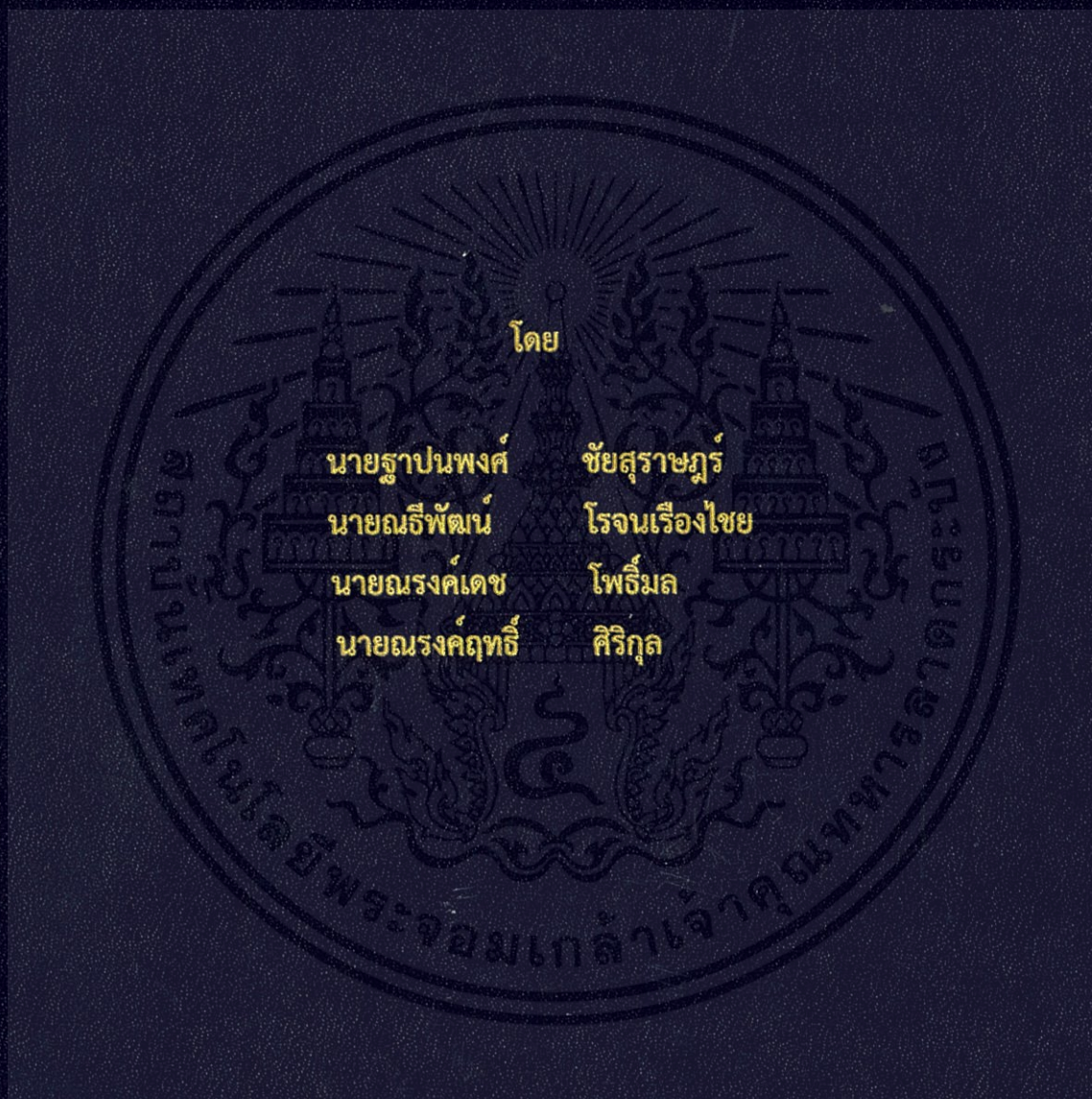


การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง  
THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง  
THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD



โดย

นายฐาปนพงศ์ ชัยสุราษฎร์

นายณธิพัฒน์ โรจนเรืองไชย

นายณรงค์เดช โพธิ์มล

นายณรงค์ฤทธิ์ ศิริกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2557

# THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE OF ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปี 2014 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง  
THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช  
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ผู้จัดทำ

- |                  |              |
|------------------|--------------|
| 1. นายฐาปนพงศ์   | ชัยสุราษฎร์  |
| 2. นายณธิพัฒน์   | โรจนเรืองไชย |
| 3. นายณรงค์เดช   | โพธิ์มล      |
| 4. นายณรงค์ฤทธิ์ | ศิริกุล      |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชฐ พัฒนเดช )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไป อาจารย์ที่ปรึกษา การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา (รองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุ้มสาร) ไปได้

## การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

นายฐาปนพงศ์	ชัยสุราษฎร์
นายณธิพัฒน์	โรจนเรืองไชย
นายณรงค์เดช	โพธิ์มล
นายณรงค์ฤทธิ์	ศิริกุล
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557	

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาแนวทางไฟฟ้าของสนามไฟฟ้ากระแสตรงชั่วเวลาที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode) โดยด้านหนึ่งจ่ายแรงดันสูง กระแสตรง ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อลงกราวด์ และตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนด้วยความต้านทาน ชั้นที่ได้ออกแบบสร้างในขณะที่อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์ และในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่ อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดแรงสูง จากนั้นนำรูปคลื่นสัญญาณของพัลส์กระแสดีสชาร์จมา หาค่าองค์ประกอบต่างๆ เช่น ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ ช่วงเวลาการเพิ่มขึ้นของพัลส์กระแส ดีสชาร์จ (rise time) ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ (pulse duration) พลังงานของพัลส์กระแส แสดีสชาร์จ และช่วงความถี่ของพัลส์กระแสดีสชาร์จที่มีอิทธิพลต่อค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ โดยแบ่ง การทดลองเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทดลองที่ระยะแกป 1 cm ทำการป้อนแรงดันจนอนุภาคเริ่มยกตัว จากอิเล็กโทรดกราวด์พร้อมทั้งตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วน โดยตรวจจับพัลส์แรกที่เกิดขึ้น กรณี ที่ 2 ทดลองที่ระยะแกป 1 cm ทำการป้อนแรงดันจนอนุภาคยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์พร้อมทั้ง ตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรด แรงสูง กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ แต่เปลี่ยน ระยะแกปเป็น 1.5 cm ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะแกปเท่ากันค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่า พลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จในขณะที่อนุภาคเริ่มยกตัวมีค่าสูงกว่าตอนที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทั้งสองกรณีนี้มีช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีส ชาร์จใกล้เคียงกัน ส่วนที่ระยะแกปต่างกันพบว่า ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ และค่าพลังงาน ของพัลส์กระแสดีสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด ถ้าป้อนแรงดันสูงขึ้นเพื่อให้อนุภาค เริ่มยกตัวเมื่อมีระยะแกปเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ และค่าพลังงานของ กระแสดีสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาพลังงานของ พัลส์กระแสดีสชาร์จที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) ที่ทำให้อนุภาคนิวเคลียส SF<sub>6</sub> เสื่อมสภาพความเป็นฉนวนต่อไป

## THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD

THAPANAPON

CHASURAT

NATEEPAT

ROCHJANAREUNGCHAI

NARONGDECH

POLMOL

NARONGRIT

SIRIKUL

Asst.Prof.Dr.Norasege

Pattanadech

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Anantawat

Kunakron

Advisor

2014

### ABSTRACT

This senior project presents the study of force of DC electric field which makes the particle start lifting from plane-plane electrode. The one side of electrode is supplied by high DC voltage and the other is connected to ground. To detect the PD current pulse with  $50 \Omega$  shunt-resistance when the particle start lifting from grounded electrode and is being moved between high voltage electrode and ground electrode. The PD current pulse components such as amplitude, rise time, pulse duration, energy of PD current pulse and dominant frequency are analyzed. The test can be classified into 4 cases; (1) testing with gap distance 1 cm, the DC voltage supplying to electrode causes the particle starts lifting and then detecting the first PD current pulse (2) testing with gap distance 1 cm, the DC voltage supplying to electrode causes the particle is moving between plane-plane electrode and then detecting PD current pulse. The other cases are similar to those ones, but gap distance is changed from 1 cm to 1.5 cm. From the test, on the condition of the same gap distance requires higher amplitude and energy of PD current pulse compare with freely moving between the gap after the first lifting, but there are not much different in pulse duration. Testing with different gap distance, pulse duration and energy of PD current pulse depend on the voltage supplying to plane-plane electrode system. The higher voltage supply to electrode in order to lift the particle from the grounded electrode, the longer pulse duration and the more energy of PD current pulse are required. This fundamental study could be applied for studying the movement of particle in GIS (gas insulated system) which leads to degradation of SF<sub>6</sub> insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะคุณบุษยพล เพาพาน คุณเพทาย นิมสนอง และคุณบัญญัติ ลีลาจรรย์กุล ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้ไฟฟ้าสม่ำเสมอ	5
2.2 ประจุเหนี่ยวนำ	5
2.3 แรงคูลอมบ์	6
2.4 แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า	7
2.5 แรงทางกลอื่นๆ	8
2.5.1 แรงโน้มถ่วง	8
2.5.2 แรงเสียดทาน	9
2.5.3 แรงหนืด	9
2.6 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	9
2.6.1 การยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวนด์	9
2.7 ดิสรจาร์จบางส่วน (PD)	10
2.7.1 ดิสรจาร์จแบบโคโรนา	11
2.7.2 ดิสรจาร์จตามผิว	12
2.7.3 ดิสรจาร์จภายใน	13
2.8 ผลกระทบของดิสรจาร์จบางส่วน	13
2.9 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD	13
2.10 พฤติกรรมของดิสรจาร์จบางส่วน	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.10.1 วงจรสมมูลของดิสรจาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ให้นำไปใช้ 15 โชนันด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10.2 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน	16
2.10.2.1 การดีสชาร์จซ้ำ	16
2.10.2.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดีสชาร์จบางส่วน	17
2.11 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน	17
2.11.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน	17
2.11.2 แสดงผลของดีสชาร์จบางส่วน	19
2.11.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (Discharge calibrator)	19
2.12 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน	19
2.13 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน	21
2.13.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน	21
2.13.2 การลดสัญญาณรบกวน	22
2.14 การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน	23
2.14.1 การวิเคราะห์ PD แบบนิยม	23
2.14.1.1 รูปแบบ PD แบบโคโรนา	23
2.14.1.2 รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว	24
2.14.1.3 รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จภายใน	24
2.14.1.4 รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น	24
2.15 การวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั๊นท์ (shunt)	26
2.15.1 หลักการวัดด้วยความต้านทานของชั๊นท์	26
2.15.2 ความต้านทานชั๊นท์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	27
2.15.3 เวลาคงตัวของความต้านทานชั๊นท์	28
2.15.4 ความไวของชั๊นท์	29
<b>บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ทดลองที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง</b>	<b>30</b>
3.1 ภาพรวมการออกแบบแท่นวางวัสดุทดสอบ	30
3.1.1 อคติคิไลสครอบอิเล็กโทรด	31
3.1.2 แท่นปรับหมุน	32
3.1.3 ฝาปิดและแท่นยึดแกนหมุน	33
3.1.4 ขาตั้งชิ้นงาน	34
3.2 การออกแบบอิเล็กโทรด	35
3.2.1 อิเล็กโทรดแบบระนาบ (plate)	35
3.3 ขนาดอนุภาค	36
3.3.1 อนุภาคขนาดเล็ก	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี 3.3.1 อนุภาคขนาดเล็ก เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 ภาพรวมการออกแบบความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์	37
3.4.1 ตัวทานทาน	38
3.4.2 ฉนวนป้องกันแท่งตัวนำกับโครงกราวด์	38
3.4.3 แผ่นตัวนำ	39
3.4.4 โครงกราวด์ครอบความต้านทานชั้นที่	40
3.4.5 แท่งตัวนำทองเหลือง	42
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	43
4.1 วิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค	43
กรณีที่ 1 อนุภาคถูกวางบนระนาบเล็กโตรดกราวด์	44
กรณีที่ 2 อนุภาคเคลื่อนที่จากระนาบกราวด์	
ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	44
กรณีที่ 3 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	45
กรณีที่ 4 อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดกราวด์	45
กรณีที่ 5 อนุภาคกระทบอิเล็กโตรดกราวด์	46
4.2 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบขึ้น	46
4.3 ผลการทดสอบการยกตัวขึ้นของอนุภาคจากอิเล็กโตรดกราวด์	
ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบสม่ำเสมอ	48
4.3.1 ผลการทดสอบการเริ่มยกตัวของอนุภาคจาก	
อิเล็กโตรดกราวด์ที่ระยะ gap 1 cm	51
4.3.1.1 เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวด์	51
4.3.1.2 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวด์	
กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	56
4.3.2 ผลการทดสอบการเริ่มยกตัวของอนุภาคจาก	
อิเล็กโตรดกราวด์ที่ระยะ gap 1.5 cm	60
4.3.2.1 เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวด์	60
4.3.2.2 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวด์	
กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	66
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	72
<b>ภาคผนวก</b>	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ	1
1.2 อนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า	2
2.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์และอนุภาคที่ใช้พิจารณา	5
2.2 อนุภาคอยู่บนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า	6
2.3 แรงที่กระทำกับอนุภาคในแนวตั้ง	9
2.4 ดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ	11
2.5 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จตามผิวบางส่วน	12
2.6 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป	14
2.7 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด	16
2.8 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD	16
2.9 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็กๆ	17
2.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD	18
2.11 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบ	19
2.12 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ	21
2.13 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ	22
2.14 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน	22
2.15 รูปแบบการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ	23
2.16 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิว	24
2.17 รูปแบบการเกิดดิสชาร์จภายใน	24
2.18 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด	25
2.19 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นท์	26
2.20 วงจรสมมูลของชั้นท์และผลตอบสนองของแรงดันรูปชั้นท์ของชั้นท์	27
2.21 จุดต่อวัดแรงดันคร่อม $R_c$ เกิดเป็นวงรอบชั้นท์	27
2.22 ความต้านทานชั้นท์วัดกระแสอิมพัลส์	28
3.1 แบบจำลองแท่นวางวัสดุทดสอบ	30
3.2 แท่นวางวัสดุทดสอบ	31
3.3 ขนาดของอิลิกโทรดแบบอิเล็กทรอนิกส์	31
3.4 แบบจำลองแบบจำลองแท่นปรับหมุน	32
3.5 ขนาดแท่นยึดตลับลูกปืนหมุน	32
3.6 ขนาดแกนหมุน	32
3.7 ขนาดของตลับลูกปืนที่ติดกับสกรูหมุน	33
3.8 แบบจำลองฝาปิด และแท่นยึดแกนหมุน	33
3.9 ขนาดของฝาปิด	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ขนาดแทนยึดแกนหมุน	34
3.11 แบบจำลองขาตั้งชิ้นงาน	34
3.12 ขนาดและจำนวนขาตั้งชิ้นงาน	35
3.13 แบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบโค้ง	35
3.14 อิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบโค้ง	36
3.15 ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบโค้ง	36
3.16 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค	37
3.17 แบบจำลองความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์	37
3.18 ความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์	38
3.19 แบบจำลองฉนวนป้องกันแท่งตัวนำ กับกราวด์ และแท่งฉนวน	38
3.20 ขนาดของฉนวนป้องกันแท่งตัวนำ กับกราวด์ และแท่งฉนวน	39
3.21 แบบจำลองแผ่นตัวนำ	39
3.22 ขนาดของแผ่นตัวนำด้านบน	40
3.23 ขนาดของแผ่นตัวนำด้านล่าง	40
3.24 แบบจำลองโครงกราวด์ครอบคลุมความต้านทานชั้นที่	41
3.25 ขนาดของโครงกราวด์ครอบคลุมความต้านทานชั้นที่	41
3.26 ขนาดของฝาปิดล่าง	41
3.27 ขนาดของฝาปิดบน	42
3.28 ขนาดของแท่งตัวนำ	42
4.1 ทิศทางของแรงคูลอมบ์ และแรงโน้มถ่วงในแนวแกน Z	43
4.2 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 1	44
4.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 2	44
4.4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 3	45
4.5 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 4	45
4.6 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทาน R-Shunt	46
4.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานของความต้านทานชั้นที่ที่ออกแบบสร้างเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น	48
4.8 การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีไฟน์โทอิลิเมนต์ที่แกป 1.0 cm	49
4.9 การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีไฟน์โทอิลิเมนต์ที่แกป 1.5 cm	49
4.10 วงจรสมมูลการทดสอบ	50
4.11 วงจรการทดสอบ	51
4.12 กราฟพล็อตกระแสดิซชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1 cm เมื่ออนุภาคเริ่มยก	55
4.13 กราฟพล็อตกระแสดิซชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1 cm เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่	59
4.14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ระยะแกป 1.5 cm	61

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟพล็อตกระแสดิซาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1.5 cm เมื่ออนุภาคเริ่มยก	65
4.16 กราฟพล็อตกระแสดิซาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1.5 cm เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์	3
4.1 ผลการทดสอบความต้านทานชั้นท์	47
4.2 แสดงค่าแรงดันเริ่มยกตัวของอนุภาคที่ระยะแกป 1 cm	52
4.3 แสดงคุณสมบัติพัลส์ของกระแสไอซาร์จบางส่วน ของอนุภาคที่เริ่มยกตัวจากกระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์	56
4.4 แสดงคุณสมบัติพัลส์ของกระแสไอซาร์จบางส่วนเมื่ออนุภาค เคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวนด์ กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	60
4.5 แสดงค่าแรงดันเริ่มยกตัวของอนุภาคที่ระยะแกป 1.5 cm	61
4.6 แสดงคุณสมบัติพัลส์ของกระแสไอซาร์จบางส่วน เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากกระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์	65
4.7 แสดงคุณสมบัติพัลส์ของกระแสไอซาร์จบางส่วน เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวนด์กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง	69

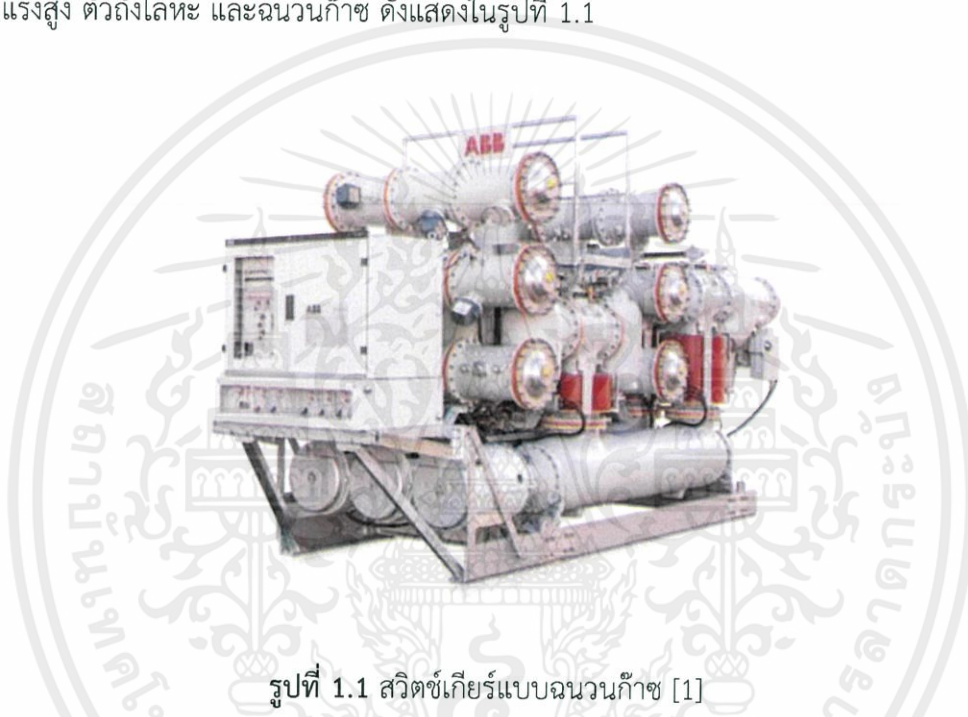
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

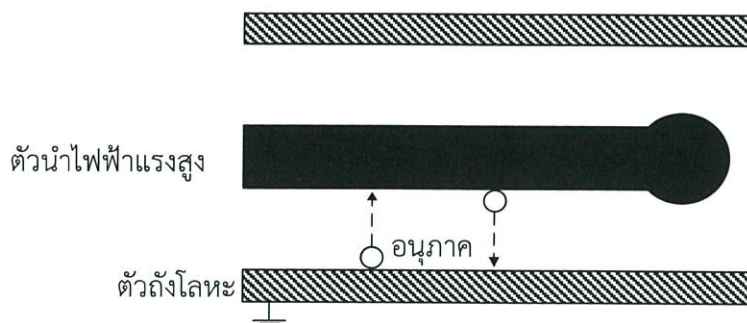
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนก๊าซ (gas insulated switchgear) มีการนำเทคโนโลยีการออกแบบอุปกรณ์สวิตช์เกียร์สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่มีการพัฒนาดีขึ้นและมีการออกแบบให้บรรจุอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ในโครงสร้างปิดและบรรจุวัสดุฉนวน เช่น ก๊าซหรือน้ำมันฉนวนไว้ภายใน สำหรับสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบันโครงสร้างหลักของระบบจะประกอบด้วย ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ตัวถังโลหะ และฉนวนก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ [1]

โดยปกติภายในระบบสวิตช์เกียร์จะมีบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับโครงสร้างและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคตัวนำอิสระในระบบฉนวนอาจเกิดได้จากหลายๆ ปัจจัย เช่น เกิดจากการบำรุงรักษาระบบ หรืออาจปะปนมากับก๊าซในการติดตั้ง การชำรุดของอุปกรณ์ภายในระบบจนทำให้มีเศษผงซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบของโลหะเกิดขึ้น จากข้างต้นทำให้ความสามารถในการฉนวนของก๊าซลดลง อนุภาคที่เกิดขึ้นทำให้ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์สูงขึ้นเฉพาะจุด จึงอาจนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วนรวมถึงเกิดการเบรกดาวนในระบบได้ จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดประจุที่ผิวของอนุภาคตัวนำแล้วส่งผลให้เกิดแรงทางไฟฟ้าที่กระทำกับอนุภาคขึ้นเมื่อผลลัพธ์ของแรงซึ่งเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงคูลอมบ์บนอนุภาคไม่เท่ากับศูนย์จะส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปยังส่วนต่างๆ ของระบบจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่วนต่างๆ ของระบบมีค่าสนามไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะแตกต่างกัน



รูปที่ 1.2 อนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาแรงทางไฟฟ้าของสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์ โดยใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode)
2. เพื่อทำการออกแบบความต้านทานชั้นสำหรับการตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วน
3. เพื่อนำความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้างไปวัดค่าพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนในขณะที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนและในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode) ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ปฏิญญาพันธันนี้จำกัดการศึกษาเฉพาะอนุภาคทรงกลม
2. ใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode) ในการทดสอบ
3. ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วลงในทดสอบ

## 1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีการยกตัวของอนุภาคเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง
2. ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดอิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode)
3. ทำการออกแบบและประกอบสร้างความต้านทานชั้น
4. ทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ (frequency response analysis) ของความต้านทานชั้น
5. ตรวจจับกระแสดีสชาร์จบางส่วนเมื่อมีอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าด้วยความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบไว้
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ
7. ทำปฏิญญาพันธันฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2557									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีของสนามไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง										
2. ทำการออกแบบและประกอบสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบกับระนาบ										
3. ทำการออกแบบและประกอบสร้างความต้านทานชั้น										
4. ทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้น										
5. ตรวจสอบกระแสดีสชาร์จบางส่วนเมื่อมีอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าด้วยความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบไว้										
6. ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์										

←-----→ วางแผน      ←-----→ ทำจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1. ทำให้ทราบว่าภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงนั้น มีแรงทางไฟฟ้าเกิดขึ้นจริงต่อวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า
2. ได้องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
3. สามารถประเมินความเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อากาศเป็นฉนวน จากการเกิดพัลส์กระแสดีเอสอาร์เนื่องจากมีอนุภาคเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวด์กับอิเล็กโตรดแรงสูงด้วยกราฟพัลส์กระแสดีเอสอาร์ที่ตรวจจับด้วยความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้ไฟฟ้าสม่ำเสมอ

หัวข้อนี้อธิบายถึงพื้นฐานของแรงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยระบบอิเล็กโตรดและอนุภาคจะพิจารณาดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นแบบระนาบ 2 มิติ โดยที่ระนาบอิเล็กโตรดด้านล่างต่อลงกราวด์ และระนาบอิเล็กโตรดด้านบนได้รับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงจากแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.1 ระบบอิเล็กโตรดและอนุภาคที่ใช้พิจารณา

สนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กโตรดที่ใช้พิจารณาคือแบบสม่ำเสมอ เราสามารถหาขนาดของสนามไฟฟ้าได้จาก

$$E = \frac{V}{d} \tag{2.1}$$

เมื่อ  $E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโตรด (V)

$D$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดด้านแรงสูงกับอิเล็กโตรดด้านกราวด์ (m)

### 2.2 ประจุเหนี่ยวนำ

เมื่อวางอนุภาคตัวนำบนอิเล็กโตรดด้านกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก  $E_0$  และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่อิเล็กโตรดด้านแรงสูง จะเกิดประจุเหนี่ยวนำ  $q_{ind}$  ขึ้น เมื่อพิจารณาอนุภาคตัวนำรัศมี  $a$  บนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า  $E_0$  ทิศทางพุ่งลงดังรูปที่ 2.2 จะได้ว่า [2,3,5]

$$q_{\text{ind}} = -\frac{2}{3}\pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s E_0 a^2 \quad (2.2)$$

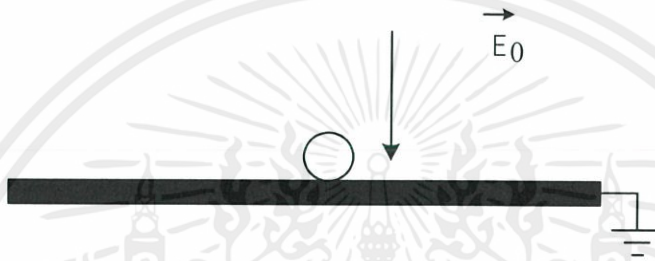
เมื่อ  $q_{\text{ind}}$  คือ ประจุเหนี่ยวนำ (C)

$a$  คือ รัศมีของอนุภาคตัวนำ (m)

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

$\epsilon_s$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งเท่ากับ 1.0 สำหรับอากาศ

$E_0$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)



รูปที่ 2.2 อนุภาคอยู่บนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า

สังเกตว่า ถ้าทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางอ้างอิงดังในภาพที่ 2.2 จะทำให้ประจุไฟฟ้าบวกถูกเหนี่ยวนำบนอนุภาคแทน

### 2.3 แรงคูลอมบ์

ประจุเหนี่ยวนำบนผิวของอนุภาคตัวนำ ซึ่งวางตัวอยู่บนระนาบอิเล็กโตรดดังในหัวข้อ 2.2 ที่ผ่านมาที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก  $E_0$  จะเกิดแรงคูลอมบ์  $F_q$

เมื่ออ้างอิงแรง  $F_q$  ในทิศทาง  $+Z$  พุ่งขึ้นออกจากอิเล็กโตรดด้านล่าง จะได้ขนาดของแรงเป็นไปตามสมการ [1,2,4]

$$F_q = 0.832 |q_{\text{ind}}| E_0 \quad (2.3)$$

แทนค่าประจุเหนี่ยวนำ  $q_{\text{ind}}$  จากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$F_q = (0.832) \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 E_0^2 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ แรงคูลอมบ์จะมีทิศทางดึงอนุภาคออกจากระนาบอิเล็กโตรดเสมอ ไม่ว่าสนามไฟฟ้าภายนอกจะใช้  
จะมีทิศทางพุ่งลง ( $V > 0$ ) หรือพุ่งขึ้น ( $V < 0$ )

