

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

(The study of Lightning phenomena striking on building Construction)



เลขามู.....  
เลขทะเบียน..... 72628  
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ย. 2550

b. 11๗๗๐51X  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

The study of Lightning phenomena striking on building Construction



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

นาย เจด อธิธิเวชชัย

นาย เกษฎา มณีวงศ์

นาย ชัยณรงค์ ธรรมจินดารักษ์

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมฟ้าผ่าตัวอาคาร โดยได้จัดสร้างตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์ ชนิดด้วยความต้านทานชั้นพีทิกัด 0.1 โอห์ม เพื่อตรวจจับกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตัวต้านทานชั้นที่จัดสร้างขึ้นมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด และได้นำไปทดสอบกับโครงสร้างอาคารจำลอง เพื่อศึกษาการกระจายของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยการควบคุมเปลี่ยนค่าความต้านทานดินของโครงสร้างอาคาร ขั้นตอนการศึกษาได้ทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับโครงสร้างของตัวอาคาร แล้วทำการวัดค่ากระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นตามจุดต่างๆ ของโครงสร้าง รายละเอียดผลการทดลองดั่งนำเสนอในปฏิญานพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

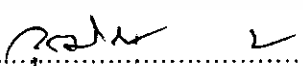
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่ากับโครงสร้างอาคาร

ผู้จัดทำ

นาย เจด	อิทธิเวชชัย	46010127
นาย เกษญา	มณีวงศ์	46010130
นาย ชัยณรงค์	ธรรมจินดารักษ์	46010157

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## The study of Lightning phenomena striking on building Construction

Jade Ittivetchai

Jetsada Maneevong

Chainarong Thumjindarat

Norasage Pattanadech            Advisor

Dr. Vuttichai Chatpattananan   Advisor

2006

### ABSTRACT

This project studies the behavior of the lightning striking on buildings. By constructing a Shunt's impulse current detector at 0.1 ohm in order to detect the impulse current of lightning. The constructed Shunt's resistor has the standard properties as indicated. The resistor was tested with a simulated building structure to study the distribution of the impulse current by adjusting a ground resistance of the structure. The first procedure of the study is done by feeding the impulse voltage to the structure , and then measuring the impulse current occurring at any point of the structure. All details and test results are shown in this project

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยดีเนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ดร. วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์ ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ทั้งยังให้คำปรึกษาชี้แนะ และแนะนำแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ต่อคณะผู้จัดทำและได้ตรวจสอบแก้ไข ปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทำให้ผู้จัดทำมีความภูมิใจเป็นอย่างมากที่ได้มีโอกาสทำปริญญาานิพนธ์นี้

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณการไฟฟ้าที่อนุเคราะห์ความด้านทานชั้นที่ตัวมาตรฐานเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับความด้านทานชั้นที่ได้จัดทำขึ้น

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ อ.สุริช ฒ สงขลา และ พี่ ณัฐพงษ์ ประพฤติ และรุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะทำให้การทดสอบเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	2
1.2 งานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการ.....	2
1.4 วัตถุประสงค์.....	2
1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 แผนการในการดำเนิน โครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า.....	5
2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร.....	5
2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า.....	5
2.2 คุณลักษณะของฟ้าผ่า.....	5
2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น.....	5
2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น.....	7
2.2.3 ฟ้าผ่าซ้ำ.....	8
2.2.4 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า.....	9
2.3 ผลจากฟ้าผ่า.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1	ผลทางความร้อน.....10
2.3.2	ผลจากแรงทางกลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....10
2.3.3	ผลจากการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก.....11
2.3.4	ผลจากการเกิดแรงดัน สปราร์กด้านข้าง.....11
2.3.5	ผลที่เกิดจากฟ้าผ่าคนโดยตรง.....11
2.3.6	ผลจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส.....11
2.4	ระบบป้องกันฟ้าผ่าต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้างตามมาตรฐาน IEC.....12
2.4.1	ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก.....13
2.4.1.1	ตัวนำล่อฟ้า.....13
2.4.1.2	ตัวนำลงดิน.....18
2.4.1.3	รากสายดิน.....18
2.5	การวัดกระแสอิมพัลส์.....19
2.5.1	ชนิดและมาตรฐานของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....19
2.5.2	หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....22
2.5.3	การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....23
บทที่ 3	การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับกระแสอิมพัลส์.....25
3.1	การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....25
3.1.1	หลักการทำงานของความต้านทานชั้นที่.....25
3.1.2	ชนิดของความต้านทานชั้นที่.....26
3.1.2.1	ความต้านทานชั้นที่แบบ Wire wound หรือ Squirrel cage.....26
3.1.2.2	ความต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular.....29
3.1.3	เคเบิลวัด (Measuring Cables).....31
3.1.4	เวลาตอบสนอง (Response Time).....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.2 การออกแบบความต้านทานชั้นที่.....	34
3.2.1. แกนของชั้นที่.....	34
3.2.1.1 แท่งตัวนำ.....	34
3.2.1.2 แผ่นตัวนำ.....	35
3.2.1.3 ตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวต้านทานชั้นที่.....	35
3.2.1.4 ฉนวน.....	36
3.2.2 ระบายออกซีลด์.....	37
3.2.3 สายสัญญาณ.....	38
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	39
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	39
4.1.1. เครื่องกำเนิดอิมพัลส์.....	39
4.1.2. ออสซิลโลสโคป.....	39
4.1.3. ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้เป็นมาตรฐาน.....	40
4.1.4. ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้ทดสอบ.....	40
4.1.5. สายเคเบิลวัด.....	41
4.1.6. สายนำส่งแรงสูง.....	41
4.1.7. อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง.....	42
4.1.8. ตะขอกร่าวด์.....	42
4.2 การทดสอบหาสเกลแฟคเตอร์ที่กำหนด.....	45
4.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น.....	52
4.4 การทดสอบดูการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	64
5.1 สรุป.....	64
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	64

VII  
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ตัวอย่างสมการที่ใช้ในการออกแบบ.....	68
ภาคผนวก ข การประกอบสร้าง.....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ฟิวส์ล่ง.....	6
2.2 ฟิวส์ขึ้น.....	6
2.3 รูปคลื่นกระแสฟิวส์.....	7
2.4 กระบวนการเกิดฟิวส์ชำ.....	8
2.5 แรงสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว.....	12
2.6 ส่วนประกอบของระบบป้องกันอันตรายจากฟิวส์แบบฟาราเดย์.....	13
2.7 air termination แบบวิธีโครงสร้างค้ำ.....	14
2.8 termination เมื่อหลังคาทำจากวัสดุที่ติดไฟได้.....	15
2.9 การใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เป็น air termination.....	16
2.10 ระยะการป้องกัน โดย 2 Air-termination.....	16
2.11 ระยะการป้องกัน โดยหลาย ๆ Air-termination.....	18
2.12 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1(1989) [2].....	20
2.13 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์.....	22
2.14 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่.....	24
3.1 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นที่ความต้านทานต่ำ.....	25
3.2 Star-type Wire wound Shunt.....	27
3.3 Squirrel cage Shunt โดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน.....	28
3.4 Squirrel cage Shunt ที่สร้างจากลวดความเหนียวนำต่ำพันกระจายให้การพัน สม่ำเสมอบนฉนวนทรงกระบอก.....	28
3.5 การต่อวัดความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอก.....	29
3.6 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	30
3.7 แท่งตัวนำ.....	34
3.8 แผ่นตัวนำ.....	35
3.9 ตัวต้านทานชนิด metal film.....	35
3.10 ฉนวน.....	36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 กระบอบอกซีตค์.....	37
3.12 สายสัญญาณ.....	38
4.1 ชุดเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า 6 kV, 3 kA.....	39
4.2 ออสซิลโลสโคป.....	39
4.3 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้เป็นมาตรฐาน.....	40
4.4 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้ทดสอบ.....	40
4.5 สายเคเบิลวัด.....	41
4.6 สายนำส่งแรงสูง.....	41
4.7 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง.....	42
4.8 ตะขอราวด์.....	42
4.9 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นที่ต่อวัดในวงจร.....	43
4.10 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้วยความต้านทานชั้นที่.....	43
4.11 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้วยความต้านทานชั้นที่ (รูปวงจรจริง).....	44
4.12 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานชั่วคราว.....	46
4.13 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นชั่วคราว.....	47
4.14 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมา.....	47
4.15 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานชั่วคราว.....	50
4.16 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมาชั่วคราว.....	50
4.17 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมา.....	50
4.18 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ชั่วคราว).....	53
4.19 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ชั่วคราว).....	53
4.20 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ชั่วคราว).....	53
4.21 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ชั่วคราว).....	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วบวก).....	54
4.23 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วลบ).....	55
4.24 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วลบ).....	56
4.25 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วลบ).....	56
4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วลบ).....	56
4.27 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วลบ).....	57
4.28 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสใน โครงสร้างอาคารจำลอง.....	58
4.29 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสใน โครงสร้างอาคารจำลอง (รูปวงจรถริง)...	59
4.30 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 2 โอห์ม.....	61
4.31 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 20 โอห์ม.....	62
4.32 ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 100 โอห์ม.....	63
5.1 ตัวต้านทานที่เกิดการเสื่อมสภาพ.....	64

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟ้าผ่า.....	9
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันและชนิดของระบบการป้องกัน.....	12
2.3 ความหนาแน่นที่สุดของแผ่นโลหะหรือท่อโลหะที่ใช้ในระบบ Air termination...15	
2.4 ตารางแสดงการคำนวณระยะป้องกัน.....	17
3.1 เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์.....	33
4.1 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 $\mu$ S (ชั่วบวก).....	46
4.2 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์ 8/20 $\mu$ S (ชั่วลบ).....	49
4.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบ วัดอ้างอิง (ชั่วบวก).....	52
4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบ วัดอ้างอิง (ชั่วลบ).....	55
4.5 ผลการทดสอบการกระจายของกระแสอิมพัลส์ 8/20 $\mu$ S.....	60

## บทที่ 1

### บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งซึ่งสร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นมนุษย์จึงได้พยายามคิดค้นวิธีป้องกันฟ้าผ่าขึ้นมา ซึ่งก็คือ การป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า จากการวิจัยคิดค้นวิธีการป้องกันฟ้าผ่าที่คิดขึ้นมาตั้งแต่ยุคแรกจนถึงปัจจุบันก็ยังมีหลักการที่คล้ายคลึงกันแต่ในยุคปัจจุบันนี้มีการป้องกันที่รัดกุมมากขึ้น ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น ความจำเป็นในการป้องกันก็มีสูงขึ้น เนื่องจากสถานที่บางแห่งถ้าถูกฟ้าผ่าจะเกิดความเสียหายมีค่ามหาศาล เช่น คลังน้ำมันขนาดใหญ่ เสาส่งไฟฟ้าแรงสูง อาคารสถานที่บางแห่ง

การป้องกันฟ้าผ่าในปัจจุบันยังใช้วิธีใช้ตัวนำล่อฟ้าในการป้องกัน หลักการในการออกแบบและติดตั้ง ตัวนำล่อฟ้านั้นมีหลักการที่ง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบก็มีค่าคงที่และตัวแปรไม่กี่ตัว แต่ถ้าพิจารณาในปัจจุบันแล้ว จะพบข้อสงสัยในหลายประการที่เกี่ยวกับระบบตัวนำล่อฟ้าที่ใช้อยู่ ปัญหาเหล่านี้ เช่น

ระบบป้องกันที่ใช้ผู้มีประสิทธิภาพเพียงใด

ระบบป้องกันได้ในขนาดของความแรงฟ้าผ่าในช่วงใด

ถ้าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวนำล่อฟ้าเปลี่ยนแปลง ผลการป้องกันจะเป็นอย่างไร

ปัญหาเหล่านี้ ถ้าดูจากหลักทฤษฎีในการออกแบบตัวนำล่อฟ้าแล้วคงไม่สามารถตอบได้ เนื่องจากในการออกแบบตัวนำล่อฟ้าที่ใช้อยู่นั้นไม่ได้เป็นฟังก์ชันหรือเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางฟ้าผ่าและ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการป้องกันฟ้านั้นมีน้อยมาก ข้อมูลต่างๆ ค่อนข้างที่จะหายาก ซึ่งถ้ามีการวิจัยอย่างมีหลักเกณฑ์แล้ว เราสามารถจะออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้ถูกต้องเหมาะสมได้ และช่วยลดความเสียหายจากการถูกฟ้าผ่าได้

ในการเกิดฟ้านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นกระแสดรอนเซียน ซึ่งสามารถสร้างกระแสนี้ได้โดยเครื่องกำเนิดอิมพัลส์ และใช้ป้อนให้กับการทดสอบของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทำงานเพื่อป้องกันกระแสดรอนเซียน โดยกระแสดรอนเซียนเป็นกระแสที่มีเวลาขึ้น (Rise Time) ตั้งแต่ นาโนวินาทีจนถึงหลายๆ ไมโครวินาทีซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดสัญญาณที่มีการตอบสนองทางเวลาที่เร็วพอเช่นความต้านทานชั้นที่สำหรับวัดค่ากระแสในการทดสอบ

## 1.1 ที่มาของปัญหา

การเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติซึ่งสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สิน และชีวิตของมนุษย์ซึ่งมีความรุนแรงมากและไม่สามารถห้ามได้ จึงต้องมีการศึกษาว่าปรากฏการณ์ ฟ้าผ่านั้น เกิดขึ้นได้อย่างไร มีสาเหตุในการเกิดอย่างไร และจึงต้องมีการคิดหาวิธีป้องกัน โดยทั่วไป เมื่อฟ้าผ่าลงบนโครงสร้างตัวอาคาร เชื่อกันว่าถ้าตัวอาคารมีระบบกราวด์อยู่แล้ว อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อ ใช้งานอยู่ในตัวอาคารก็จะไม่ได้รับผลโดยตรง แต่ก็มีไม่น้อยเช่นกันที่เกิดความเสียหายเกิดขึ้น จึงมี ความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาพฤติกรรมฟ้าผ่าตัวอาคารจำลองนี้ โดยอาศัยตัวด้านทานชั้นที่เป็น ตัวตรวจจับ

## 1.2 งานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 IEC 61024-1-2 Protection of structures against lightning

1.2.4 IEC 61312-3 Protection against lightning electromagnetic impulse

1.2.5 IEC Publication 60060-1 High Voltage Test Techniques Part I General Definitions and Test Requirement

1.2.4 IEC Publication 60060-2 High Voltage Test Techniques Part II Measuring system

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษากระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวัดสัญญาณฟ้าผ่า

1.3.2 สร้างตัวตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าประเภท ความต้านทานชั้นที่มีพิคคขนาด 0.1 โอห์ม ให้เป็นไปตามมาตรฐาน

1.3.3 ทดลองและวิเคราะห์ผลจากการจำลองกระแสฟ้าผ่าจากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ แรงสูง

## 1.4 วัตถุประสงค์

1.4.1 เพื่อศึกษากระบวนการเกิดฟ้าผ่าและผลกระทบจากฟ้าผ่า

1.4.2 เพื่อศึกษาวิธีการวัดสัญญาณอิมพัลส์

1.4.3 เพื่อสร้างตัวตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าเพื่อใช้ในกระบวนการตรวจจับฟ้าผ่าที่จำลองขึ้น ในห้องปฏิบัติการ

1.4.4 เพื่อศึกษาผลจากกระแสฟ้าผ่าในโครงสร้างอาคารซึ่งมีความต้านทานดินแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับฟ้าผ่าและระบบป้องกันฟ้าผ่าและวิธีป้องกัน

1.5.2 ทฤษฎีการวัดและตรวจจับกระแสฟ้าผ่า

1.5.3 ทฤษฎีการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงกระบวนการเกิดฟ้าผ่า

1.6.2 ทราบถึงผลกระทบจากฟ้าผ่าต่อโครงสร้างอาคารและวิธีการป้องกัน

1.6.3 สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่า แบบความต้านทานชั้นที่

## 1.7 แผนการในการดำเนินโครงการ

แผนการดำเนินงาน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวิธีตรวจวัดสัญญาณฟ้าผ่า	←————→				
2. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่าและวิธีตรวจวัดสัญญาณฟ้าผ่า	←————→				
3. ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์การตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่าแบบ R-shunt		←————→			
4. เตรียมตัวสอบ วิศวกรรม 1				←————→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงาน	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม
5. สร้างอุปกรณ์การ ตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่า แบบ R-shunt	←→	←→			
6. สร้างแบบโครงสร้าง อาคารแบบจำลอง	←→	←→			
7. ทดสอบอุปกรณ์การ ตรวจจับสัญญาณฟ้าผ่า แบบ R-shunt ต่อ โครงสร้างอาคาร			←→	←→	
8. ทดลองและวิเคราะห์ผล จากฟ้าผ่าต่อ โครงสร้าง อาคาร			←→	←→	
9. รวบรวมข้อมูลจัดทำ ปริญญานิพนธ์และเตรียม ตัวสอบโครงงาน วิศวกรรม 2				←→	←→

←→ เวลาในการดำเนินงาน

←- - - - -> ปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า

#### 2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร [1]

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการ ดิสชาร์จ (Discharge) ของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆกับพื้นโลก การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10-100 MV จนอากาศที่ฉนวนระหว่าง ก้อนเมฆกับพื้นโลก เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) เกิดเป็นวาบฟ้าผ่า นอกจากนี้ ยังมีการเกิด ดิสชาร์จระหว่าง ก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือ ฟ้าแลบ

#### 2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า [1]

ในก้อนเมฆ จะมีการสะสมประจุ ซึ่งประจุลบจะอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆ ประจุบวกจะอยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ซึ่งฟ้าผ่าส่วนใหญ่เป็นฟ้าผ่าแบบประจุลบ เพราะระยะใกล้พื้นโลกมากกว่า ประจุบวกในก้อนเมฆ แต่ฟ้าผ่าแบบประจุบวก ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน

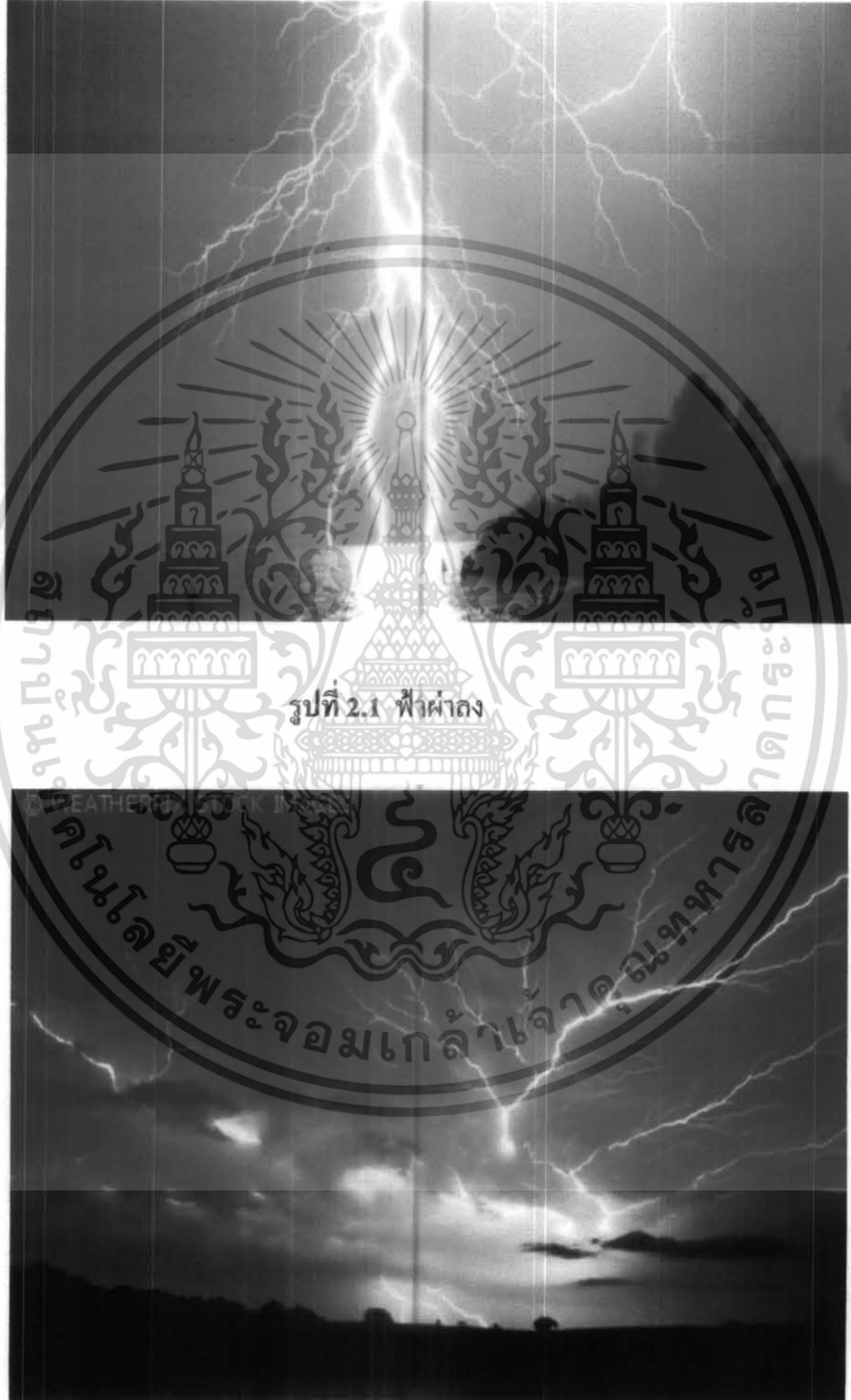
กระบวนการเกิดฟ้าผ่า คือ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าในก้อนเมฆถึงจุดวิกฤต จะเกิดการ ไอออไนเซชัน ตามหลักการเกิด ดิสชาร์จ ในก๊าซ การเกิด ไอออไนเซชันของอากาศจะเป็นลีดเดอร์ (Leader) หรือ หัวนำร่องมีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจิ้งหะกั้ว (stepped leader) โดยเฉลี่ยช่วงกั้วละประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุดความเร็ว 10-100 km/s แต่ละจิ้งหะกั้วจะหยุดพักราว 10-50  $\mu$ s ก่อนที่จะกระโดดกั้วต่อไป เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่พื้นโลก ที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้ เป็นต้น เกิด ไอออไนซ์ เป็นสตรีมเมอร์ (streamer) มีความยาว 1-100 เมตร เฉลี่ย 20 เมตร วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง จนมาพบกันเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้าจากพื้นวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่า 50-1000 km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรูยทางลงมาเอง ระยะทางสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดด เข้าหา สตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า คือ กระแสฟ้าผ้านั่นเอง

