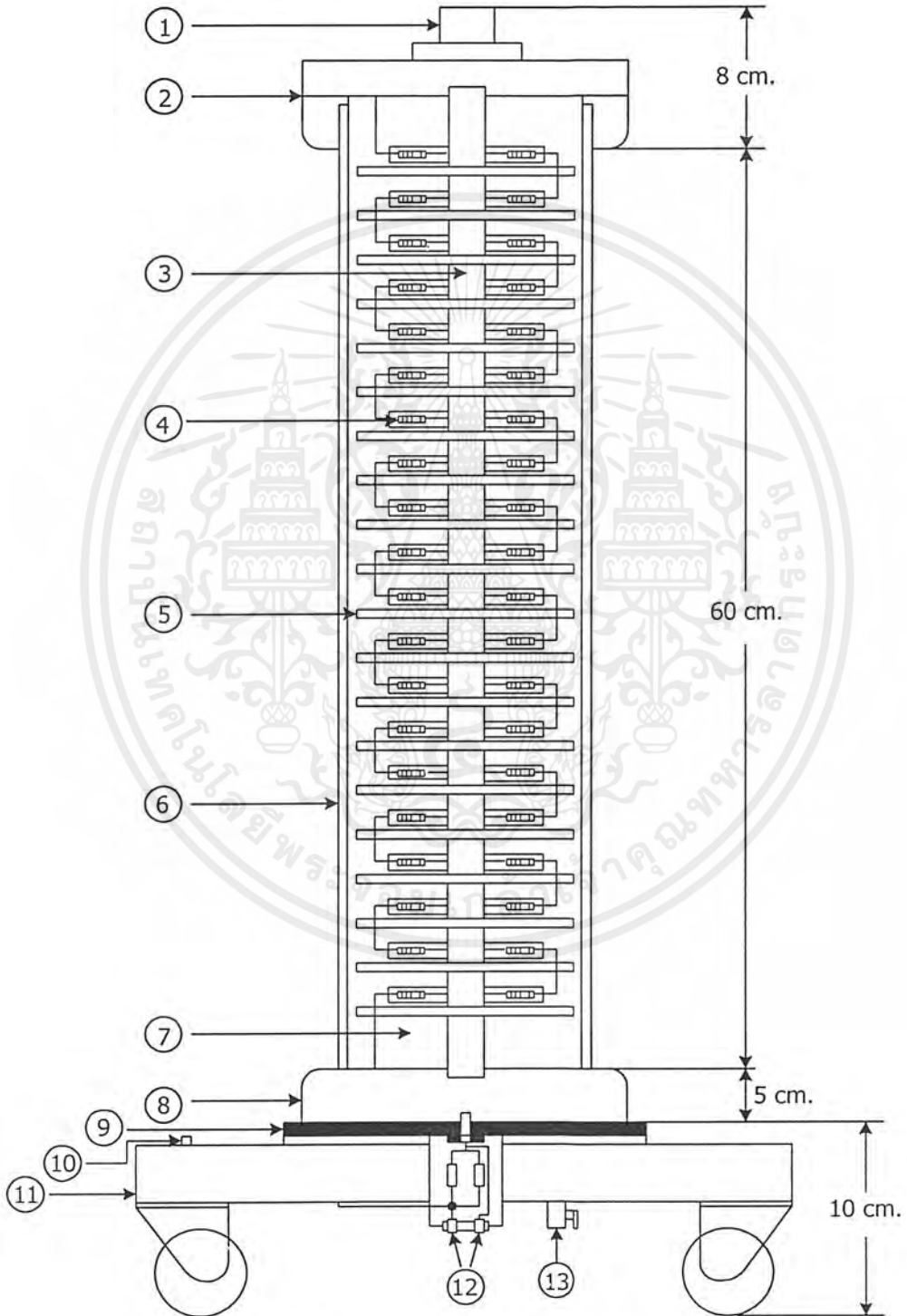
5.การแสดงผลของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่ต่อออกมาจากความต้านทานภาคแรงต่ำควรมีการพัฒนาให้สามารถแสดงผลโดยทำการคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์เสียก่อน ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการอ่านค่าที่ทำการวัด

# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
การใช้งานและการซ่อมบำรุง



โครงสร้างทั้งหมดของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้งาน

1. ต่อสายจากแหล่งจ่ายเข้ากับจุดเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันสูง (หมายเลข 1) ชันสกรูยึดให้แน่น

2. ต่อสายกราวด์เข้ากับจุดเชื่อมต่อกราวด์ (หมายเลข 10) ซึ่งจะอยู่บนฐานล้อย ชันน็อตยึดจุดกราวด์ให้แน่น

3. ต่อสายจากจุดต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ (หมายเลข 12) โดยกรณีวัดแรงดันไฟบวก จุดต่อสีแดงต่อเข้ากับขั้วบวก และจุดต่อสีดำต่อเข้ากับขั้วลบ

4. จ่ายไฟจากแหล่งจ่าย แล้วอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ โดยสามารถหาค่าแรงดันที่แท้จริงได้จากการนำค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์คูณด้วยค่าสเกลแฟกเตอร์คือ 1000

## การซ่อมบำรุง

เมื่อต้องการซ่อมบำรุงเครื่องวัดแรงดันสูงแบบความต้านทาน เช่น เปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลง หรือเปลี่ยนค่าตัวความต้านทาน ให้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. เปิดท่อเดรน (หมายเลข 13) เพื่อเดรนน้ำมันหม้อแปลงออกให้หมด
2. คลายสกรูของฝาปิดอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลังบนออก (หมายเลข 2) แล้วถอดฝาปิดอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลังบนออก
3. ยกแกนยึดแผ่นอาคริลิกใสและตัวความต้านทานด้านแรงสูงขึ้น (หมายเลข 3) แล้วถอดออกจากท่ออาคริลิกใส ซึ่งตัวความต้านทานทั้งหมดด้านแรงสูงจะถูกยกออกมาด้วย
4. ทำการเปลี่ยนตัวความต้านทานตามต้องการ แล้วประกอบกลับตามขั้นตอนที่ 3 ปิดท่อเดรนแล้วเติมน้ำมันหม้อแปลง จากนั้นจึงปิดฝาอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลังบนตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง  
ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 10 kV ถึง 110 kV

ที่ 10 kV      ที่อุณหภูมิ 27.8 °C  
ความชื้นสัมพัทธ์ 79.6%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F.)
1	10.02	10.20	982.35
2	10.05	10.25	980.49
3	10.06	10.26	980.51
4	10.02	10.22	980.43
5	9.98	10.19	979.39
6	10.09	10.32	977.71
7	9.99	10.22	977.50
8	9.98	10.19	979.39
9	10.02	10.23	979.47
10	10.00	10.20	980.39
เฉลี่ย	10.02	10.23	979.76
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			979.76
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.80
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			1.43