แทนค่าสนามไฟฟ้า  $E_0$  จากสมการที่ (2.1) และค่าประจุเหนี่ยวนำ  $q_{ind}$  จากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.3) เราจะได้ขนาดของแรงคูลอมบ์ที่กระทำกับอนุภาคในขณะที่อนุภาควางอยู่บนอิเล็กโตรดเป็น

$$F_q = (0.555) \frac{\pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 V^2}{d^2} \quad (2.5)$$

เมื่ออนุภาคตัวนำยกตัวออกจากระนาบอิเล็กโตรดโดยไม่สัมผัสกับระนาบอิเล็กโตรด แรงคูลอมบ์ที่กระทำกับอนุภาคสามารถประมาณได้เป็น

$$F_q = q_{ind} E_0 \quad (2.6)$$

ดังนั้นในกรณีทั่วไป เมื่ออนุภาคยกตัวอยู่ระหว่างระนาบอิเล็กโตรดทั้งสองโดยไม่ได้สัมผัสกับอิเล็กโตรดใด จะได้ขนาดของแรงคูลอมบ์ที่กระทำกับอนุภาคเป็น

$$\vec{F}_q = \pm \frac{2\pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 V^2}{3 d^2} \vec{a}_\theta \quad (2.7)$$

ในสมการที่ (2.7) เครื่องหมายลบจะใช้บ่งบอกว่าอนุภาคได้เคลื่อนที่ออกจากระนาบอิเล็กโตรดด้านบนหลังได้รับประจุเหนี่ยวนำจากการกระทบอิเล็กโตรดบนของอนุภาคแล้ว

## 2.4 แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า

แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าเป็นแรงที่กระทำกับอนุภาคที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ พื้นฐานของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ามาจากปฏิกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้ากับประจุเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนอนุภาค โดยธรรมชาติของอนุภาคเมื่ออยู่ใต้สนามไฟฟ้าภายนอก จะเกิดประจุเหนี่ยวนำขึ้นที่ผิวของอนุภาคซึ่งประจุเหนี่ยวนำนี้อาจเกิดจากโพลาริเซชัน หรือเกิดจากประจุจริงก็ได้ เราสามารถประมาณผลของประจุเหนี่ยวนำนี้ด้วยไดโพลที่จุดศูนย์กลางของอนุภาคโดยเรียกว่าเป็นไดโพลเหนี่ยวนำสมมูล

พิจารณาอนุภาครัศมี  $a$  ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก  $E_0$  เราสามารถเขียนไดโพลเหนี่ยวนำสมมูล  $\vec{p}_{ind}$  ของอนุภาคได้เป็น [5]

$$\vec{P}_{ind} = 4\pi\epsilon_0 K_{CM} a^3 \vec{E}_0 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $K_{CM}$  คือตัวประกอบ Clausius-Mossotti มีค่าเท่ากับ  $\frac{\epsilon_s - \epsilon_0}{\epsilon_s + 2\epsilon_0}$  เท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{CM} = \frac{\epsilon_p - \epsilon_s}{\epsilon_p + 2\epsilon_s} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\epsilon_p$  คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอนุภาค ในกรณีอนุภาคตัวนำ  $K_{CM}$  จะเท่ากับ 1 เนื่องจาก  $\epsilon_p$  มีค่าอนันต์แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า  $\vec{F}_{gd}$  คือแรงที่กระทำกับไดโพลเหนี่ยวนำสมมูลเนื่องจากสนามไฟฟ้า  $E_0$  [5]

$$\vec{F}_{gd} = (\vec{F}_{ind} \cdot \nabla) \vec{E} \quad (2.10)$$

แทนค่า  $\vec{p}_{ind}$  จากสมการ (2.8) จะได้ว่า

$$\vec{F}_{gd} = 4\pi\epsilon_0 a^3 \cdot \nabla \vec{E}_0 \quad (2.11)$$

$$= 2\pi\epsilon_0 a^3 \nabla E_0^2 \quad (2.12)$$

เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า  $E_0$  เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งพิกัด

สำหรับระบบขั้วเล็กทรงกลมที่พิจารณา  $E = \frac{V}{r\theta_0}$  เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.11) เราจะได้ว่า [5]

$$\vec{F}_{gd} = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon_s a^3 V^2}{r^3 \theta_0^2} \vec{a}_r \quad (2.13)$$

หรือ

$$\vec{F}_{gd} = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon_s a^3 E_0^2}{r} \vec{a}_r \quad (2.14)$$

สังเกตว่า แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าจะมีทิศทางที่จะเคลื่อนอนุภาคตัวนำไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน

## 2.5 แรงทางกลอื่นๆ

แรงทางกลอื่นๆ ที่กระทำกับอนุภาค ซึ่งพิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ แรงโน้มถ่วง  $\vec{F}_g$  แรงเสียด

ทาน  $\vec{F}_{fric}$  และแรงหนืด  $\vec{F}_v$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 แรงโน้มถ่วง

แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับอนุภาคในภาพที่ 2.1 มีทิศทาง  $-Z$  และคำนวณได้จาก [4]

$$\vec{F}_g = -\frac{4}{3}\pi a^3 g(\rho_p - \rho_s)\vec{a}_z \quad (2.15)$$

โดยที่  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ  $9.8 \text{ m/s}^2$

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  $\rho_p = 7878 \text{ kg/m}^3$  สำหรับเหล็ก

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของตัวกลางโดยรอบ  $\rho_s = 1.184 \text{ kg/m}^3$  สำหรับอากาศ

### 2.5.2 แรงเสียดทาน

แรงเสียดทานเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่บนระนาบอิเล็กโทรดหรือฉนวน โดยมีทิศทางต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในสภาวะที่อนุภาคหยุดนิ่ง ขนาดของแรงเสียดทานสูงสุด  $\vec{F}_{fric}$  มีค่าเป็น

$$\vec{F}_{fric} = \mu N \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\mu$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างอนุภาคและพื้นผิว และ  $N$  คือแรงลัพธ์ที่อนุภาคกระทำกับอิเล็กโทรด สังเกตว่า  $N$  เป็นผลรวมของแรงโน้มถ่วงและแรงไฟฟ้าในแนวตั้ง

### 2.5.3 แรงหนืด

แรงหนืดมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค สำหรับอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{V}$  ภายในตัวกลางที่มีความหนืด เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของอากาศ

$$\vec{F}_v = -6\pi\eta a\vec{V} \quad (2.17)$$

## 2.6 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

### 2.6.1 การยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 แรงที่กระทำกับอนุภาคในแนวตั้ง

จากสมการที่ (2.3) และ (2.14) แรง  $F_z$  ในแนวแกนตั้งที่เกิดกับอนุภาคเมื่อละลายผลของมุม  $\theta_0$  มีค่าเป็น

$$F_z = F_q - F_g \quad (2.18)$$

อนุภาคถูกยกขึ้นจากระนาบกราวด์เมื่อ  $F_z = 0$  นั่นคือ

$$(0.832) \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 E_0^2 = \frac{4}{3} \pi a^3 g(\rho_p - \rho_s) \quad (2.19)$$

ซึ่งได้สนามไฟฟ้าเริ่มต้น  $E_L$  ในการยกอนุภาคเป็น

$$E_L = 0.5 \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s) a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (2.20)$$

จาก  $E = Vd$  แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น  $V_L$  ที่ยกอนุภาคขึ้นจากระนาบกราวด์คำนวณได้จาก

$$V_L = 0.5d \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s) a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (2.21)$$

## 2.7 ดิสชาร์จบางส่วน (PD)

ดิสชาร์จบางส่วนคือ ดิสชาร์จเบรกดาวนที่ไม่สมบูรณ์ทางไฟฟ้า พลังงานที่ทำให้เกิดดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็งของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ Kreuger [7] ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “ดิสชาร์จบางส่วนเป็นดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด”

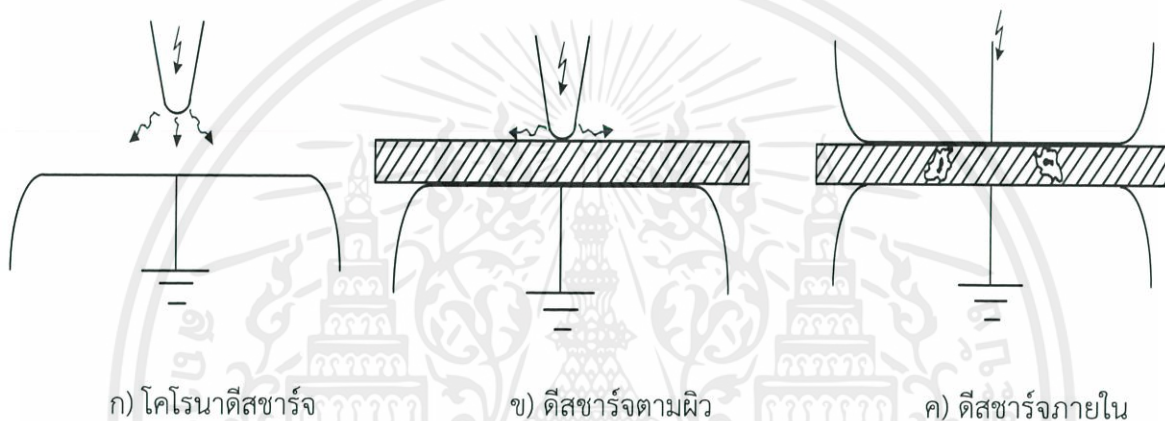
ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ต่อเนื่องกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

ดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นทุกๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ปกตินั้นเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอดของการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานนักให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิเตอร์ ดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดได้ 3 แบบคือ

1) โครนาดีสชาร์จ (corona discharge) เกิดบนแท่งตัวนำในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลม ซึ่งต่อกับไฟฟ้าแรงดันสูงหรือกราวด์อยู่ในอากาศหรือก๊าซที่ความดันปกติ ดังรูปที่ 2.4 ก)

2) ดีสชาร์จตามผิว (surface discharge) เกิดบริเวณผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกับผิวสูง อาจเกิดร่องรอยกัดกร่อนซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้า (tracking) ดังรูปที่ 2.4 ข)

3) ดีสชาร์จภายใน (internal discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีความคงทนได้อิเล็กตริกต่ำ หรือมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้เนื้อฉนวนส่วนนี้เกิดเบรกดาวน์ก่อน ดีสชาร์จภายในเกิดขึ้นเนื่องจากมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวนที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างของดีสชาร์จภายในแสดงในรูปที่ 2.4 ค) [6]



ก) โครนาดีสชาร์จ

ข) ดีสชาร์จตามผิว

ค) ดีสชาร์จภายใน

รูปที่ 2.4 ดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

### 2.7.1 ดีสชาร์จแบบโครนา

ดีสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายแหลมอิเล็กโทรดแหลม หรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซความดันปกติ เรียกว่า โครนา โครนาดีสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ ผลเนื่องจากโครนาคือ

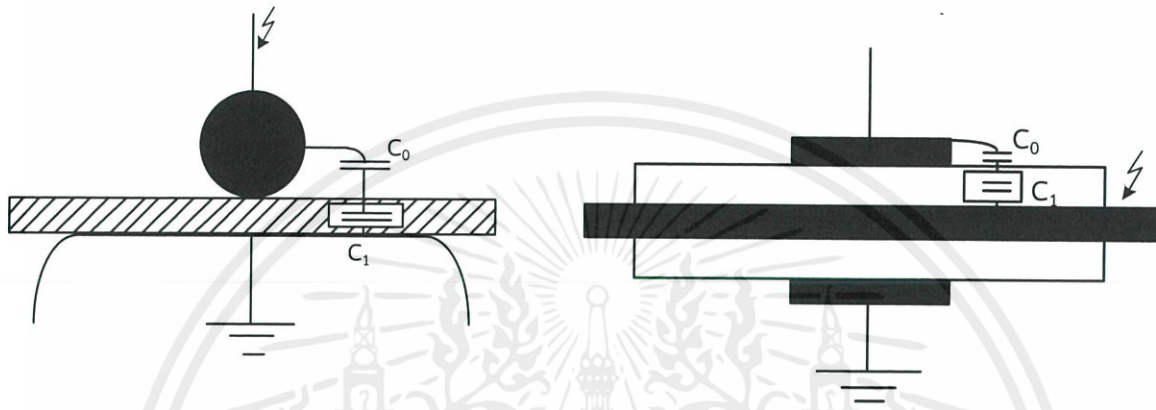
1. เมื่อเกิดโครนาในอากาศอาจสังเกตเห็นได้ด้วยร่างกายคน คือจะได้ยินเสียงฮีสซิ่ง (เสียงแมลงบิน) มีกลิ่นโอโซน ( $O_3$ ) ในยามมืดสนิทจะเห็นแสงเรือง
2. โครนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้นๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึง MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะรบกวนระบบสื่อสาร

3. การเกิดโครนาย่อมหมายถึง มีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนา ในการออกแบบระบบสายส่งจึงหลีกเลี่ยงมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าสนามวิกฤต

พลังงานสูญเสียเนื่องจากโครนาขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของผิวดำนำ ด้วยเหตุนี้ในระบบสายส่งแรงสูงจึงใช้สายควบ (bundled conductors) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศ ฝน หมอก น้ำค้าง จะทำให้เกิดโครนาง่าย

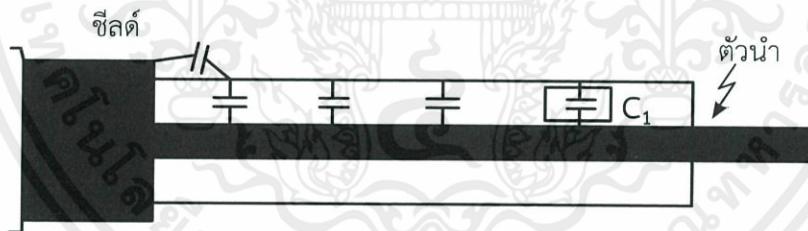
2.7.2 ดิสชาร์จตามผิว

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ตามฉนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่นแผ่นฉนวนคั่นระหว่างอิเล็กโตรดกับแผ่นระนาบ ที่ปกยึดปกฉนวนตัวนำ และปลายสายเคเบิลแรงสูงดังรูป 2.5



ก) อิเล็กโตรดทรงกลมกับระนาบคั่นด้วยแผ่นแก้ว

ข) ปกฉนวนตัวนำ



ค) ปลายสายเคเบิลแรงสูง

รูปที่ 2.5 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จตามผิวบางส่วน

ตามรูป ค่าเก็บประจุระหว่างอิเล็กโตรด  $C_a \ll$  ค่าเก็บประจุของฉนวนแข็ง  $C_1$  ฉะนั้นแรงดันระหว่าง อิเล็กโตรดจะตกคร่อม  $C_0$  เกือบทั้งหมด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบนส่วน  $C_0$  มีค่าสูงเกินค่าวิกฤตได้ จึงเกิดเบรกดาว์นหรือดิสชาร์จในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็งซึ่งมีความคงทนต่อแรงดัน  $E_b$  สูง จึงไม่อาจเกิดเบรกดาว์นทะลุได้ แต่จะดิสชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง [7] ไปใช้

### 2.7.3 ดีสชาร์จภายใน

การเกิดดีสชาร์จภายใน จะเกิดในส่วนที่มีความต้านทานของฉนวนทางไฟฟ้าต่ำ ปกติแล้วจะเกิดที่ช่องกลางที่มีก๊าซอยู่ แต่ก็สามารถเกิดที่ช่องกลางที่มีน้ำมันอยู่ได้เหมือนกันและนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จในก๊าซ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในได้ดังนี้

1) โพรงอากาศ การเกิดดีสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นบ่อยๆ ในโพรงอากาศอยู่ซึ่งสามารถเกิดได้ในทั้ง พลาสติก เรซิน หรือกระดาษเคลือบเรซิน แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดดีสชาร์จขึ้นอยู่กับความเครียดในโพรง และความแข็งแรงทางไฟฟ้าของโพรง ความเครียดในโพรงสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ถ้าโพรงตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความเครียดในโพรงก็จะเท่ากับ  $\mathcal{E}$  คูณด้วยความเครียดของไดอิเล็กตริก โดยที่  $\mathcal{E}$  แทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน

2) การปนเปื้อน (inclusion) การปนเปื้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในพลาสติกหรือเรซิน ขึ้นรูป การปนเปื้อนประกอบไปด้วย ฟูน กระดาษ ใยผ้า หรือ วัสดุแปลกปลอมอื่นๆ การปนเปื้อนทำให้ความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนลดลงจากเดิม และหลังจากการเบรกดาวน์จากการปนเปื้อน จะเกิดก๊าซภายในฉนวน แล้วทำให้การดีสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น

3) โพรงที่มีน้ำมัน (oil-filled cavities) โพรงที่มีน้ำมันจะถูกพบบริเวณระหว่างชั้นท์และกันของช่องว่างของ oil-impregnated paper insulation เช่น ขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ สายเคเบิล ความเครียด ในโพรงที่มีน้ำมัน สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับที่ทำได้ในโพรงอากาศ

## 2.8 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะการชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิวดินขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่า โคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดีสชาร์จดังกล่าวทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่าคลื่นรบกวนวิทยุ

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันงานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน จะต้องไม่มีดีสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้นอย่างไรก็ตาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูง มีความยุ่งยากซับซ้อน PD อาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจหรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่กำหนด ฉะนั้นเพื่อความมั่นใจในคุณภาพของการฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่า PD วัดค่าแรงดันคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Interference Voltage = RIV) ตามที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารที่ 2.9 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ การตรวจจับและวัดค่า PD จะอาศัยผลที่เกิดจากดีสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในนำไปใช้รูปแบบต่างๆ คือ

- 1) มีกระแสพัลส์ไฟฟ้าเกิดขึ้นขณะที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2) เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 3) เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง ครอบคลุมระบบสื่อสาร
- 4) เกิดแสงเรือง เนื่องจากเกิดไอออนไนเซชันเป็นโคโรนา
- 5) เกิดโรโรนาในอากาศ จะมีกลิ่นโอโซน ( $O_3$ ) เกิดเสียงฮิสซิ่ง (hissing)
- 6) เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น
- 7) เกิดความร้อน
- 8) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

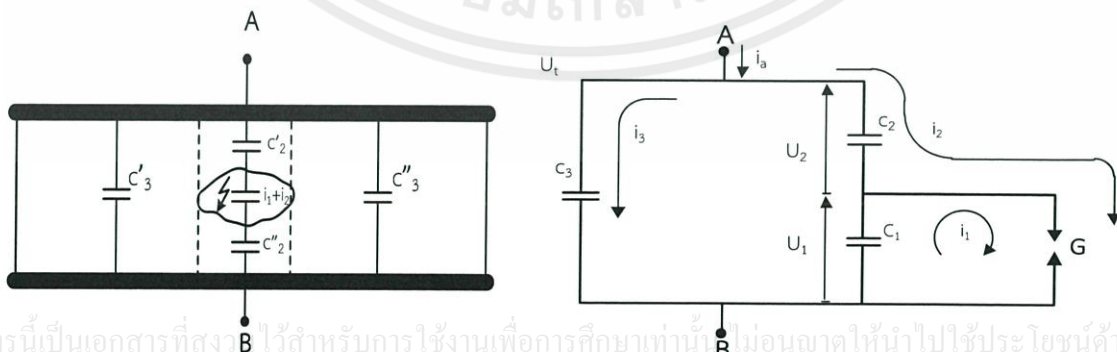
การตรวจจับ PD ส่วนมากจะอาศัยผลทางไฟฟ้า ซึ่งให้ผลที่มีความถูกต้องดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ ดิสชาร์จทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลผ่านวงจรต่ออนุกรมฉนวนทดสอบ จึงสามารถวัดแรงดันตกคร่อม อิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ในวงจรได้ การใช้สื่อสัญญาณอื่นจะมีความไวน้อยกว่า บางอย่างก็ต้องเกิด PD ในปริมาณมากๆ จึงจะตรวจจับได้ การตรวจจับสื่อสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวงจร สมมูลที่มี PD [7]

## 2.10 พฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิด ดิสชาร์จขึ้น [7] พลังงานการกระทบจากอิเล็กตรอน หรือไอออนพลังงานสูงจะทำให้ฉนวนเกิดความ ร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเหตุให้ฉนวนเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อายุการใช้งานของ อุปกรณ์สั้นลง นำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ในที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนและอุปกรณ์ ไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นแล้วดิสชาร์จบางส่วนยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ (radio interference) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร มาตรฐานจึงกำหนดให้มีการทดสอบตรวจวัดค่า PD [6]

### 2.10.1 วงจรสมมูลของดิสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป

วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ขณะเกิด PD อาจแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$   $C_2$   $C_3$  และสปาร์กแกป G ดังรูปที่ 2.3 โดยฉนวนส่วนที่บกพร่องซึ่งปกติแล้วจะเป็นโพรงอากาศขนาดเล็กๆ จะแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  และสปาร์กแกป G ฉนวนที่อยู่ใกล้เคียงกับส่วนที่บกพร่องจะแทน ด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  และฉนวนส่วนที่มีสภาพดีจะแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป

จากรูปที่ 2.6 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (ขั้ว A-B) ในรูปที่ 2.6 ก) จะทำให้เกิด แรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆ ของฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.6 ข) ถ้าเกิดเบรกดาวนหรือดีสชาร์จเฉพาะ บริเวณโพรงอากาศนี้ จึงเรียกว่าเกิด “ดีสชาร์จบางส่วน” หรือ “PD” ภายในอุปกรณ์นั้น จากรูปที่ 2.3 ข) จะได้

$$C_3 = C'_3 + C''_3 \quad (2.22)$$

$$C_2 = \frac{C'_2 C''_2}{C'_2 + C''_2} \quad (2.23)$$

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (2.24)$$

จากเหตุผลในสมการ (2.24) โดยที่  $C_a$  คือค่าความจุไฟฟ้ารวมของวัสดุทดสอบ จะได้ว่า

$$C_a = \frac{C'_2 C''_2}{C'_2 + C''_2} + C_3 \approx C_3 \quad (2.25)$$

จากรูปที่ 2.6 ข) แรงดันที่ขั้วสาย  $\Delta U_t$  เนื่องจากการเกิด PD สามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบประจุสะสมก่อนและหลังการเกิด PD

$$C_3 U_t + C_2 (U_t - \Delta U_t) = C_3 U'_t + C_2 U'_t \quad (2.26)$$

จะได้

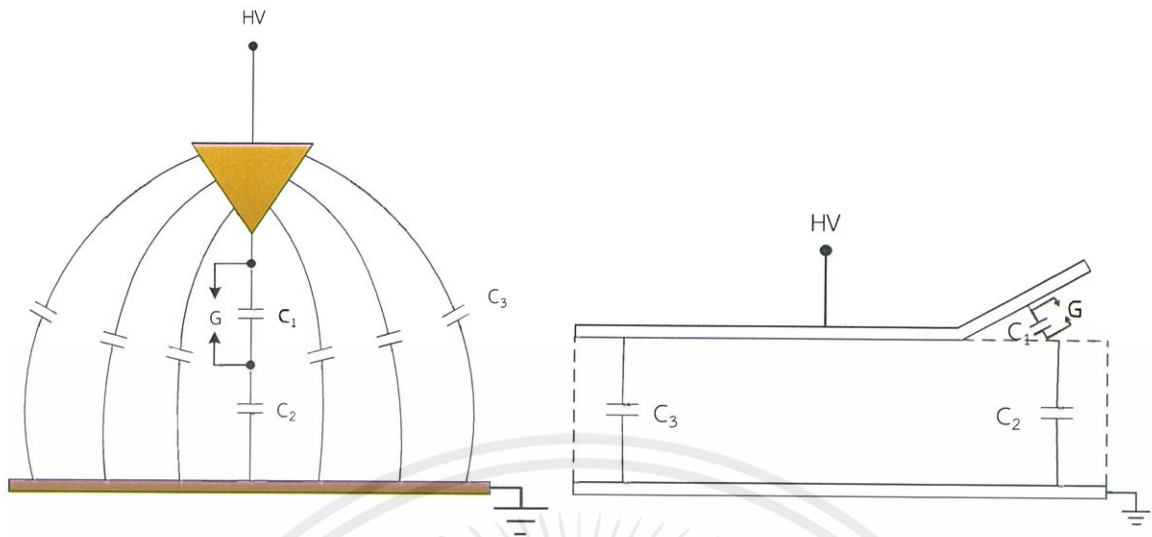
$$\Delta U_t = (U_t - U'_t) = \frac{C_2 \Delta U_1}{(C_2 + C_3)} \quad (2.27)$$

โดยที่  $U_t$  คือ แรงดันคร่อมขั้วสายก่อนการเกิด PD

โดยที่  $U'_t$  คือ แรงดันคร่อมขั้วสายหลังการเกิด PD

วงจรมุมูลในรูปที่ 2.6 ข) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ PD ที่เกิดในบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง PD ลักษณะนี้เรียกว่า “โคโรนา” และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับดีสชาร์จตามผิว ได้เช่นเดียวกันโดยสามารถแทนอากาศรอบๆ หรือฉนวนส่วนต่างๆ ด้วยค่าความจุไฟฟ้างรูปที่ 2.7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) โคโรนาดีสชาร์จ

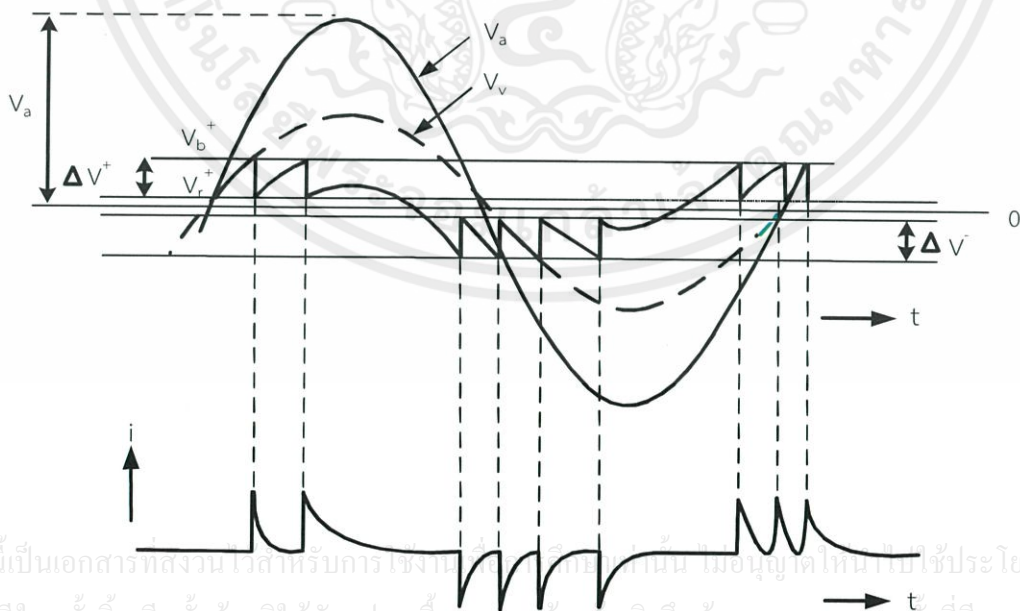
ข) ดีสชาร์จตามผิว

รูปที่ 2.7 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด PD แบบ ก) โคโรนาดีสชาร์จ ข) ดีสชาร์จตามผิว

2.10.2 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน

1) การดีสชาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลาดังรูปที่ 2.5 โดยที่  $U_t$  คือแรงดันคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์,  $V_b$  คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซ,  $U'_1$  แรงดันคร่อมโพรงอากาศถ้าไม่มีการเกิด PD และ  $i_a$  คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ลักษณะรูปร่างของกระแสดีสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแก๊สหรือโพรงอากาศเล็ก ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.9 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแก๊สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแก๊สอื่นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแก๊สหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว กระแสที่ลดลงจะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก [8] แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 ns ถึง ช่วงเป็นหลัก 100 ns ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 10 MHz ไปและอาจจะมีค่าความถี่ถึง 200 MHz ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะการเกิดหรืออั้ง (treeing) ในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด [6]