### 2.2 คุณลักษณะของฟ้าผ่า

#### 2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น [1]

ปรากฏการณ์ที่ประจุในก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ที่กล่าวมาเรียกว่า ฟ้าผ่าลง ซึ่งฟ้าผ่าลงจะสังเกตจากลำแสงฟ้าผ่าว่าจะมีการแขนงจากลำฟ้าผ่ากระจายสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ เนื่องจากว่า หัวนำร่องที่กรูยทางมานั้น อาจคืบหน้ามาหลายทางตามทางที่ขยายตัวได้ง่ายกว่า

ฟ้าผ่าขึ้นมีกระบวนการฟ้าผ่า เช่นเดียวกับ ฟ้าผ่าลง แต่หัวนําร่องจะเริ่มก่อตัวจาก ยอด  
 โครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตร ขึ้นไป เช่นต้นไม้ สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น สังกเกตจาก  
 ลำแสง จะคล้ายรากต้นไม้ เช่นเดียวกันแต่ จะแตกจากพื้นดินขึ้นฟ้า จากการสังเกตพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมัก  
 เป็นผลอันเนื่องมาจากฟ้าผ่าลง



รูปที่ 2.2 ฟ้าผ่าขึ้น

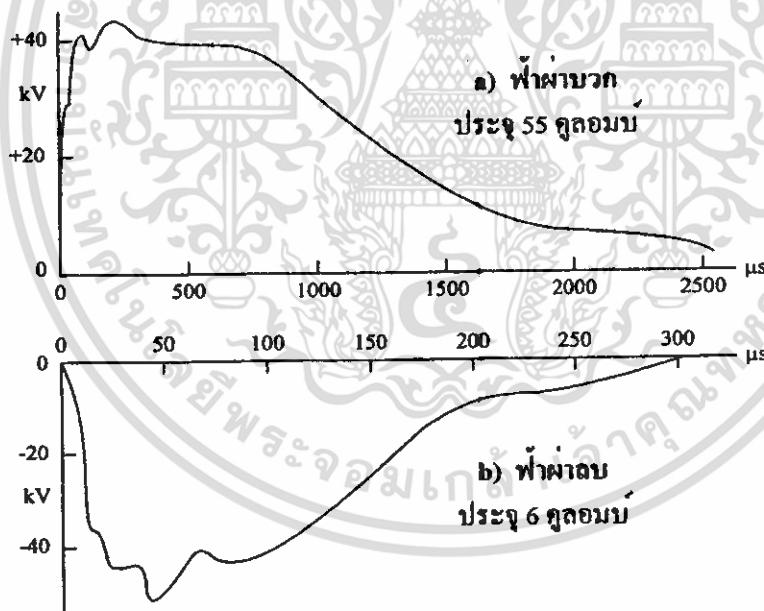
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่าและรูปคลื่น [1]

ฟ้าผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆสู่พื้นโลกเรียกว่า ฟ้าผ่าลบ ฟ้าผ่าที่นำประจุบวกลงมาเรียกว่า ฟ้าผ่าบวก จากข้อมูลพบว่า 80-85% มักเป็น ฟ้าผ่าลบและฟ้าผ่าลบ มักเป็นการผ่าซ้ำหลายครั้ง ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นฟ้าผ่าลำเดี่ยว

จากข้อมูลพบว่าประจุฟ้าผ่าบวกจะมีมากกว่า ประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่า และเวลาของรูปคลื่นก็ยาวมากกว่าถึง 9 เท่าเช่นกัน อธิบายได้ว่า ประจุบวกจะอยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ประจุลบจะอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆ ซึ่งประจุลบใกล้กว่าประจุบวก ประจุบวกจึงต้องสะสมประจุให้มากพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์มายังพื้นโลกได้

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า อาจกำหนดด้วยช่วงหน้าคลื่น (เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด) และหางคลื่น (เวลาดั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนกระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด) ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่น คืออัตราเพิ่มของกระแส  $di/dt$  หน่วยเป็น  $kA/\mu S$  ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ  $\Delta v = L di/dt$  ซึ่งต้องคำนึงถึงเมื่อออกแบบสายล่อฟ้า



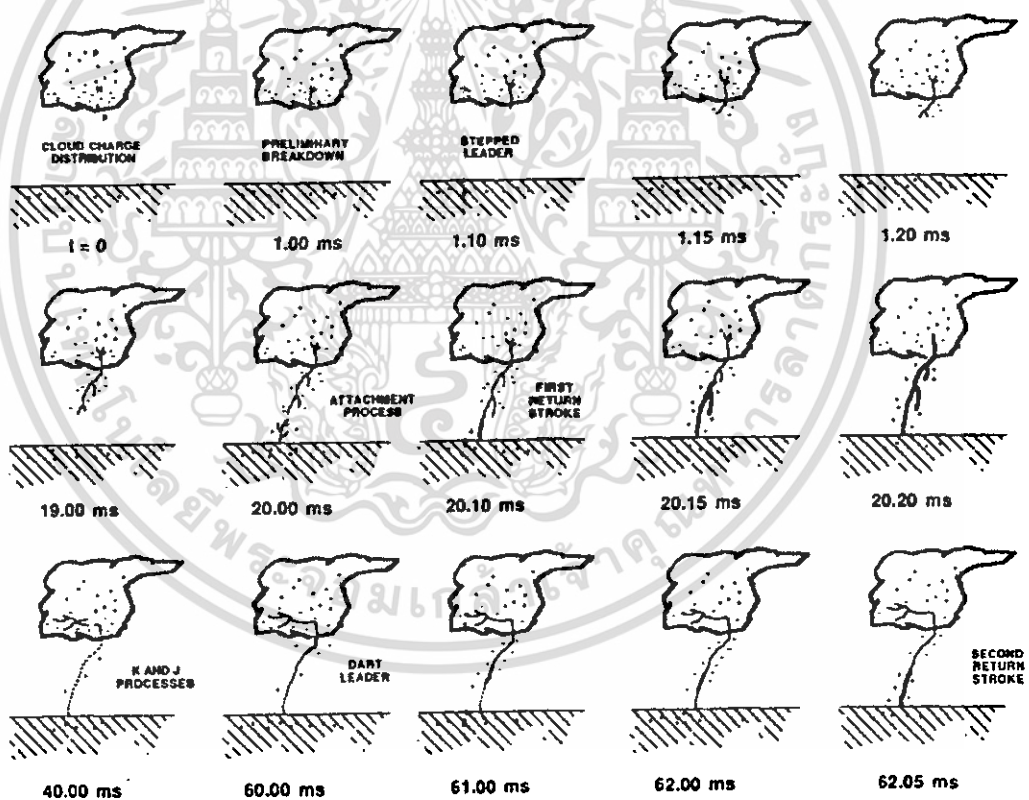
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

### 2.2.3 ฟ้าม่าช้า [1]

ในก้อนเมฆอาจมีจุดศูนย์กลางรวมกลุ่มหลายแห่ง เมื่อกลุ่มใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อนก็จะดิซชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นฟ้าม่าล่าแรกและหลังจากกลุ่มประจุแรกดิซชาร์จไปหมดแล้วก็จะทำให้เกิด สตรีมเมอร์ระหว่างประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิซชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวฟ้าม่าล่าแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะในอากาศในแนวฟ้าม่าล่าแรกยังไม่คืนสภาพความเป็นฉนวน จึงทำให้ก้อนเมฆจากกลุ่มอื่น ดิซชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้เรียกว่าฟ้าม่าช้า

ฟ้าม่าช้าจะมีช่วงเวลาดำเนินการระหว่างครั้งประมาณ 5-30 มิลลิวินาที ฟ้าม่าช้าจะไม่มีแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจิ้งหะก้าวของหัวนำร่อง และหน้าคลื่นของฟ้าม่าอีกทั้ง จะมีความร้อนสูงมาก

จากข้อมูลพบว่าเกิดการเกิดฟ้าม่าช้าขึ้นกับภูมิภาค ประเทศ ในประเทศเขตนหนาวจะมีฟ้าม่าล่าเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศเขตร้อน จะมีฟ้าม่าช้ามากกว่า



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดฟ้าม่าช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า [1]

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าหมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่ามากหรือน้อย ขึ้นกับปริมาณของประจุที่คิสซาร์จขึ้นกับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นกับฟ้าผ่าขึ้นหรือลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมป์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมป์

พารามิเตอร์ต่างๆของฟ้าผ่าคือ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า ประจุในลำฟ้าผ่า ช่วงเวลาน้ำคลื่น และความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่มีความน่าจะเป็นเกิดขึ้นร้อยละ 95,50 และ 5 ซึ่งเป็นผลงานบันทึกของ Berger ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟ้าผ่า

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเป็นร้อยละ		
			95	50	5
	<b>ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า</b>				
99	กระแสฟ้าผ่าลบลำแรก	kA	14	30	80
137	กระแสฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	kA	4.6	12	30
28	กระแสฟ้าผ่าบวก	kA	4.6	35	250
	<b>ประจุไฟฟ้า</b>				
91	ประจุไฟฟ้าผ่าลบลำแรก	C	1.1	5.2	24
124	ประจุไฟฟ้าผ่าลบลำผ่าตาม	C	0.2	1.4	11
88	ประจุไฟฟ้าผ่าลบทั้งหมด	C	1.3	7.5	40
26	ประจุไฟฟ้าผ่าบวก	C	20	80	350
	<b>ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์</b>				
88	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำแรก	C	1.1	4.5	20
119	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์ลำผ่าตาม	C	0.22	0.95	4.0
25	ประจุไฟฟ้าอิมพัลส์บวก	C	2.0	16	150

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	หน่วย	ความน่าจะเป็นเกิดเป็นร้อยละ		
			95	50	5
	<b>เวลาช่วงหน้าคลื่น</b>				
87	ฟ้าผ่าลบลำแรก	$\mu\text{S}$	1.8	5.5	18
120	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม	$\mu\text{S}$	0.22	1.1	4.5
19	ฟ้าผ่าบวก	$\mu\text{S}$	3.5	22	200
	<b>เวลาช่วงหลังคลื่น</b>				
78	ฟ้าผ่าลบลำแรก	$\mu\text{S}$	30	75	200
104	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม	$\mu\text{S}$	6.5	32	140
16	ฟ้าผ่าบวก	$\mu\text{S}$	25	230	2,000
	<b>ความชัน (di / dt)</b>				
90	ฟ้าผ่าลบลำแรก	$\text{kA}/\mu\text{S}$	5.5	12	32
124	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม	$\text{kA}/\mu\text{S}$	12	40	120
21	ฟ้าผ่าบวก	$\text{kA}/\mu\text{S}$	0.20	2.4	32
133	ช่วงเวลาระหว่างลำฟ้าผ่าลบ	$\text{mS}$	7	35	150

## 2.3 ผลจากฟ้าผ่า

### 2.3.1 ผลทางความร้อน [1]

เนื่องจากกระแสฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก จากข้อมูลอาจมากถึง 30000 เคลวิน เมื่อฟ้าผ่าลงที่ใด ก็อาจเกิดเพลิงไหม้ได้ หรือ แม้แต่โลหะก็อาจหลอมละลายได้

### 2.3.2 ผลจากแรงทางกลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งแรงบิดนี้อาจทำให้โครงสร้างอาคารเสียหายได้หรือแม้แต่วัสดุที่รองรับฟ้าผ่า ก็มีโอกาสเสียหายได้ ถ้าระบบล่อฟ้าไม่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ผลจากการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก [1]

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งไปรบกวนระบบสื่อสาร ระบบควบคุม รวมทั้งระบบการวัด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ถ้าอุปกรณ์เหล่านี้ มีความไวต่อสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้จากอุปกรณ์จากระบบเหล่านี้ ไม่อาจเชื่อถือได้ ดังนั้นในการใช้อุปกรณ์หรือชื่ออุปกรณ์ ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญ เช่นเดียวกับระบบล่อฟ้า

### 2.3.4 ผลจากการเกิดแรงดัน สปราร์กด้านข้าง [1]

ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ (L) และมีความต้านทาน (R) จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำและความต้านทาน

$$\Delta v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามี  $\frac{di}{dt}$  สูง ดังนั้น ในการออกแบบระบบล่อฟ้าต้องคำนึงถึงค่า L และ R

ด้วยแรงดัน  $\Delta v$  อาจสูงมากพอที่จะทำให้เกิดการสปาร์ก ด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี

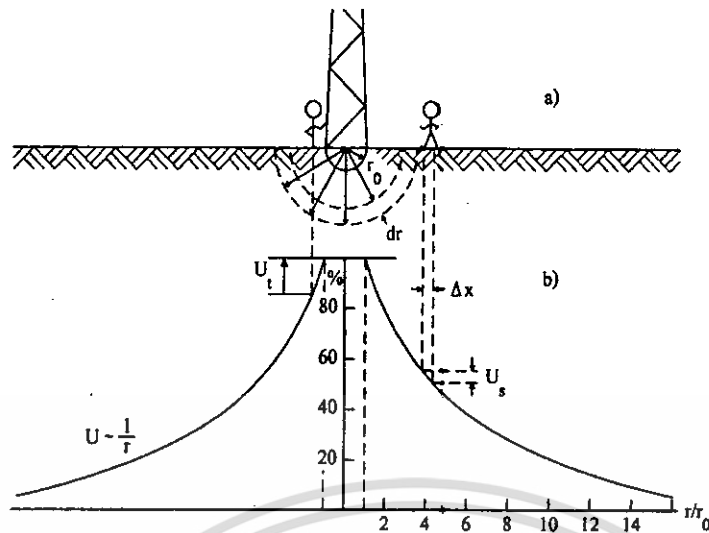
### 2.3.5 ผลที่เกิดจากฟ้าผ่าต่อคนโดยตรง [1]

โดยธรรมชาติแล้วฟ้าจะผ่าที่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น ดังนั้น ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้คน ไปอยู่ในที่โล่งแจ้ง ไม่มีต้นไม้ หรือพื้นที่เสี่ยงใดๆ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้ อาจทำให้เสียหายถึงชีวิตได้

### 2.3.6 ผลจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส [1]

ฟ้าผ่าลงที่ใด เมื่อกระแสลงดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดบนดิน ซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ เรียกว่าแรงดันช่วงก้าว

ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่าน ไป สู่รากสายดินที่คนมีโอกาสสัมผัส ถึงกับคนที่ยืนอยู่ เพราะฉะนั้น ต้องคำนึงถึง แรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส ในการออกแบบระบบล่อฟ้าด้วยเช่นกัน



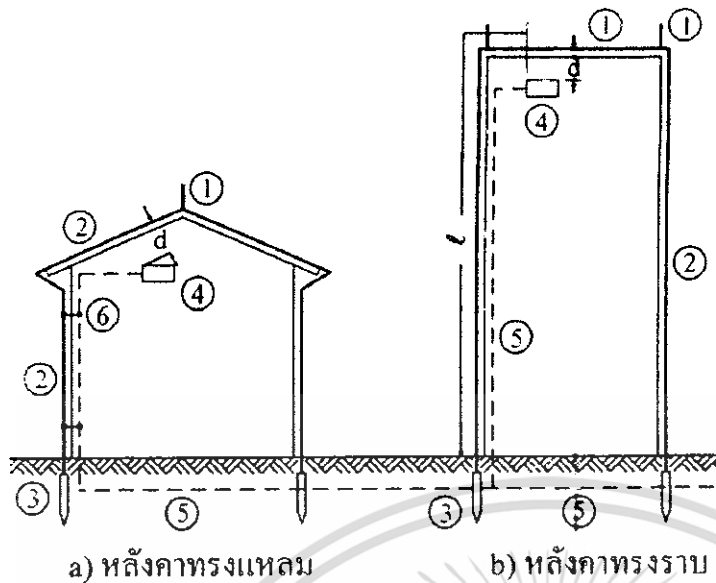
รูปที่ 2.5 แรงสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำว

#### 2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าต่ออาคารและสิ่งปลูกสร้างตามมาตรฐาน IEC [2]

การป้องกันฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้าง และสิ่งมีชีวิต ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [3] โดยที่มาตรฐาน IEC 60060-2 ได้บอกความต้องการสำหรับป้องกันของสิ่งปลูกสร้างในระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบป้องกันฟ้าผ่าและป้องกันต่ออันตรายเนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำว

#### ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันและชนิดของระบบการป้องกัน

Protection levels	Type of LPS
I	I
II	II
III	III
IV	IV



1. ตัวนำล่อฟ้า
2. สายตัวนำลงดิน
3. รากสายดิน
4. ถังโลหะ
5. ท่อโลหะ
6. ต่อท่อโลหะในอาคาร  
เข้ากับระบบป้องกัน

รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าแบบฟาราเดย์

#### 2.4.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก (External lightning Protection System) [2]

การป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงต่อสิ่งปลูกสร้างซึ่งรวมถึงการผ่าด้านข้าง ที่จะนำกระแสฟ้าผ่าลงดินเพื่อให้กระแสแพร่ลงไปในดินให้ปราศจากผลจากความร้อนและทางกล รวมถึงการสปาร์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดไฟไหม้และการระเบิด

ส่วนประกอบของการป้องกัน จะใช้วัสดุที่นำไฟฟ้าที่มีอยู่ในสิ่งปลูกสร้างมาประยุกต์

เนื่องด้วยความสูงของตัวอาคาร และการพัฒนาทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ระบบล่อฟ้ากลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอาคาร และระบบล่อฟ้าที่จะกล่าวต่อไปนี้ ได้รับความนิยมในการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า เนื่องจากความสะดวก และการทำงานที่ไวต่อสนามไฟฟ้ารอบตัวมัน

ระบบป้องกันฟ้าผ่าประกอบด้วย

- ตัวนำล่อฟ้า
- สายตัวนำลงดิน
- รากสายดิน

##### 2.4.1.1 ตัวนำล่อฟ้า (Air terminal)

ตัวนำล่อฟ้าอาจเป็นแท่งตัวนำหรือสายตัวนำยึดไว้บนยอดสูงสุดของสิ่งปลูกสร้างอาคาร หรือ สิ่งที่ต้องการป้องกัน ตัวนำล่อฟ้ามักนิยมทำปลายยอดให้แหลม เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้นสูงกว่าที่อื่นในบริเวณใกล้เคียง และ สร้างสตริมเมอร์ได้ง่าย ทำหน้าที่ล่อฟ้าให้ผ่าลงที่ตัวนำล่อฟ้าหากเกิดฟ้าผ่าที่บริเวณนั้น ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวนำล่อฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งปลูกสร้างส่วนบนสุด เช่นหลังคาทรงแหลมปล่องไฟ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Air termination จะประกอบด้วย การรวมกันของวัสดุเหล่านี้

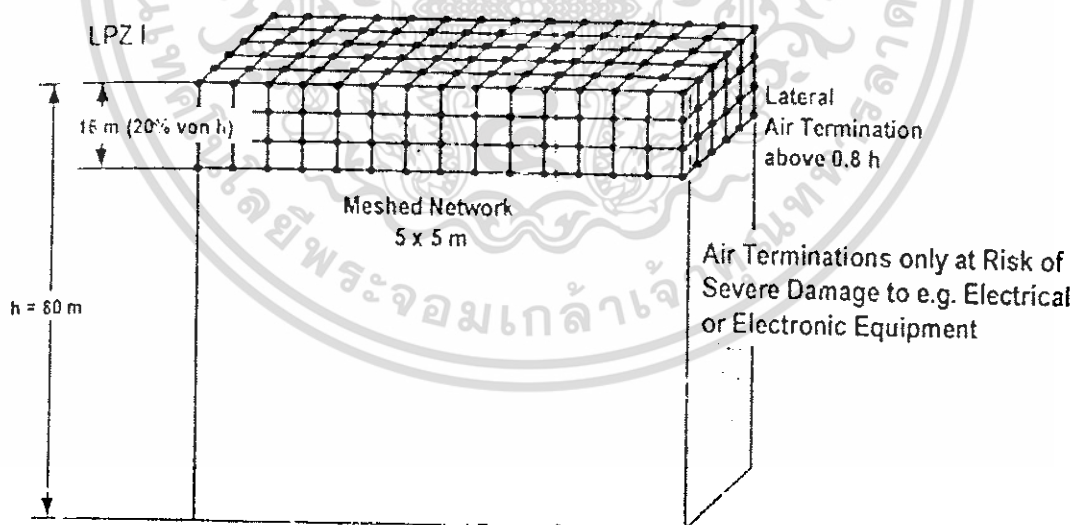
- แท่งตัวนำ
- สายตัวนำ
- โครงตาข่าย

การออกแบบวิธีการป้องกันฟ้าผ่าวิธีต่อไปนี้จะถูกใช้โดยพิจารณาจากตำแหน่งของ  
Air termination system

- วิธีมุมป้องกัน เหมาะสมสำหรับอาคารปกติ แต่วิธีนี้สำหรับอาคารที่มีความสูงจำกัด
- วิธีทรงกลมกลิ้ง เหมาะสำหรับทุกอาคาร
- วิธีโครงสร้างตาข่าย เหมาะสำหรับการป้องกันบนอาคารที่มีลักษณะเป็นระนาบ

ที่สิ่งปลูกสร้างที่สูงกว่า 60 เมตร ฟ้าผ่าด้านข้างอาจเกิดขึ้น แต่โอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับฟ้าผ่าด้านบน เราจึงให้ความสำคัญกับฟ้าผ่าด้านบนมากกว่า

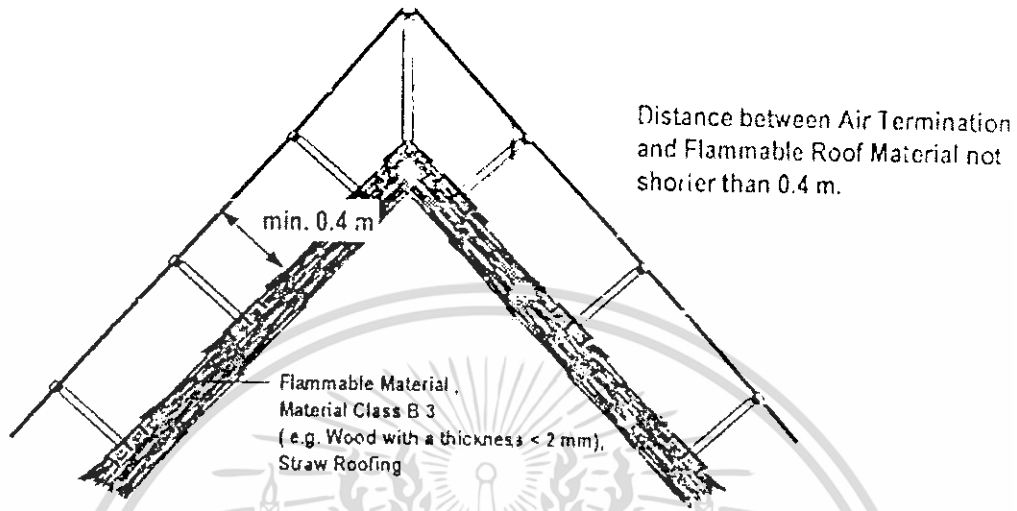
ถ้าบนสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูง การผ่าด้านข้างอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออาคารได้มีการกำหนดตำแหน่งของ Air termination system บนส่วนของอาคาร