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 10 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 20 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.6%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F.)
1	20.0	20.1	995.02
2	20.2	20.3	995.07
3	20.6	20.7	995.17
4	19.8	19.9	994.97
5	20.2	20.2	1000.00
6	19.9	20.0	995.00
7	19.6	19.7	994.92
8	20.0	20.2	990.09
9	19.7	19.8	994.95
10	20.0	20.2	990.09
เฉลี่ย	20.0	20.1	994.53
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			994.53
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.95
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			2.81

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 30 kV

ที่อุณหภูมิ 27.7 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.6%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>t</sub> )
1	30.0	30.1	996.97
2	29.9	30.1	993.36
3	30.2	30.2	1000.00
4	30.6	30.7	996.74
5	29.9	29.5	1013.55
6	29.5	29.5	1000.00
7	30.0	30.2	993.38
8	30.3	30.4	996.71
9	29.7	29.9	993.31
10	30.0	30.1	996.67
เฉลี่ย	30.0	30.1	998.04
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			998.04
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.98
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			5.98

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 30 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 40 kV

ที่อุณหภูมิ 27.7 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.6%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>t</sub> )
1	40.1	40.2	997.51
2	40.2	40.3	997.52
3	39.8	39.9	997.49
4	39.8	39.9	997.49
5	40.0	40.0	1000.00
6	41.0	41.0	1000.00
7	40.5	40.6	997.54
8	40.2	40.3	997.50
9	39.9	40.1	995.01
10	39.8	39.9	997.49
เฉลี่ย	40.1	40.2	997.76
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			997.76
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.98
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			1.42

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 50 kV

ที่อุณหภูมิ 27.7 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.6%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>i</sub> )
1	50.0	50.2	996.02
2	51.0	51.1	998.04
3	50.1	50.2	998.01
4	49.7	49.8	997.99
5	49.6	49.8	995.98
6	49.5	49.6	997.98
7	49.0	49.0	1000.00
8	50.3	50.4	998.02
9	51.0	51.1	998.04
10	50.3	50.4	998.02
เฉลี่ย	50.0	50.2	997.81
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			997.81
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.98
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			1.14

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิงที่ระดับแรงดัน 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 60 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>i</sub> )
1	59.8	60.0	996.67
2	59.5	59.6	998.32
3	60.1	60.2	998.34
4	60.0	60.2	996.68
5	60.4	60.3	1001.66
6	59.5	59.6	998.32
7	60.2	60.4	996.69
8	59.5	59.6	998.32
9	60.3	60.4	998.34
10	60.7	60.8	998.36
เฉลี่ย	60.0	60.1	998.17
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			998.17
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.98
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			1.45

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 60 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 70 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>i</sub> )
1	69.8	69.9	998.57
2	70.0	70.2	997.15
3	70.1	70.3	997.16
4	70.0	70.1	998.57
5	69.9	70.0	998.57
6	70.3	70.4	998.58
7	70.2	70.2	1000.00
8	69.9	70.1	997.15
9	69.8	69.9	998.57
10	70.0	70.1	998.57
เฉลี่ย	70.0	70.1	998.29
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			998.29
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.98
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			1.13

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 70 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 80 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F.)
1	80.1	80.2	998.75
2	80.0	80.0	1000.00
3	79.9	80.0	998.75
4	80.0	80.2	997.50
5	79.8	79.9	998.75
6	80.2	80.3	998.75
7	79.8	80.0	997.50
8	79.9	80.0	998.75
9	80.0	80.2	997.50
10	79.9	79.9	1000.00
เฉลี่ย	79.9	80.1	998.63
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			998.63
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.99
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			0.92

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 80 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 90 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>p</sub> )
1	90.1	90.2	998.89
2	89.9	90.1	997.78
3	90.3	90.4	998.89
4	90.6	90.6	1000.00
5	90.0	90.1	998.89
6	89.7	89.6	1001.12
7	89.5	89.6	998.89
8	90.0	90.2	997.78
9	90.2	90.3	998.89
10	90.3	90.4	998.89
เฉลี่ย	90.1	90.2	999.00
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			999.00
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.99
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			0.97

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 90 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 100 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>i</sub> )
1	100.1	100.4	997.01
2	100.2	100.6	996.02
3	100.1	100.5	996.01
4	99.9	100.2	997.00
5	99.8	100.0	998.00
6	100.0	100.3	997.00
7	100.3	100.6	997.02
8	99.9	100.3	996.01
9	100.0	100.3	997.01
10	100.2	100.6	996.02
เฉลี่ย	100.1	100.4	996.70
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			996.70
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.97
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			0.67

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 110 kV

ที่อุณหภูมิ 27.8 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 79.7%

ครั้งที่	แรงดันอ้างอิง (kV)	แรงดันที่อ่านได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ (S.F <sub>i</sub> )
1	109.9	110.4	995.47
2	110.0	110.5	995.48
3	109.8	110.3	995.47
4	109.9	110.5	994.57
5	110.1	110.7	994.58
6	110.3	110.8	995.49
7	110.0	110.6	994.58
8	110.2	110.8	994.58
9	110.0	110.6	994.58
10	109.8	110.2	996.37
เฉลี่ย	110.0	110.5	995.22
ค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			995.22
1% ของค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ (S.F <sub>m</sub> )			9.95
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)			0.64

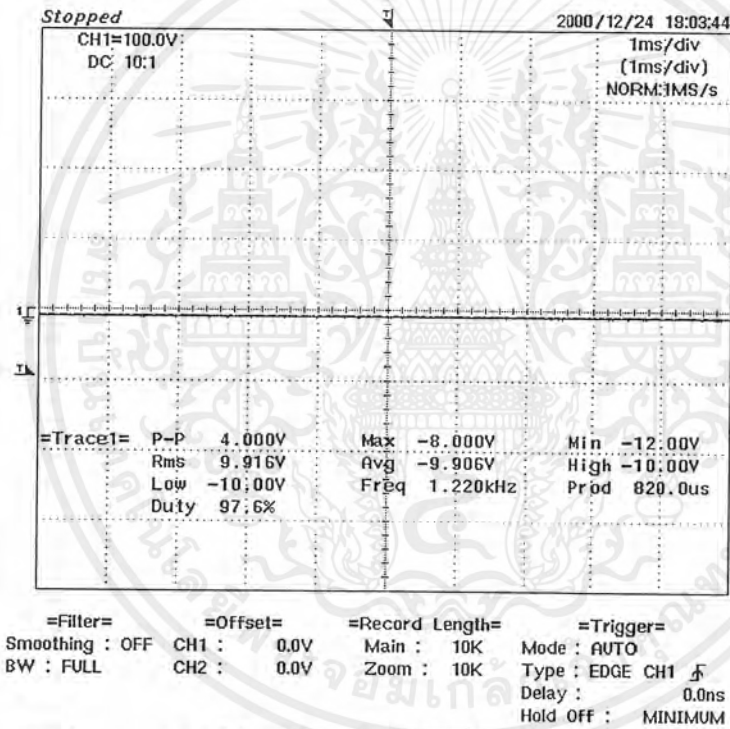
การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยทำการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิง ที่ระดับแรงดัน 110 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