รูปที่ 2.9 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็กๆ

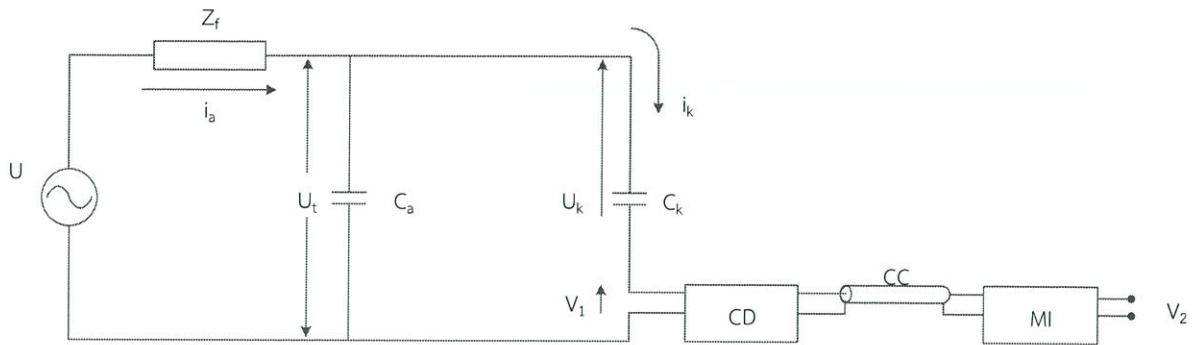
### 2.11 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

หลักการตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ [6]

#### 2.11.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  วัสดุทดสอบ (test object)  $C_u$  ตัวเก็บประจุคัปปลิง (connecting capacitor)  $C_k$  อุปกรณ์รับสัญญาณ (coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ในอนาคตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง  $U$  ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอดภัย PD ที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิก และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบที่ไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่ายตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (high voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (high voltage filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจะไม่จำเป็นต้องกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลอดภัย PD

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$  และ  $C_k$  CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

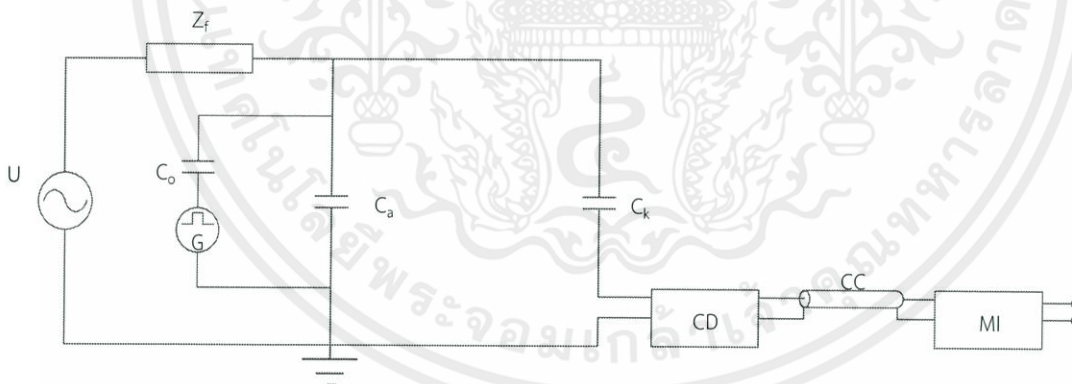
4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (integrate) กระแสพัลส์  $i_i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 Hz) และฮาร์มอนิกต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่อีก 3 ประการคือ เป็นวงจรรขยายสัญญาณ (amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากค่อๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  (ถ้าขนาดของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง)  $C_k$   $C_a$  และ CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_a$  กับ  $C_k$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

### 2.11.2 แสดงผลของดีสชาร์จบางส่วน

การแสดงผลหรือวัดผลของดีสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้ทั้งทางมิเตอร์ ทางจอภาพของ ออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก [5] ค่าของดีสชาร์จบางส่วนที่มาตรฐานกำหนดโดยปกติจะ แสดงในเทอมของ “ประจุปรากฏ” ของ PD หรือ “ขนาดของดีสชาร์จ” (discharge magnitude) “ $q$ ” มีหน่วยเป็นพิโคลคูลอมป์ (pC) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD คือ  $V_2$  จะเป็นปฏิภาค โดยตรงกับ  $q$  ดังนั้นค่ายอดของ  $V_2$  คือ  $V_2(\text{peak})$  จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ  $q$  ด้วย จากเหตุผล ดังกล่าวการอ่านค่า  $q$  จึงนิยมอ่านจากค่ายอดของ  $V_2$  ซึ่งอ่านได้จากจอภาพของออสซิลโลสโคป หรือ มิเตอร์อ่านค่ายอดก็ได้

### 2.11.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (discharge calibrator)

สัญญาณเอาต์พุต  $V_2$  แปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่า PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบโดยใช้เครื่องปรับเทียบ ดีสชาร์จมาตรฐาน เพื่อนำใช้ในการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งผ่านกระแสพัลส์ที่มีขนาดของประจุ มาตรฐาน  $q_0$  ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบดังรูปที่ 2.11 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้นหรือแรงดันแบบสี่เหลี่ยม  $U_0$  ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาด เล็ก (calibrating capacitor)  $C_0$  ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้  $C_0 \leq 0.1C_a$  ถ้า  $C_0$  เป็นตัวเก็บ ประจุแรงดันต่ำ และกำหนดช่วงเวลาขึ้น  $t_r$  ของ  $U_0$  เป็น  $t_r \leq 60\text{ns}$  [9] ในการปรับเทียบต้อง พิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้าสเตอร์  $C_s$  ด้วย คือต้องทำให้  $C_0 \geq C_s$



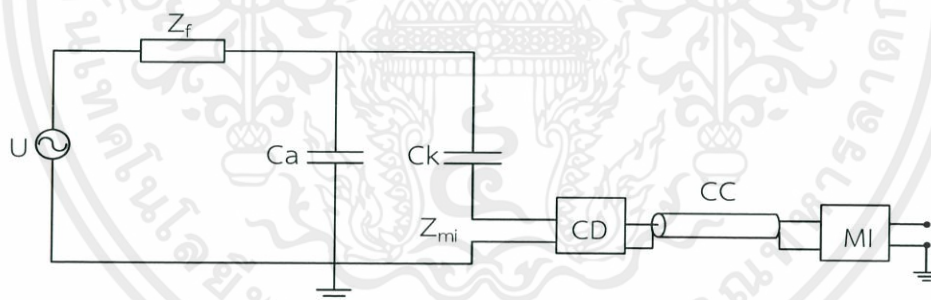
รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับการปรับเทียบ

### 2.12 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน

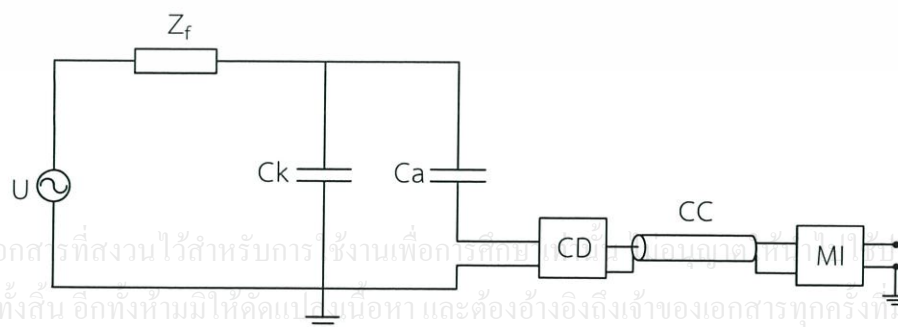
โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไปอาจแทนด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมป์หรือตัวเก็บ ประจุแบบธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกันในที่นี้ใช้วงจร ทดสอบมาตรฐาน IEC [9] โดยรูปที่ 2.12 ก) และรูปที่ 2.12 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดี ของวงจรรูปที่ 2.12 ก) และวงจรรูปที่ 2.12 ข) คือ ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์ โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาว์นอุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ได้รับความเสียหายและ

เหมาะสำหรับทดสอบวัสดุที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือมีซิลด์หรือ Screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ซิลด์ของเคเบิลจะต่อลงกราวด์โดยตรง ในรูปที่ 2.12 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุลวงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโหมด (common mode) ในรูปที่ 2.12 ง) เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้ (polarity discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรทดสอบได้ แต่ข้อเสียของรูปในวงจรในรูปที่ 2.12 ข) 2.12 ค) และ 2.12 ง) คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์ และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากซิลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่มีซิลด์จะทำให้ความไวในการวัด PD ลดลง

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันทดสอบเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (pulse area)  $q_{cal}$  ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้  $a_1$  ดังนั้น scale factor  $K_1 = q_{cal} / a_1$  หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ ( ในกรณีที่  $C_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ ) ขณะทำการทดสอบที่แรงดันมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้  $a_2$  ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ  $k_1 a_2$  และความไวของวงจรทดสอบ  $q_{min} = 2k_1 h_n$  เมื่อ  $h_n$  คือ ค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ

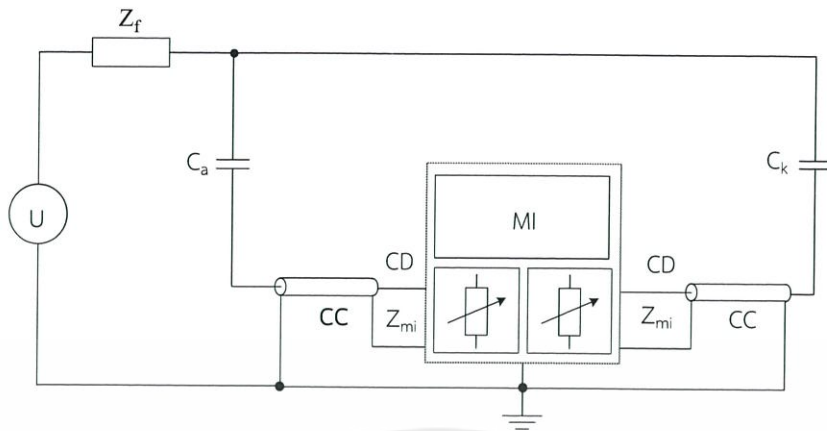


ก)

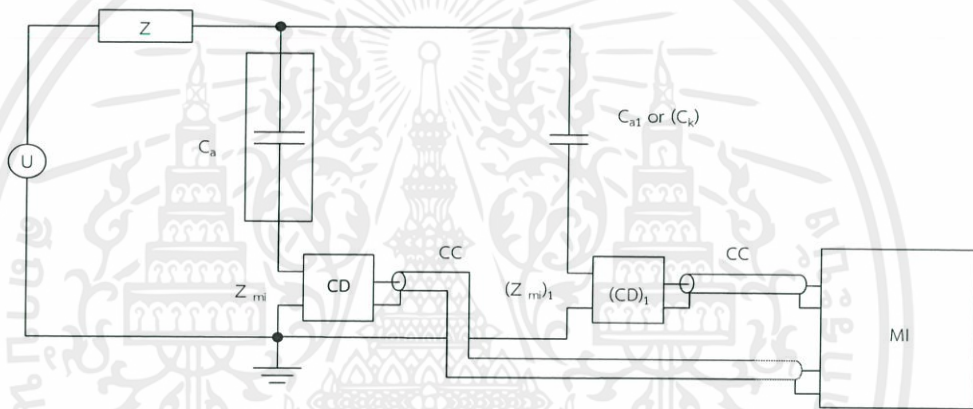


ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)



ง)

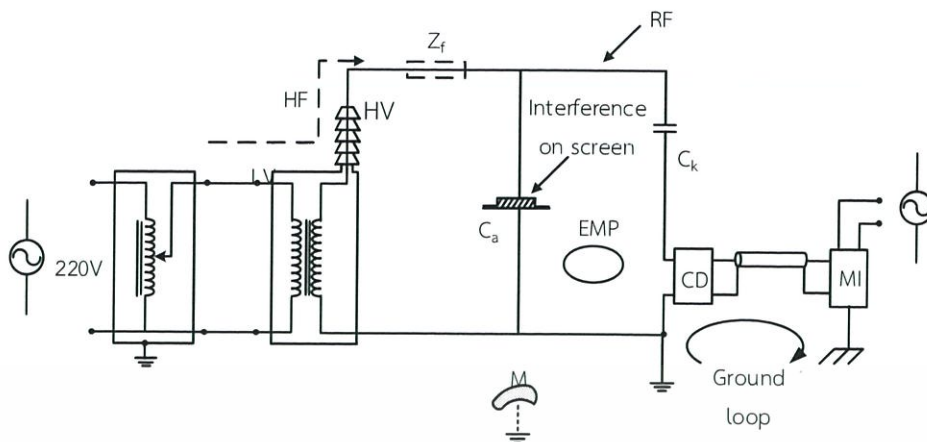
รูปที่ 2.12 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

2.13 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้ โดยมีรายละเอียดของสัญญาณรบกวนที่มีผลรบกวน และวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

2.13.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วยสัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดีสชาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (ground loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

โดยที่ HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมน โดยตรง จากอุปกรณ์พวกเรซิสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของ สวิตช์หรือเรซิสเตอร์

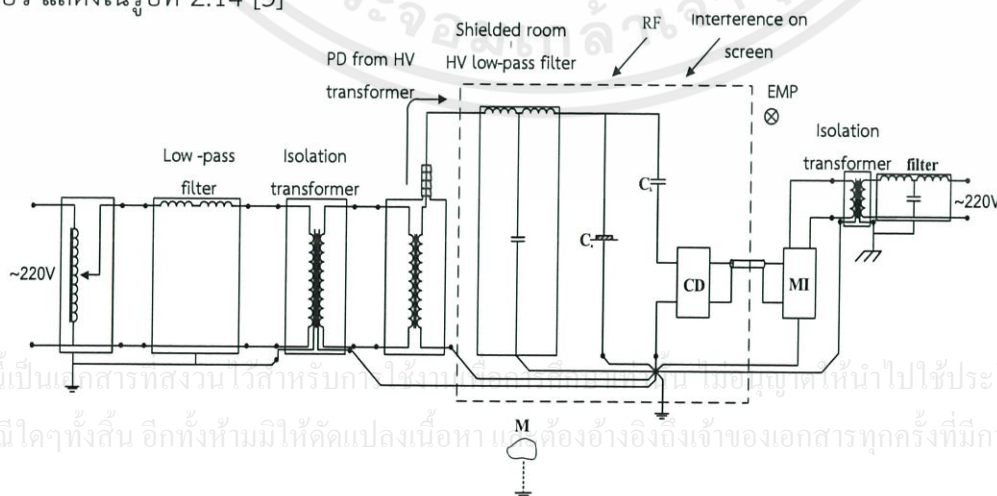
Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ซิปต์ หรือ screen หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของ วัสดุทดสอบที่มีซิปต์ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

Ground loop คือ การเกิดครบวงรอบของสายดิน

M คือ โลหะที่ไม่ได้ต่อดินและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

### 2.13.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรังฮาร์มอนิกสูงๆ จะทำให้ตัวกรองแรงดันต่ำและอาจจะ เพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยก (isolation transformer) โดยต่อทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ ของหม้อ แปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวด แรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้ โดยการทดสอบในห้องซิปต์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุด เดียว แสดงในรูปที่ 2.14 [3]



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวน วิชาสำหรับคณาจารย์ใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 การวิเคราะห์ดีเอสอาร์บางส่วน

เมื่อตรวจพบ PD ในการการณวนของอุปกรณ์ ในการวิเคราะห์ PD มีคำถามที่สำคัญ 2 ประการ คือ

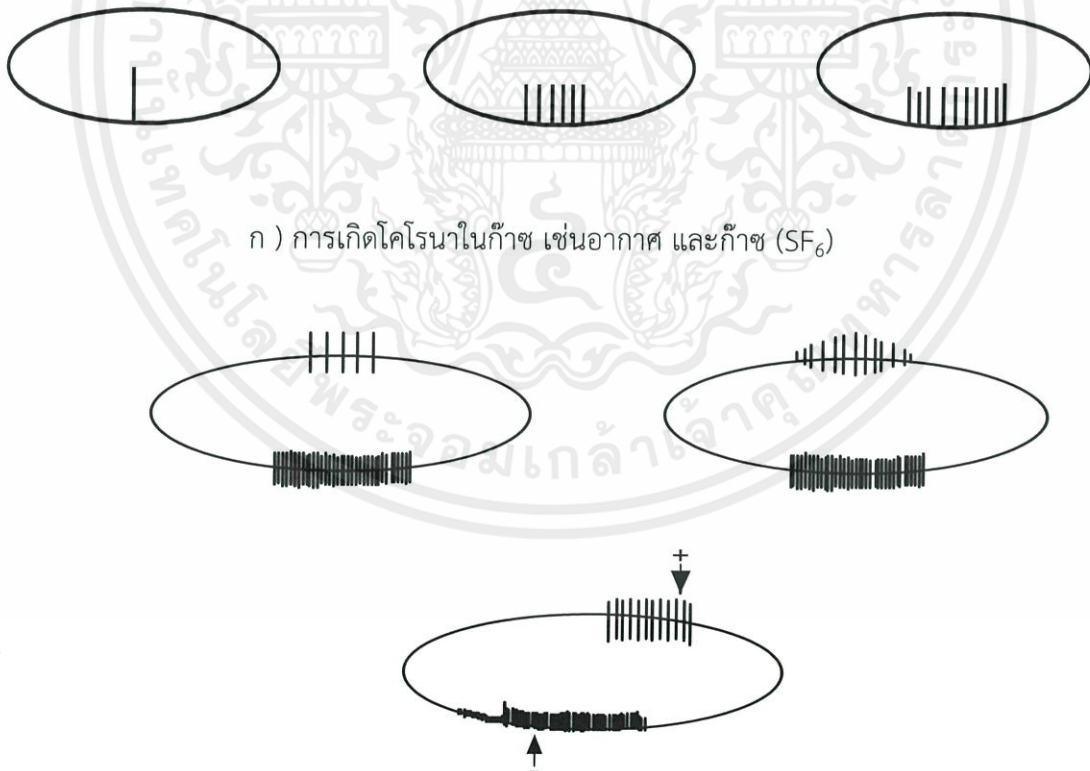
- 1) วิเคราะห์และบอกลักษณะสำคัญของข้อมูล จากรูปคลื่นการกระจายอย่างไร
- 2) สามารถแยกความแตกต่างของความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากข้อมูลที่มีอย่างไร

### 2.14.1 การวิเคราะห์ PD แบบนิยม

โดยทั่วไปการวิเคราะห์จากสัญญาณรูปวงรีที่ได้จากการตรวจจับ PD โดยดูลักษณะของพัลส์ PD ที่ปรากฏบนรูปวงรีซึ่งในแต่ละรูปแบบของการเกิด PD จะมีตำแหน่งของพัลส์ที่เกิดขึ้นในเฟสแรงดันแตกต่างกัน รูปแบบของการเกิด PD แต่ละรูปแบบที่มีความแตกต่างกันจะเป็นตัวบอกถึงชนิดและแหล่งกำเนิดของการเกิด PD ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์และวินิจฉัยหาสาเหตุของการเกิดได้ดังนี้

#### 2.14.1.1 รูปแบบ PD แบบโคโรนา

การเกิดโคโรนาจะแสดงดังรูปที่ 2.15 ถ้าดีเอสอาร์ปรากฏทางด้านลบของรูปคลื่น แสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านแรงสูง แต่ถ้าดีเอสอาร์ปรากฏทางด้านบวกของรูปคลื่น แสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านกราวด์ ลักษณะของโคโรนาทางด้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียงกัน



ก) การเกิดโคโรนาในก๊าซ เช่นอากาศ และก๊าซ ( $\text{SF}_6$ )

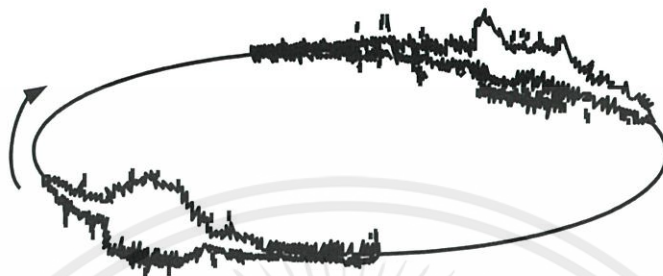
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การเกิดโคโรนาในน้ำมัน

รูปที่ 2.15 รูปแบบการเกิดโคโรนาดีเอสอาร์จ

### 2.14.1.2 รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว

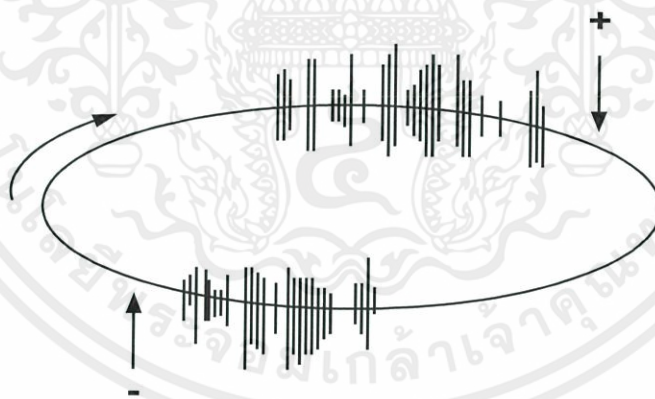
ดีสชาร์จตามผิว จะแสดงดังรูปที่ 2.16 ลักษณะของดีสชาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ 180 - 270 องศา



รูปที่ 2.16 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิว

### 2.14.1.3 รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายใน จะแสดงดังรูปที่ 2.17 ลักษณะของดีสชาร์จภายในที่แสดงบนฐานเวลา รูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0-90 องศา และ 180-270 องศา เช่นเดียวกับดีสชาร์จตามผิว แต่ลักษณะการกระจายของพัลส์ PD จะน้อยกว่า

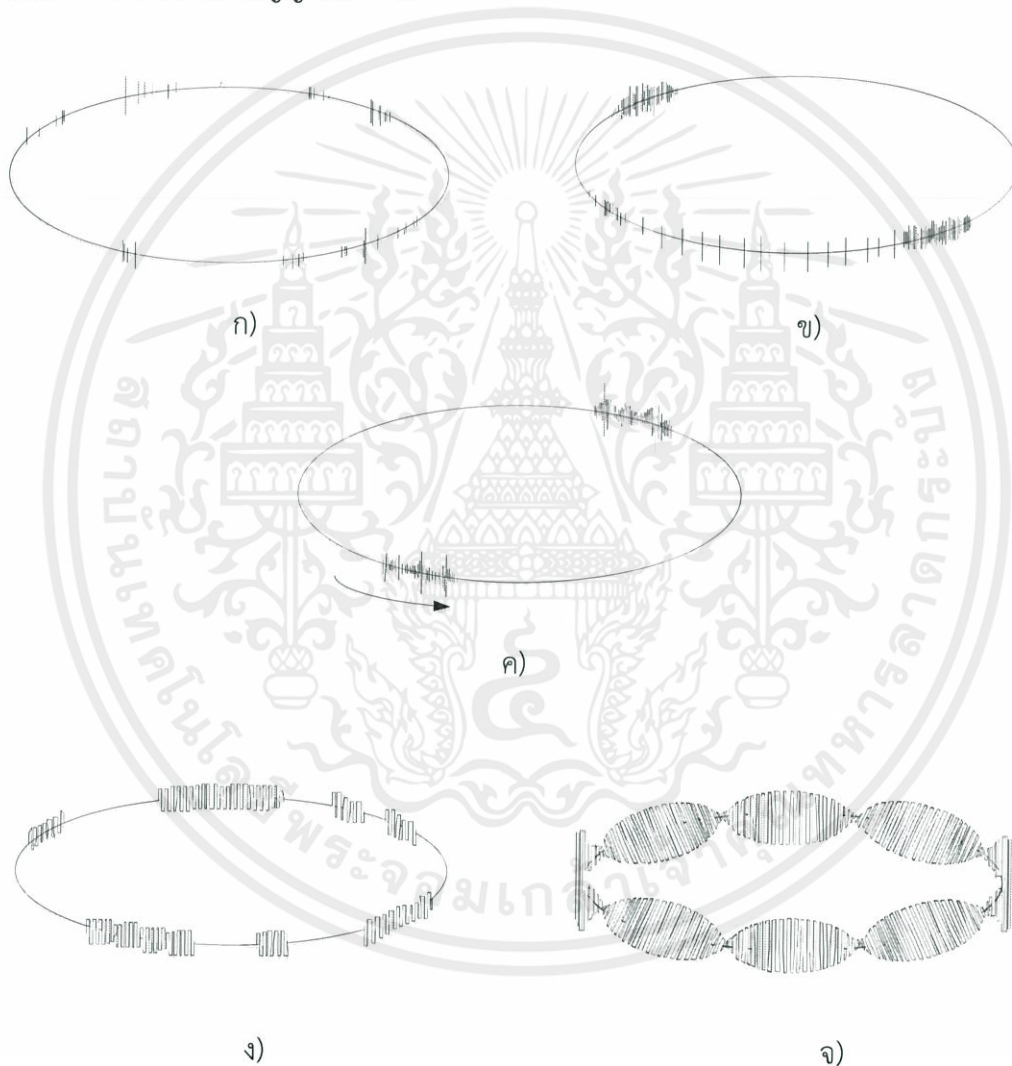


รูปที่ 2.17 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จภายใน

### 2.14.1.4 รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

สัญญาณรบกวน จะแสดงดังรูปที่ 2.18 ในการตรวจจับ PD บ่อยครั้งที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาจนทำให้การวัดค่า PD ผิดพลาด และได้ผลมากกว่าความเป็นจริงทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นไม่ได้คุณภาพ กล่าวคือ ค่า PD ที่วัดได้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด [6] ไม่ว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด PD แบบต่างๆ มีดังนี้ เข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) สัญญาณรบกวนเนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังแสดงในรูป 2.18 ข)
- 2) สัญญาณรบกวนเนื่องจากไรสเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.18 ก) ลักษณะของสัญญาณรบกวนชนิดนี้จะเกิดเป็นพัลส์คู่
- 3) สัญญาณรบกวนเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส ดังแสดงในรูป 2.18 ง)
- 4) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของเคลื่อนรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร ดังแสดงในรูป 2.18 จ) ลักษณะของสัญญาณรบกวนคือ จะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัด
- 5) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนวิทยุ ดังแสดงในรูป 2.18 ฉ) ลักษณะของสัญญาณรบกวนคือจะมีคลื่นรบกวนความถี่สูงเข้ามาในวงจรวัดเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร



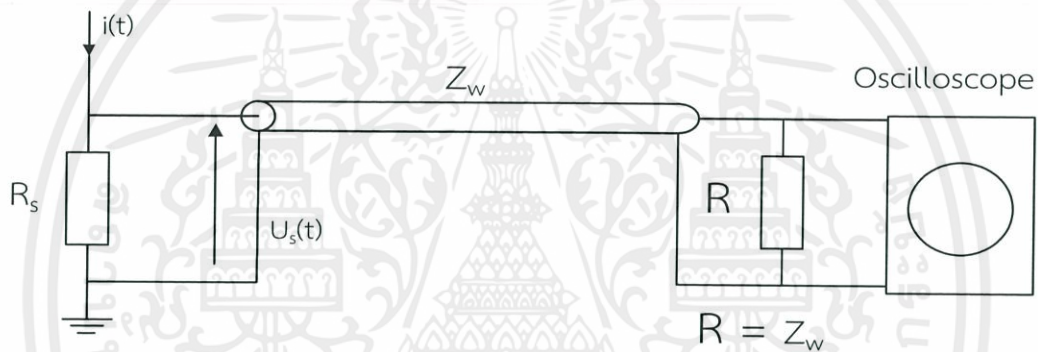
รูปที่ 2.18 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 เป็นเวลาหลายสิบปีที่การวิเคราะห์และการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD กระทำโดยการใช้  
 สายตาสังเกตสัญญาณที่แสดงแบบวงรีบนจอออสซิลโลสโคป [6] ซึ่งการแปลความหมายจะขึ้นอยู่กับ  
 ความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการตรวจวัด PD เป็น  
 การเปิดโอกาสให้สามารถทำการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD โดยอัตโนมัติได้ ระบบการฉนวนของ

อุปกรณ์ก็จะต้องทำการหาสาเหตุโดยสังเกตจากลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ การหาสาเหตุของการเกิด PD นี้มีความสำคัญสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในกระบวนการวิเคราะห์ PD จุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์คือ สามารถบ่งบอกถึงสาเหตุการเกิด PD ในเนื้อฉนวนเนื่องจากผลของดิสชาร์จตัวอย่างเช่น การเกิดดิสชาร์จภายในดิสชาร์จตามผิว และการเกิดโคโรนา เพื่อนำข้อมูลนี้มาประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการดิสชาร์จ หรือแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิตฉนวน [6]