**รูปที่ 2.7** air termination แบบวิธี โครงสร้างตาข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหลังคาทำด้วยวัสดุที่ติดไฟได้ ระยะทางระหว่างหลังคาและตัวนำล่อฟ้าจะต้องไม่น้อยกว่า 0.4 เมตรของ Air termination system ที่ประกอบด้วยแท่งตัวนำ สายตัวนำ หรือ โครงสร้างตาข่าย



**รูปที่ 2.8** air termination เมื่อหลังคาทำจากวัสดุที่ติดไฟได้

วัสดุที่จะกล่าวต่อไปนี้ที่อาคารมีอยู่แล้วอาจจะพิจารณาเป็น Air termination system

แผ่นโลหะ (Metal sheet) บนสิ่งปลูกสร้าง ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- แต่ละชั้นของโลหะต้องเชื่อมกันทางไฟฟ้าอย่างถาวร
- ความหนาของแผ่นโลหะต้องไม่น้อยกว่า  $t^a$  ถ้าได้แผ่นโลหะเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย
- แผ่นโลหะต้องไม่ถูกปกคลุมโดยวัสดุที่เป็นฉนวน

**ตารางที่ 2.3** ความหนาแน่นที่สุดของแผ่นโลหะ หรือ ท่อโลหะที่สามารถใช้ในระบ

Air termination system

Type of LPS	Material	Thickness $t^a$ (mm)	Thickness $t^b$ (mm)
I to IV	Fe	4	0.5
	Cu	5	0.5
	Al	7	0.7

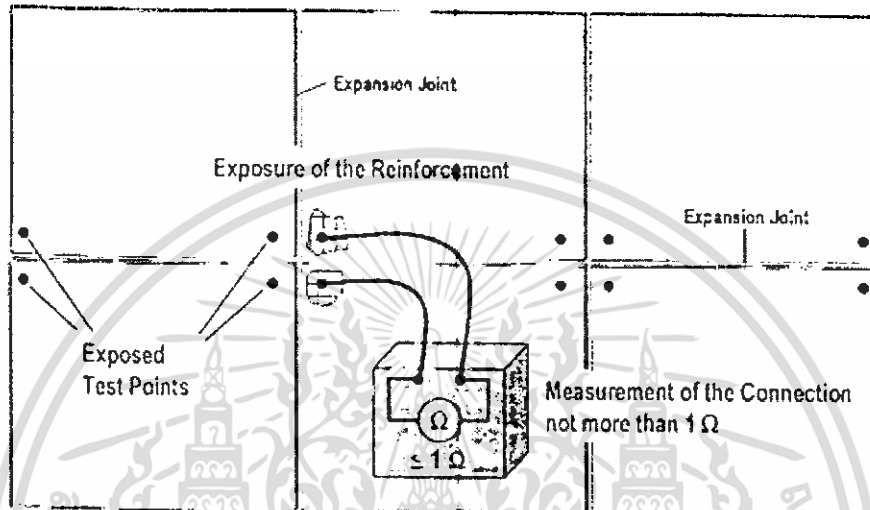
$t^a$  prevents puncture hot spot or ignition

$t^b$  only for metal streets if it is not important to prevent puncture hot spot or ignition problems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

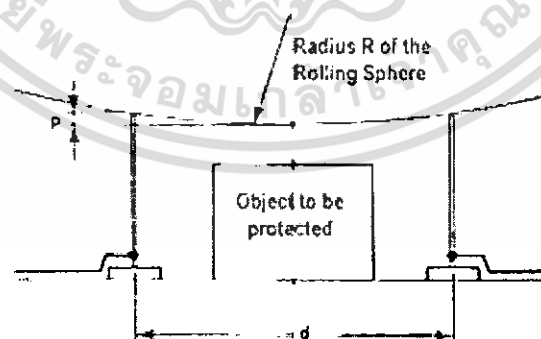
โลหะที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต อาจถูกพิจารณาว่าได้รับการเชื่อมอย่างถาวรทั้งแนวนอน และแนวตั้ง

ในกรณีที่โครงสร้างถูกทำให้ล้่วงหน้าก่อนจะออกแบบสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่า การเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโลหะที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตจะเชื่อมระหว่างแต่ละ ช่วงของคอนกรีต โดย ความต้านทานของแต่ละช่วงคอนกรีตต้องน้อยกว่า  $1 \Omega$



รูปที่ 2.9 การใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เป็น air termination

ระบบป้องกันของ 2 Air-termination แบ่งโลหะ/สายโลหะ



รูปที่ 2.10 ระยะเวลาป้องกัน โดย 2 Air-termination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะ p สามารถคำนวณได้จาก

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d^2}{4}\right)} \quad (2.2)$$

เมื่อ

p = Penetration

R = Radius of the Rolling Sphere

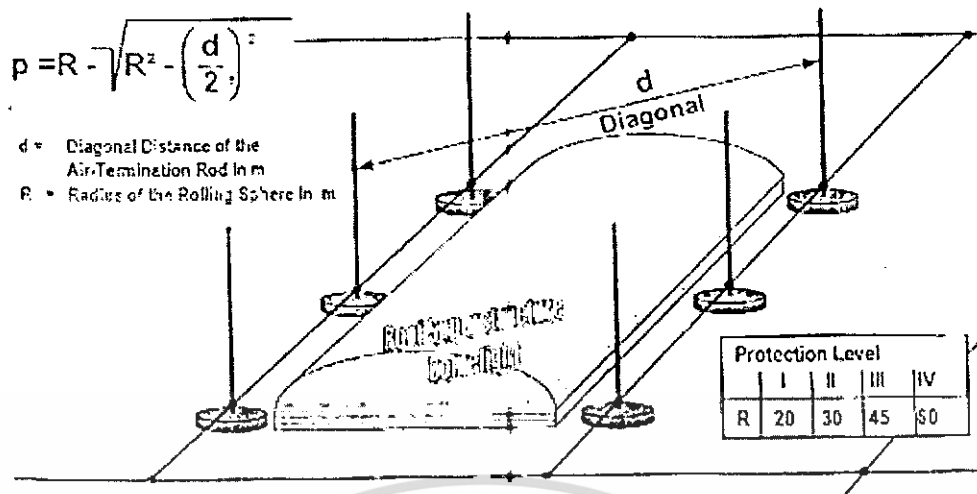
d = Distance between two Air-termination Rods or two parallel Air-termination Lines

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงการคำนวณระยะป้องกัน

d=Distance of the Air-Termination Rods/Mesh Size [m]	Protection Level			
	I	II	III	IV
	<b>R=Radius of the Rolling Sphere [m]</b>			
	20.00	30.00	45.00	60.00
	<b>P=Penetration of the Rolling Sphere [m]</b>			
2.00	0.03	0.02	0.01	0.01
3.00	0.06	0.04	0.03	0.02
4.00	0.10	0.07	0.04	0.03
5.00	0.16	0.10	0.07	0.05
6.00	0.23	0.15	0.10	0.08
7.00	0.31	0.20	0.14	0.10
8.00	0.40	0.27	0.18	0.13
9.00	0.51	0.34	0.23	0.17
10.00	0.64	0.42	0.28	0.21
15.00	1.46	0.95	0.63	0.47
20.00	2.68	1.72	1.13	1.84

72628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รูปที่ 2.11 ระยะการป้องกันโดยหลาย ๆ Air-termination

### 2.4.1.2 ตัวนำลงดิน (down conductor)

ตัวนำลงดินจะต้องต่อทางไฟฟ้าอย่างดีกับตัวนำล่อฟ้า เมื่อฟ้าผ่าลงบนตัวนำล่อฟ้าแล้ว กระแสจะไหลลงผ่านพื้นดิน ผ่านตัวนำลงดินกระจายออกไปในดินอย่างรวดเร็วผ่านทางรากสายดิน ตัวนำลงดินซึ่งต่อกับตัวนำล่อฟ้า กับสายรากดิน จะต้องมีความถี่แคบๆ มีความเหนียวแน่นๆ ฉะนั้นในบางกรณีอาจต้องใช้สายตัวนำลงดินหลายๆเส้นขนานกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างยาวของตัวอาคาร ถ้าตัวอาคารยิ่งกว้างมากก็ต้องใช้ตัวนำลงดินมากขึ้น และต้องเชื่อมโยงกันในช่วงกลางของความสูงด้วย ถ้าตัวอาคารยิ่งสูงมากๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสปาร์กด้านข้าง เนื่องจาก แรงดันเหนียวแน่น

ความยาวโดยประมาณของตัวนำลงดินที่ต้องการมีการเชื่อมโยงถึงกัน

$$l \leq 20d \quad (2.3)$$

เมื่อ  $l$  คือ ความยาวของสายตัวนำลงดินเป็นเมตร (m)

$d$  คือ ระยะช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็น โลหะอื่น ต่อลงดินเป็นเมตร โดยทั่วไปจะเชื่อมโยงส่วนที่เป็น โลหะ เช่น ถัง โลหะ บันไดเหล็ก ท่อน้ำประปาโลหะ เข้ากับตัวนำลงดิน หรือ ระบบป้องกันฟ้าผ่า

### 2.4.1.3 รากสายดิน (earth electrode)

รากสายดินเป็นตัวนำที่ฝังอยู่ในดิน เช่น แท่งทองแดงหรือแท่งเหล็กชุบสังกะสี หรือเหล็ก หุ้มด้วยทองแดง เพื่อช่วยให้ความต้านทานของระบบสายดิน หรือของระบบป้องกันฟ้าผ่ามีค่าต่ำ กระแสฟ้าผ่าจะได้ไหลกระจายออกไปได้สะดวกและรวดเร็ว ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้รากสายดิน จำนวนหลายอันและฝังให้ลึกลงไป ในดินมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดิน ขนาดของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยคำนึงถึงหลักสองประการ คือ ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานของระบบสายดินจะต้องไม่ทำให้เกิดสปาร์ก ด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานดังกล่าว และจะต้องไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างช่วงก๊าว (ประมาณ 1 เมตร) บนพื้นดินรอบๆ อาคารซึ่งเรียกว่า แรงดันช่วงก๊าว และแรงดันสัมผัสเกินกว่าที่กำหนด เพราะจะทำให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เดินอยู่ในบริเวณนั้นขณะเกิดฟ้าผ่า

เพื่อมิให้เกิดสปาร์กด้านข้างภายในอาคาร อันเนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานของรากสายดิน  $R_e$  ค่าความต้านทานจะต้องมีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้จากสมการ

$$R_e \leq 5d \quad (2.4)$$

เมื่อ  $d$  คือ ช่องว่างในอากาศระหว่างตัวนำลงดินกับส่วนที่เป็นโลหะอื่นที่ต่อถึงดิน หน่วยเป็นเมตร

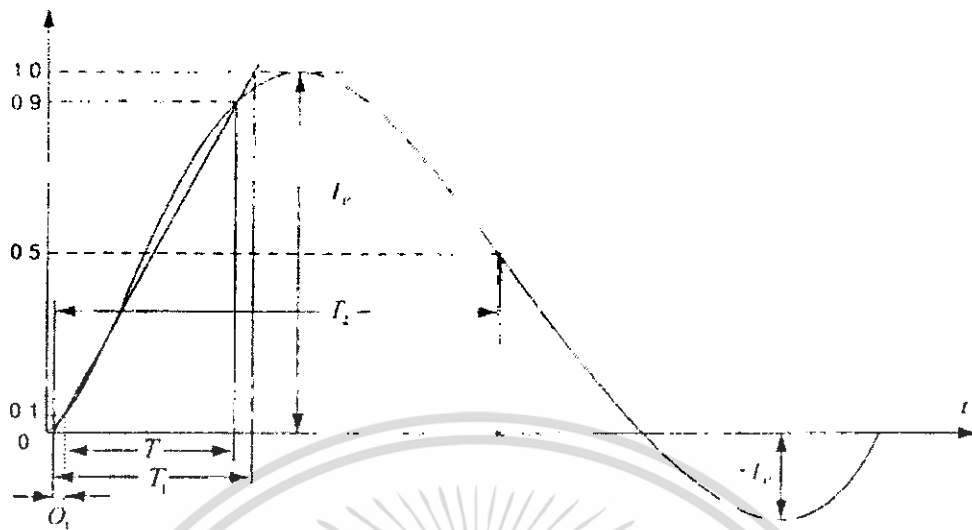
## 2.5 การวัดกระแสอิมพัลส์

ในการวิจัยทางด้านเทคนิคและวิทยาศาสตร์หลายอย่างมักจะพบกับความจำเป็นที่ต้องวัดกระแสทรานเซียน คือ กระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น กระแสฟ้าผ่าธรรมชาติ หรือ การเลียนแบบสร้างกระแสอิมพัลส์ขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ การวัดกระแสดีสชาร์จ์ในการวิจัยพลาสมาฟิสิกส์ กระแสลัดวงจรในระบบส่งจ่ายกระแสทรานเซียนในเอสซีอาร์ กระแสผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะที่ชั่วสัมผัสทำงาน ค่ากระแสที่วัดอาจจะมีค่าตั้งแต่สิบลีบิแอมป์ไปจนถึงสองสามร้อยกิโลแอมป์ ซึ่งมีเวลาขึ้น (rise time) ตั้งแต่นาโนวินาทีไปจนถึงหลายๆ ไมโครวินาที การวัดและบันทึกกระแสที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วเช่นนี้มีความจำเป็นต้องใช้ระบบวัดที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (wide-band measuring system) และมีเวลาขึ้นเร็วในเกณฑ์เดียวกับกระแสที่วัด ถึงแม้กระแสอิมพัลส์จะค่อนข้างช้าก็ตามก็ต้องใช้เครื่องวัดหรือบันทึกที่มีเวลาขึ้นสั้นมากพอเพื่อวัดกระแสสไปค์หรือยอดแหลมได้ถูกต้องหากใช้ชั้นวัดที่มีเวลาคงตัวนานเกินไปจะทำให้ผลการวัดผิดพลาดได้

### 2.5.1 ชนิดและมาตรฐานของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [๑]

กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสทรานเซียน ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเสมือนเช่น กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งเกิดเนื่องจากการคายประจุระหว่างก้อนเมฆกับพื้น โลกนั่นเอง โดยขนาดของกระแสฟ้าผ่าจริงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาตินั้น จะมีขนาดของกระแสเป็นกิโลแอมป์จนถึงหลายร้อยกิโลแอมป์ แต่โดยปกติแล้วการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20 kA ถึง 30 kA ในขณะที่กระแสอิมพัลส์เป็นกระแสที่จำลองจากลักษณะรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าโดยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่จะมีปริมาณประจุในระดับที่น้อยลงและภายในระยะเวลาที่สั้นกว่า เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น การทดสอบกับคักฟ้าผ่า การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.12** รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60060-1(1989) [2]

เมื่อ  $T_1$  คือ Rise time  
 $T_2$  คือ Time to half value  
 $I_p$  คือ Current peak value

ซึ่งรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วยค่าองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

1. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (Impulse Current peak,  $I_p$ )
2. เวลาหน้าคลื่น (Front time,  $T_1$ ) เป็นช่วงเวลาที่กระแสอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดกระแสอิมพัลส์
3. เวลาหางคลื่น (Time to half-value หรือ tail time,  $T_2$ ) เป็นช่วงเวลาดังแต่กระแสเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดกระแสอิมพัลส์ จนกระทั่งขนาดลดลงจนเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
4. ขั้วของกระแส อาจจะเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน

การกำหนดชนิดของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์จะแทนด้วย เวลาหน้าคลื่นต่อเวลาหางคลื่น หรือ  $T_1/T_2$  เช่น รูปคลื่นกระแสिमพัลส์ชนิด  $8/20 \mu s$  หมายความว่า เป็นรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่มี เวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu s$  เวลาหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$  เป็นต้น

รูปคลื่นกระแสिमพัลส์แบบ Double exponential ตามมาตรฐานของ IEC 60060-1(1989) [2] มีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด คือ

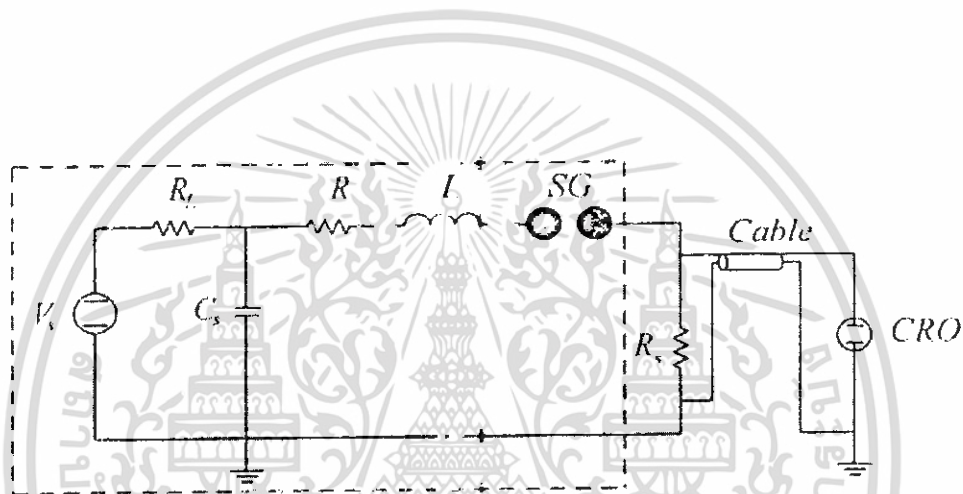
- 1)  $1/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $1 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 2)  $4/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $4 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 3)  $8/20 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $8 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $20 \mu s$
- 4)  $30/80 \mu s$  รูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ  $30 \mu s$  และหางคลื่นเท่ากับ  $80 \mu s$

การวัดรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ จะต้องมีความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ต้องอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐานของ IEC 60060-2 (1984) [3] ที่ได้กำหนดไว้ โดยมีรายละเอียดในการกำหนดค่าดังนี้

1. การวัดค่าช่วงเวลาหน้าคลื่น ( $T_1$ ) ให้คำนวณจาก 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่รูปคลื่นกระแสिमพัลส์เพิ่มค่าจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์
2. การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น ( $T_2$ ) ให้คำนวณจากช่วงเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์ จนถึงจุดที่กระแสिमพัลส์ลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสिमพัลส์
3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสिमพัลส์คือ จุดตัดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสिमพัลส์หน้าคลื่น

### 2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [6]

การสร้างกระแสอิมพัลส์ทำได้โดยอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียน (Transient) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ, ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ, แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและในวงจรมีอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดูคอนเพื่อควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงเวลาสั้นๆ โดยมีหลักการทำงานคือ ตัวเก็บประจุ  $C_s$  จะถูกอัดประจุหรือพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้แล้วทำการปล่อยให้คิซซาร์จผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ก็จะเกิดการออสซิลเลชันแบบหน่วง เพราะในตัวเหนี่ยวนำ  $L$  นั้นจะมีความต้านทานโดยธรรมชาติและถ้าวัสดุทดสอบมีความต้านทานด้วยก็จะทำให้เกิด การหน่วงมากขึ้น ฉะนั้นวงจรของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์พื้นฐานจึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เมื่อ	$V_s$	คือ	แรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ
	$R_L$	คือ	ตัวต้านทานจำกัดกระแส
	$R_s$	คือ	ตัวต้านทานแบบชั้นท์
	$R$	คือ	ตัวต้านทานในวงจร
	$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำในวงจร
	$C_s$	คือ	ตัวเก็บประจุในวงจร
	SG	คือ	สปาร์กแกปมิโกสวิตช์ (Trigger)
	----	คือ	ส่วนของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

การเกิดออสซิลเลชันของวงจรรูปที่ 2.13 จะเกิดการหน่วงมากน้อยจะขึ้นอยู่กับความต้านทานรวม  $R$  ในวงจร และค่าความเหนี่ยวนำรวม  $L$  ในวงจร ค่ากระแสสูงสุดจะได้เมื่อค่า  $R$  มีค่าต่ำสุด คือ

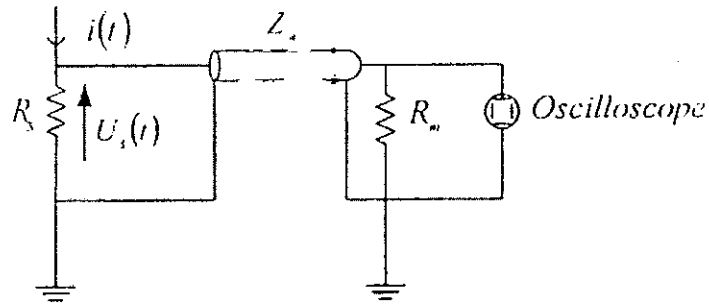
$$R \ll 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.3)$$

### 2.5.3 การวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ [6]

การวัดและบันทึกสัญญาณของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบวัดที่มีแบนด์วิดท์กว้าง (Wide-band measuring) และมีเวลาขึ้นเร็วในเกณฑ์เดียวกับกระแสที่วัด ดังนั้นต้องใช้เครื่องวัดที่มีเวลาขึ้น (Rise time) ดีพอเพื่อให้สามารถวัดกระแสที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วได้ ซึ่งในการวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์สามารถวัดได้หลายวิธี ได้แก่

1. ชั้นที่ความต้านทานต่ำ (Low ohmic shunts)
2. ขดลวดเหนี่ยวนำ (Rogowski coil)
3. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer)

แต่ในที่นี้จะอธิบายถึงการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่ โดยความต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึง ความต้านทานที่มีค่าโอห์มต่ำๆ และทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ โดยให้กระแสอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัดไหลผ่านความต้านทานชั้นที่ จากนั้นวัดแรงดันที่ตกคร่อม (Voltage drop) ความต้านทานชั้นที่ด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณของแรงดันที่วัดได้จะถูกส่งผ่านสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีความต้านทานสมคู่กัน ( $R_m$ ) ต่อที่ปลายสายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่

เมื่อ	$R_s$	คือ	ความต้านทานชั้นที่
	$Z_w$	คือ	ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
	$R_m$	คือ	ความต้านทานสมมูล

จากรูปวงจรที่ 2.14 ถ้าหากความต้านทานชั้นที่เป็นความต้านทานล้วน และไม่คิดถึงค่าของเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ( $Z_w$ ) เพราะ  $R_s \ll Z_w$  จึงสามารถอาศัยกฎของโอห์มในการหาค่ากระแสได้คือ

ตัวอย่างเช่น

$$U_s(t) = i(t)R_s$$

$$i(t) = 100 \text{ kV}$$

$$U_s(t) = 100 \text{ V}$$

$$R_s = \frac{U_s(t)}{i(t)} = 1 \text{ m}\Omega$$

ในการวัดกระแสสลับพัลส์ซึ่งเป็นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงของ สัญญาณรูปคลื่นกระแสอย่างรวดเร็ว (มีความถี่สูง,  $\omega$ ) ดังนั้นผลของ Stray Capacitance ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแบบแกนร่วมในวงจรวัดนั้นจะมีค่าของ Capacitance Reactance เท่ากับ  $\frac{1}{\omega C}$  แต่จะมีค่าน้อยมากซึ่งจะไม่มีผลต่อระบบวัดมากนัก แต่ผลของสนามแม่เหล็กตกค้าง (Stray magnetic) ซึ่งจะมีค่า Reactance เท่ากับ  $\omega L$  จะส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