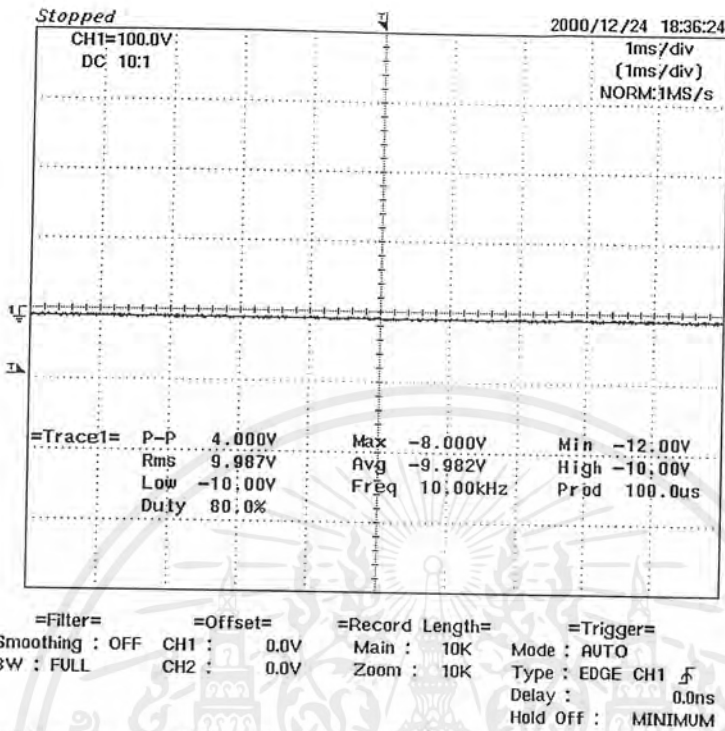
กราฟการทดสอบความต่อเนื่องในการใช้งานเป็นเวลา 30 นาที  
ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 10 kV ถึง 110 kV

ที่ระดับแรงดัน 10 kV



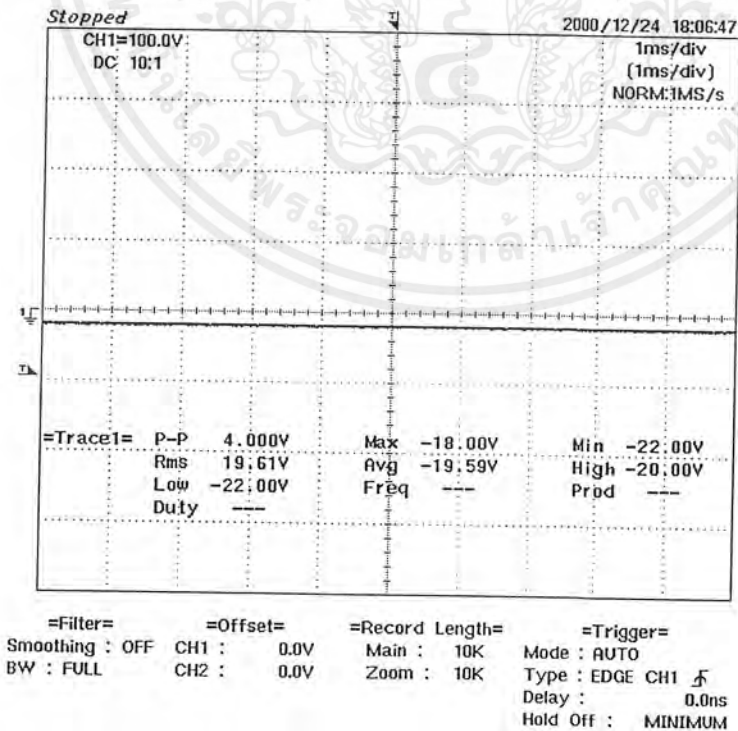
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 10 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 10 kV เป็นเวลา 30 นาที

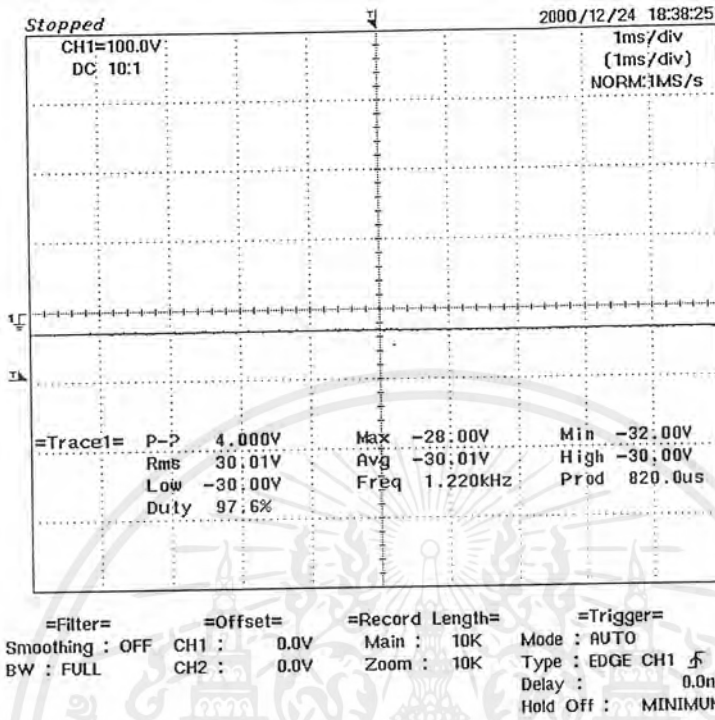
ที่ระดับแรงดัน 20 kV



กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 20 kV ตอนเริ่มต้น

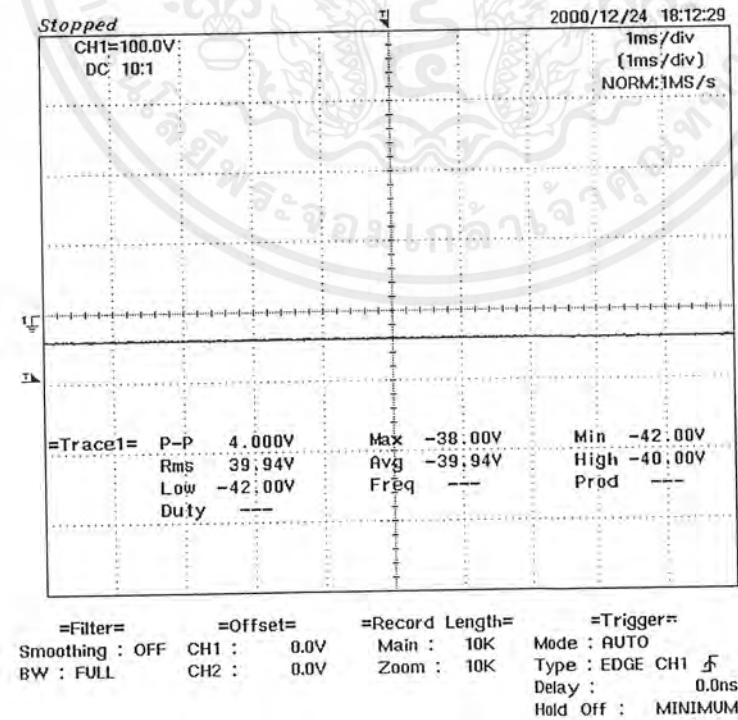
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 30 kV เป็นเวลา 30 นาที