## 2.15 วงจรการวัดพัลส์ของกระแสด้วยความต้านทานชั้นที่

ความต้านทานชั้นที่ในที่นี้หมายถึง ความต้านทานที่ทราบค่าถูกต้องแน่นอน ใช้วัดกระแสโดยให้กระแสที่ต้องการวัดนั้นไหลผ่านความต้านทานชั้นที่แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชั้นที่นั้นด้วยออสซิลโลสโคปโดยผ่านสายเคเบิลแกนร่วมมีความต้านทานสมคู่กัน  $R = Z_w$  ต่อที่ปลายเคเบิลขนานกับออสซิลโลสโคป ดังในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยชั้นที่

ถ้าชั้นที่ ( $R_s$ ) เป็นความต้านทานล้วนและไม่คิดถึงค่า  $Z_w$  เพราะ  $R_s \ll Z_w$  และอาศัยกฎของโอห์มก็จะสามารถหากระแสได้ คือ

$$U_s(t) = I(t) R_s \quad (2.28)$$

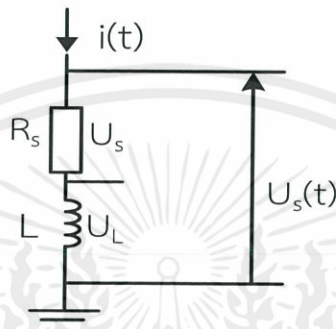
### 2.15.1 หลักการวัดด้วยความต้านทานชั้นที่

ค่าความต้านทานชั้นที่จะถูกกำหนดด้วยความร้อนที่กระจายออกไป หรือการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของชั้นที่นั่นเอง นอกจากนั้นแล้วต้องคำนึงถึงค่าแรงดันตกคร่อมชั้นที่ให้อยู่ในค่ากำหนดที่เครื่องวัดสามารถวัดได้ ผลกระทบที่เกิดจากค่าตัวเก็บประจุนั้นมีน้อยมากสามารถละทิ้งได้ แต่ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจะมีความสำคัญเพราะเมื่อมีกระแสไหลผ่านความต้านทานชั้นที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าโดยรอบ ฉะนั้นวงจรสมมูลจึงเขียนแทนด้วย R และ L ต่ออันดับกัน ดังรูป 2.20 ก) แรงดันตกคร่อมความต้านทานและความเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) \quad (2.29)$$

$$U(t) = R_s \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.30)$$

ด้วยเหตุนี้เองความต้านทานของชั้นที่จึงต้องเป็นความต้านทานที่ไร้ความเหนี่ยวนำ หรือมีแต่น้อยมาก เนื่องจากแรงดันตกคร่อม  $L di(t)/dt$  ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานล้วน ดังในรูปที่ 2.20

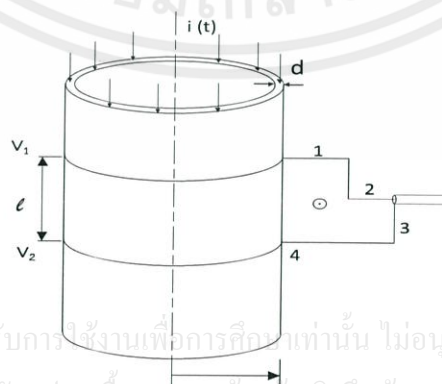


รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของชั้นที่

การต่อความต้านชั้นที่เพื่อวัดแรงดันตกคร่อมจะต้องไม่มีวงรอบ (loop) มิฉะนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในวงรอบนั้น ความต้านทานของชั้นที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำอาจทำได้โดยใช้เส้นลวดหรือแผ่นความต้านทานพับทบขนานกัน (bifilar) เพื่อให้กระแสไหลสวนทาง สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะลบล้างกัน หรือเป็นความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแทนร่วม

#### 2.15.2 ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกซ้อนกันแทนร่วม

ปัญหาของการใช้ความต้านทานชั้นที่แบบทรงกระบอกนั้นจะมีปัญหาตรงที่จะทำการต่อวัดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานชั้นที่อย่างไร เพราะการต่อจะเกิดเป็นบ่วงหรือวงรอบขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่อยู่ในบริเวณนั้น ดังในรูป 2.21



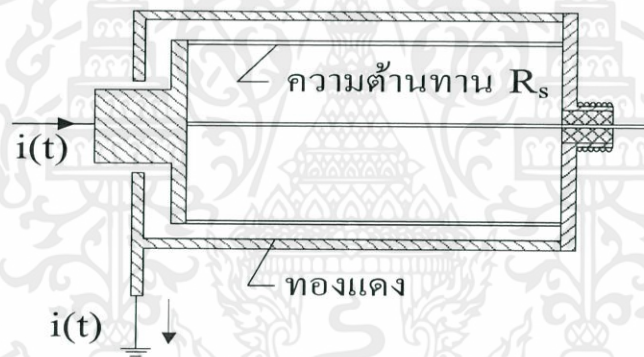
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 จุดต่อวัดแรงดันคร่อม  $R_s$  เกิดเป็นวงรอบขึ้น

แรงดันคร่อมชั้นที่ปรากฏที่ข้อ 2 และ 3 จะเท่ากับผลบวกของความต่างศักย์กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำ [7]

$$\begin{aligned}
 U_s(t) &= (V_1 - V_2) \pm \frac{d\phi_{1-4}(t)}{dt} \\
 &= i(t) R_s + \left[ \frac{\mu_0}{2\pi} l \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{di(t)}{dt} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

ดังนั้นการต่อวัตต์แรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานชั้นจะต้องไม่เป็นวงรอบ หรือต่อในบริเวณที่ปลอดภัยแม่เหล็ก เช่น ในกระบอกเหล็กที่เป็นกระบอกสองชั้นดังในรูป 2.22 เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกัน ความต้านทานของชั้นจะได้รับการชิลด์จากสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีลักษณะสมมาตรต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่กระบอกความต้านทานลดน้อยลง และไม่มีค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากวงรอบ



รูปที่ 2.22 ความต้านทานชั้นที่วัดกระแสแม่เหล็ก

### 2.15.3 เวลาคงตัวของความต้านทานชั้น

เวลาคงตัวของความต้านทานชั้นเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของความต้านทานชั้นที่จะสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ดีและละเอียดเพียงใด ความต้านทานชั้นที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วได้ทันต้องเป็นชั้นที่มีเวลาคงตัว  $T_0$  น้อยกว่า 1 ใน 4 ของคาบออสซิลเลชันของกระแสผิดปรongนั้นคือ

$$T_0 = \frac{\mu_0 \sigma d^2}{6}
 \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้าหากมีการนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เมื่อ  $\mu_0$  คือ เปรอมีบิลลิตี =  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m เพราะใช้โลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก

$\sigma$  คือ สภาพความนำของความต้านทาน  $\frac{m}{\Omega \text{mm}^2}$

d คือ ความหนาของชั้น

ทำนองเดียวกันแบนด์วิดท์ของความต้านทานชั้นคำนวณได้จากสมการ

$$f_B = \frac{1.46}{\mu_0 \sigma d^2} \quad (2.33)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าทำให้ความต้านทานชั้นมีความหนา d บางๆ จะทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้น และเวลาขึ้น  $t_r$  จะน้อยลง ผลของกระแสเชิงผิวจะน้อยลง การระบายความร้อนดีขึ้น

#### 2.15.4 ความไวของชั้น (sensitivity)

หมายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าในแนวความสูงของรูปคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วย นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วย ความไวนี้แปรตามค่าความต้านทานชั้น ถ้าเพิ่มความต้านทานของชั้น จะเพิ่มความไวสูงขึ้น รูปคลื่นกระแสจะโตขึ้น ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ชัดเจนขึ้น แต่การเพิ่มความต้านทานชั้นจะทำให้เวลาคงตัวของชั้นเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

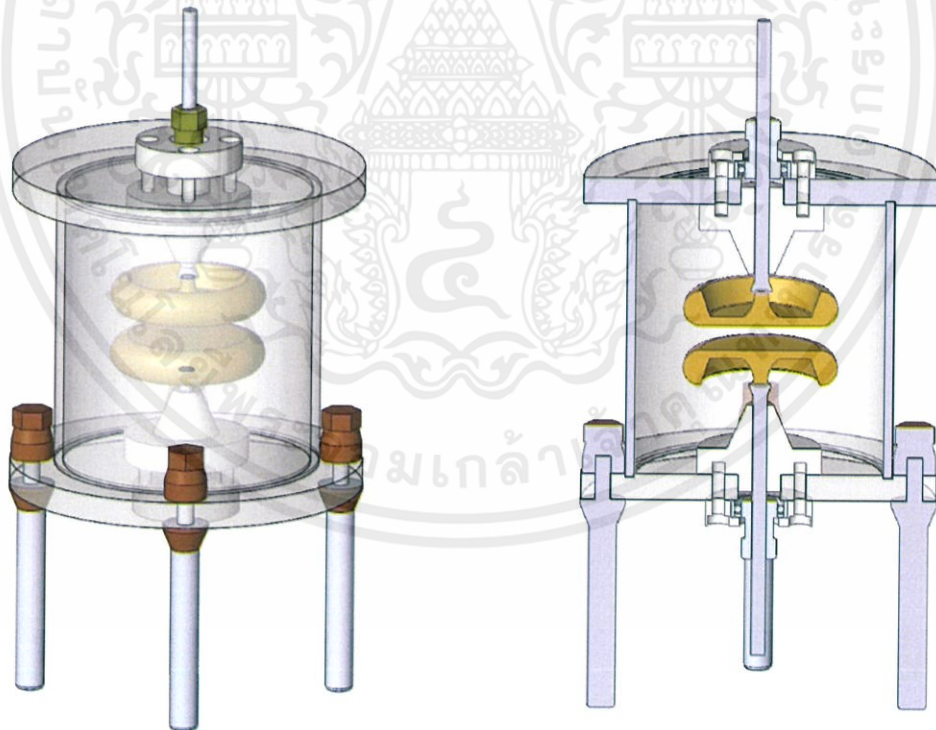
### บทที่ 3

## การออกแบบอุปกรณ์ทดลองที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในได้ สนามไฟฟ้ากระแสตรง

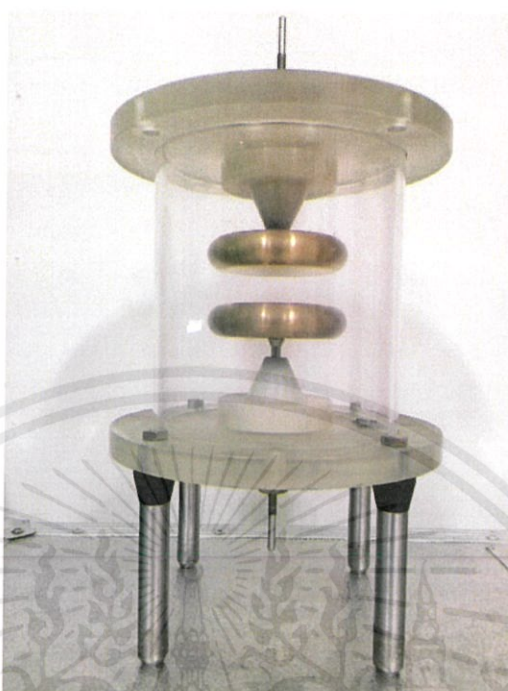
จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในได้สนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการป้อนแรงดันสูงกระแสตรงเข้าที่อิเล็กโตรดด้านบนและวางอนุภาคไว้ที่อิเล็กโตรดด้านล่างพร้อมทั้งวัดค่ากระแสดิฟฟิวชันบางส่วนในขณะที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่และในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ จึงจำเป็นต้องมีการสร้างชุดทดลองเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง โดยใช้อิเล็กโตรดเป็นแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode)

### 3.1 ภาพรวมการออกแบบแท่นวางวัสดุทดสอบ

แท่นวางวัสดุทดสอบที่ได้ทำการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกภายในมีอิเล็กโตรดแบบระนาบทั้งด้านบนและด้านล่าง ในขณะทำการทดสอบสามารถปรับระยะของแก๊ปได้ด้วยการหมุนสกรูหมุนทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยจะมีอะคริลิกใสครอบอิเล็กโตรดทั้งสองอยู่เพื่อป้องกันการกระเด็นหายของอนุภาคที่เราใช้ทดสอบซึ่งมีขนาดเล็ก และเพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อยู่ภายในได้

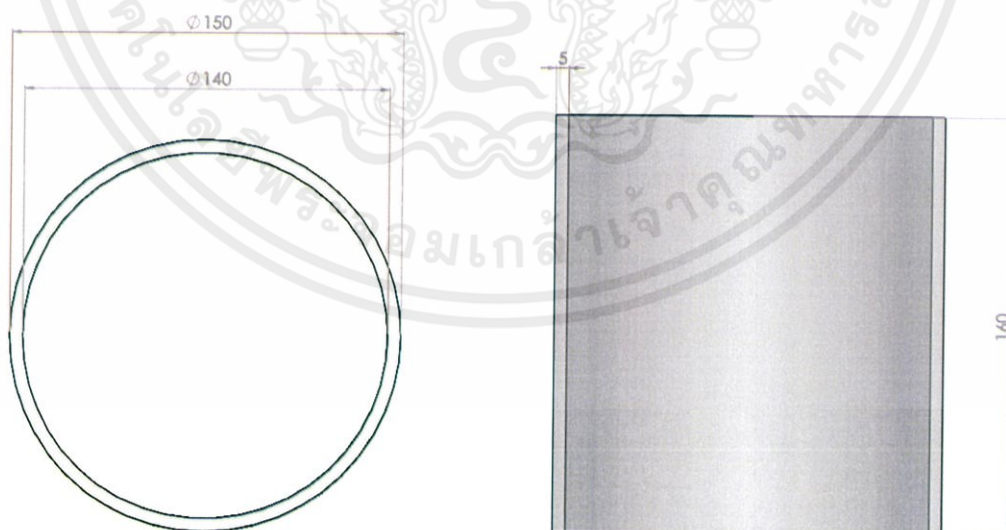


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 แบบจำลองแท่นวางวัสดุทดสอบให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แท่นวางวัสดุทดสอบ

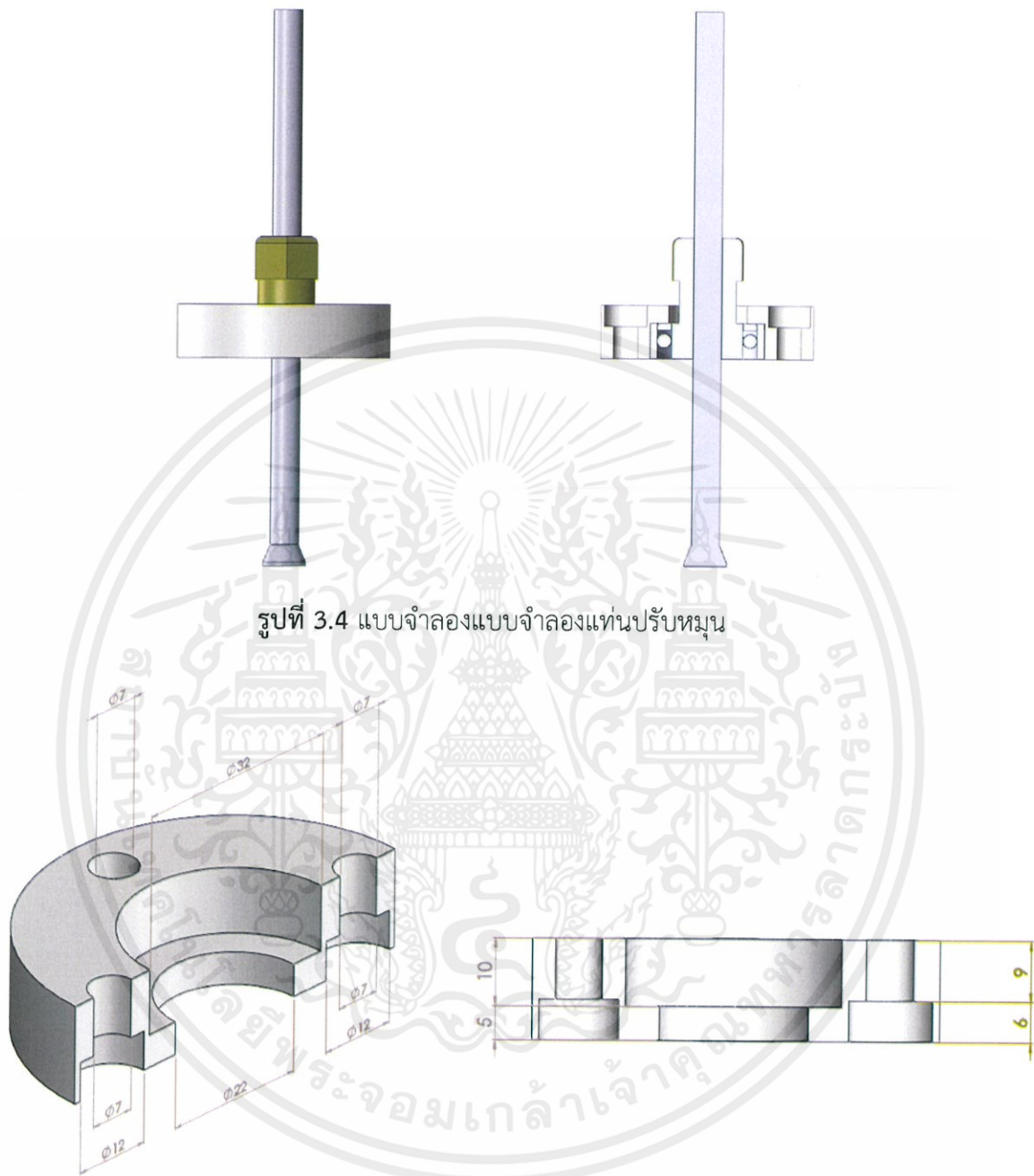
3.1.1 อะคริลิกใสครอบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันการกระเด็นหายของอนุภาคที่เราใช้ทดสอบซึ่งมีขนาดเล็ก และเพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อยู่ภายในได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่และอ้างถึงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ขนาดของอะคริลิกใสครอบอิเล็กทรอนิกส์

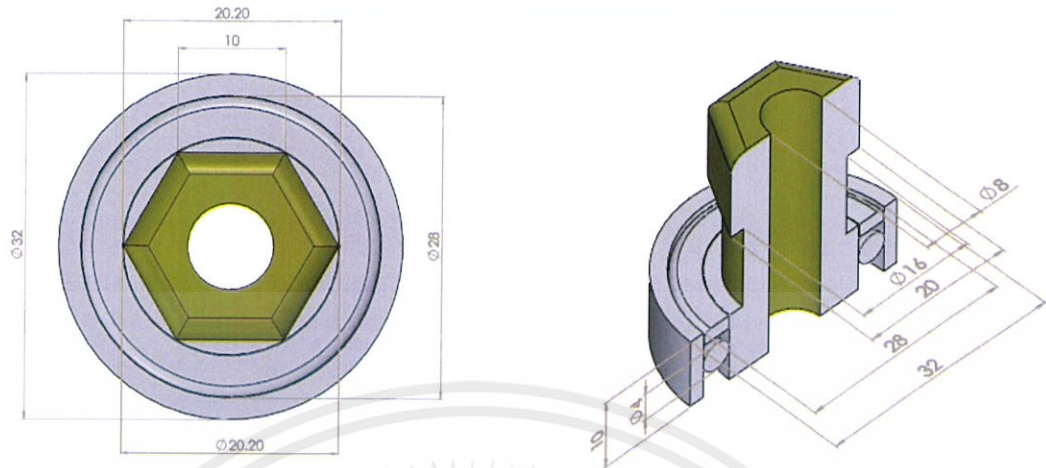
### 3.1.2 แท่นปรับหมุนเพื่อปรับระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดกราวด์กับอิเล็กโตรดด้านแรงสูง



รูปที่ 3.5 ขนาดแท่นยึดตลับลูกปืนหมุน



รูปที่ 3.6 ขนาดแกนหมุน

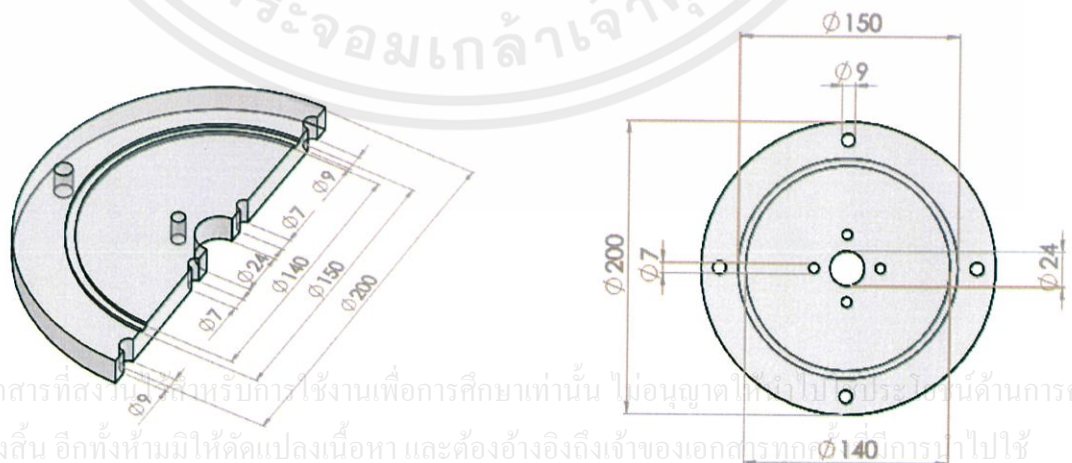


รูปที่ 3.7 ขนาดของตลับลูกปืนที่ติดกับสกรูหมุน

### 3.1.3 ฝาปิดและแทนยึดแกนหมุน

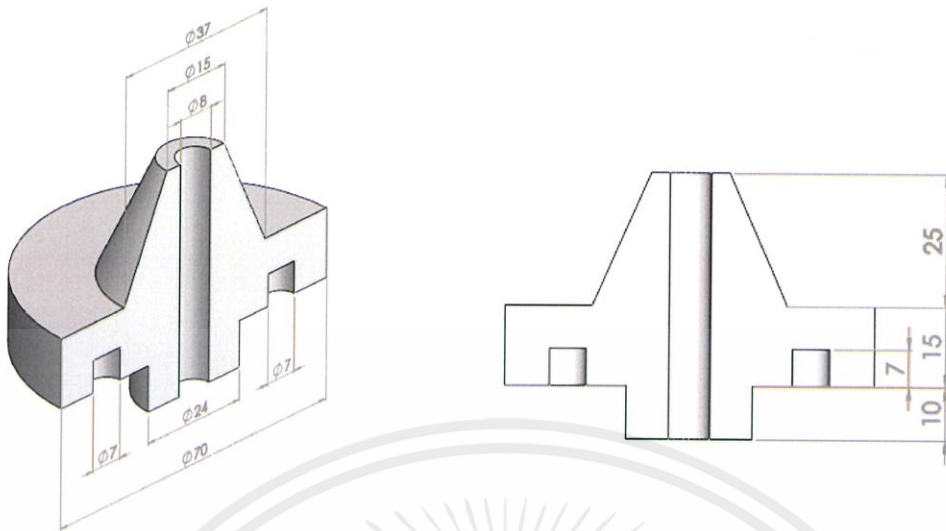


รูปที่ 3.8 แบบจำลองฝาปิดและแทนยึดแกนหมุน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง การนำไปใช้

รูปที่ 3.9 ขนาดของฝาปิด



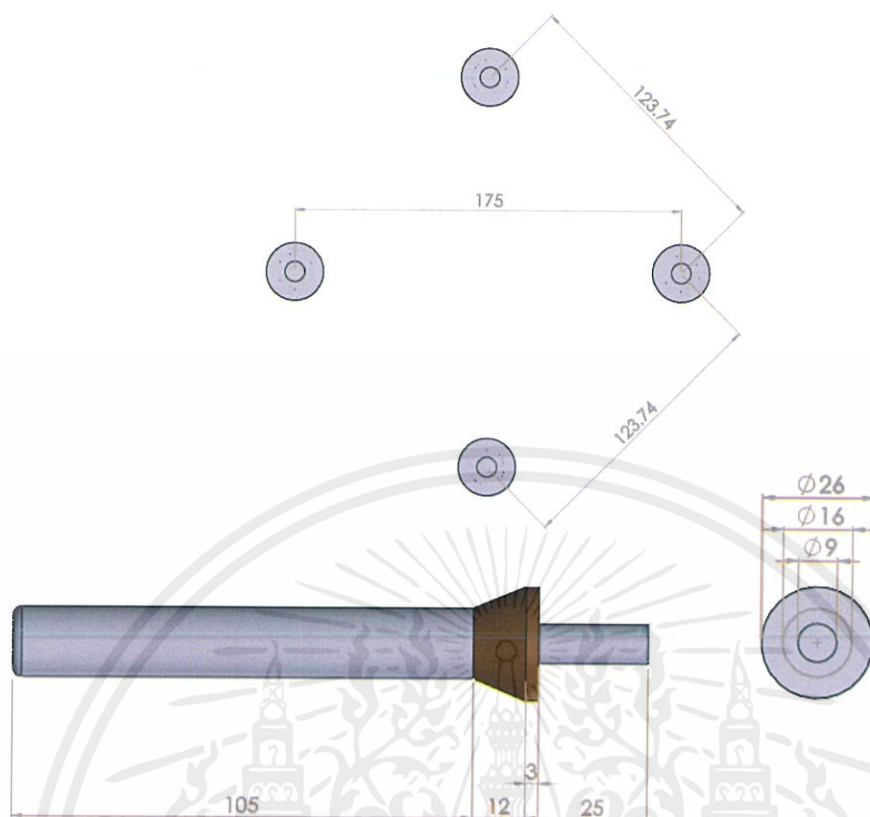
รูปที่ 3.10 ขนาดแทนยึดแกนหมุน

### 3.1.4 ขาดังขึ้นงานเพื่อรองรับแทนวางวัสดุทดสอบให้สูงขึ้นจากพื้น



รูปที่ 3.11 แบบจำลองขาดังขึ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ขนาดและจำนวนขาคั้งขึ้นงาน

### 3.2 การออกแบบอิเล็กโทรด

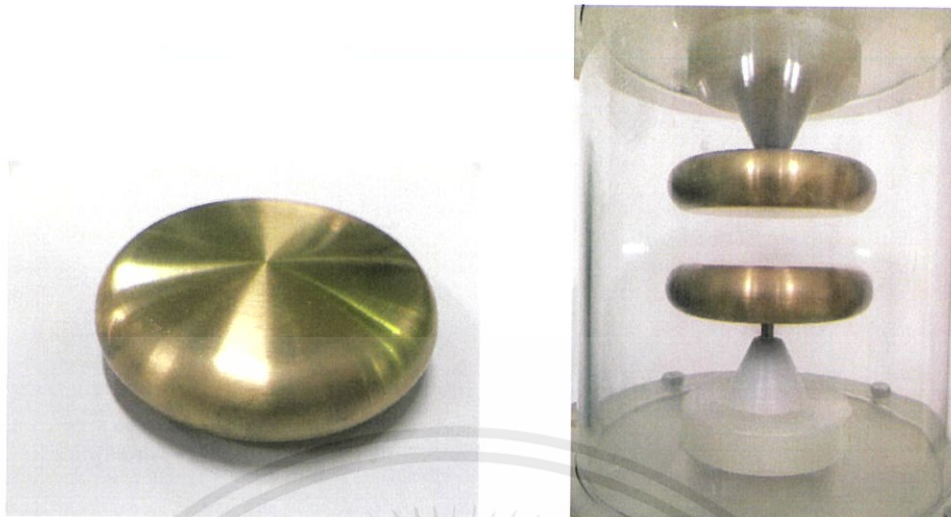
3.2.1 อิเล็กโทรดแบบระนาบ (plane-plane electrode) โดยการออกแบบระนาบเป็นแบบขอบโค้ง มีลักษณะดังต่อไปนี้

1. ความหนาอิเล็กโทรด 2.0 ซม.
2. อิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 87 ซม.
3. วัสดุที่ใช้คือทองเหลือง



เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับสำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 แบบจำลองอิเล็กโทรดระนาบขอบโค้ง



รูปที่ 3.14 อิเล็กโตรดระนาบขอบโค้ง



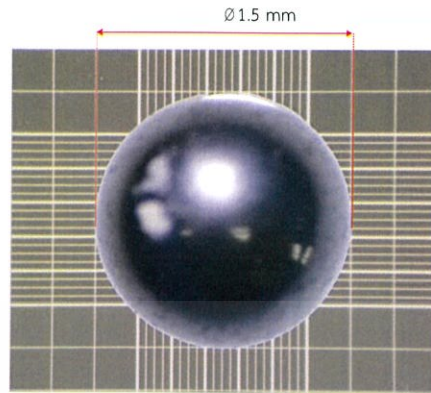
รูปที่ 3.15 ขนาดของอิเล็กโตรดระนาบขอบโค้ง

### 3.3 ขนาดอนุภาค

#### 3.3.1 อนุภาคขนาดเล็ก

1. เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm.
2. น้ำหนักอนุภาค 0.0139 g
3. ความหนาแน่น 7878 kg/m<sup>3</sup>
4. วัสดุที่ใช้คือ เหล็ก

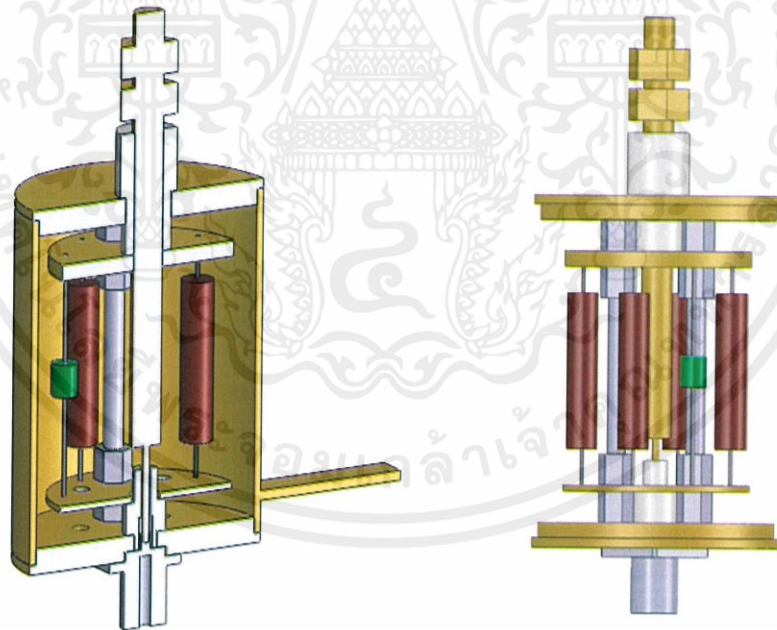
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคขนาดเล็ก

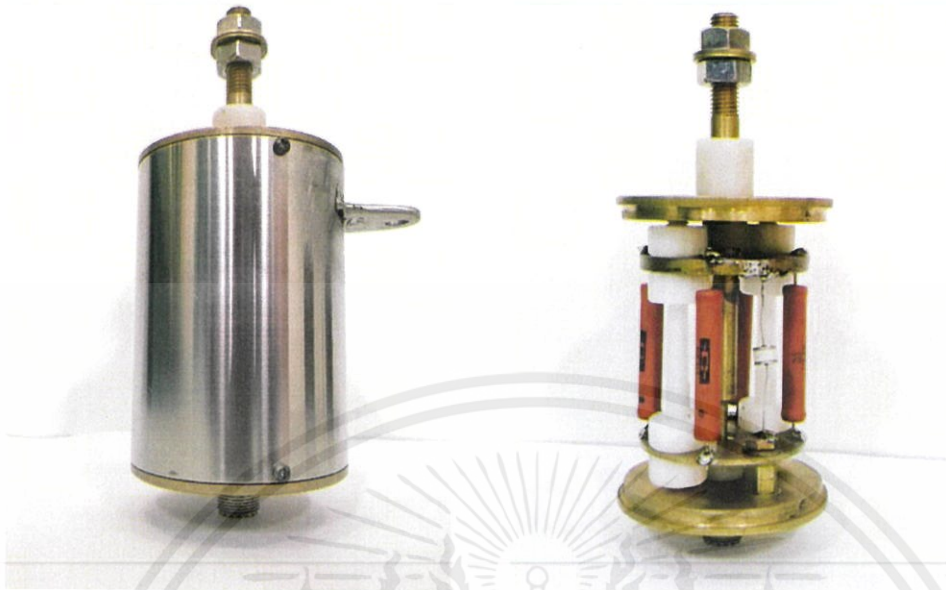
### 3.4 ภาพรวมการออกแบบความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์

ความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ภายในประกอบด้วยความต้านทาน 4 ตัว ขนาดตัวละ 200 โอห์ม และ Gas Tube ป้องกันแรงดันเกินขนาด 70 โวลต์



รูปที่ 3.17 แบบจำลองความต้านทานชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

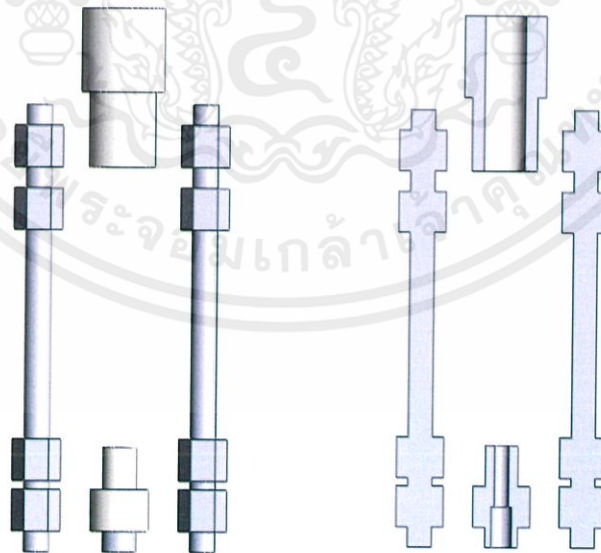


รูปที่ 3.18 ความต้านทานชั้นหัววัดกระแสอิมพัลส์

3.4.1 ตัวต้านทาน

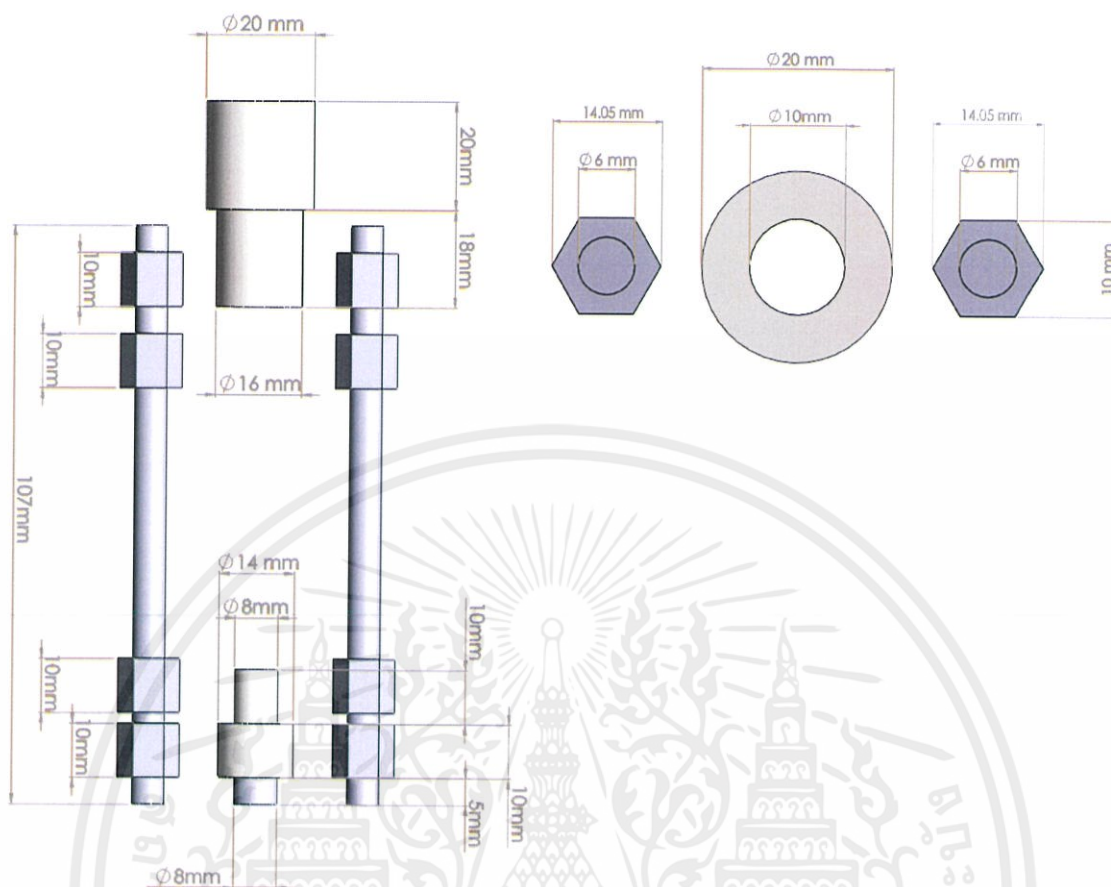
1. ขนาดความต้านทานทางไฟฟ้า 50  $\Omega$
2. จำนวนตัวต้านทานที่ใช้ขนาด 200  $\Omega$  ขนาดกัน 4 ตัว

3.4.2 ฉนวนป้องกันแท่งตัวนำกับโครงกราวด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

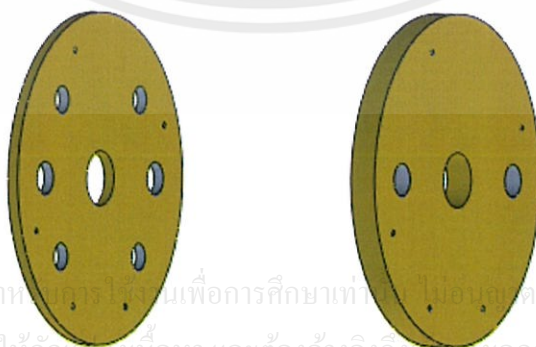
รูปที่ 3.19 แบบจำลองฉนวนป้องกันแท่งตัวนำกับโครงกราวด์และแท่งฉนวน



รูปที่ 3.20 ขนาดของฉนวนป้องกันแท่งตัวนำกับกราวด์และแท่งฉนวน

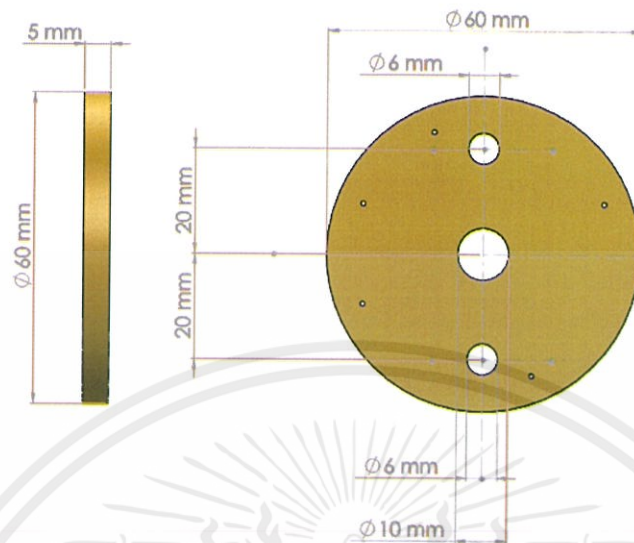
### 3.4.3 แผ่นตัวนำ

1. วัสดุที่ใช้คือ ทองเหลือง
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm.
3. ความหนาของแผ่นตัวนำด้านแรงสูง 5 mm, ด้านกราวด์ 2 mm.

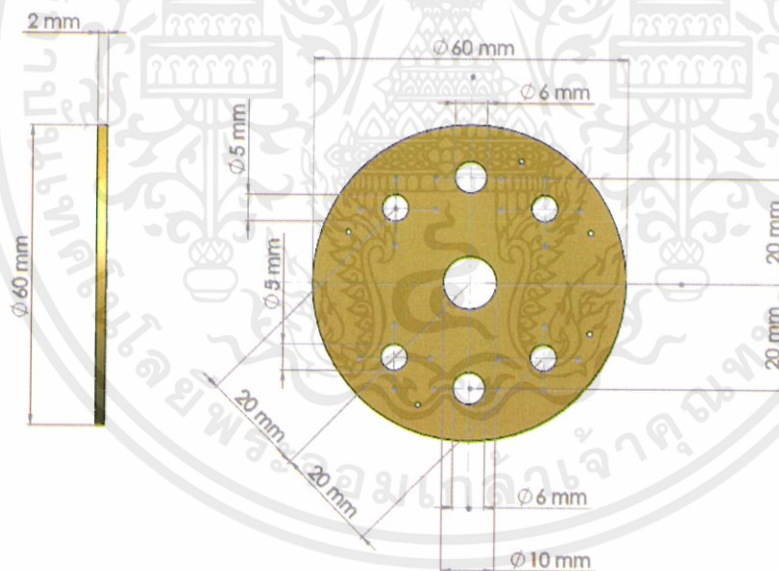


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 แบบจำลองแผ่นตัวนำ



รูปที่ 3.22 ขนาดของแผ่นตัวนำด้านบน

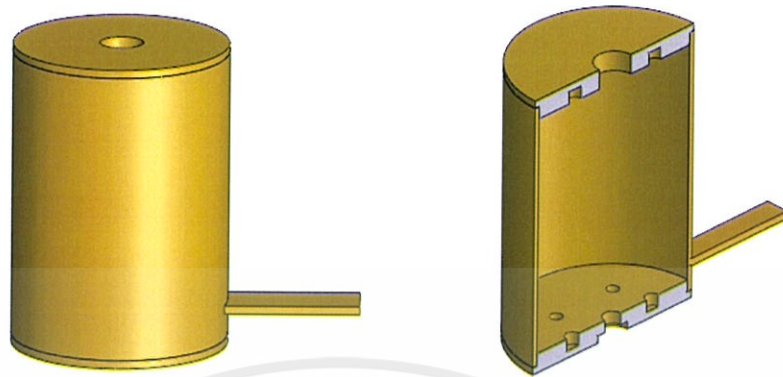


รูปที่ 3.23 ขนาดของแผ่นตัวนำด้านล่าง

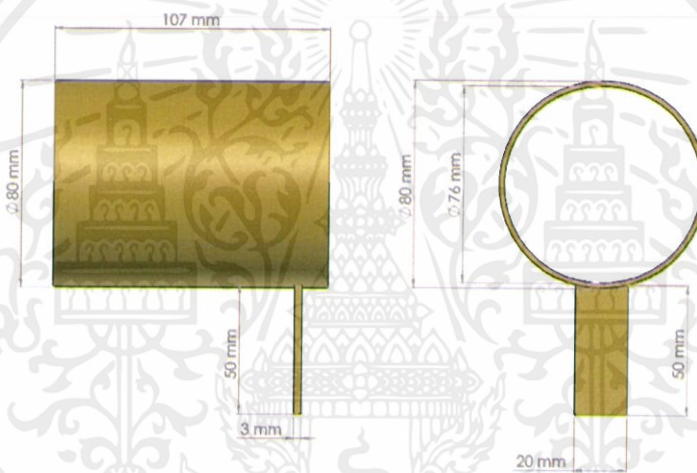
#### 3.4.4 โครงกราวด์ครอบคลุมความต้านทานชั้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

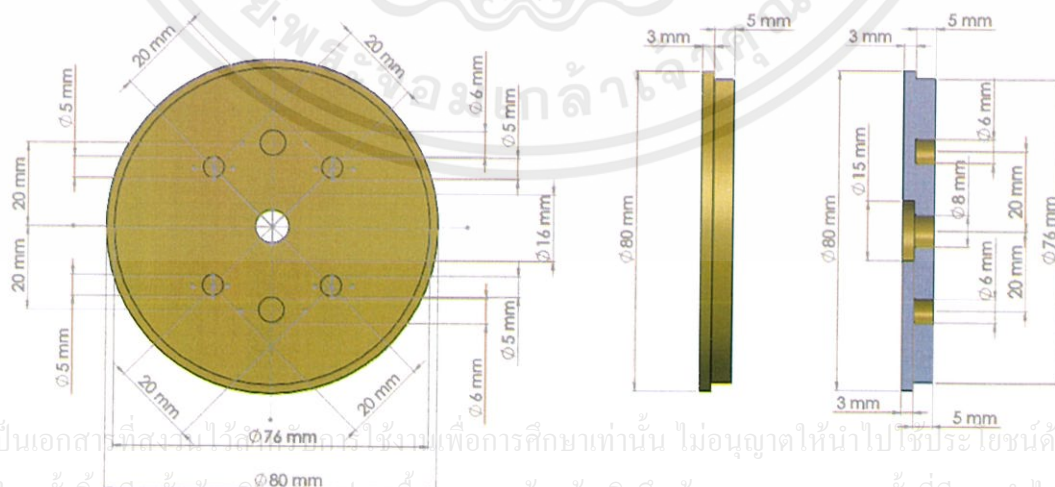
1. วัสดุที่ใช้คือ อะลูมิเนียม
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm.
3. ความหนาของโครงกราวด์ครอบคลุม 2 mm



รูปที่ 3.24 แบบจำลองโครงกราวด์ครอบคลุมความต้านทานชั้นท์

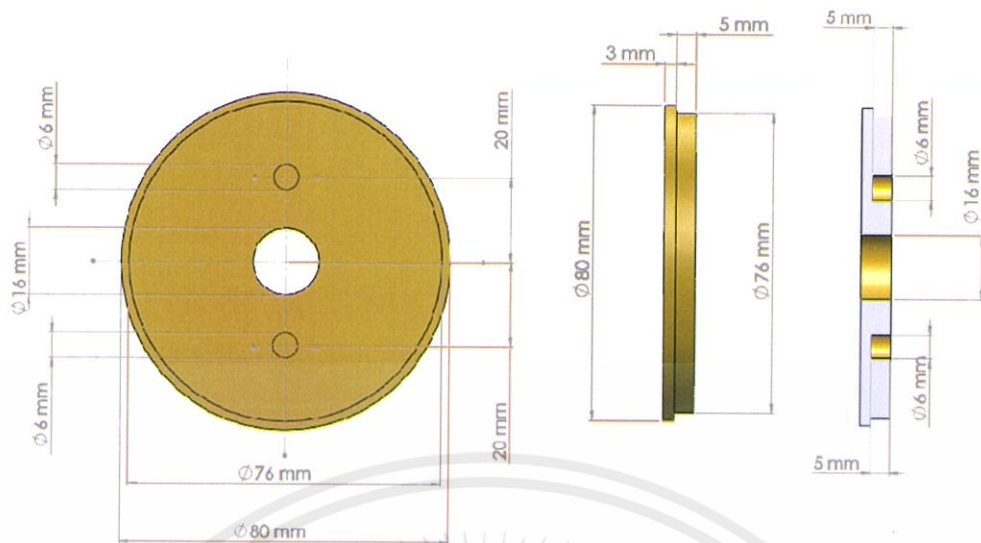


รูปที่ 3.25 ขนาดของโครงกราวด์ครอบคลุมความต้านทานชั้นท์



รูปที่ 3.26 ขนาดของฝาปิดล่าง

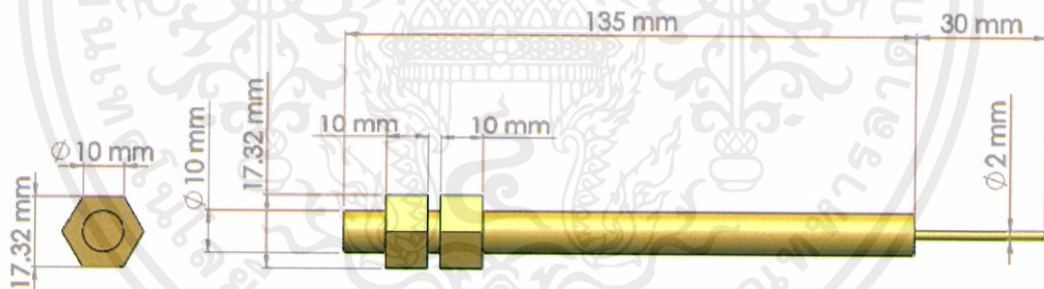
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ขนาดของฝาปิดบน

#### 3.4.5 แท่งตัวนำทองเหลือง

1. วัสดุที่ใช้คือ ทองเหลือง
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm.
3. ความยาวตลอดแท่งตัวนำ 165 mm.



รูปที่ 3.28 ขนาดของแท่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

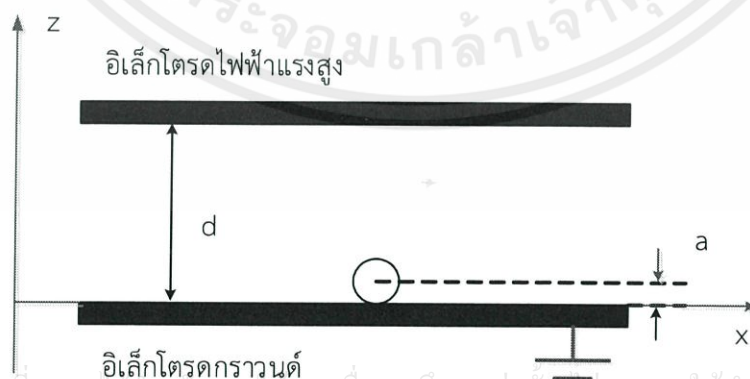
ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วนจากการที่มีอนุภาคเคลื่อนที่อยู่ในระหว่างระนาบอิเล็กโตรดกราวด์ และระนาบอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงในแนวแกน  $z$  โดยวัดค่าดีสซาร์จบางส่วนในขณะที่อนุภาคเริ่มยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวด์ และในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงกับอิเล็กโตรดกราวด์ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองวัดค่าผลตอบสนองของความถี่ของความต้านทานชั้นที่ผู้ทดลองได้สร้างขึ้นสำหรับวัดค่าพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วน โดยค่าที่ได้จากการวัดผลตอบสนองความถี่ดังกล่าวนั้นจะทำให้ทราบว่าความต้านทานชั้นที่สร้างขึ้นนั้นเหมาะสมในการวัดดีสซาร์จบางส่วนในช่วงความถี่ใดบ้าง

### 4.1 วิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรด ใช้วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติบนพิกัด  $(x, z)$  แรงทั้งหมดที่กระทำกับอนุภาคระหว่างอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงกับอิเล็กโตรดกราวด์ที่ขนานกัน ได้แก่ แรงคูลอมบ์  $F_c$  ในทิศทาง  $+Z$  และแรงโน้มถ่วง  $F_g$  ในทิศทาง  $-Z$  เพื่ออำนวยความสะดวกให้ผู้วิจัยได้จำลองและแบ่งกรณีในการพิจารณาเป็น 5 กรณี ประกอบด้วย

- กรณีที่ 1 อนุภาคถูกวางบนระนาบอิเล็กโตรดกราวด์
- กรณีที่ 2 อนุภาคเคลื่อนที่จากระนาบกราวด์ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง
- กรณีที่ 3 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง
- กรณีที่ 4 อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดกราวด์
- กรณีที่ 5 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดกราวด์

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ผู้ทำการทดลองสมมติให้อนุภาคมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบอิเล็กโตรดโดยที่อนุภาคเปรียบเสมือนจุด ทำให้สามารถละเลยรัศมีของอนุภาคเมื่อเกิดการกระทบระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด การคำนวณแรงต่างๆ จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวในบทที่ 2

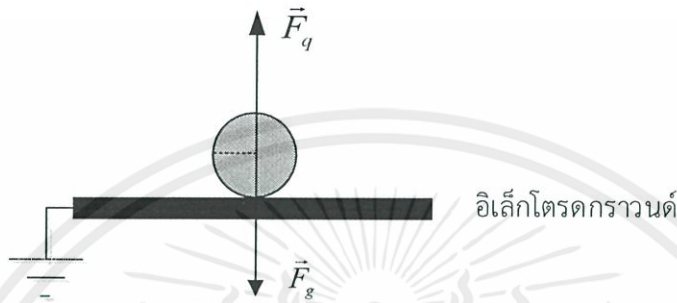


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ทิศทางของแรงคูลอมบ์ และแรงโน้มถ่วงในแนวแกน  $Z$

#### 4.1.1 กรณีที่ 1 อนุภาคถูกวางบนระนาบอิเล็กโตรดกราวด์

อนุภาคมวล  $m$  ที่พิกัด  $(x_p(i), z_p(i))$  โดยที่  $i$  แทนลำดับกรณี 1, 2, 3, ... โดยอนุภาคดังกล่าวอยู่บนอิเล็กโตรดกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง  $E_L$  และเกิดประจุเหนี่ยวนำ  $q_{ind}$  บนอนุภาค อนุภาคจะเริ่มยกตัวขึ้นดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 1

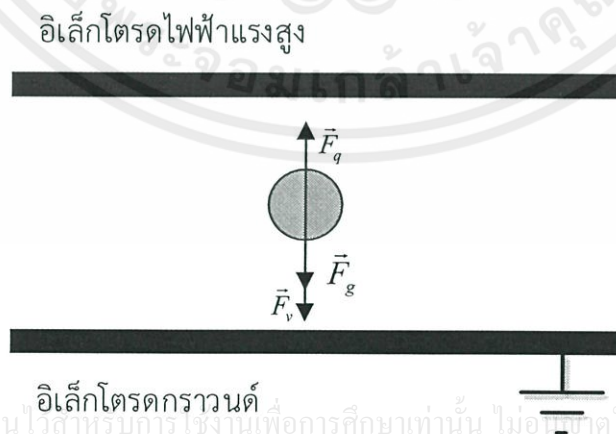
ผลรวมของแรง  $F_z(1)$  ที่กระทำต่ออนุภาคในแนวแกน  $z$  เป็นดังสมการที่ (4.1)

$$F_z(1) = F_q(1) - F_g(1) \quad (4.1)$$

ในกรณีที่ 1 นี้จะไม่คิดแรงหนืดของอากาศ  $F_v$  เนื่องจากความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

#### 4.1.2 กรณีที่ 2 อนุภาคเคลื่อนที่จากระนาบกราวด์ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง

ในกรณีนี้ อนุภาคจะถูกยกขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวด์ด้วยแรงทางไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงโดยมีแรงคูลอมบ์  $F_q(2)$  แรงโน้มถ่วง  $F_g(2)$  และแรงหนืดของอากาศ  $F_v(2)$  กระทำกับอนุภาคในทิศทางดัง รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อาจใช้ทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

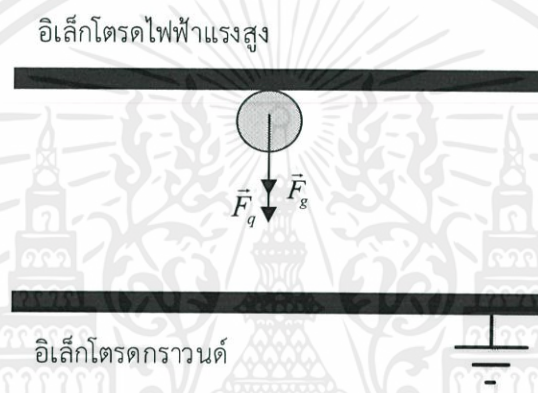
รูปที่ 4.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 2