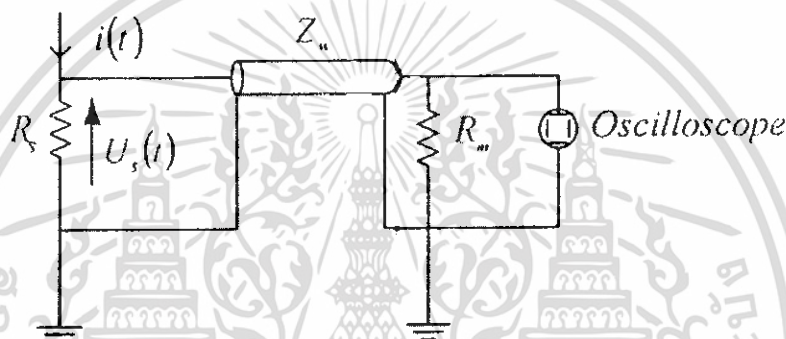
## บทที่ 3

### การวัดและการออกแบบตัวตรวจจับกระแสฮอลล์

#### 3.1 การวัดกระแสฮอลล์ด้วยความต้านทานชั้นที่

##### 3.1.1 หลักการทำงานของความต้านทานชั้นที่

หลักการ คือวัดแรงดันตกคร่อม ความต้านทานที่เราทราบค่าแน่นอนด้วย Oscilloscope ผ่านสายตัวนำเคเบิลดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรวัดกระแสฮอลล์ด้วยชั้นที่ความต้านทานต่ำ

ในทางปฏิบัติเมื่อกระแสไหลผ่าน R-Shunt จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแรงดันตกคร่อมจริงจะเป็นไปตามสมการ

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ R-Shunt คือทำให้ L มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่เราไม่ต้องการวัด ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงค่า L ส่วนของ  $L \frac{dI}{dt}$  ก็จะเป็นค่าความผิดพลาดของการวัดที่ประกอบขึ้นเป็นค่า V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ชนิดของความต้านทานชั้นที่ [6]

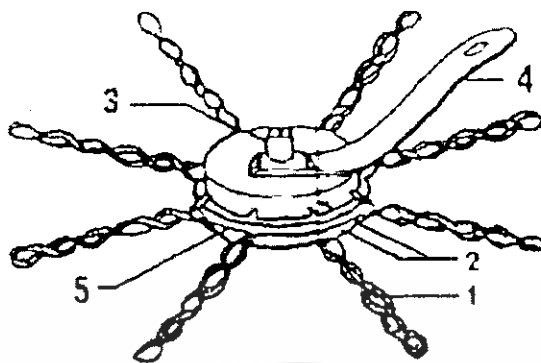
ความต้านทานชั้นที่กำหนดได้โดยระดับผลตอบสนองทางเวลาและ การกระจายความร้อนของความต้านทาน ผลตอบสนองชั่วขณะสามารถตรวจสอบได้ในการทดสอบกับวงจรที่ผลิตสัญญาณ Square current pulse และ Oscilloscope ที่ใช้วัดจะต้องมีความเร็วพอที่จะจับสัญญาณได้ ค่าความร้อนของความต้านทานที่เกิดขึ้นสามารถปรับได้จากการปรับเปลี่ยนของวัสดุที่ใช้ทำความต้านทานเป็นอัตราส่วนของความต้านทานความร้อน และพิคคของ Impulse current จากเป้าหมายของการออกแบบสามารถแบ่งแนวความคิดในการสร้างความต้านทานชั้นที่ ออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

#### 3.1.2.1 ความต้านทานชั้นที่ แบบ Wire wound หรือ Squirrel cage [6]

การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในการบันทึกกระแสของหม้อแปลงทดสอบ หรืออุปกรณ์ที่ต้องการวัดเช่น วัดกระแสในวงจร Shunt Resistance ที่เลือกใช้ต้องสามารถเข้ากับเครื่องบันทึกที่มีความไวสูง ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นตัวทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ในวงจรการวัด สัญญาณอิมพัลส์ ทำให้การวัดรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ อาจคาดเคลื่อนได้ถ้าอยู่ใกล้เครื่องกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งการรบกวนสามารถทำให้ลดลงได้โดยการ shielding ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

การพันด้วยลวดความต้านทาน Shunt แบบ wire wound นั้นเป็นการนำเอาหลักการในการไหลของกระแสบนตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นรอบๆ ของตัวนำนั้น โดยแนวความคิดนั้นคือจะทำอย่างไรให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นหายไป หรือทำให้เกิดการหักล้างกันไป ซึ่งวิธีการคือการทำให้กระแสที่ไหลนั้นเกิดการไหลวนกลับหรือทำให้ไหลสวนทางกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งวิธีการพันออกได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

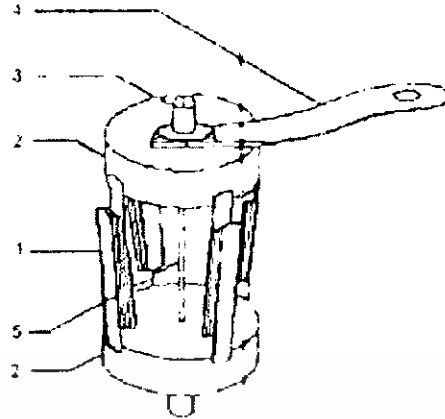
- ชนิดของ Shunt ที่พัฒนามาจากแบบ star เป็นสร้างความต้านชั้นที่โดยการบิดหมุนลวดความต้านทานที่มีการหุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำให้ทิศทางของกระแสที่ไหลเกิดการไหลวนกลับซึ่งจะทำให้เกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้



**รูปที่ 3.2** Star-type Wire wound Shunt

1. ชุดขดลวดความต้านทานที่ทำโดยการบิดหมุนลวดที่มีการหุ้มด้วยฉนวน
2. จุดต่อของกระแสเป็นทองแดงแผ่นหนาทรงกลม
3. จุดต่อกับสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. แผ่นฉนวนต่อระหว่างแผ่นทองแดง

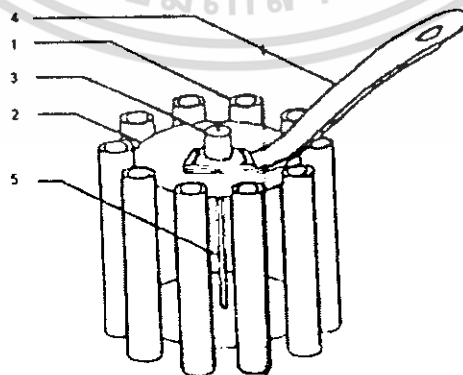
- วิธีการออกแบบ Star-type Shunt อีกแบบหนึ่ง ซึ่งก็จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการหักล้าง โดยการทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไหลสวนทางกันด้วยการนำแผ่นความต้านทานมาพับ โดยการพับนั้นจะเป็นลักษณะทับทบกันไปมาซึ่งในการพับทบกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกันไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นการพับตัวต้านทานและจะแสดงการวางโครงสร้างของแผ่นตัวต้านทานด้วย



**รูปที่ 3.3** Squirrel cage Shunt โดยใช้ลวดความต้านทานแบบพับซ้อน

1. การพับความต้านทานที่หุ้มและกันด้วยฉนวน
2. จุดต่อของกระแสที่ทำมาจากแผ่นทองแดงกลม
3. จุดต่อสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. Output circuit conductor

- จะเป็นการพัน โดยยึดหลักการเดิมเหมือนที่ผ่านมามีแต่จะแตกต่างที่วิธีการพัน คือจะเป็นลักษณะของการนำเอาเส้นลวดความต้านทานมาพันบนท่อฉนวนดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยการพันนั้นพันในทิศทางที่ทำให้กระแสไหลสวนทางกันเช่นกัน ซึ่งในการพันกันในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีฉนวนกันระหว่างเส้นลวดด้วยเช่นกัน



**รูปที่ 3.4** Squirrel cage Shunt ที่สร้างจากลวดความเหนียวนำค่าพันกระจายให้การพัน

สม่ำเสมอบนฉนวนทรงกระบอก

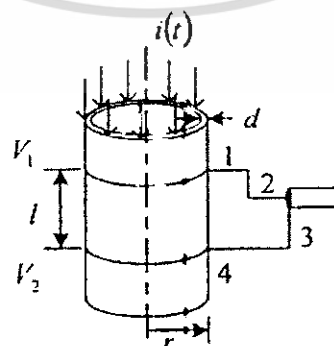
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความต้านทานความเหนียวนำค่าพันบนท่อฉนวน
2. จุดต่อของกระแสโดยทำจากแผ่นทองแดงกลม
3. จุดต่อสาย Coaxial
4. Grounding Strap
5. Output circuit conductor

แต่วิธีนี้จะมีความยุ่งอย่างมากและมีข้อเสียเนื่องจากการพันจะก่อให้เกิด เป็นลักษณะของวงรอบ (Loop) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนียวนำได้ง่าย โดยจะทำให้ค่าความต้านทานของชั้นนั้นมีค่าที่ผิดพลาดไปจากเดิมได้

### 3.1.2.2 ความต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular [6]

ในการสร้างความต้านทานชั้นที่ใช้สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์นั้น จะต้องเป็นความต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำๆ เพราะจะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานต่ำไปด้วยเมื่อนำมาวัดค่าของกระแสอิมพัลส์ จึงได้มีการสร้างความต้านทานชั้นที่ขึ้นมาหลายชนิดด้วยกันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นการสร้างความต้านทานชั้นที่แบบชนิด Wire wound ซึ่งความต้านทานชั้นประเภทนี้ จะมีผลของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนียวนำ โดยจะเป็นข้อเสียของความต้านทานชั้นประเภทนี้ เนื่องจากในการออกแบบสร้างนั้นจะมีความเป็นไปได้ยากมากที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ โดยเฉพาะเมื่อนำมาวัดกระแสอิมพัลส์ที่มีค่าสูงมากๆ ด้วยแล้วก็จะทำให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนียวนำที่เกิดขึ้นนี้มีมากขึ้น นั่นเอง ดังนั้นจึงได้มีการสร้างความต้านทานชั้นที่สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ด้วยการสร้างความต้านทาน ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันรวมขึ้นแทนที่จะเป็นการพันพับ หรือม้วนอย่างเดิม แต่ปัญหาของการสร้างความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอก จะมีปัญหาตรงที่ว่า จะต่อวัดแรงดันตกคร่อมที่ตัวความต้านทานนั้นอย่างไร เพราะการต่อจะเกิดเป็นบ่วงหรือวงรอบขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันเหนียวนำขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนั้น



**รูปที่ 3.5** การต่อวัดความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอก

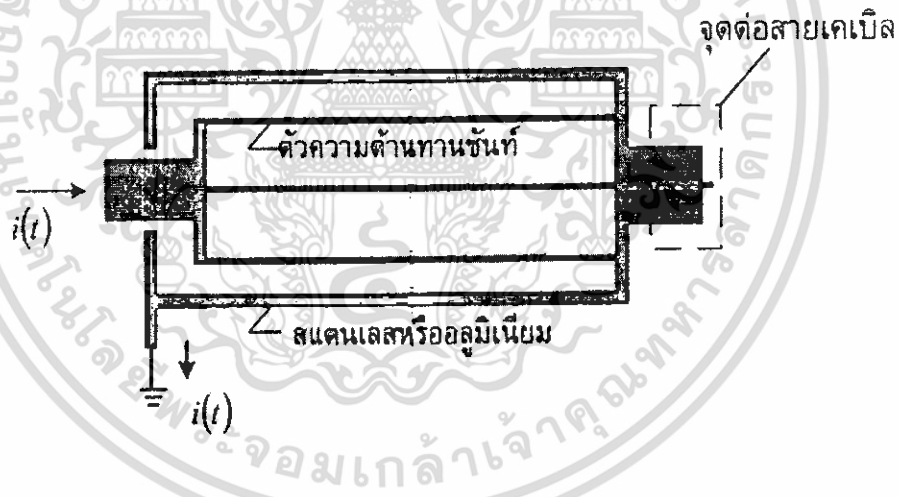
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันคร่อมความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกที่ปรากฏที่ข้อ 2 และ 3 จะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์ กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำเป็นไปตามสมการที่ (3.2)

$$U_s(t) = (V_1 - V_2) \pm \frac{d\phi_{-4}(t)}{dt}$$

$$= i(t)R_s + \left[ \frac{\mu_0}{2\pi} \lambda \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (3.2)$$

ดังนั้นการต่อวัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกจะต้องไม่เป็นวงรอบ หรือต้องต่อในบริเวณที่ปลอดภัยตามแม่เหล็ก เพราะในกระบอกเหล็กที่เป็นกระบอกชั้นเดียว จะมีปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก จึงควรใช้กระบอก 2 ชั้น ดังในรูปที่ 3.6 เป็นความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ตัวความต้านทานชั้นที่จะได้รับการชิลด์จากสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีลักษณะสมมาตรคือสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่กระบอกความต้านทานลดน้อยลง และในการต่อวัดก็ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบด้วย [1]



รูปที่ 3.6 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

ดังนั้นในการสร้างความต้านทานชั้นที่แบบท่อ Tubular จะมีลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น จึงจำเป็นที่จะต้องหาระยะห่างระหว่างตัวความต้านทานชั้นที่กับตัวชิลด์ รวมไปถึงแกนกลางของความต้านทานชั้นที่ด้วย ว่าควรใช้ระยะห่างเท่าใดถึงจะไม่เกิดการเบรคควานซ์ของความต้านทานชั้นที่ในขณะวัด ซึ่งจะทำให้ตัวความต้านทานชั้นที่เกิดความเสียหายได้ โดยในการคำนวณนั้นจะใช้สมการเหมือนกันกับการหาสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ของอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 เคเบิลวัด (Measuring Cables)

การวัดหรือบันทึกภาพแรงดันด้วยออสซิลโลสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูง เวลาใช้งานจริงๆ ไม่สามารถที่จะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับขั้วความต้านทานต่ำได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลงจำเป็นต้องใช้ออสซิลโลสโคป ให้อยู่ห่างจากขั้วความต้านทานพอสมควร ฉะนั้น การส่งสัญญาณแรงดันจากขั้วความต้านทานต่ำไปยังออสซิลโลสโคป ซึ่งต้องใช้สายเคเบิลวัด โดยทั่วไปจะใช้เป็นแบบแกนร่วม (Coaxial Cable) เคเบิลแกนร่วมที่ใช้ต้องมีการชิลด์อย่างน้อยสองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในชิลด์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดแรงดันอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวน ไปบนสัญญาณที่วัดได้

ในกรณีวัดสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และไม่มียอดประกอบของความถี่สูง เคเบิลและสายวัดอาจคิดค่า C หรือ L ขึ้นอยู่กับลักษณะของโหลดที่ปลายสายวัด แต่ในที่นี้เราต้องการวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เคเบิลวัดจึงต้องพิจารณาเป็นวงจรที่มีพารามิเตอร์กระจาย คือ คิดเป็นแบบสัญญาณคลื่นจร (Traveling Wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเป็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับ  $Z_w$  (Surge impedance) ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ปลายสายเคเบิลว่าเปิดหรือลัดวงจร หรือมีโหลดอื่นใด โหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลกระทบต่อสัญญาณต้นทาง จนกว่าจะถึงเวลา 2 เท่าของเวลาค้นเดินทาง (Transit Time) สายเคเบิลจะต้องเป็นแบบสายส่งทันที เมื่อ มีค่าใกล้เคียงกับเวลาขึ้นของคลื่น

เวลาช่วงเดินทาง  $\tau$  ของสัญญาณอาจหาได้จากความเร็วแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่น คือ [1]

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $l$  คือ ความยาวของสายเคเบิล และความเร็วที่แผ่กระจายคลื่นหาได้จากความสัมพันธ์

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/sec)

$\epsilon_r$  และ  $\mu_r$  คือ เปรอริมิทติวิตีและเปอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลปกติสายเคเบิลจะมีค่า  $\mu_r = 1$  ฉะนั้น

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายเคเบิลมาตรฐานที่ใช้กันอยู่มีฉนวนเป็น Polyethylene (PE) หรือ Teflon ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r$  ประมาณ 2.1 – 2.3 ฉะนั้น ความเร็วของสัญญาณจะอยู่ประมาณ 60-70 % ของความเร็วแสง ดังนั้น เกลือที่ช้ากว่า  $\frac{1}{4}$  ของความยาวคลื่น คือ ช่วงเวลาขึ้น  $T_r$  นั้น อาจต้องคิดเป็นสายส่ง นั่นคือ จะต้องคำนึงถึงผลของคลื่นสะท้อนกลับ (Reflection) ปัญหานี้ อาจแก้ไขโดยใช้การแมชชิงด้วยความต้านทานบริสุทธิ์ที่มีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ ( $Z_w$ ) ของสายวัดสัญญาณ

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้พลาด โดยทั่วไปสายเคเบิลแกนร่วมยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจทิ้งผลกระทบแรงดันตกคร่อมได้ ถ้าต้องใช้สายเคเบิลยาวๆ จึงควรเลือกสายเคเบิลที่มีค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำๆ

ความต้านทานแมชชิง ในกรณีที่วัดสัญญาณแรงดันด้วยออสซิลโลสโคป โดยส่งสัญญาณที่วัดจากความต้านทานต่ำไปยังออสซิลโลสโคปโดยผ่านสัญญาณด้วยสายเคเบิลแกนร่วม เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอันจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าแรงดันที่วัดได้ จึงต้องใส่ความต้านทานแมชชิงระหว่างความต้านทานชั้นที่ (Shunt) กับเครื่องวัด โดยจะต่อความต้านทานแมชชิง  $R_m = Z_w$  (ความต้านทานคลื่นจร) ไว้ปลายสายเคเบิลที่ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป ในลักษณะขนานกับออสซิลโลสโคป

### 3.1.4 เวลาตอบสนอง (Response Time)

เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการถ่ายทอดพลังงานซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น เวลาตอบสนองจึงเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งของระบบวัดที่จะบอกให้ทราบว่า ระบบวัดจะใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้เหมาะสมหรือไม่

การหาผลตอบสนองเพื่อหาเวลาตอบสนอง จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการหาเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทานล้วน นั่นคือ

$$T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6} \quad (3.6)$$

โดยที่	$T$	คือ เวลาตอบสนองของความต้านทานชั้นที่
	$\mu_0$	คือ เปรอร์มีบิลิตีมีค่า $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก)
	$\sigma$	คือ สภาพความนำไฟฟ้าของความต้านทานมีค่าเป็น $\frac{1}{\rho}$ หน่วยเป็น $(\Omega - m)^{-1}$
	$d$	คือ ความหนาของความต้านทานชั้นที่

โดยตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดความผิดพลาดในการวัดค่ายอดกระแสอิมพัลส์ยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 3\%$  อัตราส่วนกระแสอิมพัลส์ของความต้านทานชั้นที่ จะต้องถูกต้องแน่นอนยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ซึ่งเวลาตอบสนองของระบบที่ต้องการขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์ คือ

**ตารางที่ 3.1** เวลาตอบสนองที่ต้องการของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์	เวลาตอบสนองที่ต้องการ
8/20 $\mu\text{s}$	$T \leq 1.6 \mu\text{s}$
4/10 $\mu\text{s}$	$T \leq 0.8 \mu\text{s}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบ R-shunt

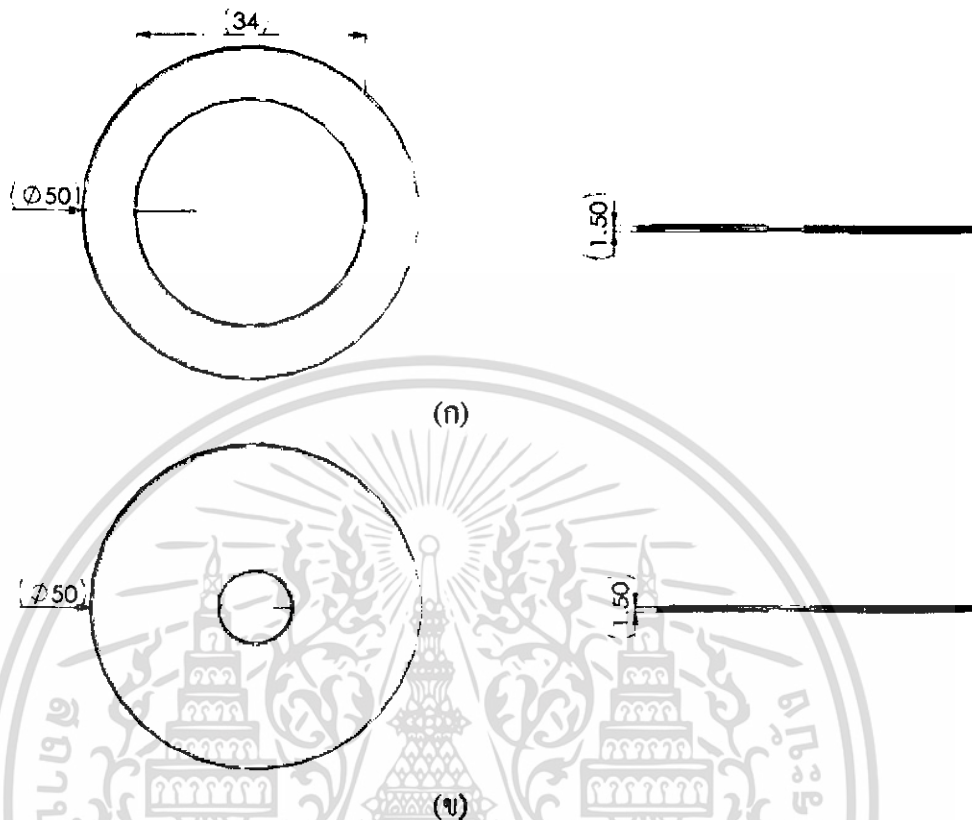
ความต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึงความต้านทานที่มีค่าโอห์มต่ำๆ ที่ทราบค่าแน่นอน ใช้สำหรับวัดกระแสโดยให้กระแสที่ต้องการวัดนั้นไหลผ่านความต้านทานของชั้นที่ แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นที่นั้นด้วยออสซิลโลสโคปโดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วม ในการออกแบบความหนาของชั้นที่จะมีผลต่อเวลาการตอบสนองของชั้นที่ จากสูตร  $T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6}$  จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ชั้นมีความหนา  $d$  บางๆจะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นและเวลาขึ้น (rise time)  $T_r$  จะน้อยลง