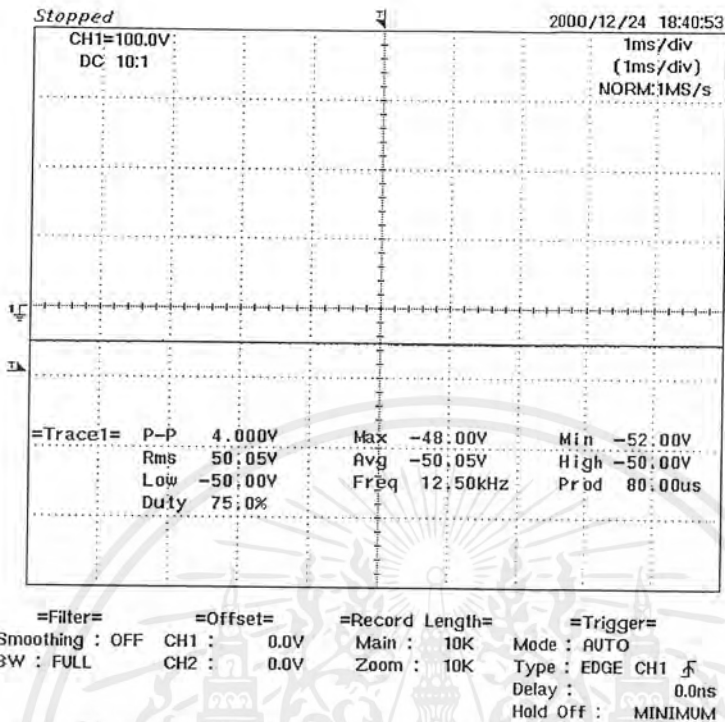
ที่ระดับแรงดัน 40 kV



กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 40 kV ตอนเริ่มต้น

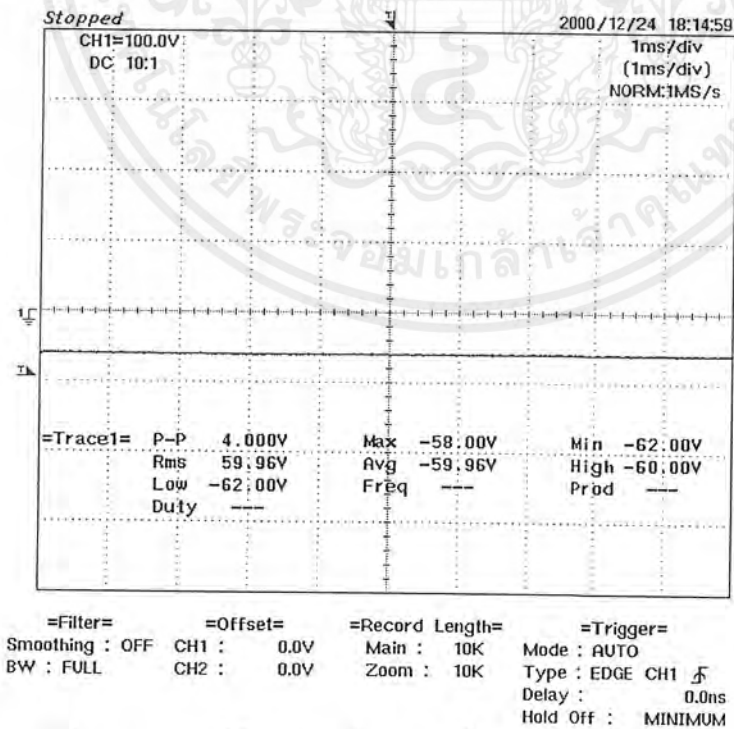
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





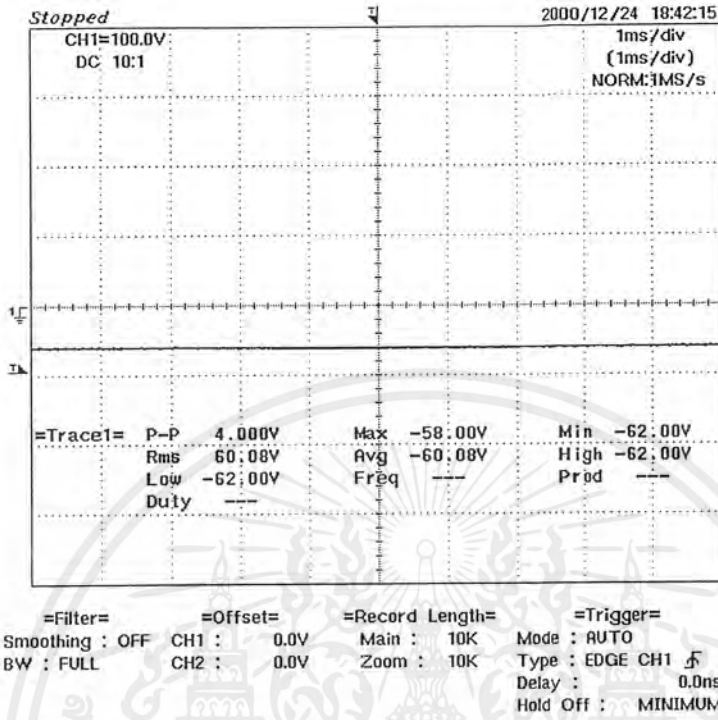
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 50 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่  
ระดับแรงดัน 60 kV



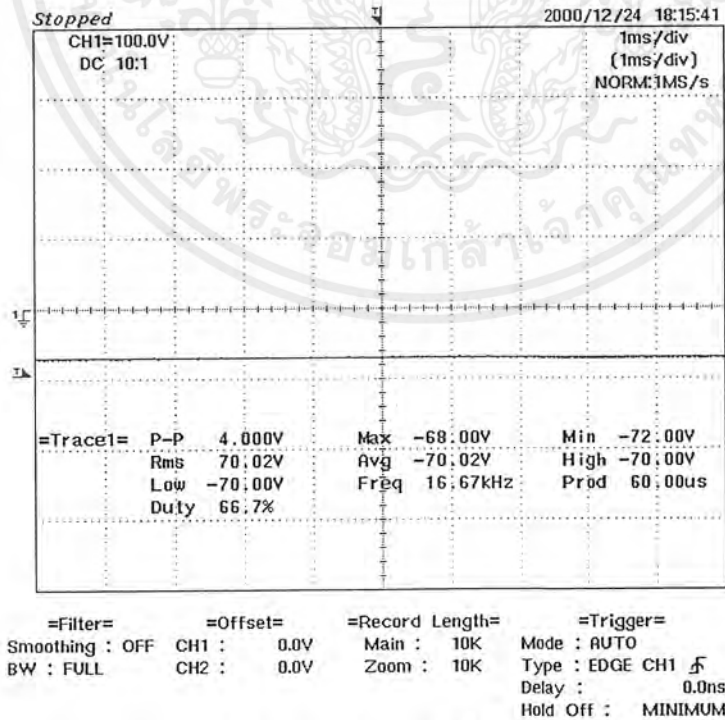
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 60 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