อนุภาคจะยกตัวขึ้นเมื่อแรงคูลอมบ์  $F_q(2)$  มีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วง  $F_g(2)$  และแรงหนืดของอากาศ  $F_v(2)$  ที่กระทำกับอนุภาค โดยผลรวมของแรง  $F_z(2)$  เป็นดังสมการที่ (4.2)

$$F_z(2) = F_q(2) - (F_g(2) + F_v(2)) \quad (4.2)$$

#### 4.1.3 กรณีที่ 3 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง

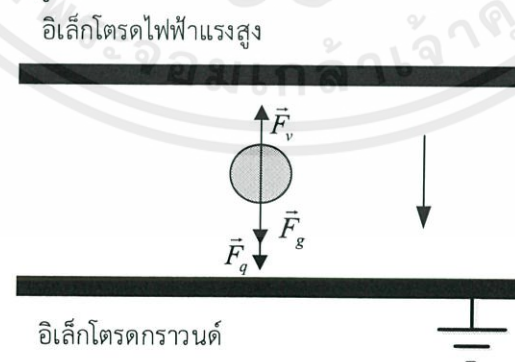
เมื่ออนุภาคกระทบกับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงดังรูปที่ 4.4 จะเกิดการเหนี่ยวนำประจุชนิดตรงข้ามขึ้น การคำนวณแรงที่กระทำกับอนุภาคจะใช้หลักการเดียวกันกับการคำนวณในกรณีที่ 1 อนุภาคจะกระดอนออกจากอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงและเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดกราวด์ การเปลี่ยนแปลงชั่วของประจุเหนี่ยวนำทำให้ทิศทางของแรงคูลอมบ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะกล่าวในกรณีที่ 4 ต่อไป



รูปที่ 4.4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 3

#### 4.1.4 กรณีที่ 4 อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดกราวด์

อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดกราวด์จนกระทั่งเกิดการกระทบกันระหว่างอนุภาคและอิเล็กโทรดกราวด์ โดยมีแรงที่กระทำกับอนุภาคคือแรงคูลอมบ์  $F_q(4)$  แรงโน้มถ่วง  $F_g(4)$  และแรงหนืดของอากาศ  $F_v(4)$  ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับผลรวมของแรง  $F_z(4)$  ในกรณีนี้ได้เป็น

$$F_z(4) = (F_q(4) + F_g(4)) - F_v(4) \quad (4.3)$$

#### 4.1.5 กรณีที่ 5 อนุภาคกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์

ในกรณีนี้ เมื่ออนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดกราวนด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุ และความเร็วของอนุภาคเช่นเดียวกับกรณีที่ 3 กล่าวคือ จะเกิดการเหนี่ยวนำประจุชนิดตรงข้าม จะทำให้ทิศทางของแรงคูลอมบ์เปลี่ยนแปลงไป อนุภาคจะกระดอนออกจากอิเล็กโตรดกราวนด์และเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อการพิจารณาและวิเคราะห์ทั้ง 5 กรณีจบลง ก็จะเริ่มการพิจารณาและวิเคราะห์ในกรณีที่ 2 ใหม่อีกครั้ง และจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

#### 4.2 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบขึ้น

กระบวนการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตค่าของความต้านทานชั้นที่ว่ามีความเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อมีค่าความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 MHz – 40 MHz โดยใช้เครื่องทดสอบการตอบสนองความถี่และต่อวงจรตามทดสอบตามรูปที่ 4.6

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องทดสอบการตอบสนองความถี่ Impedance / Gain-Phase Analyzer ยี่ห้อ HP HEWLETT PACKARD โดยจ่ายกระแสและแรงดันกระแสตรง  $\pm 20$  mA /  $\pm 40$  v
2. ความต้านทานชั้นที่

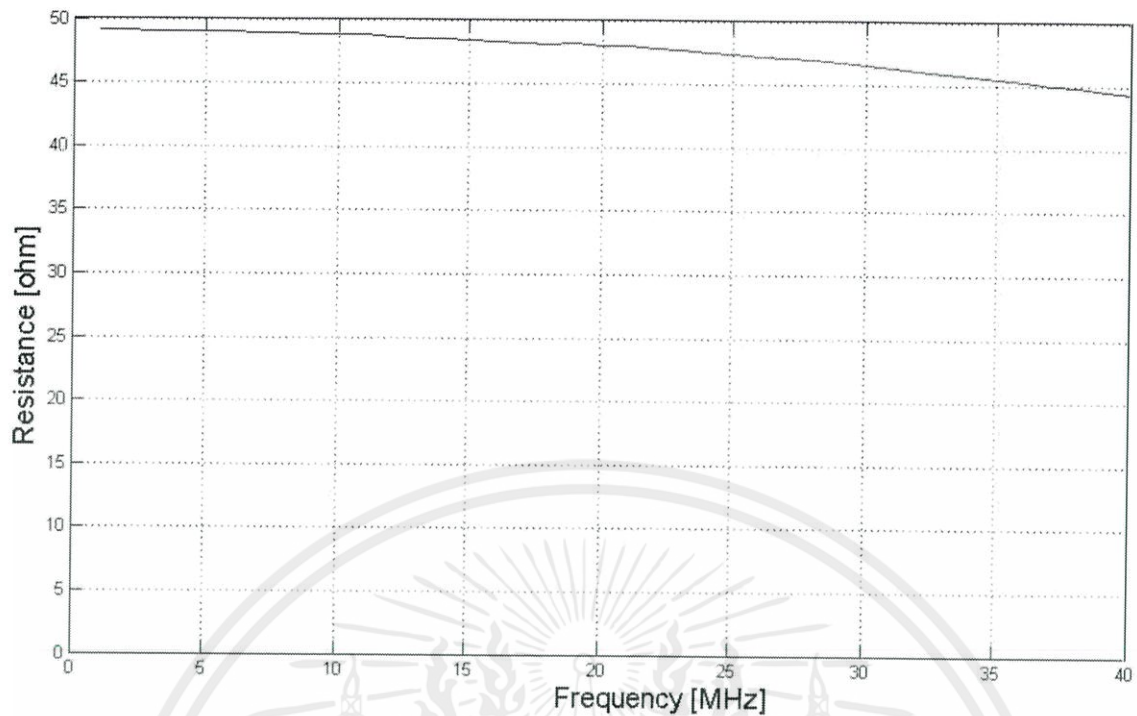


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.6 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่ทำการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่

Frequency (MHz)	Real ( $\Omega$ )	Frequency (MHz)	Real ( $\Omega$ )
1.0	49.0835	21	48.0020
2.0	49.0758	22	47.8316
3.0	49.0573	23	47.6344
4.0	49.0336	24	47.4515
5.0	49.0167	25	47.3869
6.0	48.9747	26	47.2123
7.0	48.9358	27	47.1118
8.0	48.8848	28	47.0129
9.0	48.8291	29	46.8036
10	48.7678	30	46.6040
11	48.6961	31	46.3817
12	48.6207	32	46.1573
13	48.5281	33	45.9622
14	48.5014	34	45.7499
15	48.4221	35	45.5702
16	48.2661	36	45.3082
17	48.1538	37	45.0465
18	48.0985	38	44.8883
19	48.2291	39	44.6257
20	47.9880	40	44.4067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานของความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้างเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

#### 4.3 ผลการทดสอบการยกตัวขึ้นของอนุภาคจากอิเล็กโตรดกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบสม่ำเสมอ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเริ่มยกตัวของอนุภาค  $V_L$  ระหว่างการคำนวณกับการทดลอง และทำการตรวจจับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนขณะอนุภาคเริ่มยกตัวและขณะอนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวด์กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง โดยที่อิเล็กโตรดทั้งสองทำมุมขนานกันและมีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 1 cm. และ 1.5 cm.

เมื่ออนุภาคอยู่ใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงที่กระทำต่ออนุภาคมี 2 ชนิดคือ แรงโน้มถ่วงและแรงคูลอมบ์ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวด์  $V_L$  คือ

$$V_L = 0.5d \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (4.1)$$

เมื่อ a คือ รัศมีของอนุภาคตัวนำ (mm)

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

$\epsilon_s$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งเท่ากับ 1.0 สำหรับอากาศ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ  $9.8 \text{ m/s}^2$

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดด้านแรงสูงกับอิเล็กโตรดด้านกราวด์

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  $\rho_p = 7878 \text{ kg/m}^3$  สำหรับเหล็ก

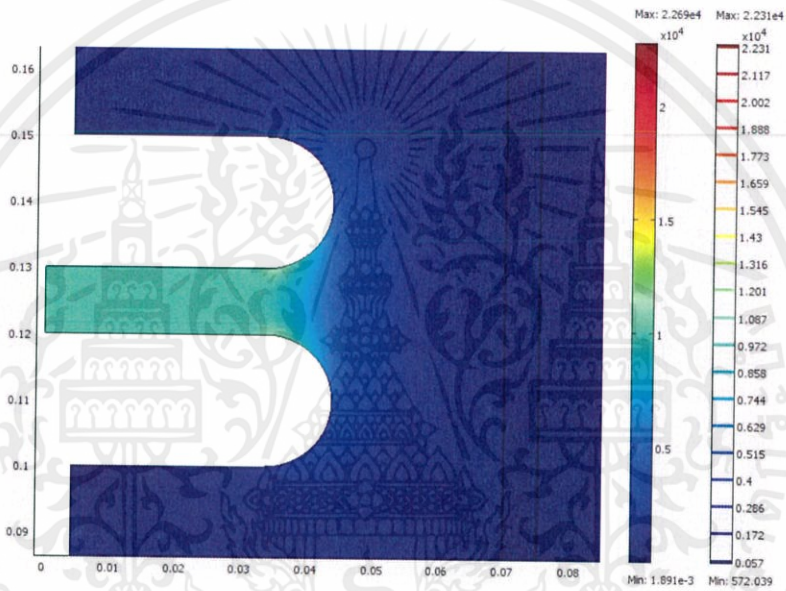
$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของตัวกลางโดยรอบ  $\rho_s = 1.184 \text{ kg/m}^3$  สำหรับอากาศ  
 $V_L$  คือ แรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัว (V)

เมื่อทำการคำนวณตามสมการ (4.1) จะได้ค่า

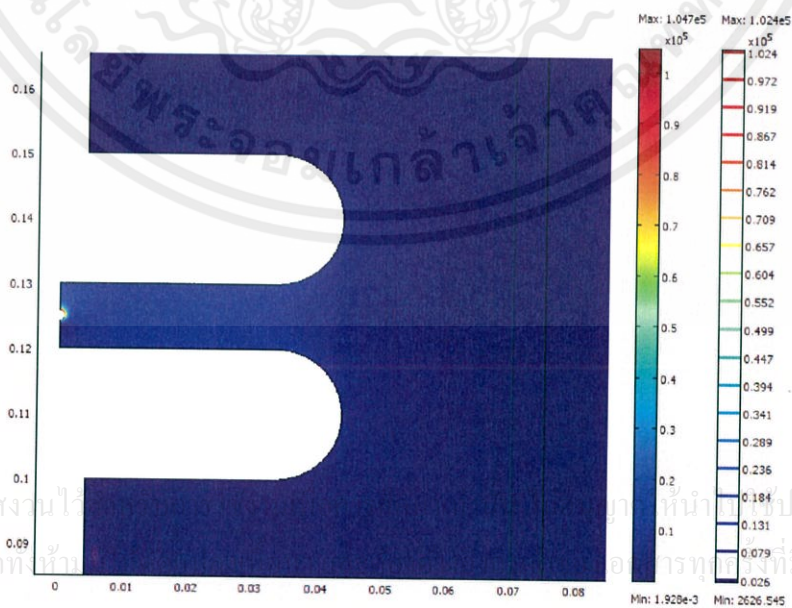
แรงดันไฟฟ้าเริ่มยกตัวของอนุภาคที่ระยะ gap 1 cm. ได้ค่า  $V_L = 12.8 \text{ kV}$

แรงดันไฟฟ้าเริ่มยกตัวของอนุภาคที่ระยะ gap 1.5 cm. ได้ค่า  $V_L = 19.17 \text{ kV}$

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีไฟน์โทลิเมนต์ที่ระยะแกป 1 cm. ขณะที่ไม่มีอนุภาค และมีอนุภาคระหว่างอิเล็กโตรด



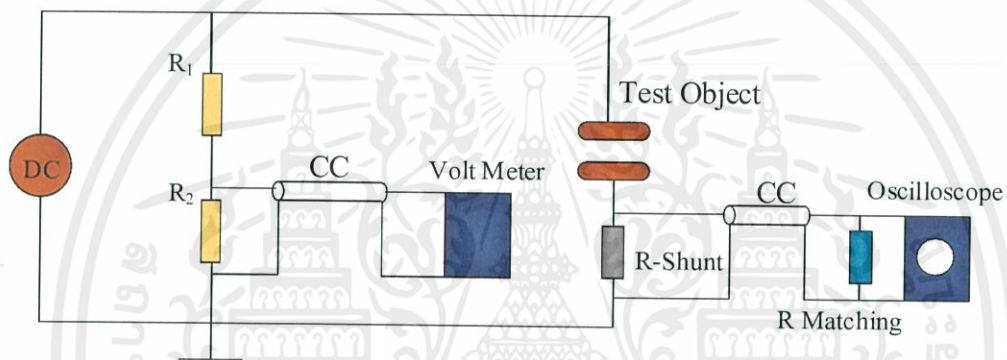
รูปที่ 4.8 จำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟน์โทลิเมนต์ที่ระยะแกป 1.0 cm. ขณะไม่มีอนุภาค



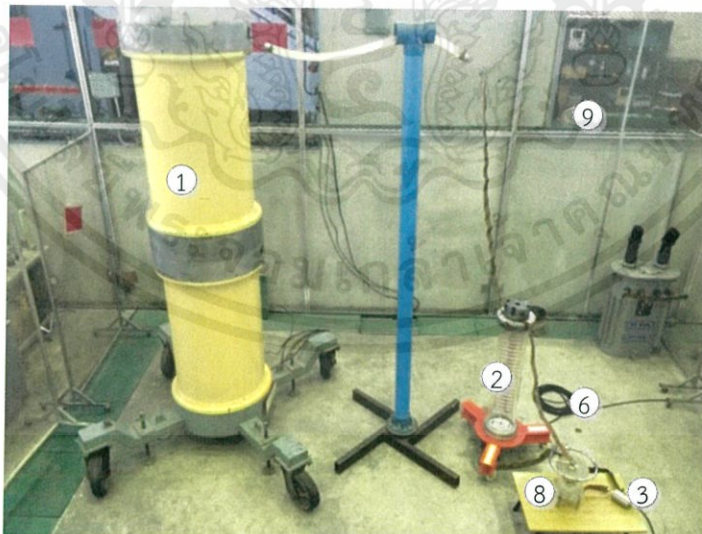
รูปที่ 4.9 การจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟน์โทลิเมนต์ที่ระยะแกป 1.5 cm.

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

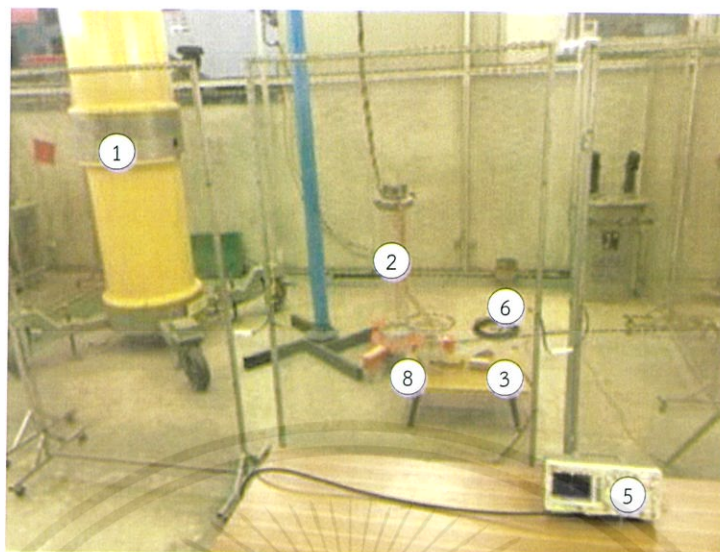
1. DC Transformer 600 kV, 10 mA
2. Universal Voltage Divider/Rated Voltage 100 kV
3. R Shunt ขนาด 50  $\Omega$
4. อนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm.
5. Oscilloscope RIGOL 100 MHz 2GSa/s
6. สายวัดสัญญาณ RG8
7. R Matching ขนาด 50  $\Omega$
8. แท่นวางวัสดุทดสอบ
9. ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



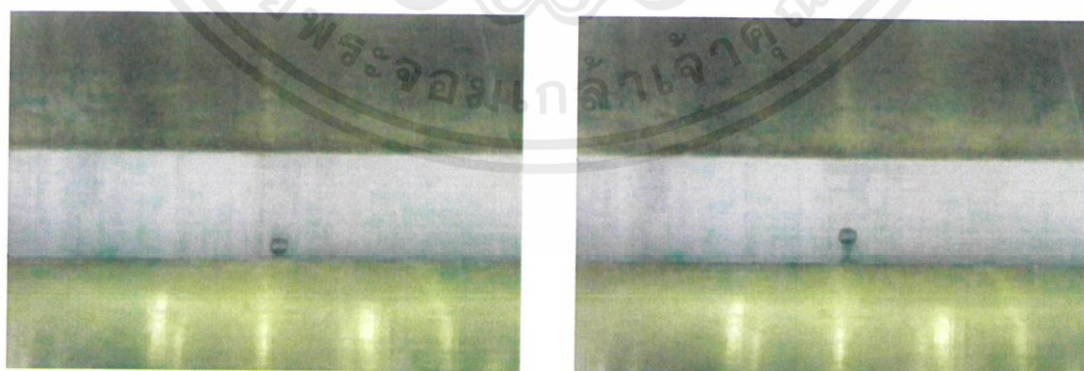
ข)

รูปที่ 4.11 วงจรการทดสอบ

4.3.1 ผลการทดสอบแรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ที่ระยะ gap 1 cm. และทำการตรวจจับพัลส์กระแสดิสชาร์จบางส่วนด้วยความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบสร้างเงื่อนไขการทดสอบ

1. ความดันบรรยากาศ = 762 mmHg
2. อุณหภูมิ = 31 องศาเซลเซียส
3. ความชื้นสัมพัทธ์ = 74 เปอร์เซ็นต์

4.3.1.1 เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์  
แรงดันไฟฟ้าเริ่มยกตัวของอนุภาคโดยคำนวณจากทฤษฎี  $V_L = 12.8 k$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ก) อนุภาควางอยู่บนระนาบกราวนด์ ข) อนุภาคเริ่มยกตัวจากระนาบกราวนด์ ไปใช้

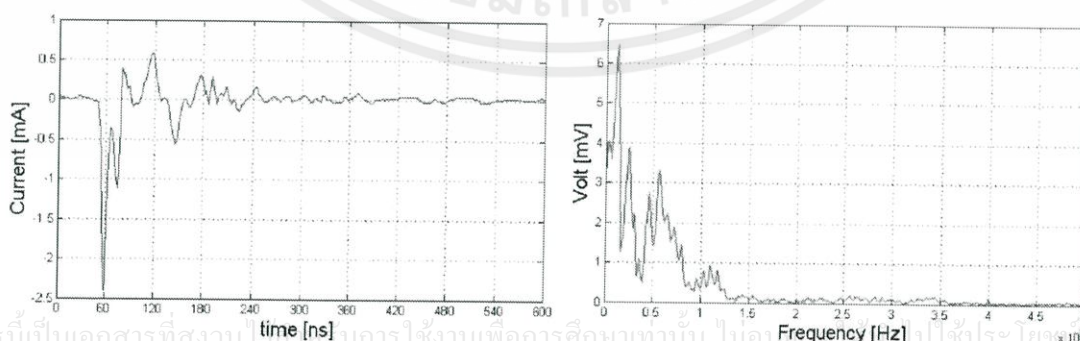
รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ระยะแกป 1.0 cm.

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวที่ระยะแกป 1 cm.

การทดลอง ครั้งที่	$V_L$ จากการทดลอง (kV)	% ความคลาดเคลื่อน
1	13.0	1.5625
2	13.0	1.5625
3	13.2	3.1250
4	13.0	1.5625
5	13.0	1.5625
6	13.2	3.1250
7	13.0	1.5625
8	13.2	3.1250
9	13.1	2.3438
10	13.2	3.1250

กราฟแสดงค่าพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนเมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ที่ระยะแกป 1.0 cm. โดยตรวจจับผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์มที่ออกแบบสร้าง โดยทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง

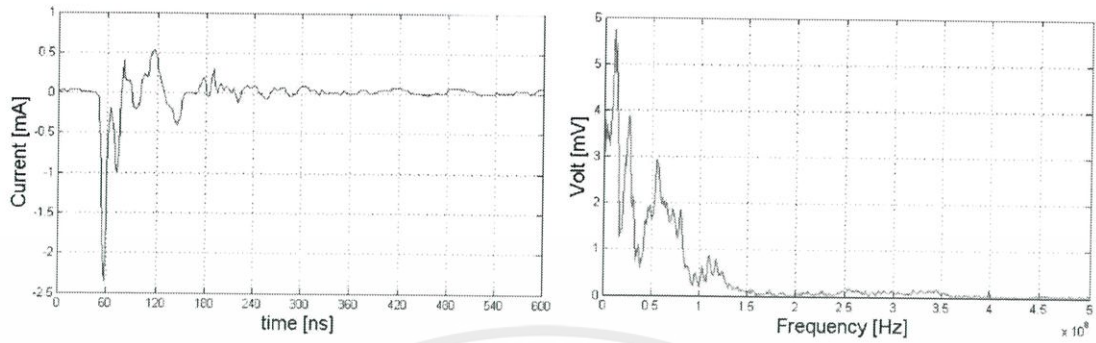
ครั้งที่ 1 ( $V_L = 13.0$  kV)  $I_{\text{peak}} = 2.40$  mA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

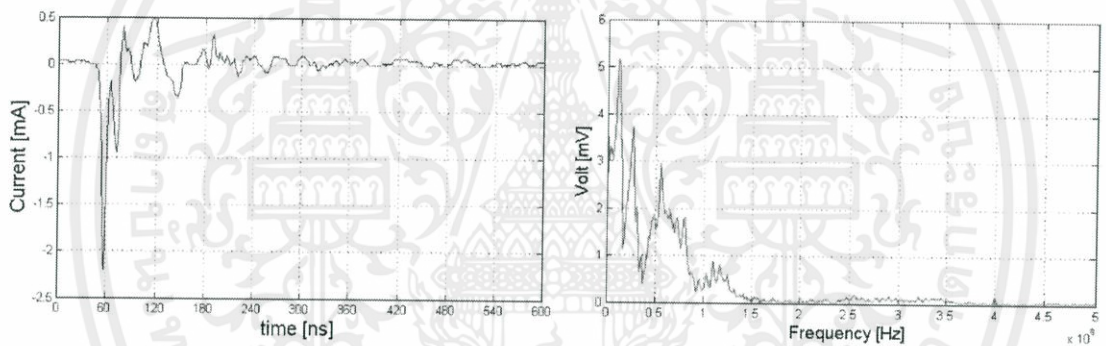
ก) การทดลองครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.36 \text{ mA}$



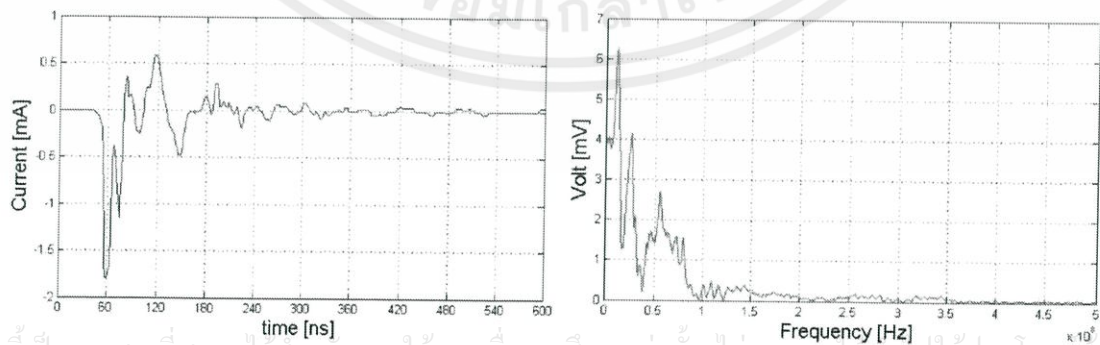
ข) การทดลองครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.20 \text{ mA}$



ค) การทดลองครั้งที่ 3

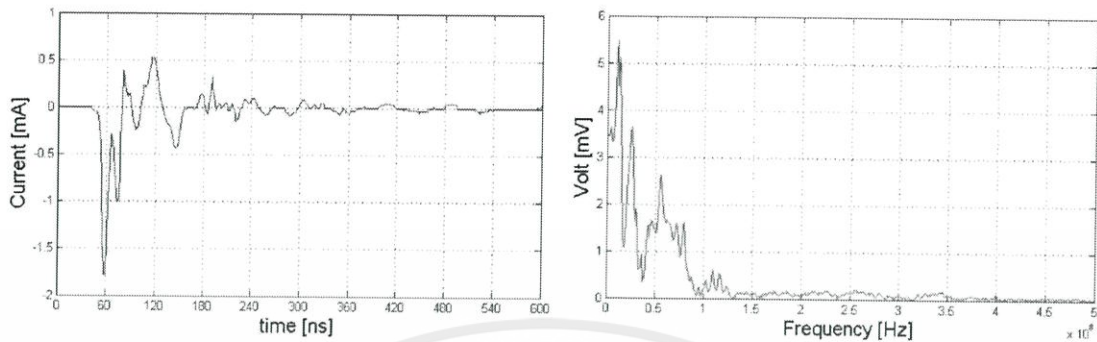
ครั้งที่ 4 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.79 \text{ mA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาก่อนและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