#### 3.2.1 แกนของชั้นที่ ประกอบไปด้วย

3.2.1.1 แท่งตัวนำ ทำจากสแตนเลสถึงเก็ลยวทั้งสองข้างมีความยาว 230 mm



3.2.1.2 แผ่นตัวนำ ทำจากทองเหลืองกลึงให้เป็นวงกลมมีความหนา 1.5 mm ซึ่งจะแบ่งเป็น  
ตัวนำด้านบนและตัวนำด้านล่างดังรูปที่ 3.8



(ก) ตัวนำด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแผ่นตัวนำ 50 mm ตรงกลางเจาะรูกว้าง 34 mm

(ข) ตัวนำด้านล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแผ่นตัวนำ 50 mm ตรงกลางเจาะรูกว้าง 11 mm

รูปที่ 3.8 แผ่นตัวนำ

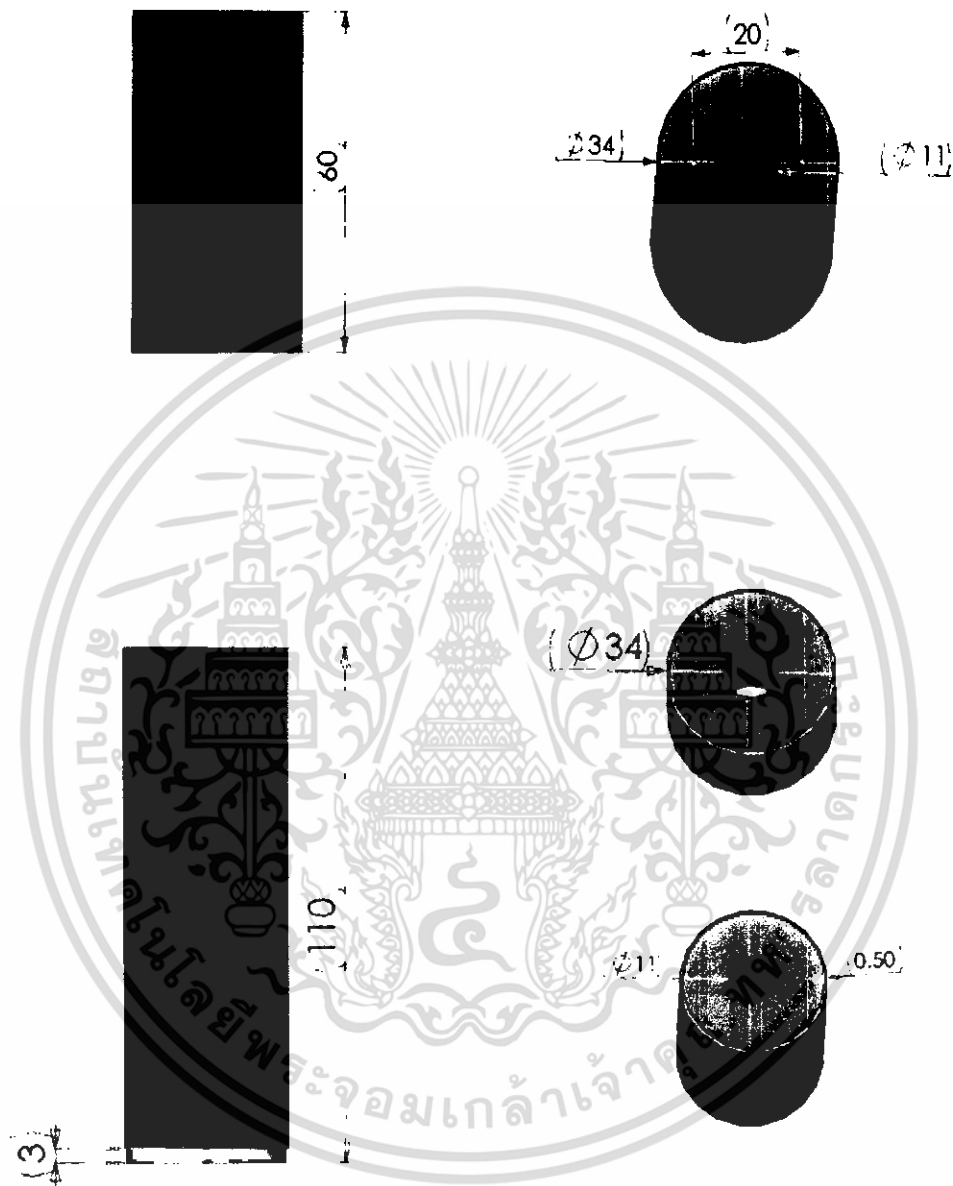
3.2.1.3 ตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวต้านทานชั้นที่ จะใช้ตัวต้านทานชนิด metal film มีความ  
ต้านทาน 1 โอห์ม 2 วัตต์



รูปที่ 3.9 ตัวต้านทานชนิด metal film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

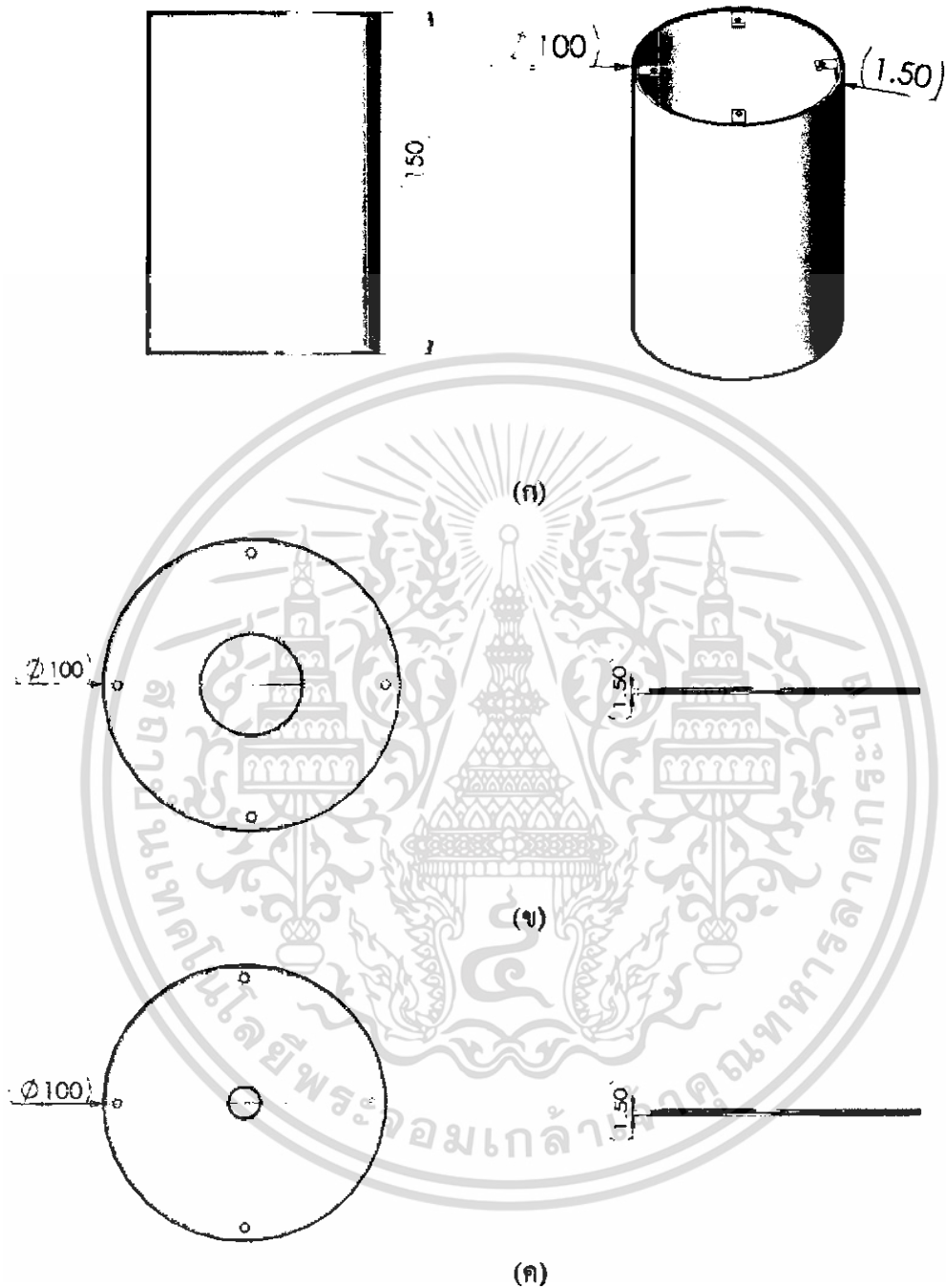
### 3.2.1.4 ฉนวน ใช้เบกาไลต์ (Bakelite) เป็นฉนวนลักษณะรูปร่างแสดงดังรูป



รูปที่ 3.10 ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ครอบอกซีลด์ ทำด้วยแผ่นทองเหลืองขึ้นรูปมีมิติดังรูป



- (ก) ครอบอกซีลด์มีความหนา 1.5 mm สูง 150 mm  
 (ข) ฝาปิดซีลด์ด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 100 mm  
 (ค) ฝาปิดซีลด์ด้านล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นตัวนำ 100 mm

รูปที่ 3.11 ครอบอกซีลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 สายสัญญาณ (สาย coaxial)

ประกอบด้วยแกนที่เป็นทองแดงที่ถูกหุ้มด้วยฉนวน ภายนอกฉนวนจะถูกหุ้มด้วยโลหะอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอก สายนำสัญญาณจะใช้ต่อจากอุปกรณ์วัดไปยัง ออสซิลโลสโคป ในการออกแบบจะใช้สาย RG-8 ซึ่งเป็นสายที่มีค่า impedance  $50\Omega$  มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.405 in (10.287mm) เป็นสายชนิด Thick Ethernet หรือสาย coaxial อย่างหนา มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. เป็นสายสัญญาณที่มีฉนวนหุ้มหนา และมีแกนทองแดงที่ใช้ในการส่งสัญญาณหนากว่าสายอย่างบาง ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าสายอย่างบาง



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 เครื่องกำเนิดอิมพัลส์ เครื่องกำเนิดอิมพัลส์รูปคลื่นผสม (Combination Wave Impulse Generator)  $8/20 \mu s$  6 kV, 3 kA



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ 6 kV, 3 kA

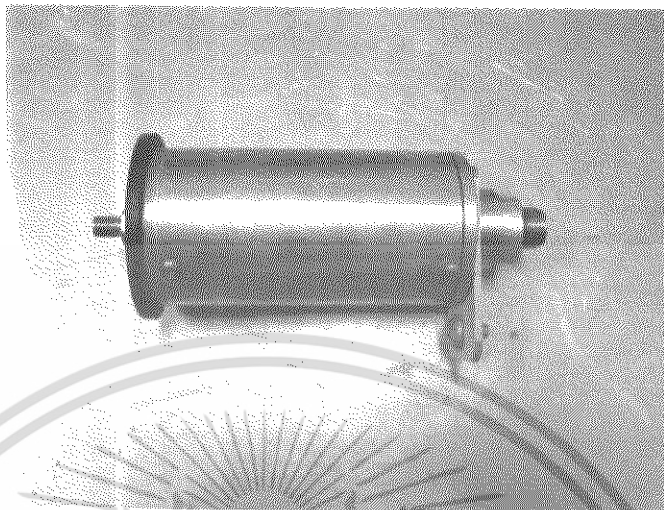
4.1.2 ออสซิลโลสโคป ใช้สำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณอิมพัลส์ในห้องปฏิบัติการ ออสซิลโลสโคปที่ใช้ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL1520



รูปที่ 4.2 ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้เป็นมาตรฐาน เป็นชั้นที่ความต้านทานซึ่งรับความอนุเคราะห์จากการไฟฟ้าซึ่งเป็นชั้นที่ความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม



รูปที่ 4.3 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้เป็นมาตรฐาน

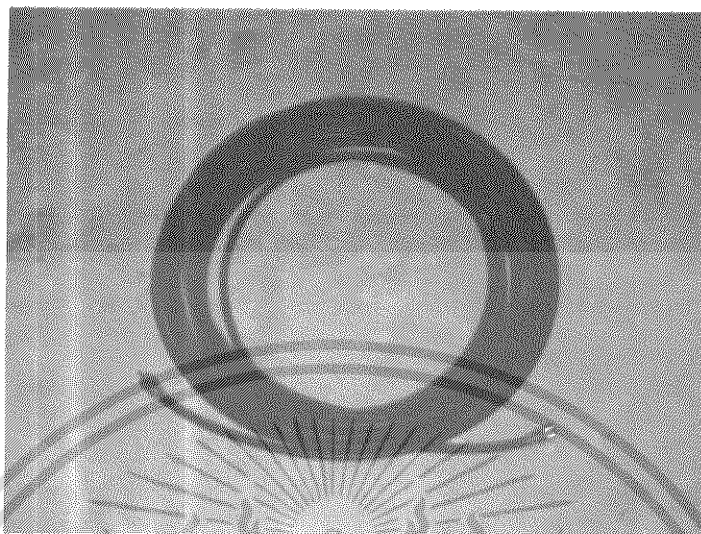
4.1.4 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้ทดสอบ เป็นชั้นที่ความต้านทานที่ใช้ความต้านทานชนิด metal film ขนาด 1 โอห์ม 2 วัตต์ต่อขนานกัน 10 ตัวทำให้ ค่าความต้านทานรวมของชั้นนี้เท่ากับ 0.1 โอห์ม



รูปที่ 4.4 ความต้านทานชั้นที่ที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดได้มายังออสซิลโลสโคปสายที่ใช้เป็นสายโคแอกเซียล RG-8



รูปที่ 4.5 สายเคเบิล

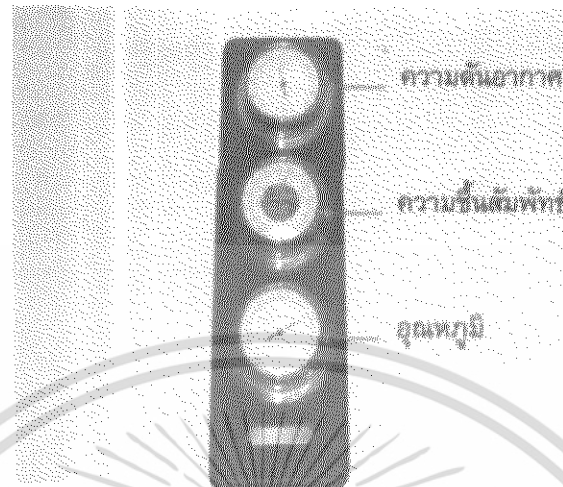
4.1.6 สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ 4.6 สายนำส่งแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับวัดค่าความดันอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในห้องทดสอบ



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง

4.1.8 ตะขอกรราวต์ ในระบบแรงดันสูงเมื่อลดระดับแรงดันหมดแล้ว แต่ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดสอบจะเป็นอันตรายได้ ดังนั้นจึงต้องมีตะขอกรราวต์เอาไว้สัมผัสกับอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์คายประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ให้หมดก่อนที่จะเข้าไปในบริเวณทดสอบ และตะขอกรราวต์ควรสัมผัสกับอุปกรณ์ตลอดเวลาเมื่ออยู่ในบริเวณที่ทดสอบ

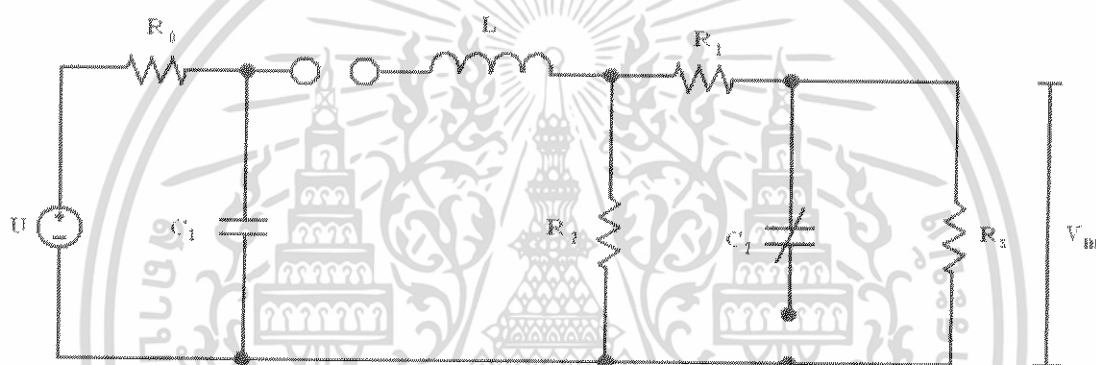


รูปที่ 4.8 ตะขอกรราวต์

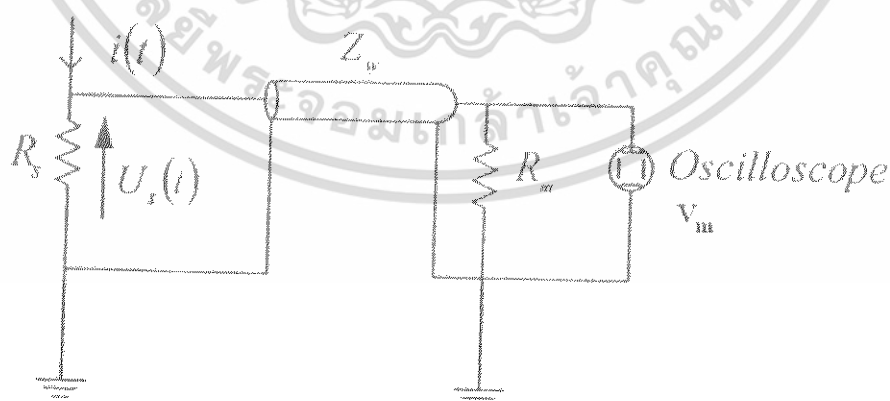
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการทดสอบและประเมินผล เพื่อเป็นการตรวจสอบดูว่าความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้างขึ้น มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการวัดกระแสอิมพัลส์จริง โดยมีการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ การทดสอบวัดเปรียบเทียบทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น โดยใช้วัดกระแสอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม (Combination Wave Impulse Generator) 8/20  $\mu$ s 6 kV, 3 kA ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3]

ในโครงการนี้ได้ทำการทดสอบความต้านทานชั้นที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.1  $\Omega$  1 kA ได้นำไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดอิมพัลส์รูปคลื่นผสมขนาด 6 kV, 3 kA โดยการวัดทดสอบจะใช้วิธีการวัดทดสอบเปรียบเทียบอ้างอิงกับความต้านทานชั้นที่มาตรฐาน ซึ่งมีพิกัดความต้านทานอยู่ที่ 0.1  $\Omega$  ซึ่งในการเปรียบเทียบจากค่าที่ได้จากการวัดนั้น จะให้เป็นไปตามที่มาตรฐานการวัดกระแสอิมพัลส์ได้กำหนดไว้

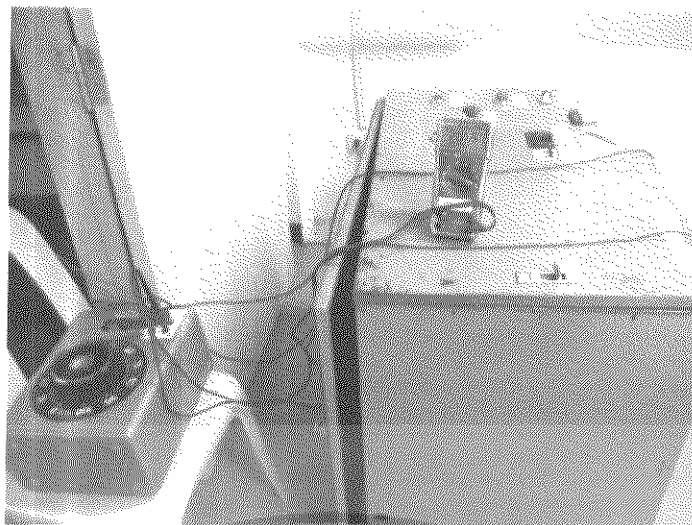


รูปที่ 4.9 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นผสมที่มีความต้านทานชั้นที่ต่อวัดในวงจร

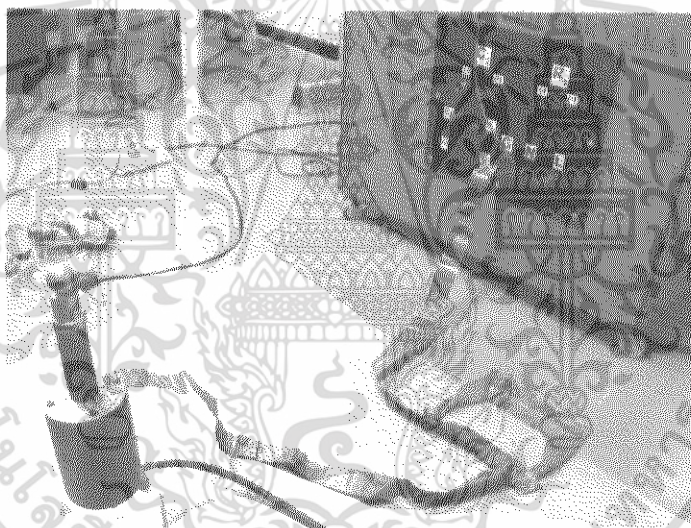


รูปที่ 4.10 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 วงจรวัดรูปคลื่นกระแสอินพุตด้วยความต้านทานชั้นที่ (รูปวงจรจริง)

วงจรการทดสอบวัดกระแสอินพุตด้วยความต้านทานชั้นที่จากรูปที่ 4.11 (ก) เป็นการจ่ายแรงดันเข้าสู่เครื่องกำเนิดกระแสอินพุตด้วย variac แล้ววัดแรงดันที่ variac จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดกระแสอินพุต ส่วนรูปที่ 4.11 (ข) เป็นวงจรการทดสอบรูปคลื่นกระแสอินพุตด้วยความต้านทานชั้นที่โดยจ่ายกระแสอินพุตเข้าสู่ความต้านทานชั้นที่แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นที่นั้นเพื่อหาขนาดกระแสอินพุตและวัดหน้าคลื่นหลังคลื่นให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale Factor Test)

วิธีการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดวิธีทดสอบอ้างอิงไว้คือ ใช้วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดยถ้าเป็นไปได้ให้ทดสอบที่พิกัดของระบบวัดทดสอบ ในกรณีที่พิกัดของระบบวัดทดสอบมีค่า 3 kA ก็จะทำให้การทดสอบที่พิกัดกระแส 3 kA แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดเปรียบเทียบที่ใช้เป็นระบบวัดอ้างอิง มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 1 kA ดังนั้นในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ 1 kA ในการทดสอบอ่านค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงและค่าแรงดันจากระบบวัดทดสอบ โดยจะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า  $n$  ค่า ( $n \geq 10$ ) ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดจะหาได้จากค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันที่ได้ อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งกำหนดให้เป็น  $F_i$  ส่วนค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด  $F_m$  หาได้จากค่าเฉลี่ยของ  $F_i$  โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $s$  คำนวณได้จาก