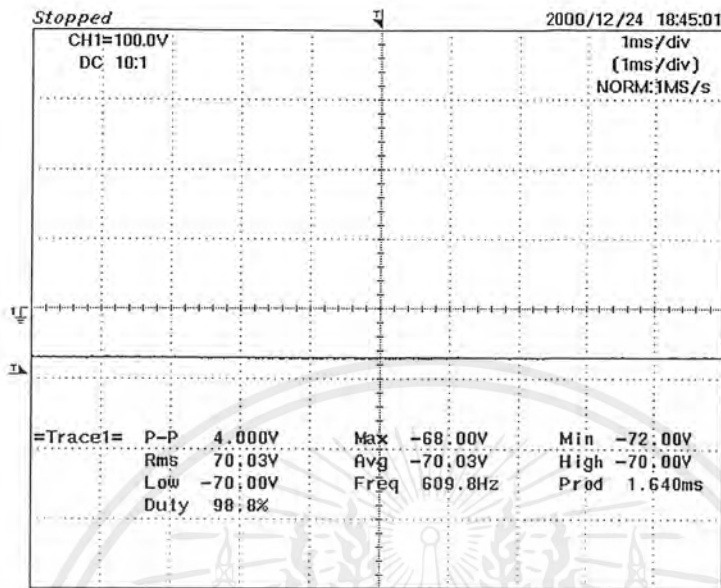
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 60 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 70 kV



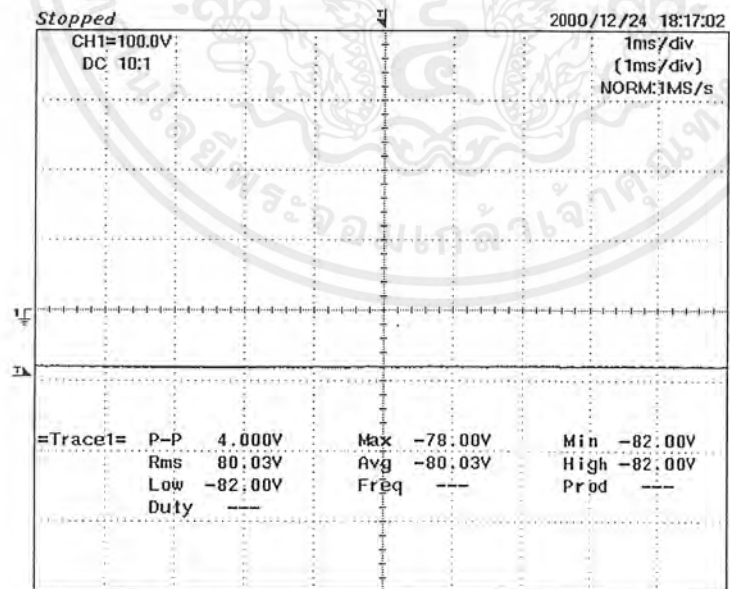
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 70 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
 Smoothing : OFF    CH1 : 0.0V      Main : 10K      Mode : AUTO  
 BW : FULL      CH2 : 0.0V      Zoom : 10K      Type : EDGE CH1   
 Delay : 0.0ns  
 Hold Off : MINIMUM

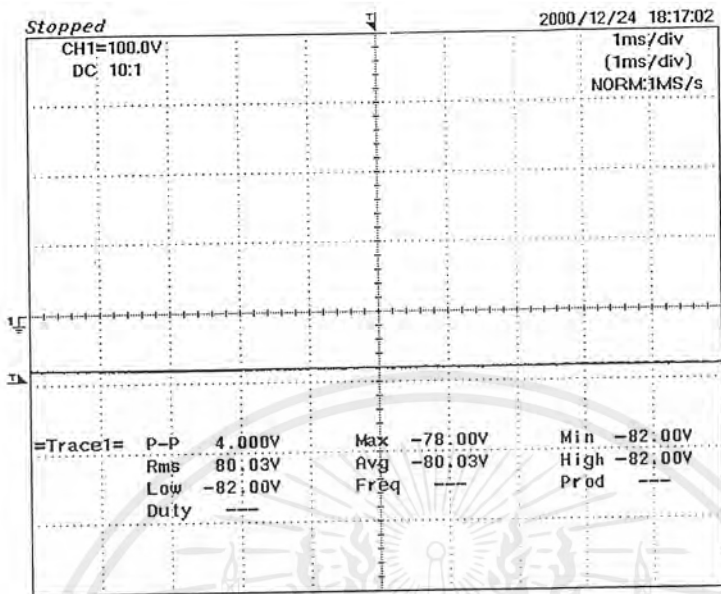
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 70 kV เป็นเวลา 30 นาที  
 ที่ระดับแรงดัน 80 kV



=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
 Smoothing : OFF    CH1 : 0.0V      Main : 10K      Mode : AUTO  
 BW : FULL      CH2 : 0.0V      Zoom : 10K      Type : EDGE CH1   
 Delay : 0.0ns  
 Hold Off : MINIMUM

กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 80 kV ตอนเริ่มต้น

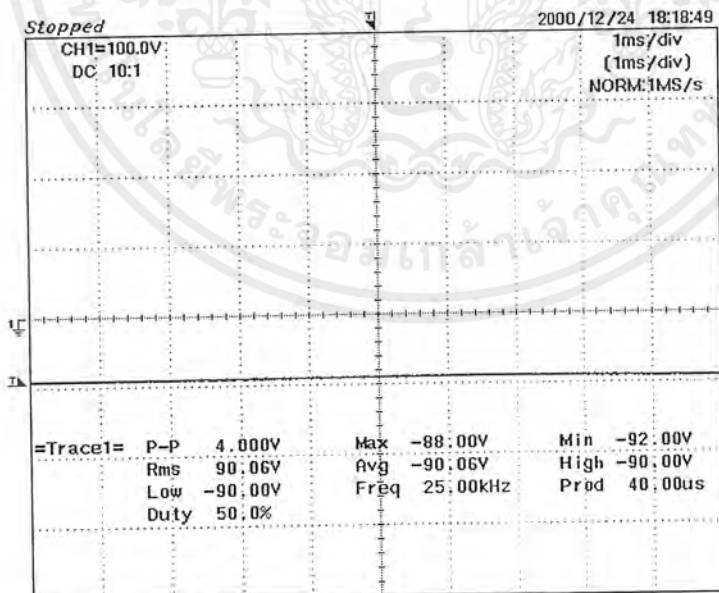
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL  
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 80 kV เป็นเวลา 30 นาที