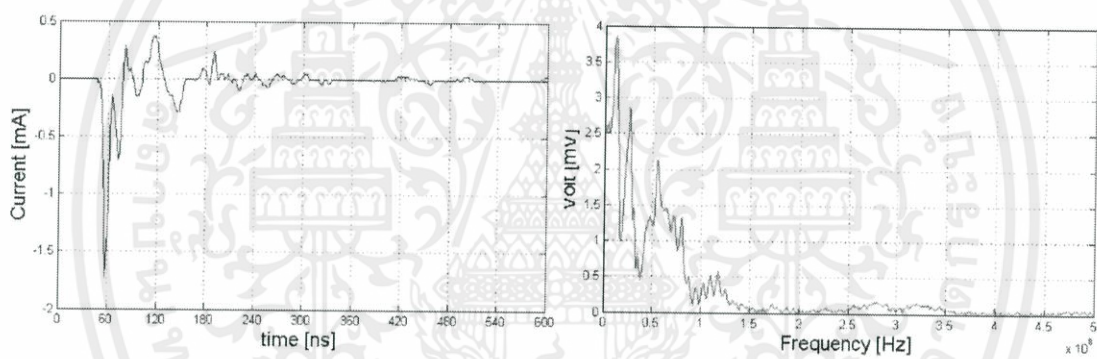
ง) การทดลองครั้งที่ 4

ครั้งที่ 5 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.78 \text{ mA}$



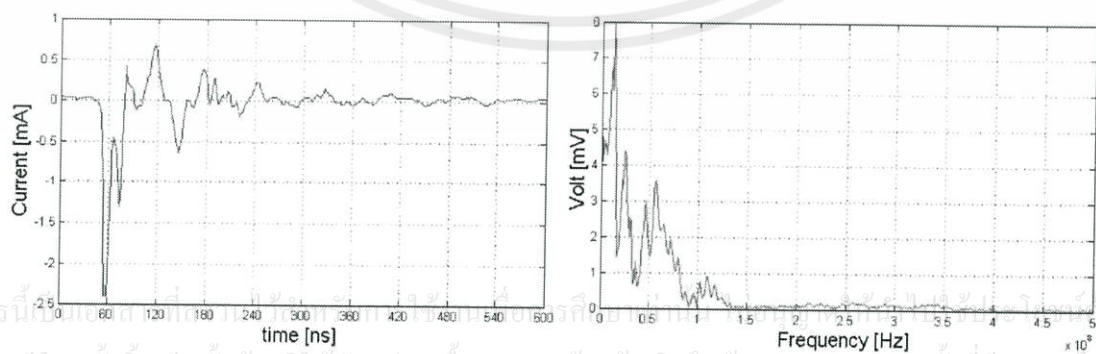
จ) การทดลองครั้งที่ 5

ครั้งที่ 6 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.73 \text{ mA}$



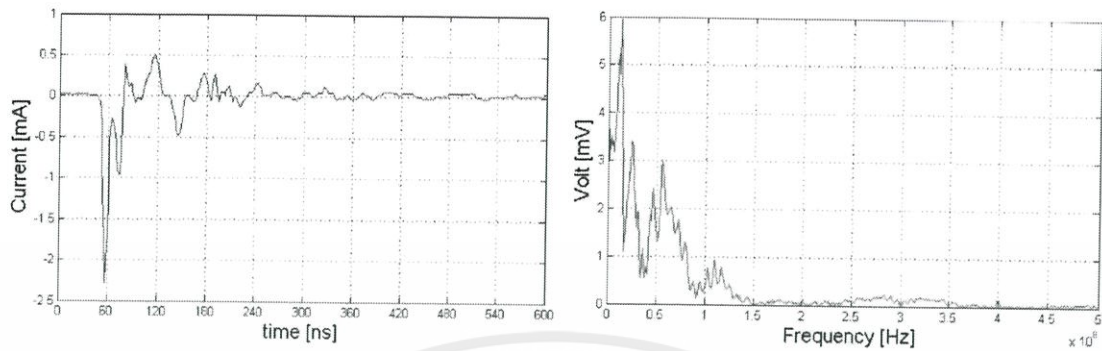
ฉ) การทดลองครั้งที่ 6

ครั้งที่ 7 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.40 \text{ mA}$



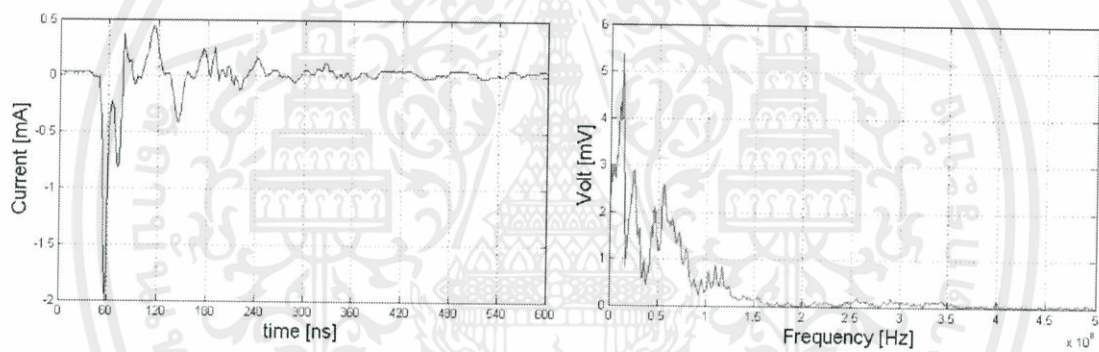
ช) การทดลองครั้งที่ 7

ครั้งที่ 8 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.28 \text{ mA}$



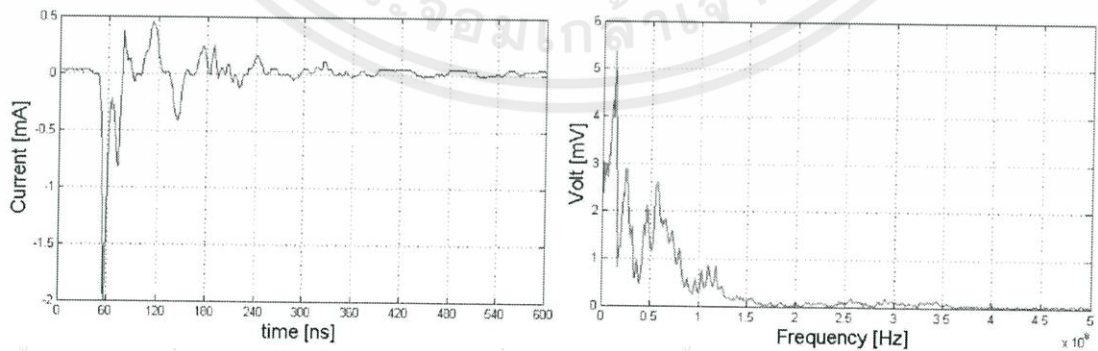
ซ) การทดลองครั้งที่ 8

ครั้งที่ 9 ( $V_L = 13.1 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.0 \text{ mA}$



ณ) การทดลองครั้งที่ 9

ครั้งที่ 10 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.0 \text{ mA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง) การทดลองครั้งที่ 10 ึ่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

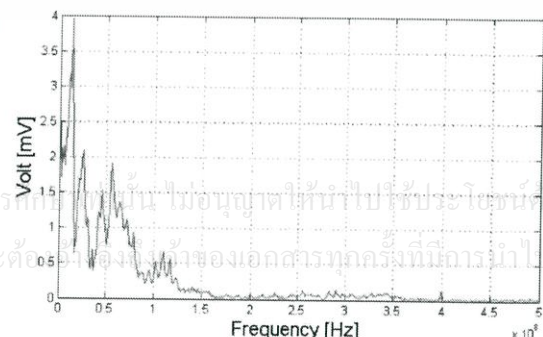
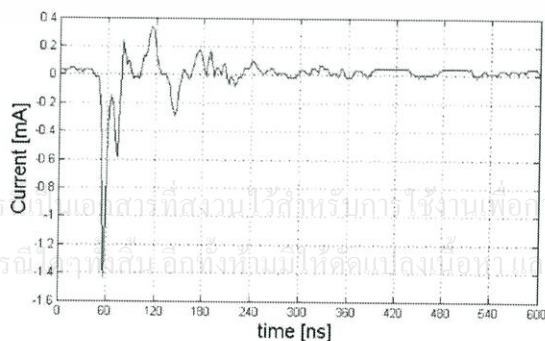
รูปที่ 4.12 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1 cm. เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัว

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วนของอนุภาคที่เริ่มยกตัวจากกระบวนาปอเล็กโตรกราวนด์ที่ระยะแกป 1 cm. ด้วยความต้านทานชั้นที่ 50  $\Omega$  ที่ออกแบบสร้าง

การทดลองครั้งที่	$I_{\text{Peak}}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu\text{w}$ )	Energy ( $\mu\text{J}$ )	ช่วงความถี่ (MHz)
1	2.40	250	8.5	3.864	966	10 - 25
2	2.36	270	6.5	3.276	885	9 - 25
3	2.20	260	7.3	2.880	749	10 - 30
4	1.79	270	7.0	3.484	941	15 - 30
5	1.78	280	6.5	2.880	806	20 - 30
6	1.73	260	6.7	1.729	450	15 - 30
7	2.40	270	7.0	4.929	1331	15 - 35
8	2.28	280	7.1	3.075	861	15 - 35
9	2.0	270	6.8	2.332	630	20 - 35
10	2.0	260	7.5	2.332	607	15 - 30

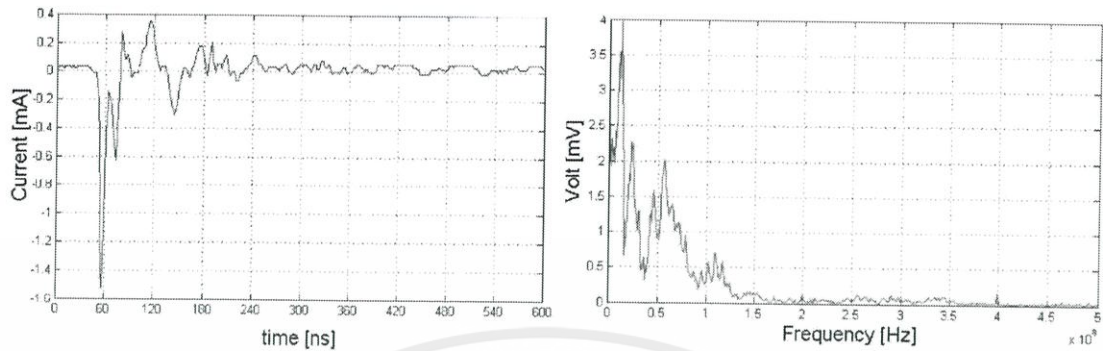
4.3.1.2 เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอเล็กโตรกราวนด์กับอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง กราฟแสดงค่าพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วนของอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างอเล็กโตรกราวนด์กับอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงที่ระยะแกป 1.0 cm. โดยตรวจจับผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์ม โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง

ครั้งที่ 1 ( $V_L = 13.1 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.44 \text{ mA}$



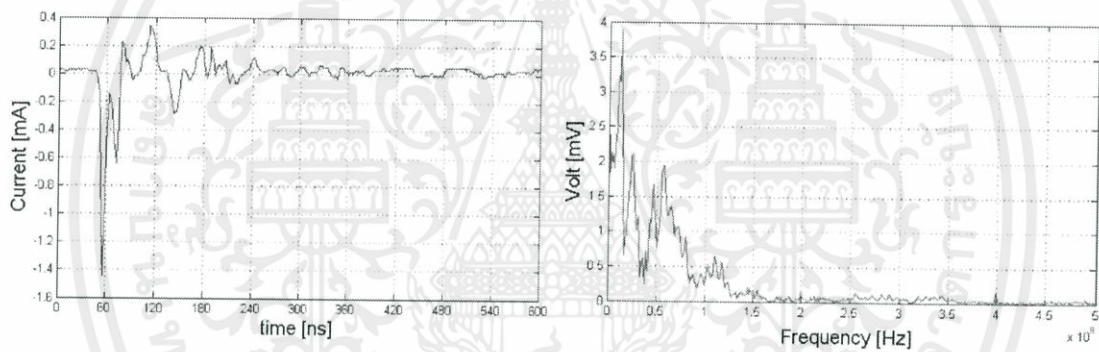
ก) การทดลองครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2 ( $V_L = 12.8 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.52 \text{ mA}$



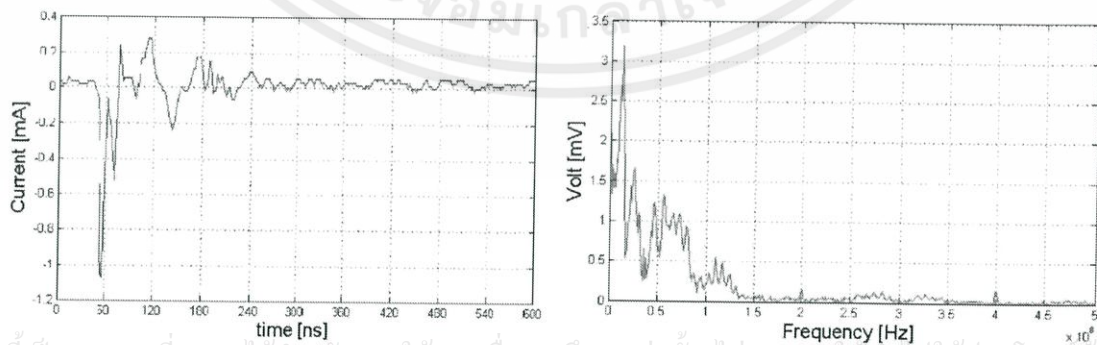
ข) การทดลองครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.44 \text{ mA}$



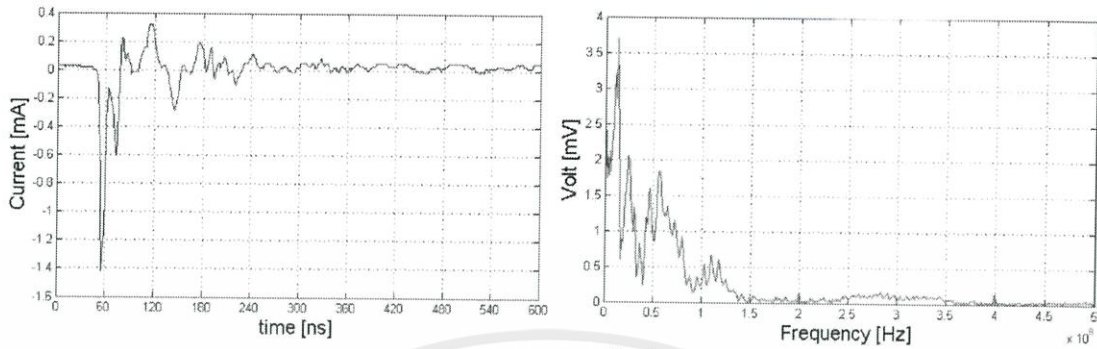
ค) การทดลองครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.07 \text{ mA}$



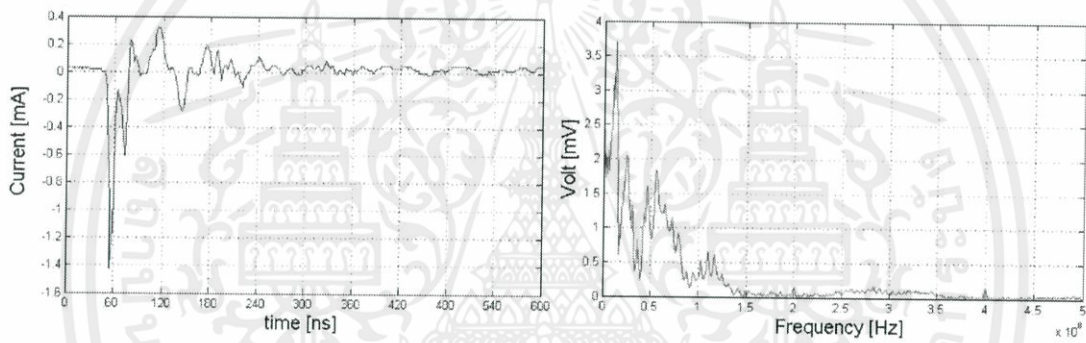
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ง) การทดลองครั้งที่ 4  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 5 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.07 \text{ mA}$



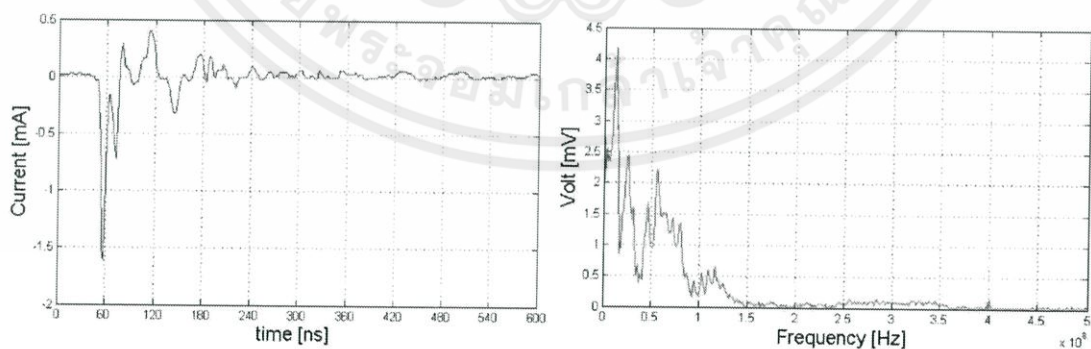
จ) การทดลองครั้งที่ 5

ครั้งที่ 6 ( $V_L = 13.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.07 \text{ mA}$



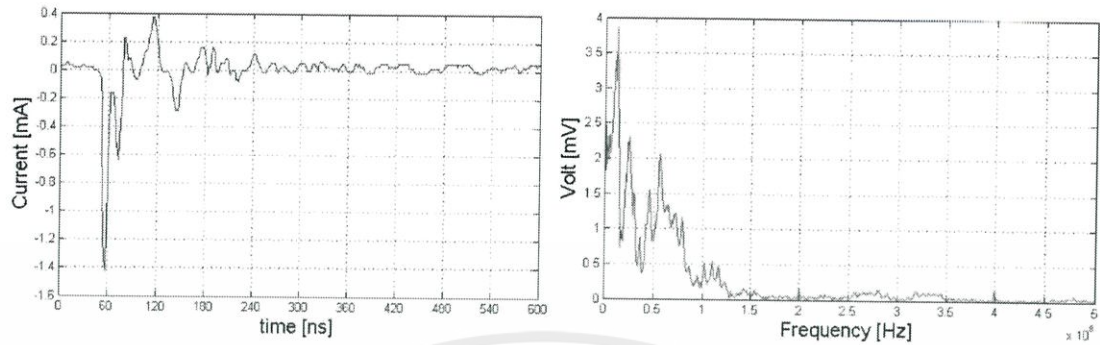
ฉ) การทดลองครั้งที่ 6

ครั้งที่ 7 ( $V_L = 12.9 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.62 \text{ mA}$



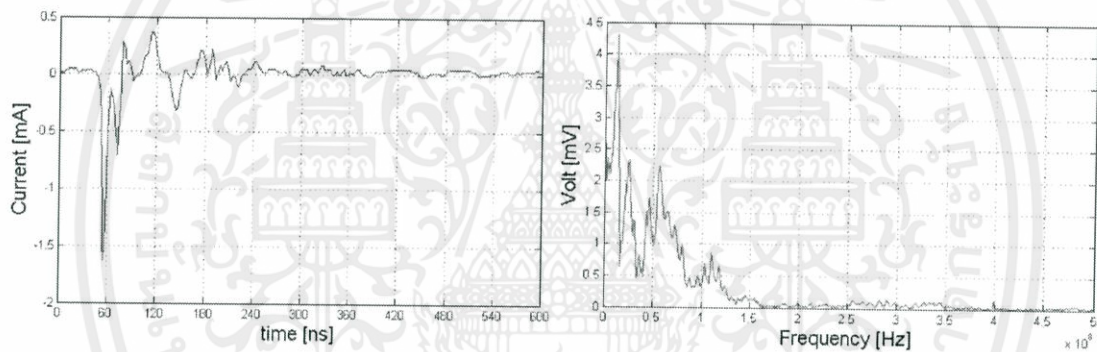
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ช) การทดลองครั้งที่ 7 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่ 8 ( $V_L = 13.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.42 \text{ mA}$



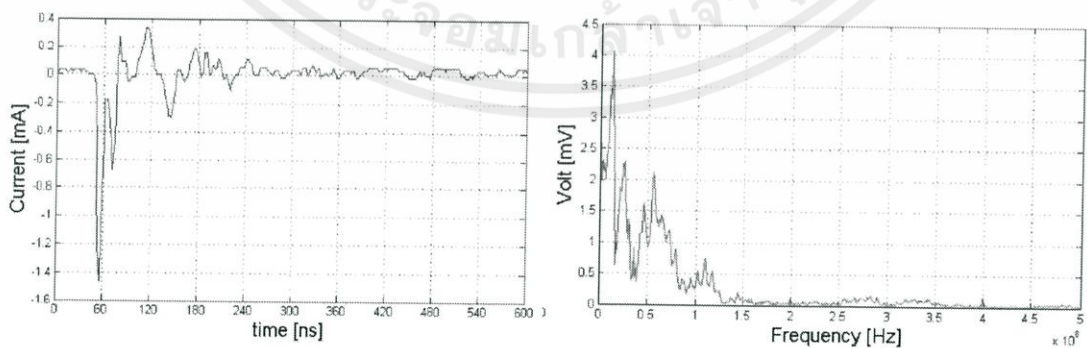
ข) การทดลองครั้งที่ 8

คลื่นที่ 9 ( $V_L = 12.8 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.65 \text{ mA}$



ค) การทดลองครั้งที่ 9

คลื่นที่ 10 ( $V_L = 12.9 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.46 \text{ mA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปด (ยู) การทดลองครั้งที่ 10 ึ่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1 cm. เมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วนของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงกับอิเล็กโตรดกราวด์ ที่ระยะแกป 1 cm. ด้วยความต้านทานชั้นที่ 50  $\Omega$  ที่ออกแบบสร้าง

การทดลองครั้งที่	$I_{Peak}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu$ w)	Energy ( $\mu$ J)	ช่วงความถี่ (MHz)
1	1.44	260	5.2	1.185	308	10 - 30
2	1.52	250	5.0	1.312	328	15 - 35
3	1.44	250	4.0	1.216	304	10 - 30
4	1.07	260	4.5	1.008	262	10 - 25
5	1.42	280	4.3	1.155	323	10 - 25
6	1.42	270	4.0	1.312	354	10 - 30
7	1.62	250	4.4	1.620	405	15 - 30
8	1.42	260	5.0	1.312	341	12 - 35
9	1.65	240	5.1	1.729	415	13 - 30
10	1.45	270	4.8	1.277	372	10 - 30

4.3.2 ผลการทดสอบแรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวด์ที่ระยะ gap 1.5 cm. และทำการตรวจจับพัลส์กระแสดีสซาร์จบางส่วนด้วยความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้าง

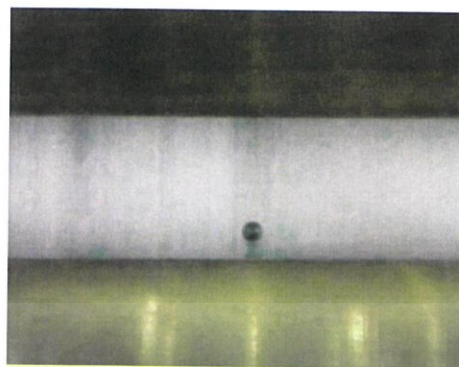
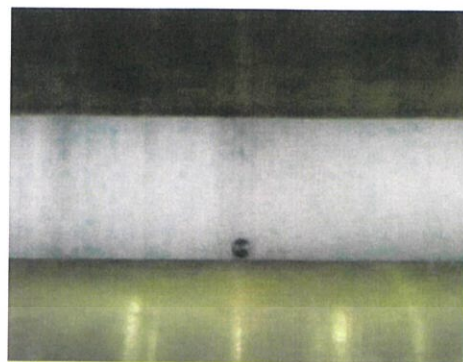
เงื่อนไขการทดสอบ

1. ความดันบรรยากาศ = 762 mmHg
2. อุณหภูมิ = 33 องศาเซลเซียส
3. ความชื้นสัมพัทธ์ = 71 เปอร์เซ็นต์

4.3.2.1 เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวด์

แรงดันยกตัวโดยคำนวณจากทฤษฎี  $V_L = 19.17$  kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) อนุภาควางอยู่บนระนาบกราวนด์

(ข) อนุภาคเริ่มยกตัวจากระนาบกราวนด์

รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ระยะแกป 1.5 cm.

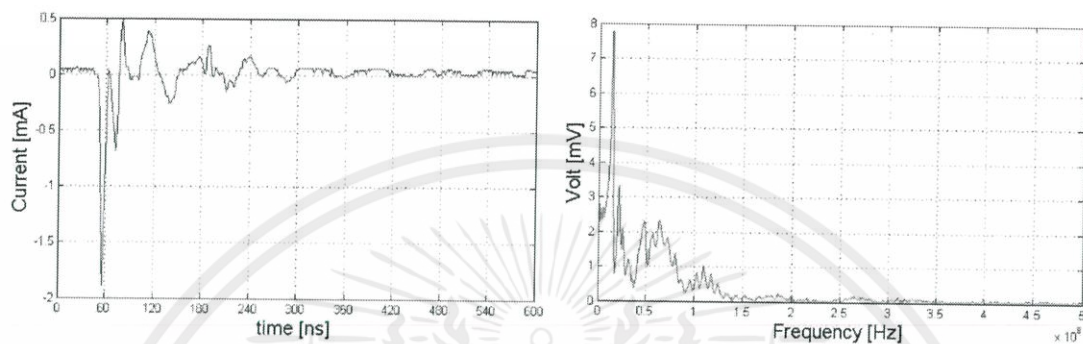
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวที่ระยะแกป 1.5 cm.

จำนวนครั้ง การทดลอง	$V_L$ จากการทดลอง (kV)	% ความคลาดเคลื่อน
1	19.0	0.887
2	19.2	0.156
3	19.2	0.156
4	19.5	1.721
5	19.0	0.887
6	19.2	0.156
7	19.0	0.887
8	19.2	0.156
9	19.1	0.365
10	19.3	0.679

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

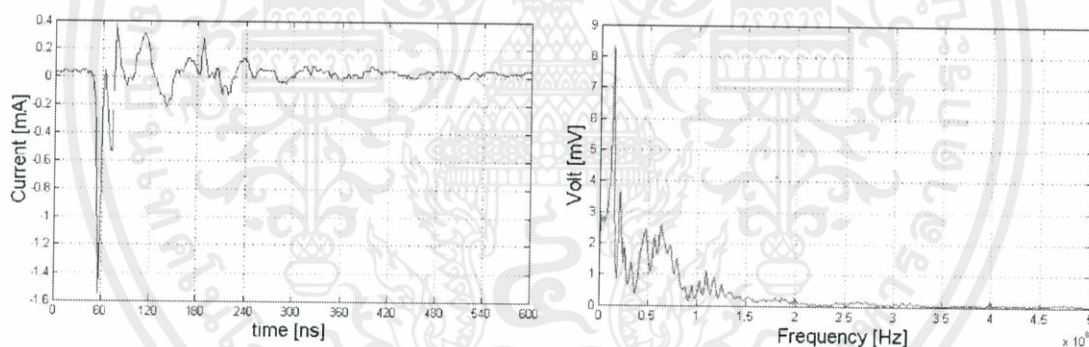
กราฟแสดงค่าพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนของอนุภาคที่เริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ที่ระยะแก๊ป 1.5 cm. ตรวจจับผ่านความต้านทานชั้นขนาด 50 โอห์ม โดยทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง

ครั้งที่ 1 ( $V_L = 19.0$  kV)  $I_{peak} = 1.8$  mA



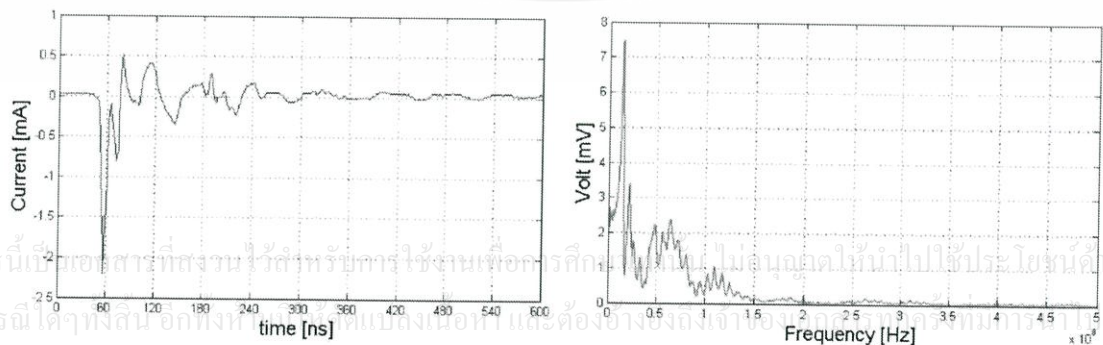
ก) การทดลองครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2 ( $V_L = 19.2$  kV)  $I_{peak} = 1.6$  mA



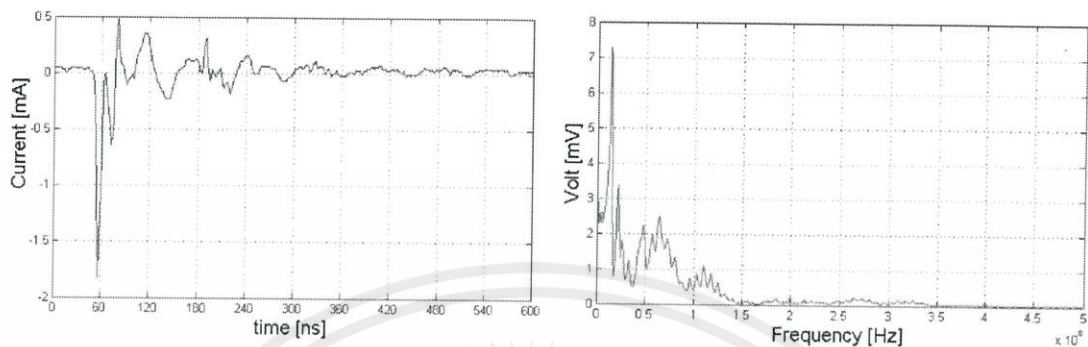
ข) การทดลองครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3 ( $V_L = 19.2$  kV)  $I_{peak} = 2.1$  mA



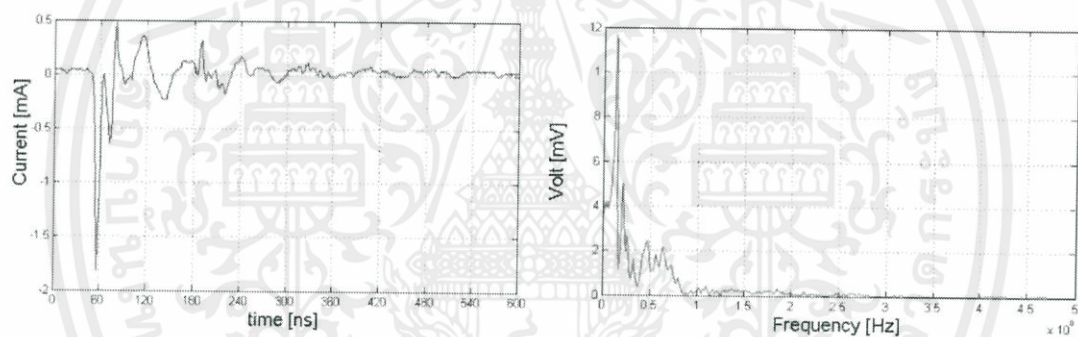
ค) การทดลองครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4 ( $V_L = 19.5 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.8 \text{ mA}$