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

เมื่อ :  $S$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$F_i$  คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันจากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

$F_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $F_i$

ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้

1. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องน้อยกว่า 1% ของ  $F_m$
2. ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องอยู่ในเงื่อนไขดังนี้
  - ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 10\%$  ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง
  - อัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกับระบบวัดอ้างอิงต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 5% ของค่าเฉลี่ย

**ตารางที่ 4.1** ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์  $8/20 \mu S$  (ซ้ำบวก)

ครั้งที่	$I_{REF}$ (kA)	$V_m$ (V)	$F_1$ (A/V)	$T_1 (\mu s)$			$T_2 (\mu s)$		
				REF	LRC	REF/LRC	REF	LRC	REF/LRC
1	1	100.0	10.00	8.22	8.20	1.0024	21.75	21.56	1.0088
2	1	100.1	9.99	8.30	8.28	1.0024	21.57	21.25	1.0151
3	1	100.1	9.99	8.26	8.30	0.9952	21.48	21.55	0.9968
4	1	100.1	9.99	8.20	7.98	1.0276	21.59	21.40	1.0089
5	1	100.2	9.98	8.20	8.17	1.0037	21.76	21.35	1.0192
6	1	100.0	10	8.38	8.35	1.0036	21.60	21.39	1.0098
7	1	100.3	9.97	8.39	8.42	0.9964	21.83	21.85	0.9991
8	1	100.2	9.98	8.25	8.24	1.0012	21.72	21.75	0.9986
9	1	100.1	9.99	8.34	8.35	0.9988	21.67	21.70	0.9986
10	1	100.0	10.0	8.26	8.28	0.9976	21.65	21.38	1.0126
$\bar{x}$	1	100.11	9.989	8.280	8.257	1.0087	21.662	21.518	1.0067
$F_m$		9.989			1.0087			1.0067	
s		0.00994			0.00919			0.00794	
ค่าพารามิเตอร์ทางเวลา					0.27%			0.66%	

หมายเหตุ : REF คือ ระบบวัดอ้างอิง, LRC คือ ระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg

อุณหภูมิห้อง 28.0 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

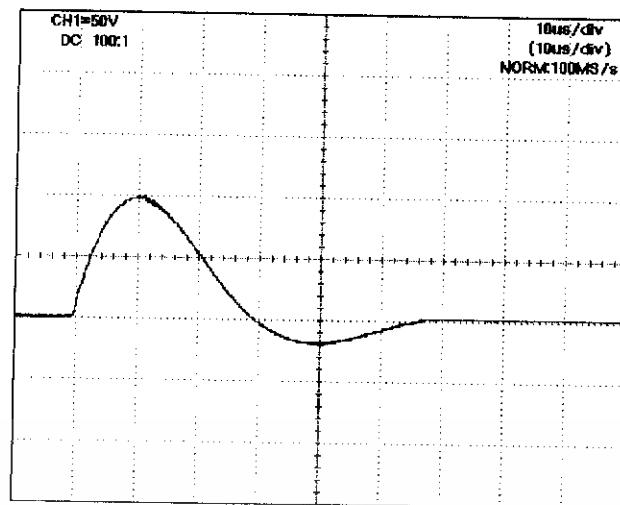
เมื่อ  $I_{REF}$  คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิง

$V_m$  คือ แรงดันที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

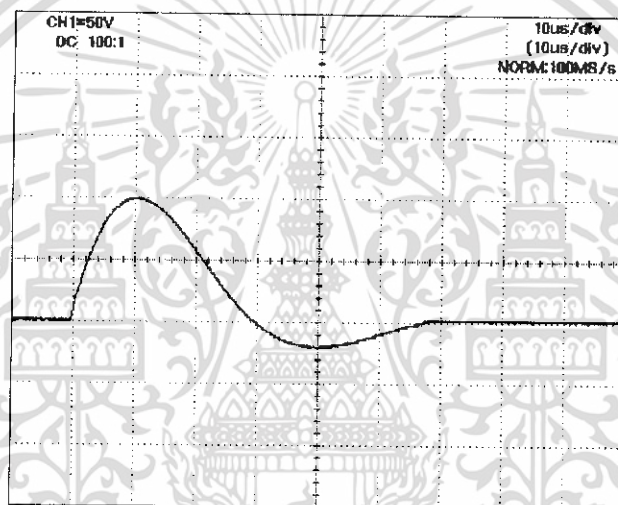
$F_1$  คือ ค่ากระแสจากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยค่าแรงดันจากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

จากผลการทดสอบ R-shunt แบบเชิงเส้น โดยการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์  $8/20 \mu S$  ซ้ำบวก ตามตารางที่ 4.1 ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด  $F_m$  มีค่าเท่ากับ 9.989 A/V และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.994% ของ  $F_m$  (มีค่าน้อยกว่า 1%) สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางเวลา  $T_1 = 0.27\%$   $T_2 = 0.66\%$  (มีค่าน้อยกว่า  $\pm 10\%$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.919%, 0.794% ของค่าเฉลี่ย (มีค่าน้อยกว่า 5%) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

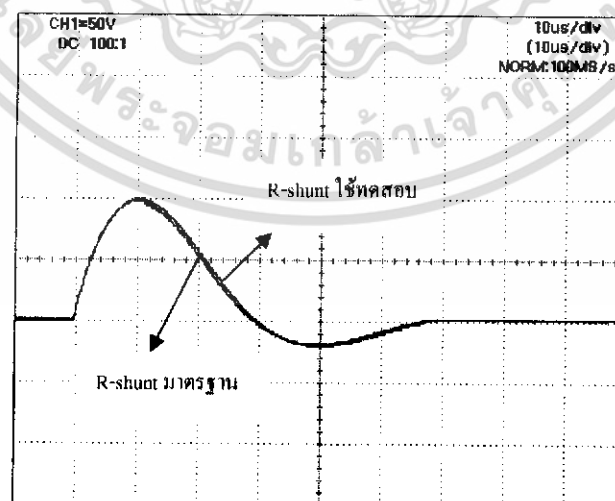
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานชั่วคราว



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมาชั่วคราว



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมา ซึ่งทำการทดสอบที่พิกัดกระแส 1.0 kA จั้วบวค ค่าที่อ่านได้เป็นดังนี้  $V_m = 100.11$  V เพราะฉะนั้น  $I_m = 1$  kA ค่าสเกลแฟกเตอร์กำหนดเท่ากับ 9.989 A/V โดย  $T_1 = 8.257 \mu S$   $T_2 = 21.518 \mu S$  จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์  $8/20 \mu\text{S}$  (ซ้ำลบ)

ครั้งที่	$I_{\text{REF}}$ (kA)	$V_m$ (V)	$F_i$ (A/V)	$T_1 (\mu\text{s})$			$T_2 (\mu\text{s})$		
				REF	LRC	REF/LRC	REF	LRC	REF/LRC
1	1	100.0	10.00	8.00	8.02	0.998	21.18	21.36	0.992
2	1	100.1	9.99	7.84	8.00	0.980	21.40	21.40	1.000
3	1	100.2	9.98	7.96	8.02	0.993	21.18	21.06	1.006
4	1	100.3	9.97	8.06	8.04	1.002	21.80	21.69	1.005
5	1	100.2	9.98	8.11	8.12	0.999	21.31	21.24	1.003
6	1	100.1	9.99	7.99	8.01	0.998	21.62	21.51	1.005
7	1	100.3	9.97	8.68	8.54	1.016	21.90	21.90	1.000
8	1	100.2	9.98	7.98	8.00	0.998	21.60	21.35	1.012
9	1	100.1	9.99	8.11	8.12	0.999	21.60	21.52	1.004
10	1	100.2	9.98	8.06	8.17	0.987	21.45	21.80	0.984
$\bar{x}$	1	100.17	9.983	8.079	8.104	0.9969	21.504	21.483	1.0010
$F_m$		9.983			0.9969			1.0010	
s		0.00948			0.00961			0.00792	
ค่าพารามิเตอร์ทางเวลา					-0.31%			0.097%	

หมายเหตุ: REF คือ ระบบวัดอ้างอิง, LRC คือ ระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

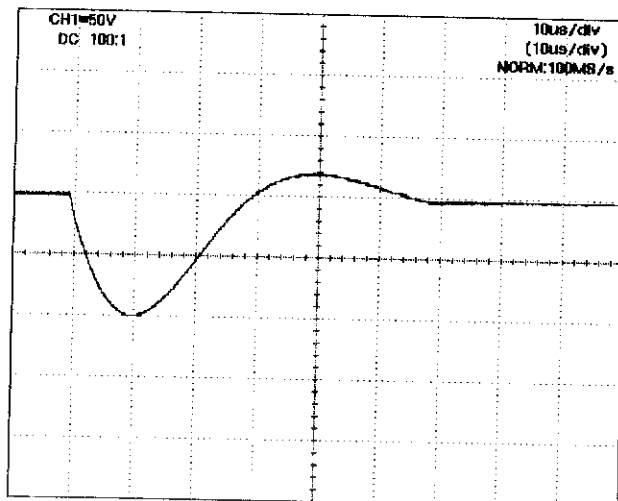
ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg

อุณหภูมิห้อง 28.0 °C

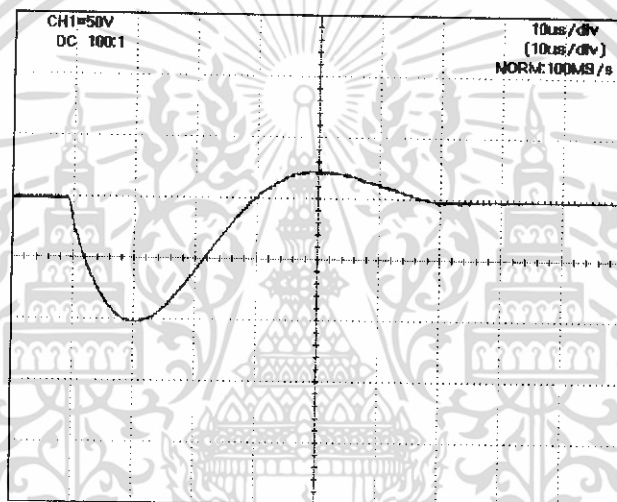
ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

จากผลการทดสอบ R-shunt แบบเชิงเส้น โดยการทดสอบวัดเปรียบเทียบกระแสอิมพัลส์  $8/20 \mu\text{S}$  ซ้ำลบ ตามตารางที่ 4.2 ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด  $F_m$  มีค่าเท่ากับ 9.983 A/V และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.948% ของ  $F_m$  (มีค่าน้อยกว่า 1%) สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางเวลา  $T_1 = -0.31\%$   $T_2 = 0.097\%$  (มีค่าน้อยกว่า  $\pm 10\%$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.961%, 0.792% ของค่าเฉลี่ย (มีค่าน้อยกว่า 5%) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

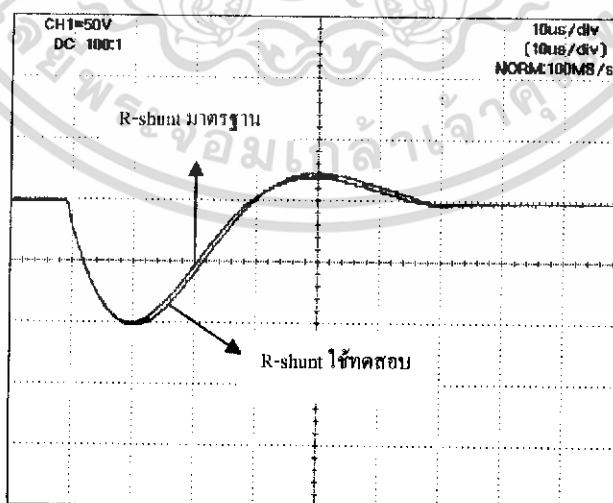
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานชั่วคราว



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมาชั่วคราว



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่มโครงการได้ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นกราฟการทดสอบ R-shunt มาตรฐานเทียบกับ R-shunt ที่กลุ่ม ครงงาน ได้ทำการสร้างขึ้นมา (ข้าวลบ) ซึ่งทำการทดสอบที่พิกัดกระแส 1.0 kA ขั้วบวก ค่าที่อ่านได้เป็นดังนี้  $V_m = 100.17 \text{ V}$  เพราะฉะนั้น  $I_m = 1 \text{ kA}$  ค่าสเกลแฟกเตอร์กำหนดเท่ากับ  $9.983 \text{ A/V}$  โดย  $T_1 = 8.104 \mu\text{S}$   $T_2 = 21.483 \mu\text{S}$  จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของ R-shunt แบบเชิงเส้นที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง ตามมาตรฐานต้องมีการทดสอบทั้งชั่วบวกและชั่วลบ เนื่องจากเครื่องมือวัดเปรียบเทียบที่ใช้เป็นระบบวัดอ้างอิง มีพิกัดกระแสอยู่ที่ 1.0 kA ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นได้แบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 5 ช่วง ตั้งแต่ 200A- 1.0 kA โดยในการวัดกระแสทดสอบแต่ละช่วงจะวัดช่วงละ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกระแสทดสอบในแต่ละช่วง ตามมาตรฐานมีข้อแนะนำในการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นไว้ว่า ควรทำการทดสอบให้เสร็จเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้มีผลกระทบเนื่องจากสภาวะอากาศที่เปลี่ยนไปและไม่ต้องการปรับค่าที่วัดได้จากการทดสอบไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน โดยวงจรการทดสอบในช่วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.9

มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างกระแสทดสอบกับกระแสที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด มีค่าไม่เกิน 1% ของค่าเฉลี่ย ให้ถือว่าเครื่องมือวัดที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น

**ตารางที่ 4.3** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ชั่วบวก)

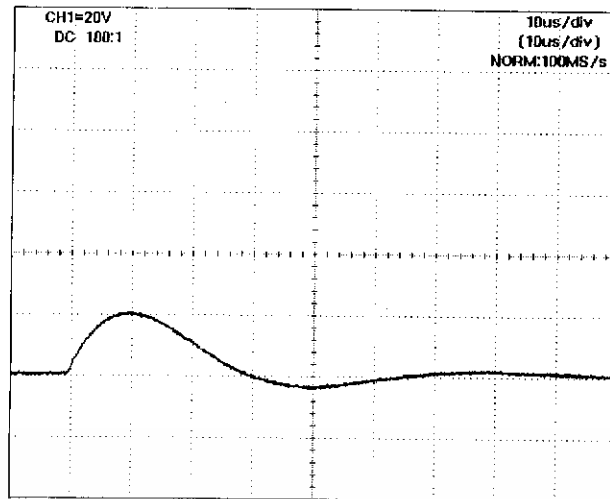
ครั้งที่	กระแสทดสอบ ( $I_{REF}$ )	กระแสที่วัดได้ ( $I_m$ )	$I_{REF} / I_m$
1	208.00	208.00	1.0000
2	408.32	410.57	0.9945
3	600.08	595.84	1.0071
4	804.84	807.53	0.9967
5	1000.00	1008.02	0.9920
ค่าเฉลี่ย			0.9981
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0058

หมายเหตุ: ค่ากระแสที่วัดได้ คือ ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปของระบบวัดที่ต้องการทดสอบคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ ( $F_m = 9.989 \text{ A/V}$ )

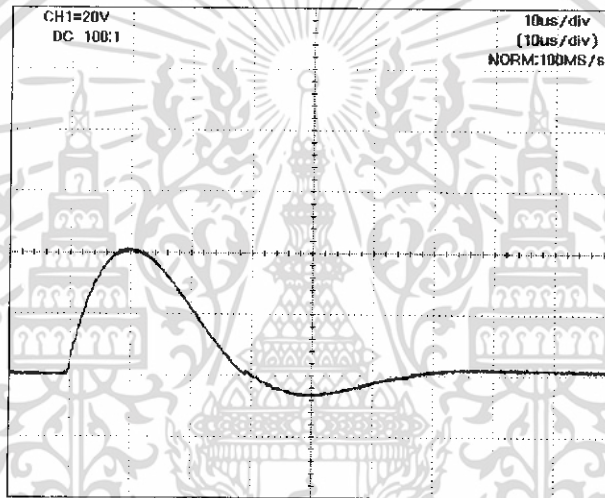
สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ	758.0 mmHg
อุณหภูมิห้อง	28.0 °C
ความชื้นสัมพัทธ์	57.0 %

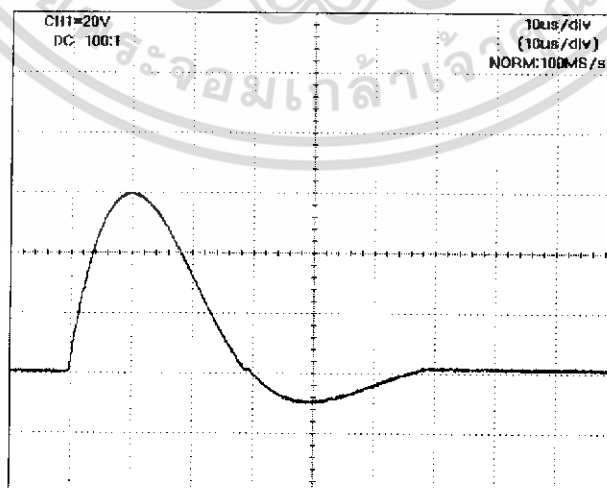
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ขั้วบวก)

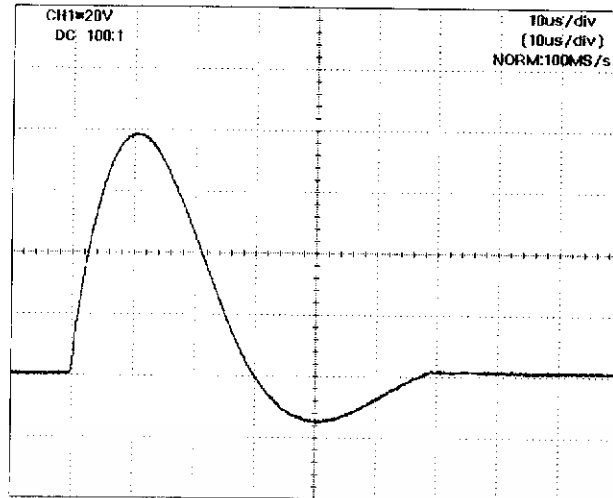


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วบวก)

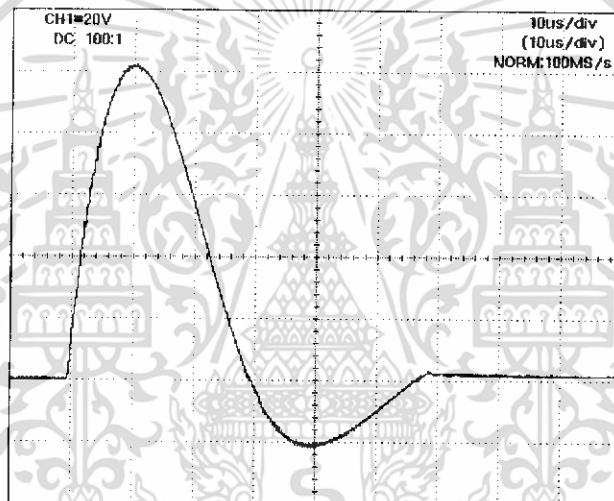


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.21** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วบวก)



**รูปที่ 4.22** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วบวก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

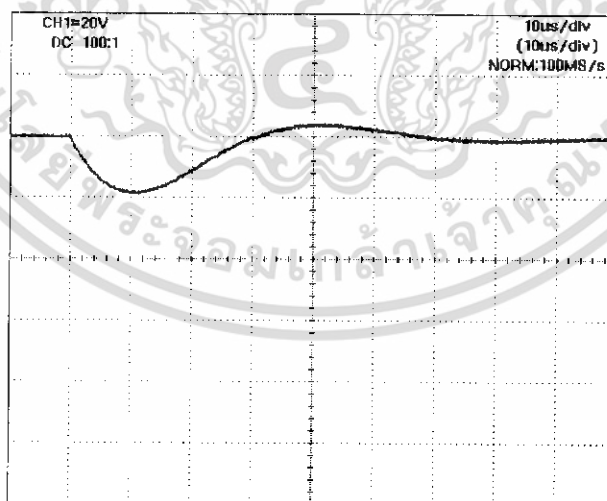
**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิง (ข้อ  
ลป)

ครั้งที่	กระแสทดสอบ( $I_{REF}$ )	กระแสที่วัดได้ ( $I_m$ )	$I_{REF} / I_m$
1	198.15	194.86	1.0169
2	395.24	396.28	0.9973
3	608.04	604.87	1.0052
4	824.17	822.42	1.0021
5	1000	1000	1.0000
ค่าเฉลี่ย			1.0043
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.0076

หมายเหตุ : ค่ากระแสที่วัดได้ คือ ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปของระบบวัดที่  
ต้องการทดสอบคูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ ( $F_m = 9.983 \text{ A/V}$ )

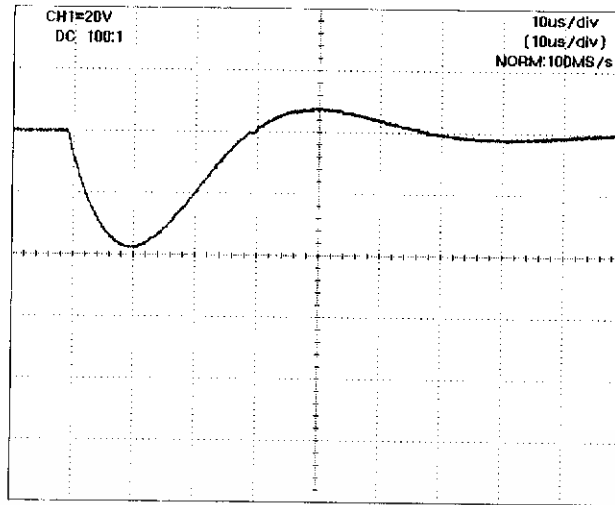
สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg  
อุณหภูมิห้อง  $28.0 \pm 0.2$   
ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