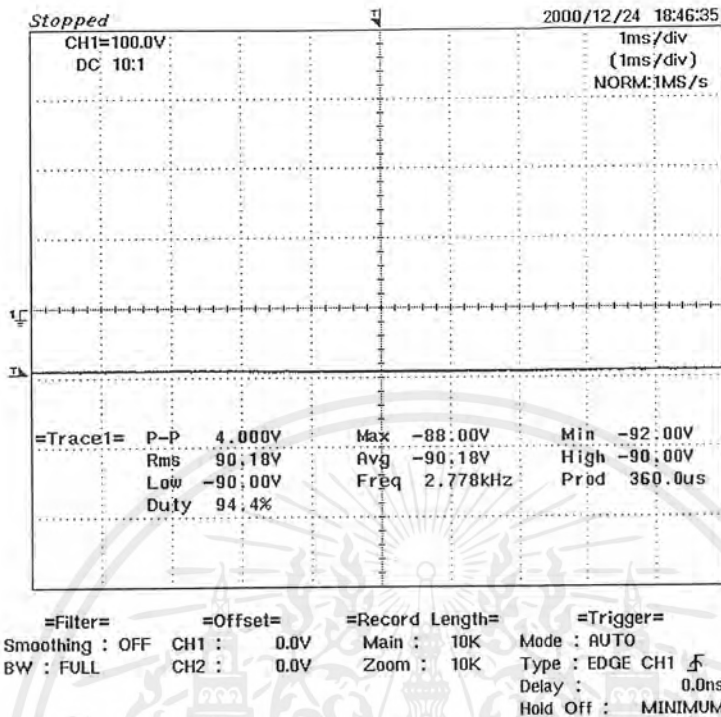
ที่ระดับแรงดัน 90 kV



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL  
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  $\uparrow$  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

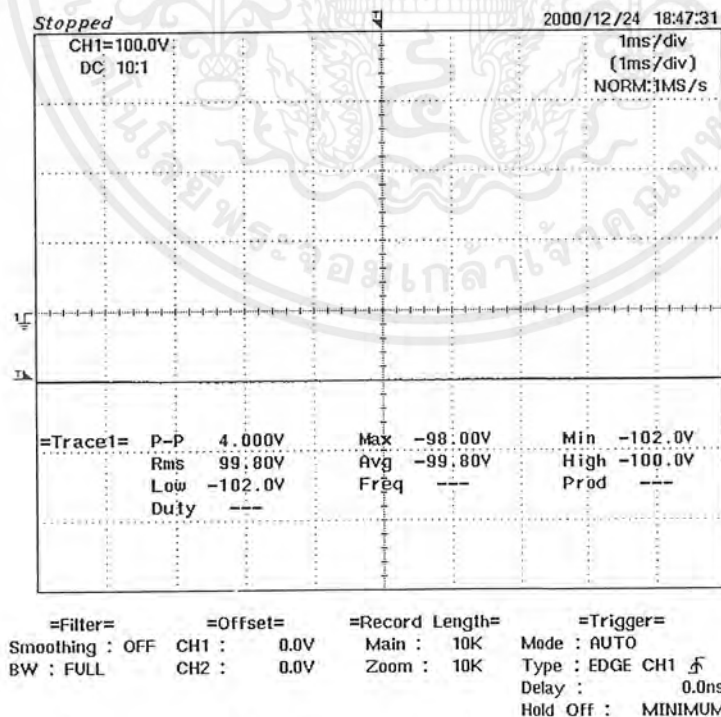
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 90 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



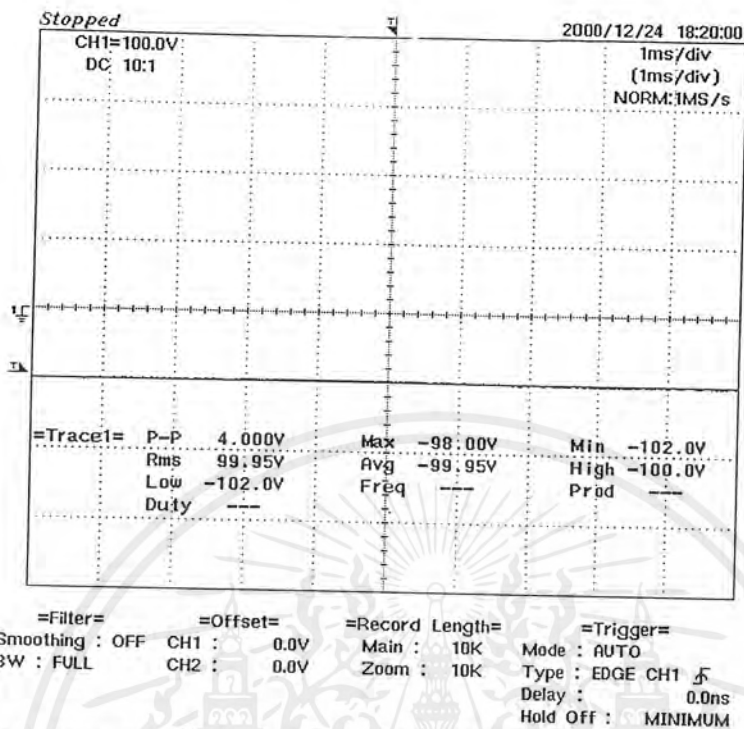
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 90 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 100 kV



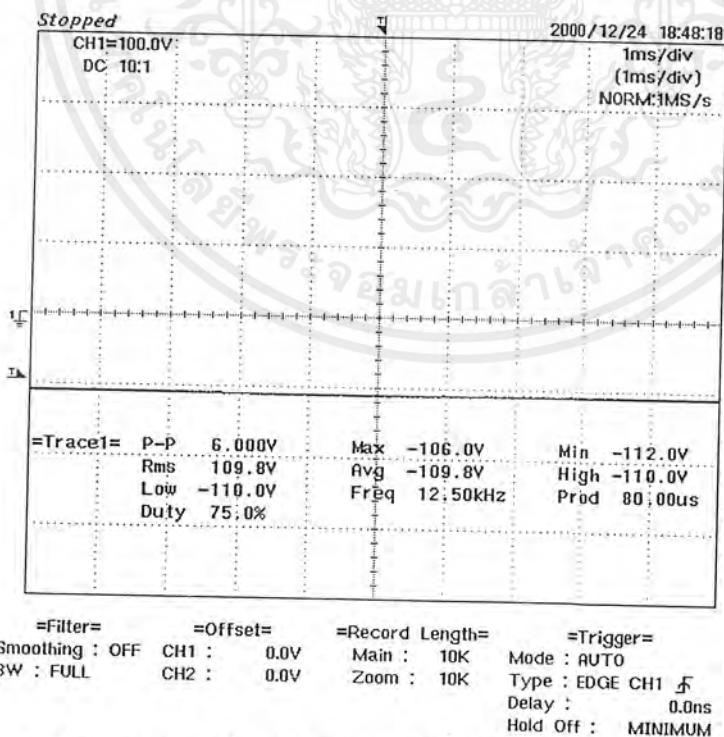
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