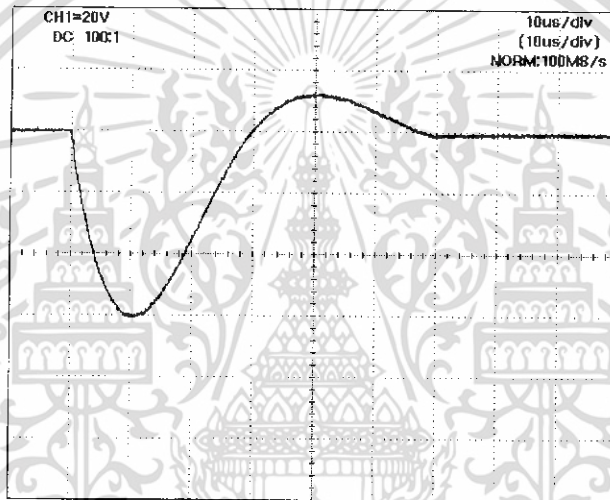


**รูปที่ 4.23** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 200A (ข้อลป)

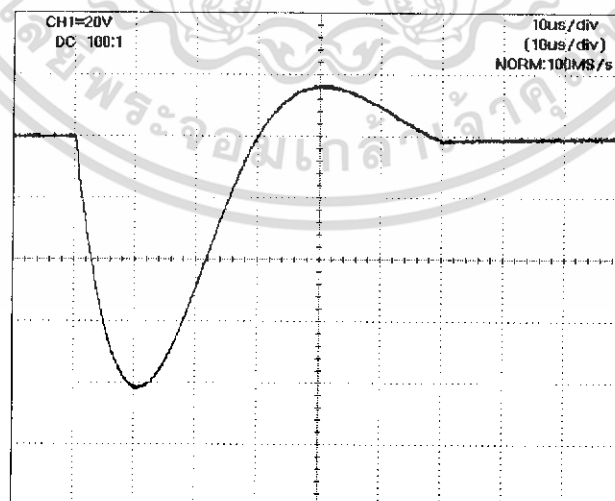
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 400A (ขั้วลบ)

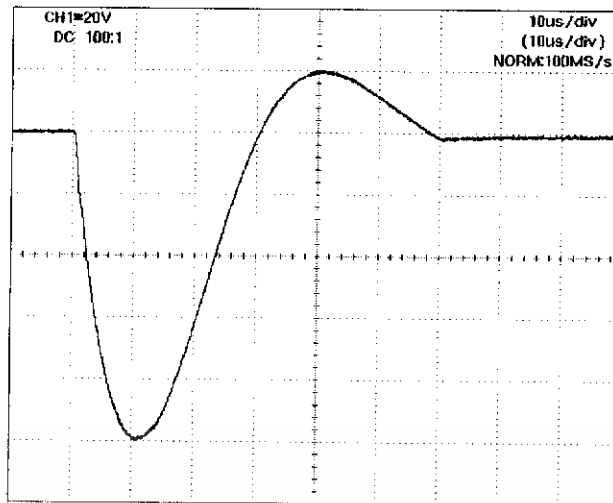


รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 600A (ขั้วลบ)



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 800A (ขั้วลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.27** ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่กระแสทดสอบ 1000A (ขั้วลบ)

จากผลการทดสอบ หากคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นเทียบกับค่ากระแสที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เป็นไปดังกราฟข้างต้น แสดงให้เห็นว่า R-shunt ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมานี้มีคุณสมบัติใช้วัดกระแสอิมพัลส์ได้ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

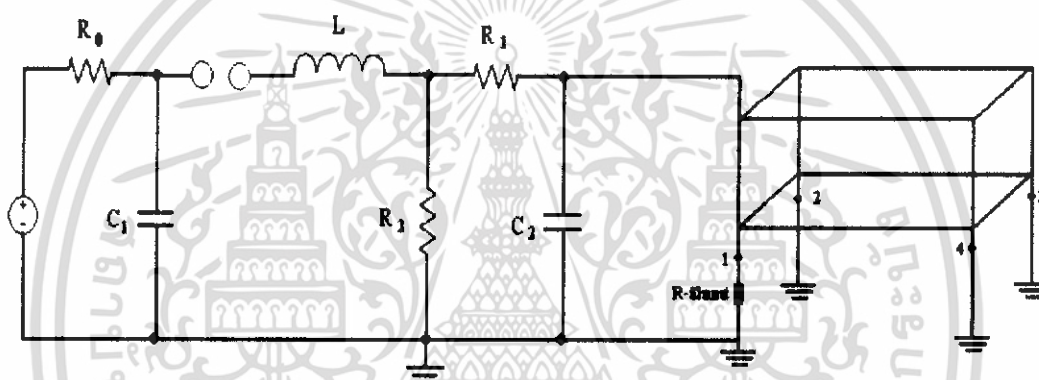
#### 4.4 การทดสอบดูการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6 kV, 3 kA
2. ออสซิลโลสโคป
3. แผ่นพรีอบบีคิขนาด 1.44 MB
4. R-shunt ที่ออกแบบ
5. โครงสร้างอาคารจำลอง

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

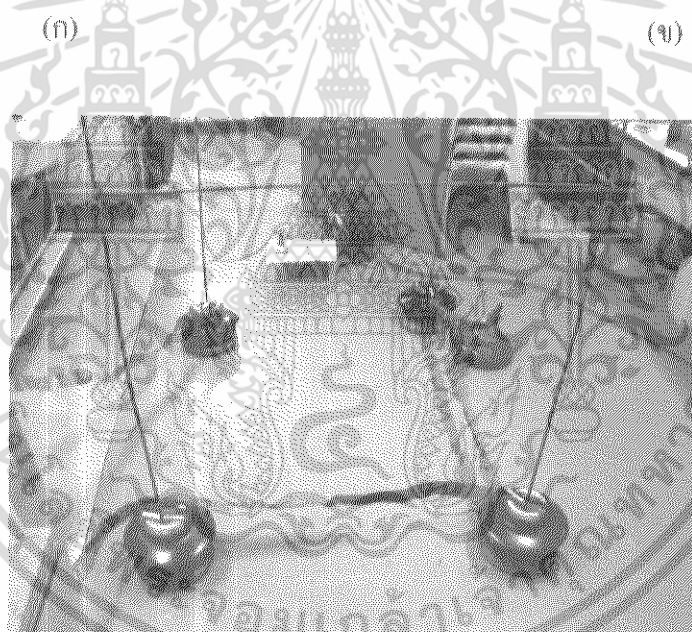
1. บันทึกสภาพบรรยากาศห้องทดลอง
2. ต่อยวงจรตามรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสใน โครงสร้างอาคารจำลอง

3. ต่อกความต้านทานที่จุด 1, 2, 3 และ 4 เริ่มจากค่าความต้านทาน 2 โอห์มและนำความต้านทานขั้นที่ไปต่อยังจุดทดสอบจุดที่ 1
4. ทำการป้อนแรงดัน Impulse ขนาด 1000 V, 1500V และ 2000V ให้กับ โครงสร้างอาคาร
5. บันทึกรูปคลื่นที่ได้และคำนวณขนาดกระแสจากค่าสเกลแฟกเตอร์
6. เปลี่ยนความต้านทานขั้นที่ไปทดสอบตรงจุดทดสอบที่ 2, 3 และ 4 แล้วป้อนแรงดัน Impulse เหมือนข้อ 4. แล้วบันทึกรูปคลื่นที่ได้
7. เปลี่ยนความต้านทานที่จุด 1, 2, 3 และ 4 เป็น 20 และ 100 โอห์มตามลำดับแล้วทดสอบซ้ำ
8. บันทึกรูปคลื่นและเปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

**รูปที่ 4.29 วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง (รูปวงจริง)**

วงจรการทดสอบการกระจายของกระแสในโครงสร้างอาคารจำลอง โดยรูปที่ 4.29 (ก) เป็นการจ่ายแรงดันอินพุตเข้าสู่โครงสร้างอาคารจำลอง ส่วนรูปที่ 4.29 (ข) และ รูปที่ 4.29 (ค) เป็นการต่อระบบกราวด์ของโครงสร้าง โดยแต่ละขาของ โครงสร้างจะมีความต้านทานต่ออยู่ เสมือนว่ามี ความต้านทานดินเท่ากันทั้งสี่ขา จากขาของ โครงสร้างก็จะทำการวัดด้วย ความต้านทานชั้นที่โลหะ ส่วนขาที่เหลือก็ต่อลงกราวด์ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** ผลการทดสอบการกระจายของกระแสอิมพัลส์ 8/20  $\mu$ S

ค่าความต้านทาน ดิน(โอห์ม)	พิกัดกำลัง (V)	กระแสที่วัดได้ (A)			
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
2	1000	108	116	9	104
	1500	160	166	15.2	158
	2000	226	214	18.4	212
20	1000	48	44	6	43
	1500	70	69	9.6	68
	2000	92	90	12.8	91
100	1000	12	14	ตรวจจับไม่ได้	16.4
	1500	20	22	ตรวจจับไม่ได้	22.4
	2000	28.8	28.6	ตรวจจับไม่ได้	28.5

สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบ

ความดันบรรยากาศ 758.0 mmHg

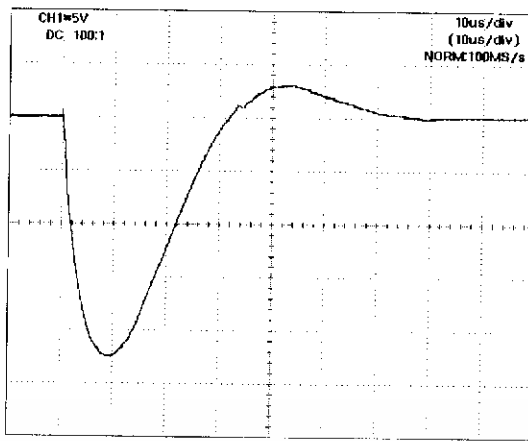
อุณหภูมิห้อง 28.0 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ 57.0 %

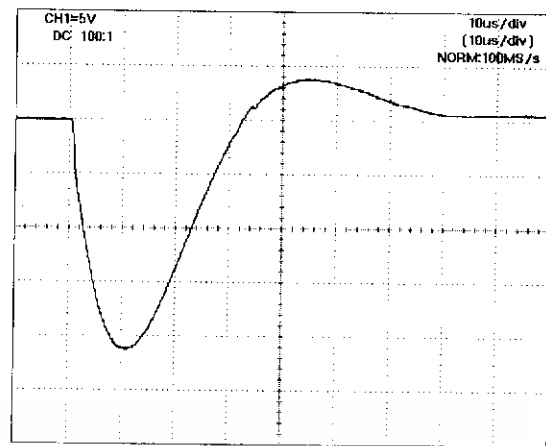
จากผลการทดสอบโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1.0 kV , 1.5 kV และ 2.0 kV ที่ค่าความต้านทานดินขนาด 2  $\Omega$  , 20  $\Omega$  และ 100  $\Omega$  โดยวัดขนาดกระแสที่ขาทั้ง 4 ของโครงสร้างอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 4.5

เมื่อพิจารณาที่ขาโครงสร้างเดียวกัน และความต้านทานดินเดียวกัน โดยเปลี่ยนขนาดแรงดันอิมพัลส์พบว่าค่าขนาดกระแสที่ได้แปรผันตรงกับ ขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนอย่างเป็นเชิงเส้นแสดงว่า กระแสฟ้าผ่าของธรรมชาติขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่เบรกดาว์นผ่านอากาศโดยตรง

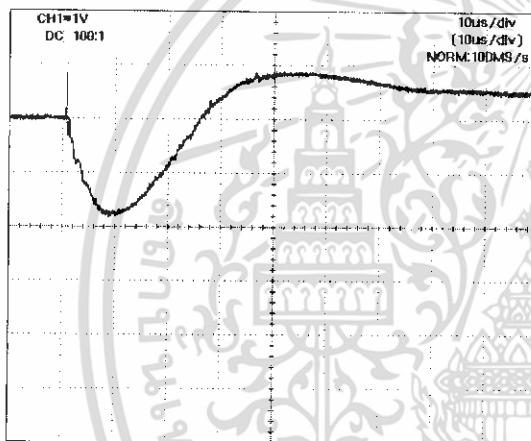
เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างเดียวกันและขนาดแรงดันอิมพัลส์เดียวกัน โดยเปลี่ยนความต้านทานดิน พบว่าขนาดของกระแสที่ได้ เมื่อค่าความต้านทานดินมากขึ้นกระแสที่วัดได้น้อยลง เป็นเพราะเมื่อโครงสร้างมีความต้านทานดินสูง ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุที่ต่อลงดินอย่างดี



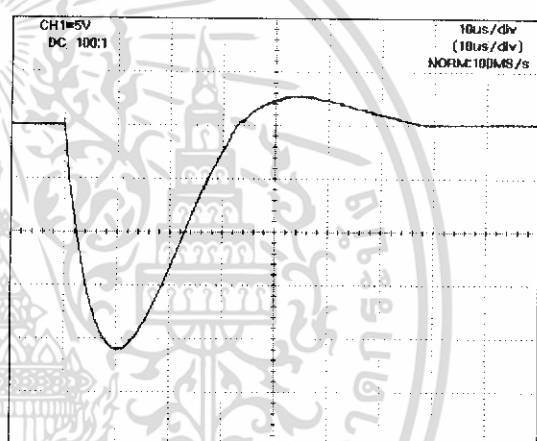
(ก)



(ข)



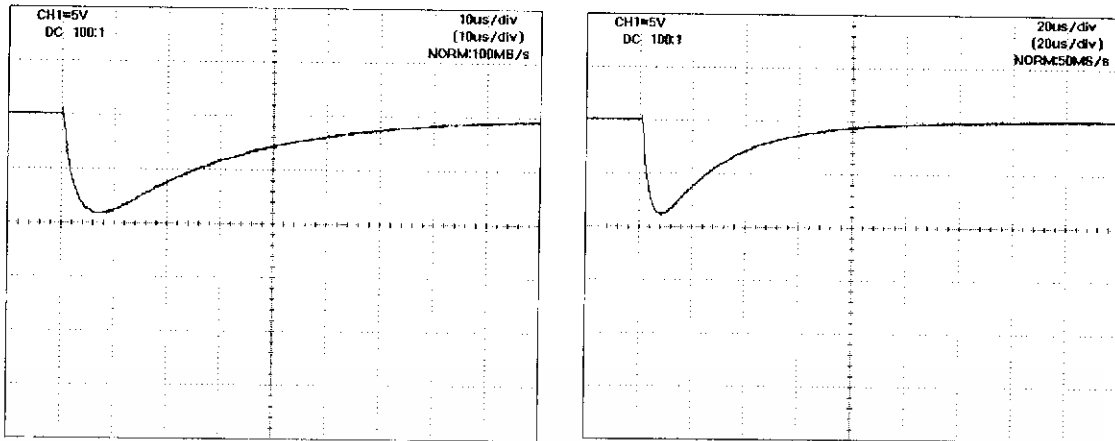
(ค)



(ง)

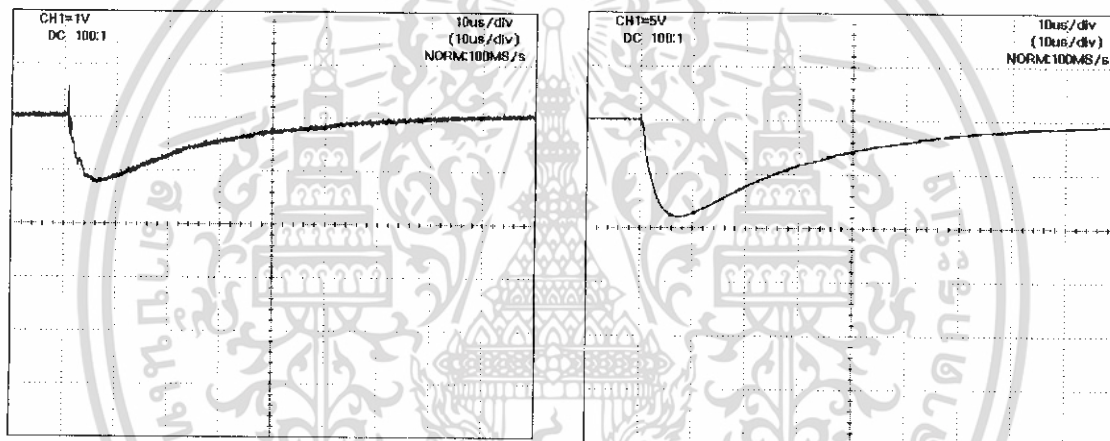
- รูปที่ 4.30** ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสฮิลล์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 2 โอห์ม
- (ก) รูปคลื่นกระแสฮิลล์เมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
- (ข) รูปคลื่นกระแสฮิลล์เมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
- (ค) รูปคลื่นกระแสฮิลล์เมื่อวัดจากจุดที่ 3 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
- (ง) รูปคลื่นกระแสฮิลล์เมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

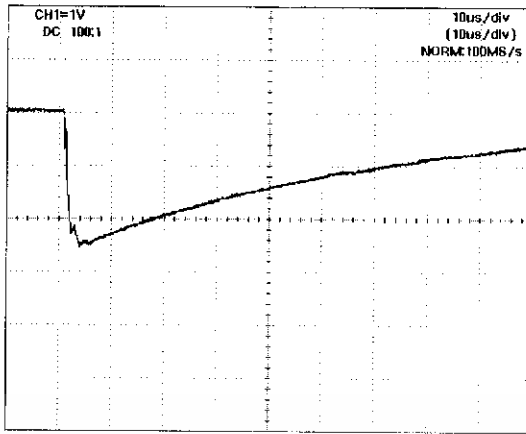


(ค)

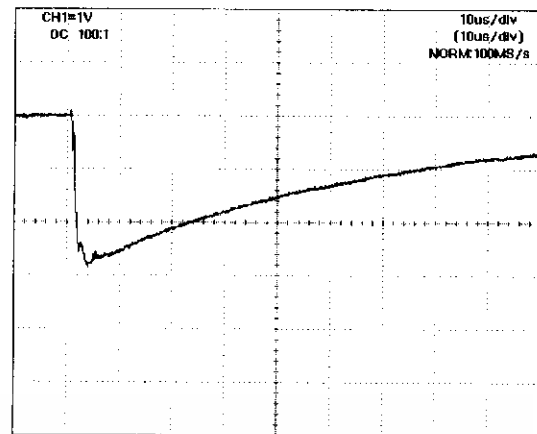
(ง)

- รูปที่ 4.31** ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 20 โอห์ม
- (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของ โครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
- (ข) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของ โครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div
- (ค) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวัดจากจุดที่ 3 ของ โครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div
- (ง) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของ โครงสร้าง โดยวัดที่ 5 Volt/Div

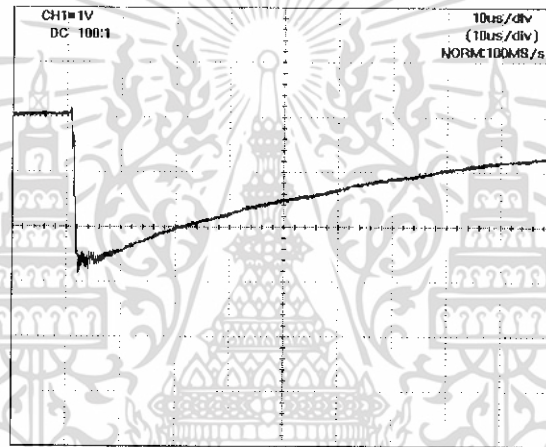
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปที่ 4.32** ผลการทดสอบวัดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่แรงดัน 2 kV ค่าความต้านทานดิน 100 โอห์ม

(ก) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 1 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div

(ข) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 2 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div

(ค) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์เมื่อวัดจากจุดที่ 4 ของโครงสร้าง โดยวัดที่ 1 Volt/Div

หมายเหตุ รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์วัดจากจุดที่ 3 ของโครงสร้างที่ความต้านทานดิน 100  $\Omega$  มีค่าน้อยมาก

เมื่อพิจารณาที่ขนาดของแรงดันอิมพัลส์เดียวกัน ค่าความต้านทานดินเดียวกัน โดยเปลี่ยนขาของโครงสร้าง พบว่า กระแสไม่เท่ากันทุกขา เนื่องจากขาที่ 3 ซึ่งอยู่ห่างจากขาที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์มากที่สุด และจากการที่กระแสอิมพัลส์มีค่าน้อยมาก กระแสอิมพัลส์จึงไปในทิศทางที่ง่ายที่สุด ซึ่งไม่เหมือนในทฤษฎีการทดสอบด้วยแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุป

การทดลองระบบบรากสายดิน ซึ่งระบบบรากสายดินเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 1 kV , 1.5 kV และ 2 kV ใส่โครงสร้างอาคารจำลอง และทำการเปลี่ยนความต้านทานดินที่ค่า 2 Ω , 20 Ω และ 100 Ω พบว่าที่แรงดันเท่ากัน ค่ากระแสที่วัดได้ของระบบที่มีความต้านทานดินต่ำ กระแสจะมีขนาดสูงกว่าที่ความต้านทานสูง และเมื่อพิจารณาที่ค่าความต้านทานดินเดียวกัน กระแสที่วัดได้จะแปรผันตามแรงดันอย่างเป็นเชิงเส้น และการกระจายของกระแสไม่สมมาตรเท่ากันทุกขาของ โครงสร้าง จากทฤษฎีกล่าวไว้ว่า ค่าความต้านทานดินต้องมีค่าต่ำๆ เพื่อกระแสฟ้าผ่าจะได้ไหลกระจายออกไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ซึ่งอธิบายได้จากผลการทดลองของโครงงานนี้ กล่าวคือ ยิ่งกระแสที่วัดได้มีขนาดต่ำๆ หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าของ โครงสร้างมีค่าสูง ซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลที่สัมผัส โครงสร้างจาก แรงดันสัมผัส และอาจเกิดการสปาร์กค้ำข้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้อีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบบรากสายดินจึงต้องทำให้ค่าความต้านทานดินมีค่าต่ำมากๆ

#### 5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

เนื่องจากใน โครงงานนี้ใช้ ตัวต้านทานชนิด metal film ซึ่งมีราคาถูกแต่คุณภาพต่ำ เมื่อทดสอบที่พิกัด 1 kA ติดต่อกันหลายๆ ครั้งตัวต้านทานจะร้อนและจนวนจะเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งไม่สามารถใช้วัดต่อไปได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวต้านทานที่เกิดการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบควรทดสอบในห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ หรือทำการทดลองให้เสร็จภายในวันเดียวเพื่อจะได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำ และในการทดสอบจะใช้ ออสซิลโลสโคป เพื่อป้องกันความเสียหายจากการเกิดแรงดันเกินหรือ เสรีจากภายนอก ดังนั้น ควรต่อออสซิลโลสโคปกับหม้อแปลง isolated 1:1

ในการทดสอบเป็นการทดสอบเพื่อดูการกระจายของกระแสิมพัลส์ด้วยความต้านทานชั้นที่ ถ้าเป็นไปได้ควรใช้โรโกสก็ค้อยส์ทดสอบร่วมกับความต้านทานชั้นที่เพื่อจะได้ศึกษาการกระจายของกระแสิมพัลส์ในรูปแบบอื่นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, 1<sup>๙</sup>(ฉบับปรับปรุง), กรุงเทพฯ, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์, 2547
- [2] IEC Publication 60060-1, “**High Voltage Test Techniques Part I:General Definations and Test Requirement**”, Geneva 1989
- [3] IEC Publication 60060-2, “**High Voltage Test Techniques Part II:Measuring system**”,Geneva 1994.
- [4] Peter Hasse, “**สัมมนาาระบบป้องกันฟ้าผ่า**,” 2546
- [5] zweisprachig, “**Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard**,” 2006
- [6] เซาวนวิศ แพน้อย ขจรยศ ภักดี พนาคร ธิววงศ์ษา และ วีระวัฒน์ เรียงเสนาะ, ”การออกแบบและสร้างความต้านทานชั้นที่สำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ขนาดพิกัด 20 kA,” **ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหานคร** ,ปี2549,หน้า 8-28
- [7] H.Griffiths and N.Pilling, “Lightning phenomena and protection systems,” **Advances in high voltage engineering** , pp. 79-121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

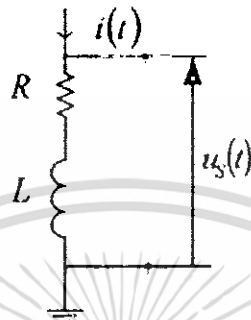


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างสมการที่ใช้ในการออกแบบ

## ความต้านทานชัณฑ์ (R-shunt)



รูปที่ ผ.ก.1 วงจรสมมูลของความต้านทานชัณฑ์

Shunt ในทางปฏิบัติประกอบด้วยทั้งค่า R และ L

$$V_1 = I_p R_s + L \frac{dI_p}{dt} \quad (\text{ก.1})$$

จากสมการถ้า  $L \gg R$

$$V_1 = L \frac{dI_p}{dt} \quad (\text{ก.2})$$

ซึ่งทำให้ค่าที่ได้ผิดจากความเป็นจริง ดังนั้นในการออกแบบ  $R \gg L$

$$V_1 = I_p R_s + L \frac{dI_p}{dt} \quad (\text{ก.3})$$

ค่าพลังงานที่สูญเสียไปกับ Shunt

$$P_{\text{loss}} = I_p^2 R_s \quad (\text{ก.4})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Shunt มีหลักการการวัดในลักษณะเดียวกันกับ Voltage divider ซึ่งมี

แบนด์วิดท์  $f_B = \frac{1.46}{RC_e}$  (ก.5)

และ เวลาตอบสนอง  $T = \frac{RC_e}{6}$  (ก.6)

เมื่อเปรียบเทียบกับ Shunt ซึ่ง  $RC_e \approx \mu_0 \sigma d^2$  (ก.7)

ดังนั้น

$$f_B = \frac{1.46}{\mu_0 \sigma d^2} \quad (ก.8)$$

และ

$$T = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6} \quad (ก.9)$$

ค่า Parameter ต่าง ๆ

$\mu_0$	คือ	$4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ = ค่า permeability ของสุญญากาศ
R	คือ	ค่าความต้านทาน
L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำ
C	คือ	ค่าตัวเก็บประจุ
$R_s$	คือ	ค่าความต้านทานของ Shunt
$f_B$	คือ	Bandwidth
T	คือ	ค่า Time Response
$\sigma$	คือ	สภาพความนำของตัวต้านทาน
d	คือ	ความหนาของ Shunt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข การประกอบสร้าง

### 1. การประกอบสร้าง ความต้านทานชั้นที่

#### 1.1 ส่วนประกอบของชั้นที่

จากการออกแบบชั้นที่ในบทที่ 3 ซึ่งจะนำมาประกอบสร้าง โดยเริ่มจากการสร้างชิ้นส่วนของชั้นที่ให้ได้ขนาดตามที่ได้ออกแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

##### 1.1.1 แกนของชั้นที่



(ก)

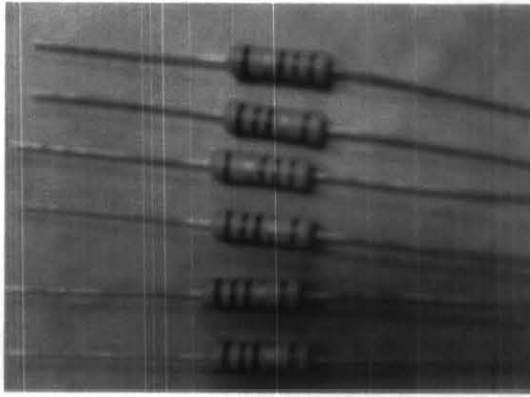
(ข)



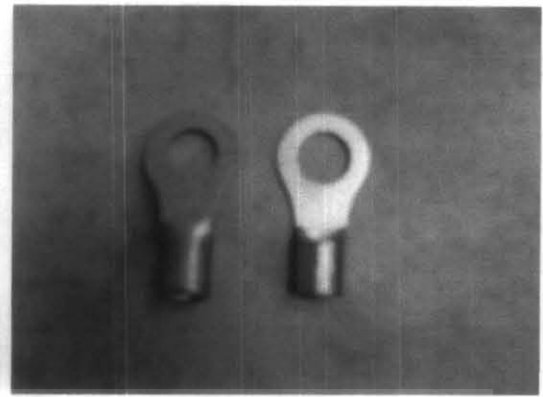
(ค)

(ง)

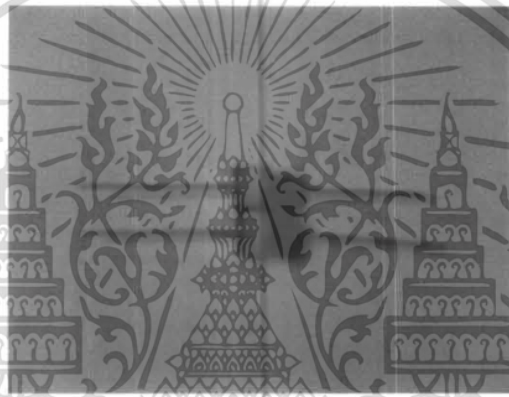
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ค)



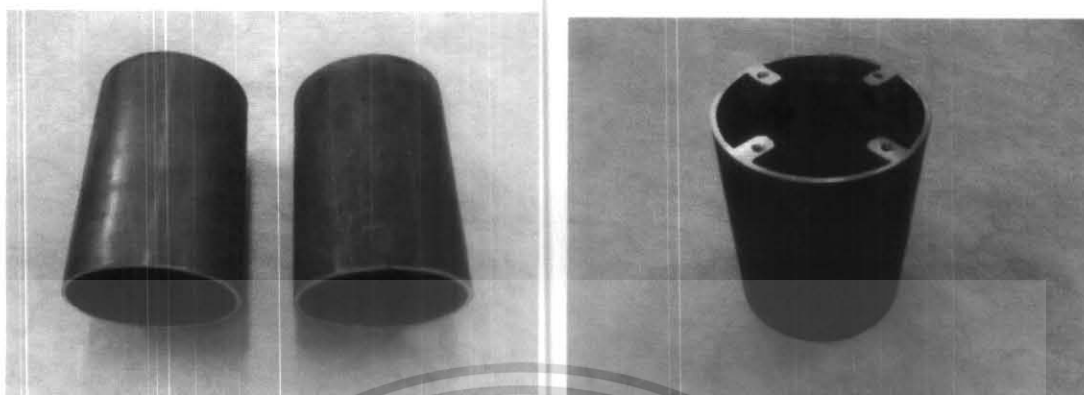
(ข)

### รูปที่ ผ.ข.1 ส่วนประกอบแทนของชั้นท์

- (ก) แท่งตัวนำทำมาจากสแตนเลสถึงเคลือบทั้ง 2 ด้าน
- (ข),(ค) แผ่นตัวนำ
- (ง) ฉนวนเบกาไลต์
- (จ) ความต้านทานชนิด metal film ขนาด 1 โอห์ม 2 วัตต์
- (ฉ) ทางปลา
- (ช) อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.2 ครอบอกซีลด์



(ก)

(ข)



(ค)

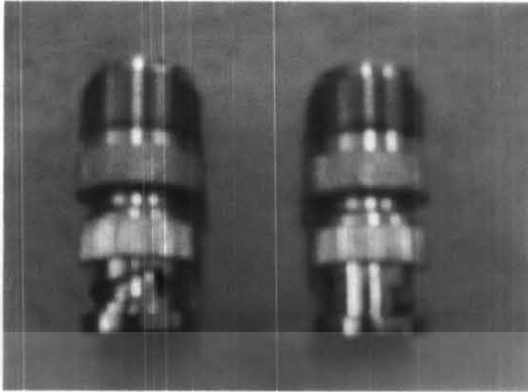
(ง)

รูปที่ ผ.ข.2 ส่วนประกอบของครอบอกซีลด์

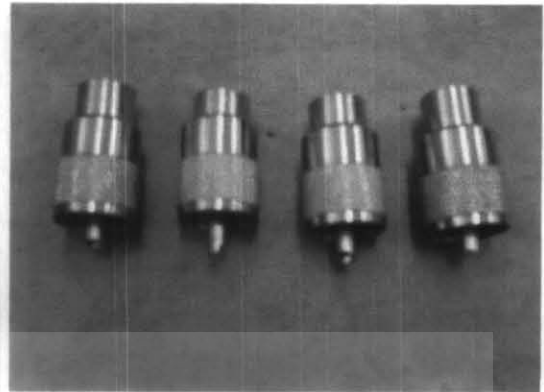
- (ก),(ข) ครอบอกซีลด์
- (ค) ฝาปิดซีลด์ด้านบน
- (ง) ฝาปิดซีลด์ด้านล่างประกอบอยู่กับหัวต่อ UHF-female

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.3 ส่วนประกอบอื่นๆ



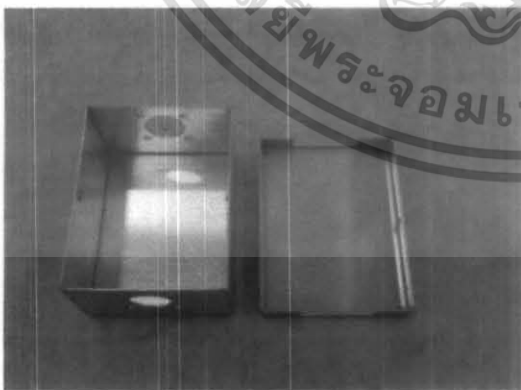
(ก)



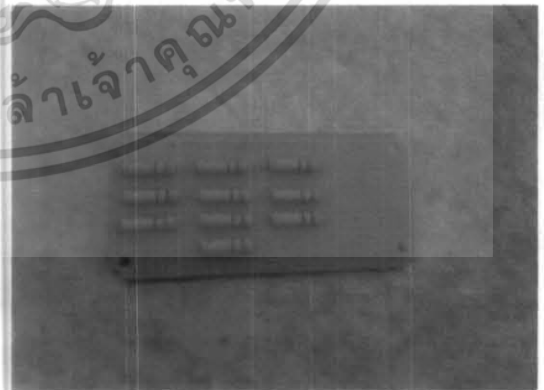
(ข)



(ค)

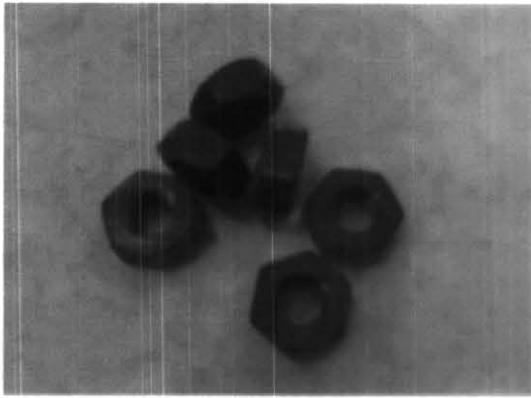


(ง)

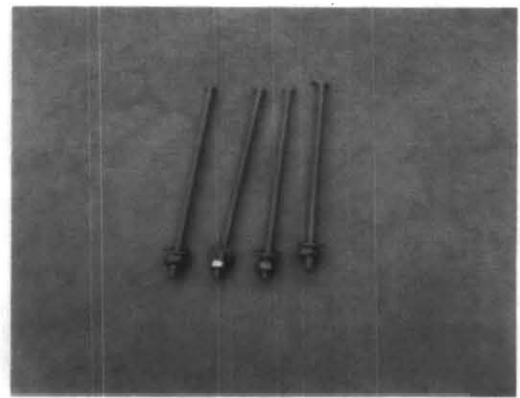


(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ง)

รูปที่ ผ.ข.3 ส่วนประกอบ r-shunt

- (ก) หัวต่อ BNC
- (ข) หัวต่อ UHF-male
- (ค) หัวต่อ UHF-female
- (ง) สายโคแอกเซียล RG-8
- (จ) กล่องซีลด์ของความต้านทานแมชซึ่งทำมาจากอะลูมิเนียม
- (ฉ) ความต้านทานแมชจริง
- (ช) นี้อ็คคือคแกนของชั้นที่
- (ซ) นี้อ็คใช้สำหรับประกอบฐานของชั้นที่

## 1.2 ขั้นตอนการประกอบสร้าง R-shunt



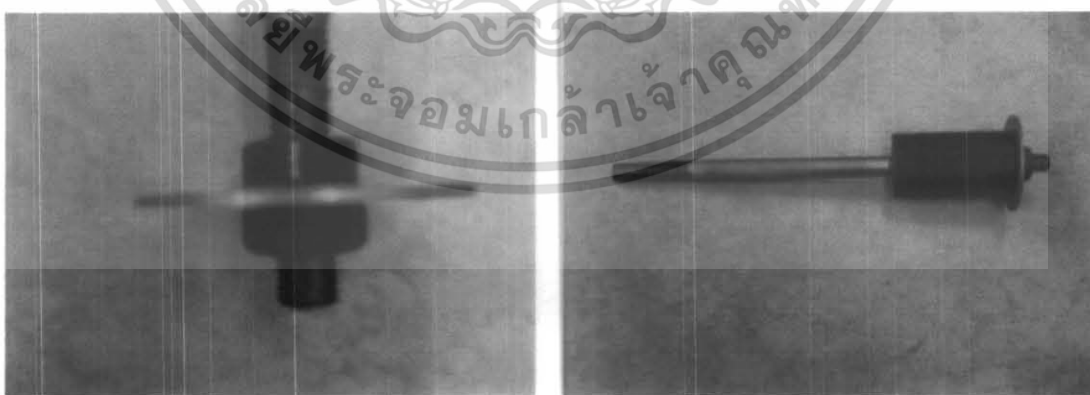
(ก)



(ข)



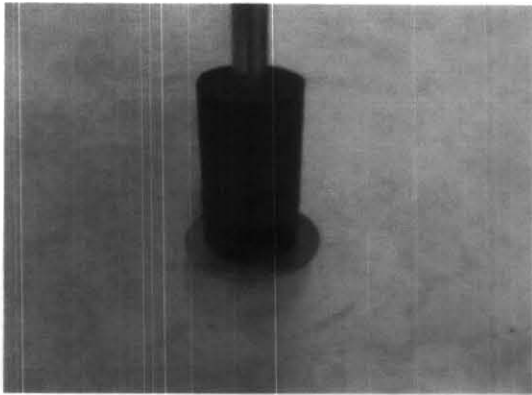
(ค)



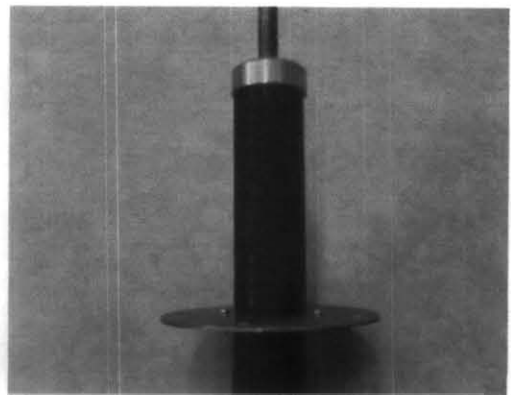
(ง)

(จ)

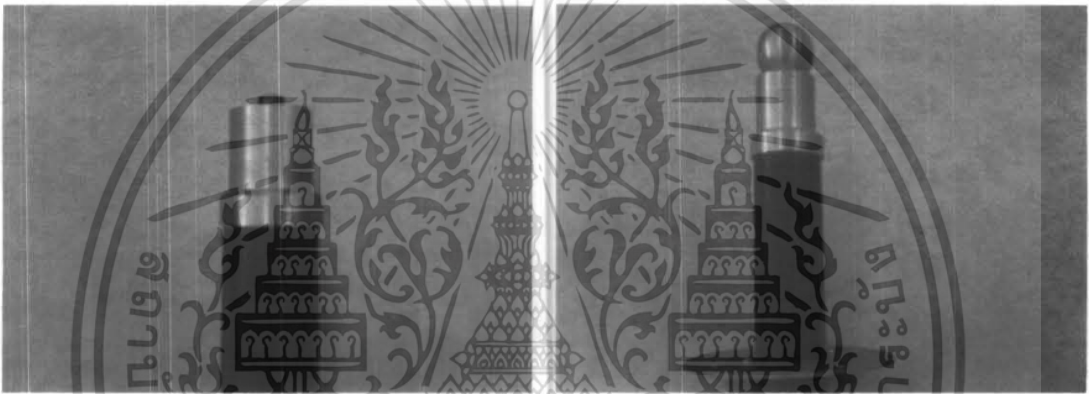
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ข)



(ฅ)

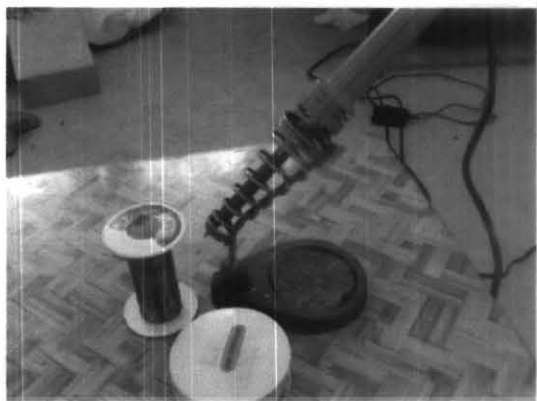
(ฅ)



(ฉ)

(ฉ)

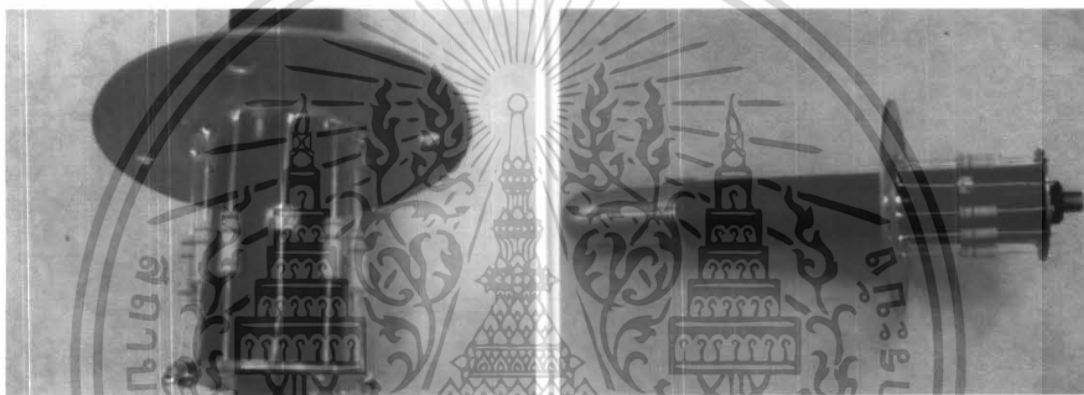
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๖)



(๗)



(๘)

(๙)



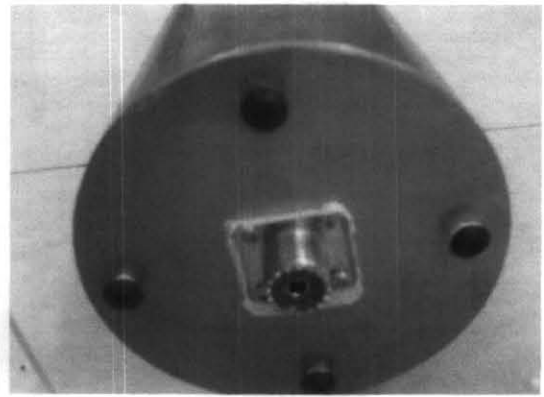
(๑๐)

(๑๑)

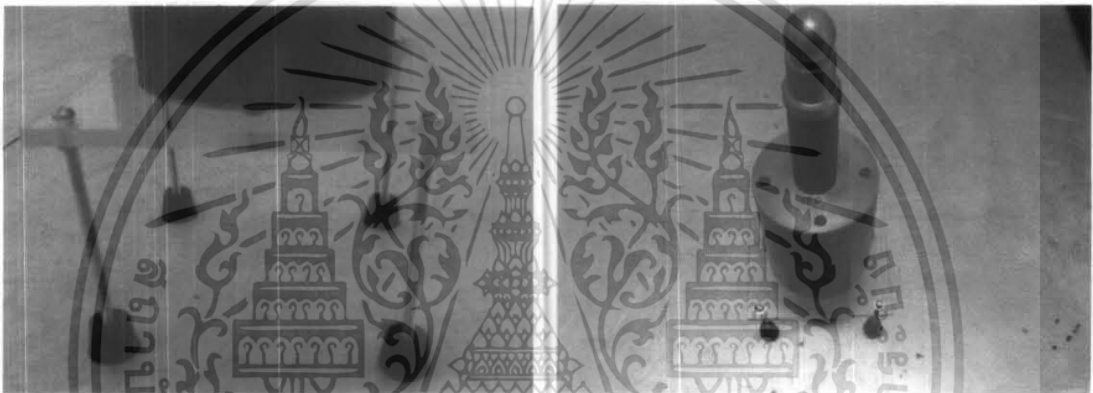
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

(ค)

#### รูปที่ ผ.ข.4 ขั้นตอนการประกอบ r-shunt

- (ก) ขั้นตอนการกลึงแท่งตัวนำ
- (ข) สว่านเจาะ
- (ค) ขั้นตอนการเจาะแผ่นตัวนำ
- (ง),(จ) นำแผ่นตัวนำล่าง ไปประกอบกับแท่งตัวนำแล้วล็อคด้วยน็อตทั้งบนและล่าง
- (ฉ),(ช) นำฉนวน(Bakelite )มาประกอบกับแท่งตัวนำ
- (ซ) นำแผ่นตัวนำบนซึ่งประกอบกับฝาปิดซิลิค์มาประกอบ
- (ฌ),(ญ) ประกอบหัวต่อของแกนของชั้นที่
- (ฎ),(ฏ) แกนของชั้นที่ทำการประกอบเรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ต่อความต้านทาน
- (ฐ) อุปกรณ์สำหรับบัดกรี
- (ฑ) ทำการบัดกรีตัวต้านทานและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินกับแกนของชั้นที่
- (ฒ),(ณ) แกนของชั้นที่ทำการต่อความต้านทานและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ค) นำหางปลาที่ต่อกับสายตัวนำต่อเข้ากับแกนของชั้นท์
- (ค),(ก) นำแกนของชั้นท์ประกอบเข้ากับกระบอกซิลด์
- (ท) ประกอบฝาปิดซิลด์ด้านล่างเข้ากับกระบอกซิลด์
- (ช) ประกอบชั้นท์ความต้านทานเข้ากับฐาน
- (น) ชั้นท์ความต้านทานที่ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้