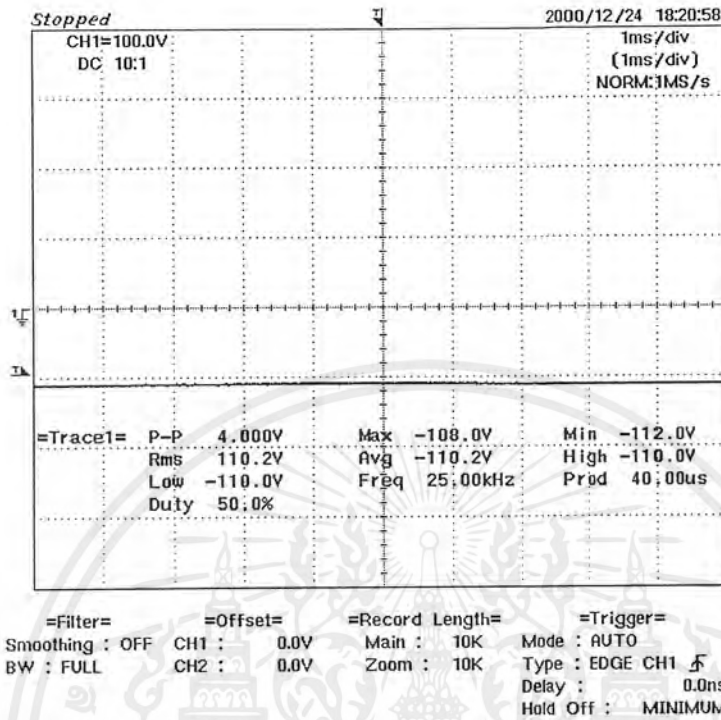
กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 100 kV เป็นเวลา 30 นาที

ที่ระดับแรงดัน 110 kV



กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV ตอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงผลการใช้งานตัวแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดัน 110 kV เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ง**  
**การทดสอบตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขนาด 100 kV**  
**ที่ระดับแรงดันต่ำ (แรงดันต่ำกว่า 1 kV)**

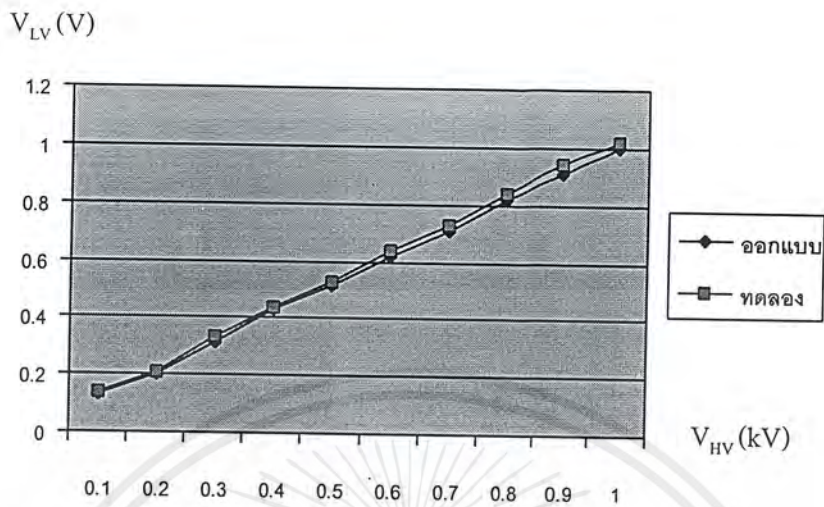
ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบโดยนำตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้นนี้มาใช้วัดที่ระดับแรงดันต่ำ (แรงดันต่ำกว่า 1 kV) ว่าจะสามารถวัดค่าแรงดันที่ระดับต่างๆ ดังกล่าวได้ถูกต้องมากน้อยเพียงไร โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ 79.1% ได้ผลดังนี้

**ผลการทดลอง**

$V_{LV}$ (ออกแบบ) (V)	$V_{LV}$ (ที่วัดได้) (V)	% ความผิดพลาด
0.13	0.14	7.69
0.20	0.21	5.00
0.31	0.33	6.45
0.43	0.44	2.33
0.51	0.53	3.92
0.62	0.64	3.23
0.71	0.73	2.82
0.82	0.84	2.44
0.91	0.94	3.30
1.00	1.02	2.00
% ความผิดพลาดเฉลี่ย		3.72

ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 1 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ออกแบบกับค่าแรงดันด้านแรงต่ำที่ได้จากการทดลอง ที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 1 kV

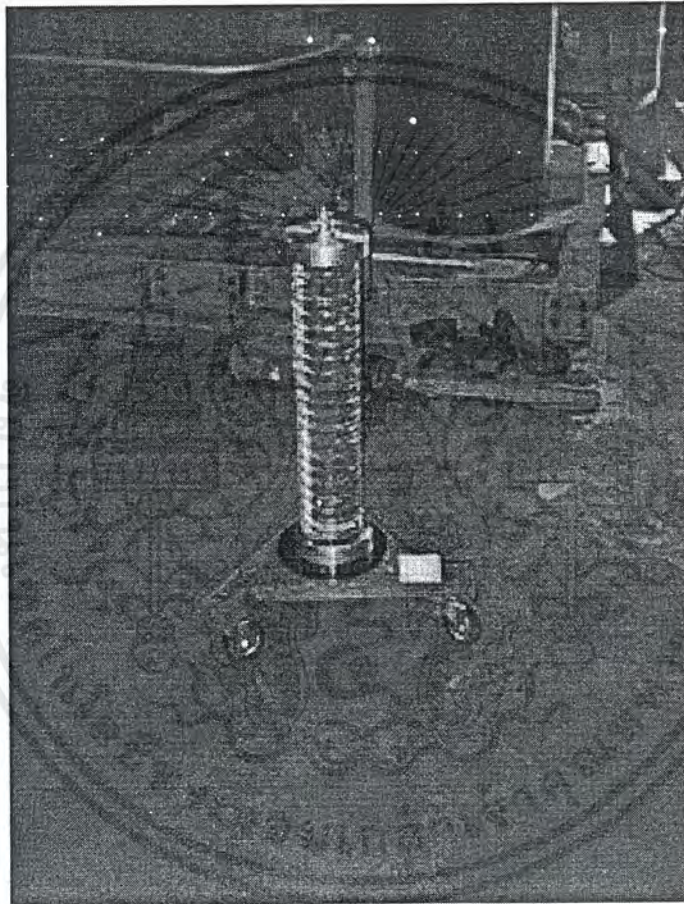
#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 kV ที่สร้างขึ้น วัดค่าแรงดันที่ต่ำกว่า 1 kV จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 3.72 ซึ่งไม่เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60-2(1994) กำหนดคือ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเกิน  $\pm 3\%$  ดังนั้นช่วงการวัดที่เหมาะสมของตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นจะอยู่ในช่วง 1 kV-110 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

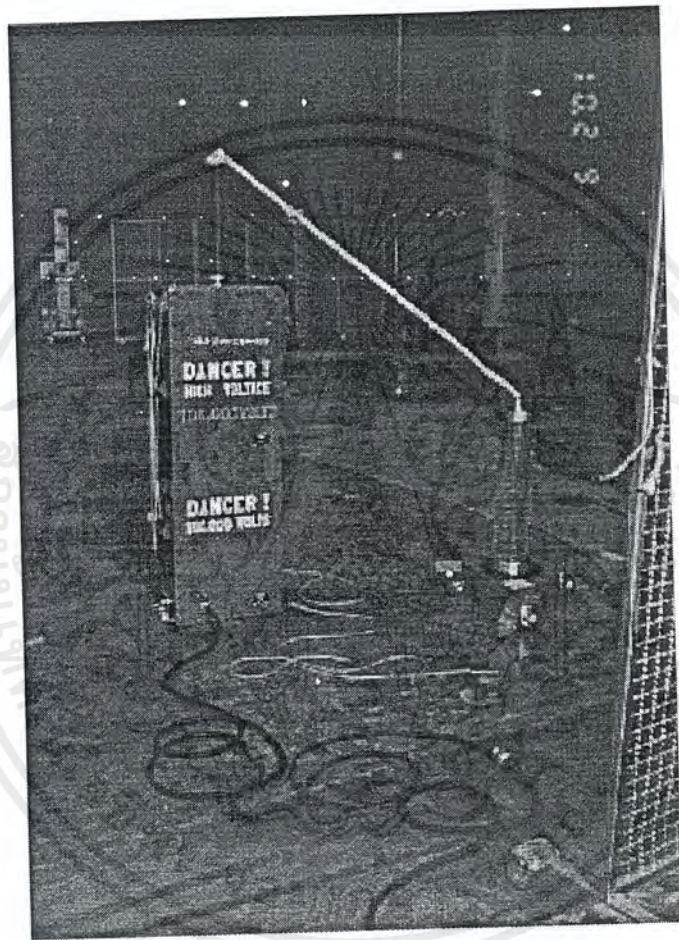
## ภาคผนวก จ

### รูปการทดสอบตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน



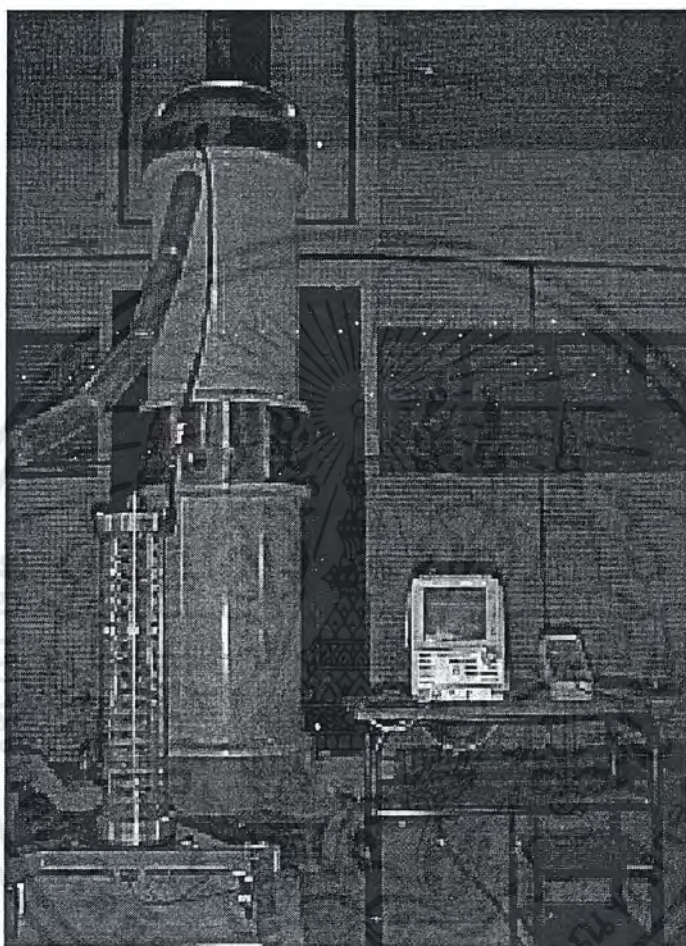
ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานก่อนทำการทดสอบที่แผนกทดสอบไฟฟ้าแรงสูง  
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขณะทำการทดสอบที่แผนกทดสอบไฟฟ้าแรงสูง  
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานขณะทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The tests specified in 7.6.2 and 7.6.3 shall be applied only to systems used to measure the ripple amplitude and are Performance Tests.

#### 7.6.2 Measurement of the scale factor at the ripple frequency

The scale factor of the Measuring System shall be determined at the fundamental frequency  $f$  of the ripple, with an uncertainty within  $\pm 3\%$ . This scale factor may be determined as the product of the scale factors of the components.

#### 7.6.3 Dynamic behaviour

The upper limit frequency  $f_2$  of the amplitude/frequency response of the Measuring System shall be greater than 10 times the fundamental frequency  $f$  of the ripple.



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ทำโครงการขอขอบคุณ รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ได้กรุณาแนะนำและให้ข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการมาด้วยดีตลอด และขอขอบคุณ คุณพงษ์ศักดิ์ จารุวรรณชัย คุณพัฒนา อินทนิ รวมทั้งพี่ๆ ปริญญาโททุกๆ ท่านที่ช่วยให้คำปรึกษาตลอดมา ขอขอบคุณ บริษัทกาลเท็กซ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันหม้อแปลง ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ แผนกทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ที่ทำการสอบเทียบมาตรฐานให้

ท้ายนี้ กลุ่มผู้ทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจให้แก่กลุ่มผู้ทำโครงการตลอดมา

นายเจษฎา ฟ้าเลิศ  
นายธนินทร์ อินทร์ประดับ  
นายศักดิ์ดา ชาตวิงสากุล

มีนาคม 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [2] พิสุทธิ อธิธิพรภาคย์, สันติ สุวิธานูวรรสิน และ ทรงชัย ลิขิตสุภิน, “การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 120 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันกระแสสลับและกระแสตรง”, คณะกรรมการวิชาการด้านการทดสอบและห้องทดลองของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2531
- [3] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., “High Voltage Engineering Fundamentals”, 1<sup>st</sup> ed., Pergamon Press Ltd., Oxford, 1984
- [4] IEC, “High Voltage Test Techniques-Part 2 : Measuring System”, IEC Publication No. 60-2, 1994
- [5] Kuffel, E. and Abdullah, M., “High Voltage Engineering”, 1<sup>st</sup> ed., Pergamon Press Ltd., Oxford, 1970

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้