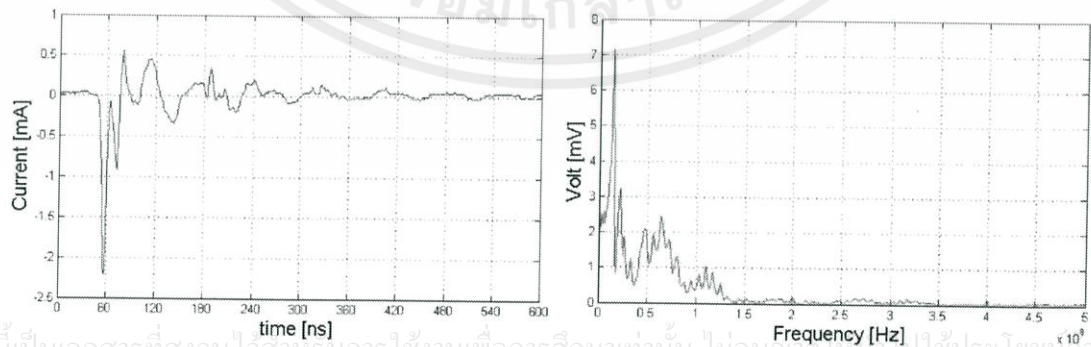
ง) การทดลองครั้งที่ 4

ครั้งที่ 5 ( $V_L = 19.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.8 \text{ mA}$



จ) การทดลองครั้งที่ 5

ครั้งที่ 6 ( $V_L = 19.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.1 \text{ mA}$

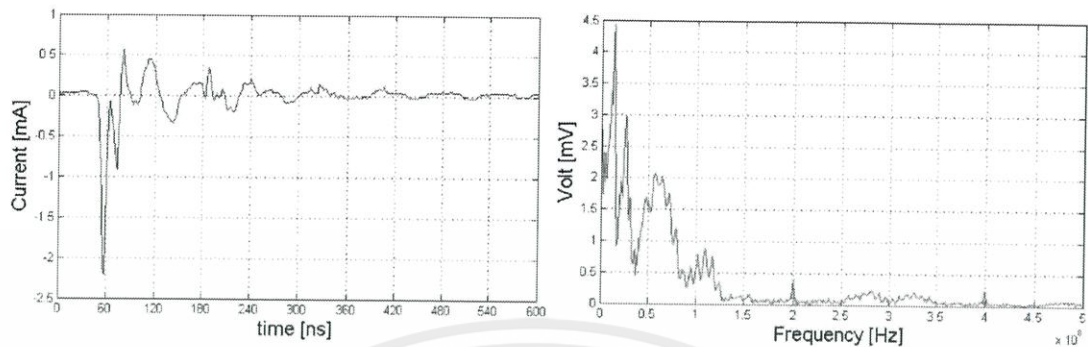


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งผู้ถือลิขสิทธิ์เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

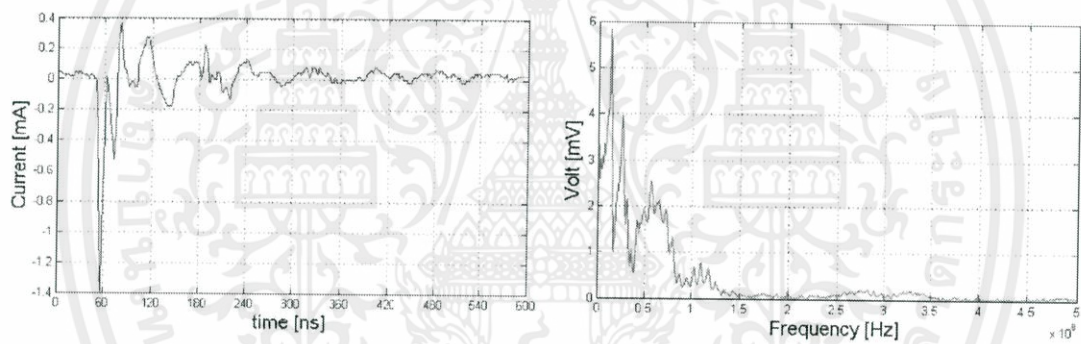
ฉ) การทดลองครั้งที่ 6

ครึ่งที่ 7 ( $V_L = 19.0 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.1 \text{ mA}$



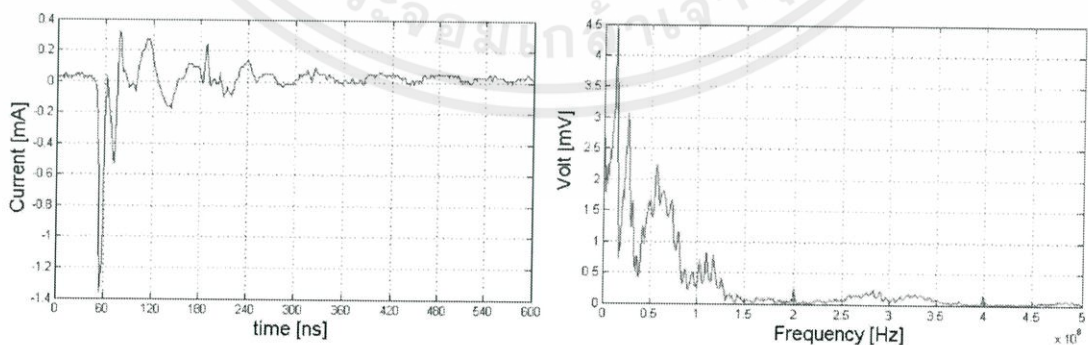
ช) การทดลองครึ่งที่ 7

ครึ่งที่ 8 ( $V_L = 19.2 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.2 \text{ mA}$



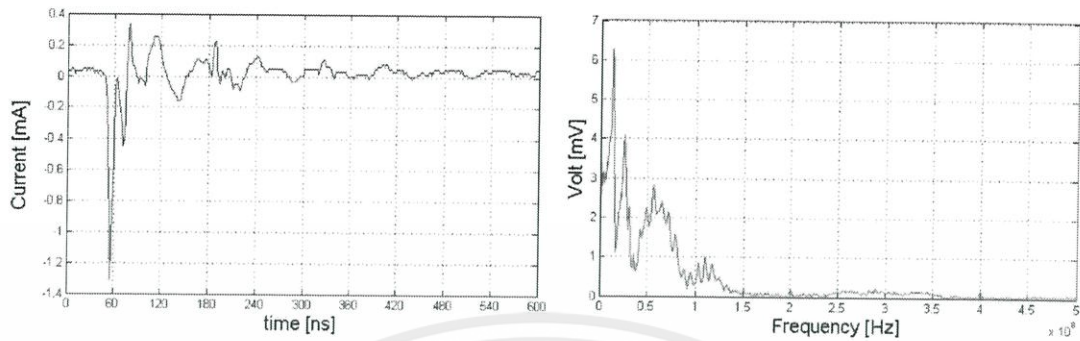
ช) การทดลองครึ่งที่ 8

ครึ่งที่ 9 ( $V_L = 19.1 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.8 \text{ mA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ณ) การทดลองครึ่งที่ 9 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะคิดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 10 ( $V_L = 19.3 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 2.2 \text{ mA}$



ญ) การทดลองครั้งที่ 10

รูปที่ 4.15 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1.5 cm. เมื่ออนุภาคเริ่มยกตัว

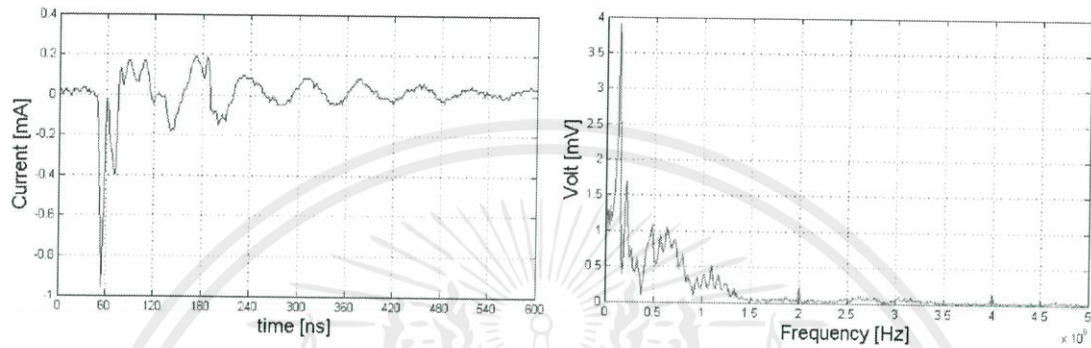
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนของอนุภาคที่เริ่มยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ ที่ระยะแกป 1.5 cm. ด้วยความต้านทานชั้นที่ 50  $\Omega$  ที่ออกแบบสร้าง

การทดลองครั้งที่	$I_{\text{Peak}}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu\text{w}$ )	Energy ( $\mu\text{J}$ )	ช่วงความถี่ (MHz)
1	1.8	510	6.0	2.691	1372.5	10-25
2	1.6	500	5.5	3.125	1562.5	9-25
3	2.1	520	6.5	2.645	1375.4	10-30
4	1.8	510	6.4	2.553	1302.4	10-30
5	1.8	530	6.0	4.929	2612.7	10-25
6	2.1	500	5.8	2.420	1210	12-30
7	2.1	500	6.1	1.843	921.6	13-35
8	2.2	500	6.3	2.691	1345.6	10-35
9	1.8	490	6.1	1.729	847.6	12-30
10	2.2	490	6.0	3.125	1531.2	10-35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

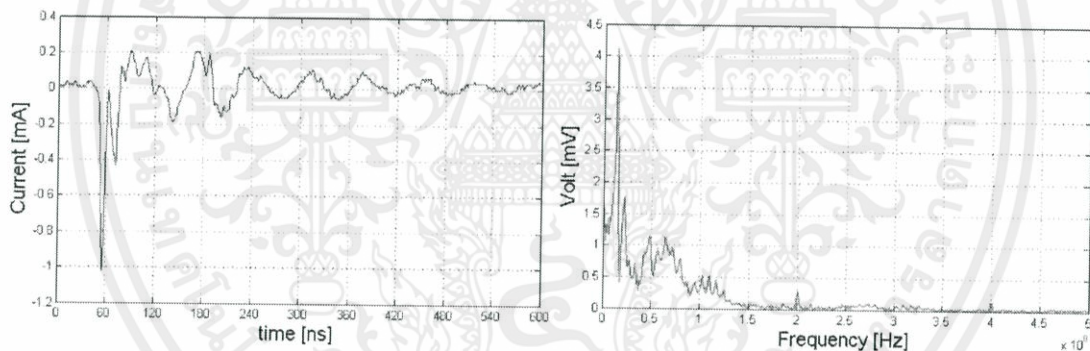
4.3.2.2 เมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรกราวด์กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง กราฟแสดงค่าพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนของอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรกราวด์กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงที่ระยะแกป 1.5 cm. ตรวจสอบผ่านความต้านทานชั้นขนาด 50 โอห์ม โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง

ครั้งที่ 1 ( $V_L = 18.6 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 0.96 \text{ mA}$



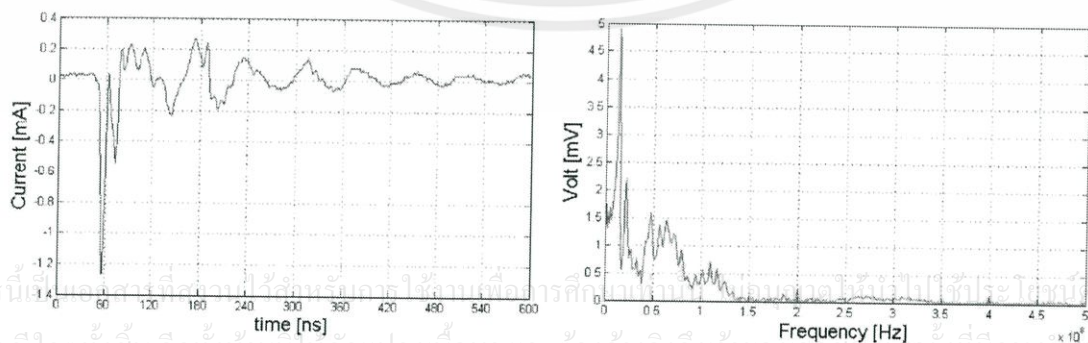
ก) การทดลองครั้งที่ 1

ครั้งที่ 2 ( $V_L = 18.7 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.02 \text{ mA}$



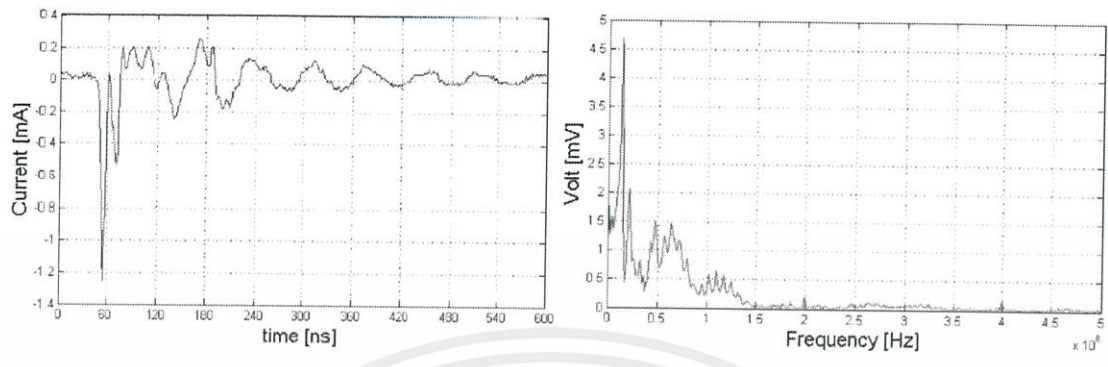
ข) การทดลองครั้งที่ 2

ครั้งที่ 3 ( $V_L = 18.7 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.27 \text{ mA}$



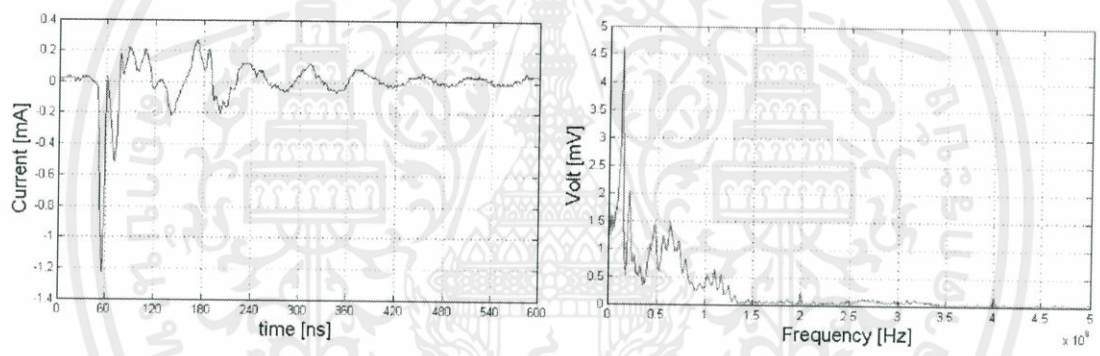
ค) การทดลองครั้งที่ 3

ครั้งที่ 4 ( $V_L = 18.8 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.24 \text{ mA}$



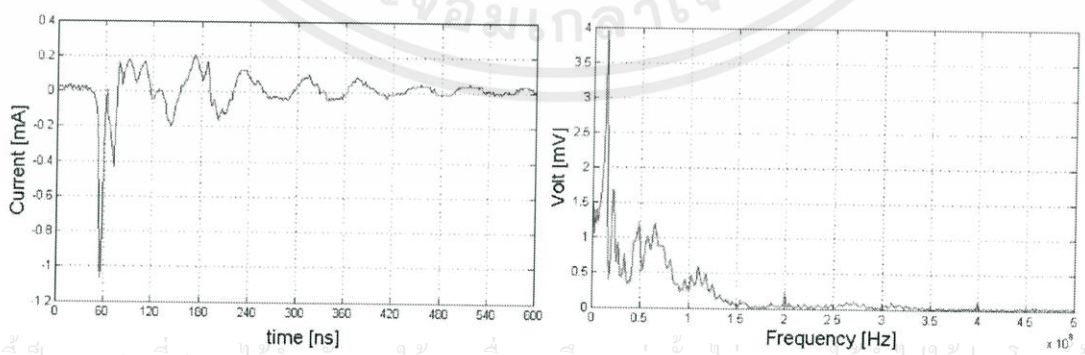
ง) การทดลองครั้งที่ 4

ครั้งที่ 5 ( $V_L = 18.9 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.24 \text{ mA}$



จ) การทดลองครั้งที่ 5

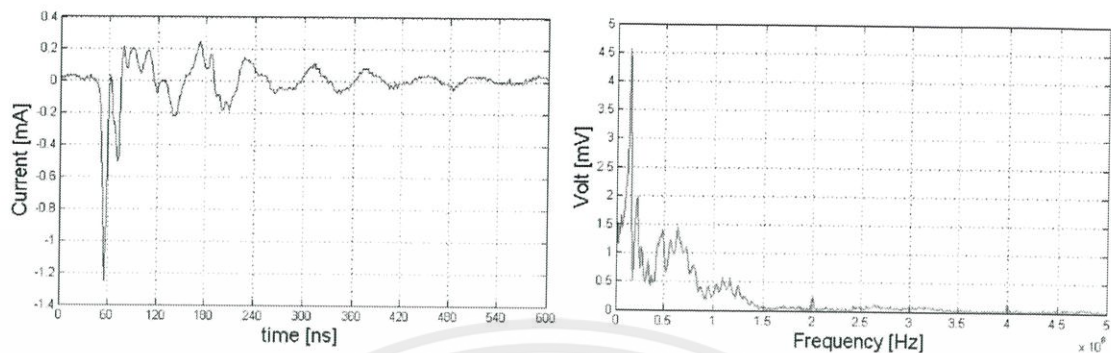
ครั้งที่ 6 ( $V_L = 18.6 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.07 \text{ mA}$



ฉ) การทดลองครั้งที่ 6

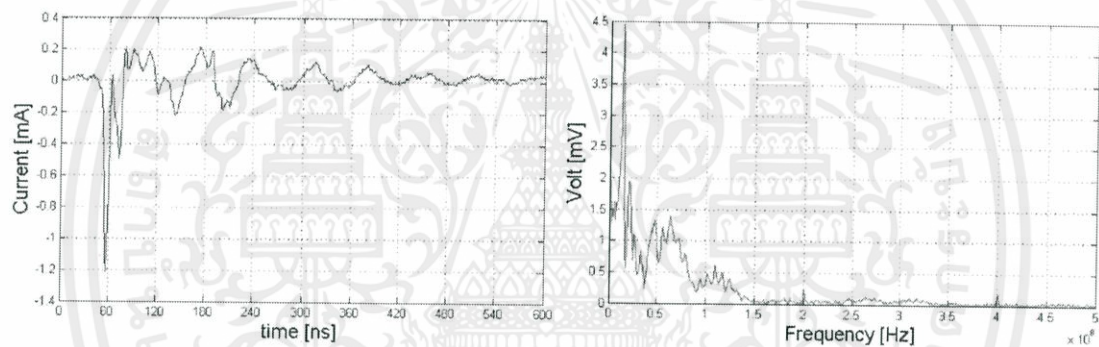
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 7 ( $V_L = 18.8 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.24 \text{ mA}$



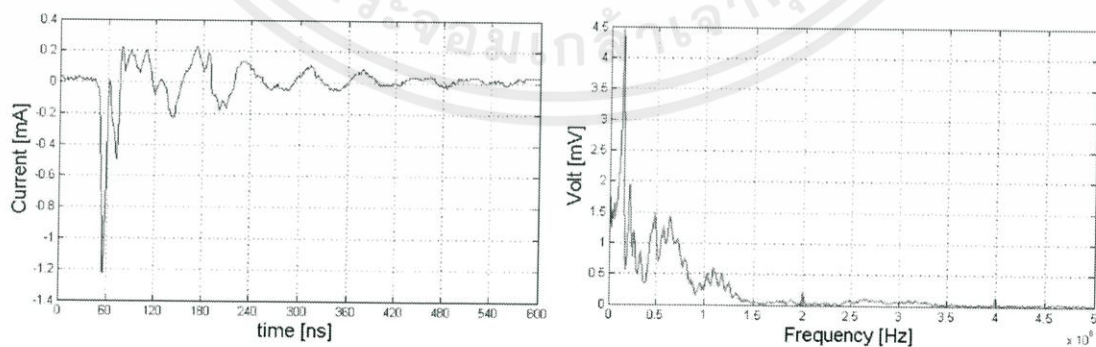
ช) การทดลองครั้งที่ 7

ครั้งที่ 8 ( $V_L = 18.8 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.21 \text{ mA}$



ช) การทดลองครั้งที่ 8

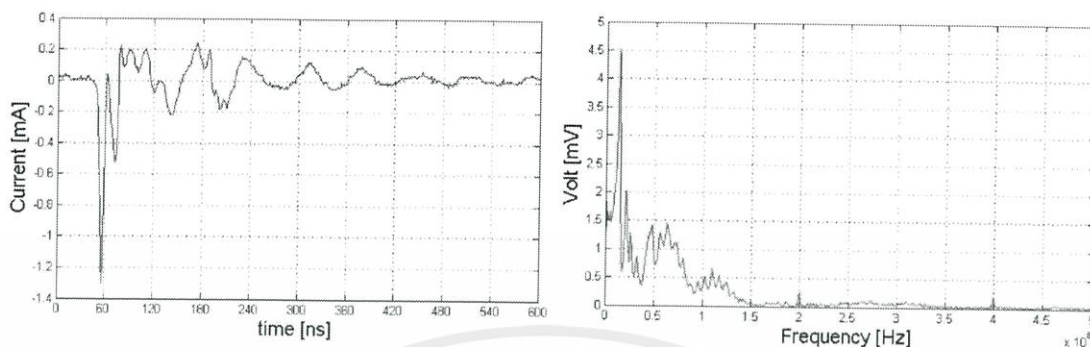
ครั้งที่ 9 ( $V_L = 18.6 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.22 \text{ mA}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใด ๆ ของเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ) การทดลองครั้งที่ 9

ครั้งที่ 10 ( $V_L = 18.9 \text{ kV}$ )  $I_{\text{peak}} = 1.29 \text{ mA}$



ญ) การทดลองครั้งที่ 10

รูปที่ 4.16 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ระยะแกป 1.5 cm. เมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงกับอิเล็กโทรดกราวนด์ ที่ระยะแกป 1.5 cm. ด้วยความต้านทานชั้นที่  $50 \Omega$  ที่ออกแบบสร้าง

การทดลองครั้งที่	$I_{\text{Peak}}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu\text{W}$ )	Energy ( $\mu\text{J}$ )	ช่วงความถี่
1	0.96	560	4.5	0.627	351	9 - 25
2	1.02	500	4.0	0.720	360	11 - 30
3	1.27	500	4.4	1.066	533	12 - 30
4	1.24	500	4.9	1.008	504	12 - 25
5	1.24	510	4.7	0.952	486	9 - 25
6	1.07	540	5.0	0.720	389	10 - 30
7	1.24	500	4.6	0.980	490	10 - 30
8	1.21	510	4.5	0.924	472	12 - 30
9	1.22	510	4.3	0.980	500	9 - 25
10	1.29	520	4.2	1.037	539	12 - 25

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โดยปกติภายในระบบสวิตช์เกียร์จะมีบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคตัวนำอิสระในระบบฉนวนอาจเกิดได้จากหลายๆ ปัจจัยเช่น เกิดจากการบำรุงรักษาระบบหรืออาจปะปนมากับก๊าซในการติดตั้ง การชำรุดของอุปกรณ์ภายในระบบจนทำให้มีเศษผงซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบของโลหะเกิดขึ้น จากข้างต้นทำให้ความสามารถในการฉนวนของก๊าซลดลงเนื่องจากอนุภาคที่เกิดขึ้นทำให้ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์สูงขึ้นเฉพาะจุด ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในที่สุด เป็นผลให้ระบบเกิดความเสียหาย ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงออกแบบการทดสอบเพื่อศึกษาแรงทางไฟฟ้าของสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์โดยใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode) โดยด้านหนึ่งป้อนแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อลงกราวด์ และตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จบางส่วนด้วยความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้างในขณะอนุภาคเริ่มยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์ และในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดแรงสูง จากนั้นนำรูปคลื่นสัญญาณของพัลส์กระแสดีสชาร์จมาหาค่าองค์ประกอบต่างๆ เช่น ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ ช่วงเวลาการเพิ่มขึ้นของพัลส์กระแสดีสชาร์จ (rise time) ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ (pulse duration) พลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จ และช่วงความถี่ของพัลส์กระแสดีสชาร์จที่มีอิทธิพลต่อค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถบ่งบอกกลไกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และระดับการเสื่อมสภาพของฉนวนได้ โดยที่ช่วงเวลาการเพิ่มขึ้นของพัลส์กระแสดีสชาร์จจะบ่งบอกถึงช่วงเวลาการเกิดอะวาลานซ์อิเล็กตรอน ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จจะบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ของพัลส์กระแสดีสชาร์จในการแพร่จากอิเล็กโทรดแรงสูงไปสู่อิเล็กโทรดกราวด์ ถ้าช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จมีค่ามากพอก็จะทำให้พัลส์กระแสดีสชาร์จสามารถแพร่จากอิเล็กโทรดแรงสูงไปสู่อิเล็กโทรดกราวด์ได้ และเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ รวมทั้งอัตราการเกิดซ้ำของพัลส์กระแสดีสชาร์จและช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จที่ทำให้ฉนวนอากาศแตกตัวเป็นไอออนนั้นหมายถึงอากาศสูญเสียสภาพความเป็นฉนวน จากการทดลองทั้ง 4 กรณีตามที่ได้ทดลองไว้ในบทที่ 4 พบว่า รูปคลื่นสัญญาณของพัลส์กระแสดีสชาร์จทั้ง 4 กรณีมีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยสิ่งที่มีความแตกต่างกันคือ ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จ ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ และค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จ โดยที่ระยะแกบเท่ากัน ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จในขณะที่อนุภาคเริ่มยกตัวมีค่าสูงกว่าตอนที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทั้งสองกรณีนี้มีช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จใกล้เคียงกัน ส่วนที่ระยะแกบต่างกันพบว่า ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแรงสูง ถ้าป้อนแรงดันสูงขึ้นเพื่อให้อนุภาคเริ่มยกตัวเมื่อมีระยะแกบเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่าพลังงาน

ของพัลส์กระแสดีซาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สรุปได้ว่า อนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงกับอิเล็กโตรดกราวด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อากาศเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนเนื่องจากการเกิดไอออนในเซชัน พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำให้อากาศเกิดไอออนในเซชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบจากการเกิดไอออนในเซชันตามปกติจากทฤษฎีทาวน์เซนต์ในระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบกับระนาบ ถ้าป้อนแรงดันสูงขึ้นไปจะทำให้พัลส์กระแสดีซาร์จเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีซาร์จมากขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานของการเคลื่อนที่ของอนุภาค ยิ่งป้อนแรงดันสูงขึ้นไปยิ่งทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีพลังงานสูงขึ้น และทำให้อากาศแตกตัวเกิดกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนกลุ่มใหญ่มากขึ้นตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ จนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด ปริมาณพันธะฉบับนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาพลังงานของพัลส์กระแสดีซาร์จที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) ที่ทำให้อิฉนวนแก๊ส SF<sub>6</sub> เสื่อมสภาพความเป็นฉนวนต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากการออกแบบและประกอบสร้างชุดวางวัสดุทดสอบยังไม่มี ความแม่นยำมากเท่าที่ควร เช่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบไม่มีความเป็นระนาบโดยแท้จริง จึงส่งผลให้อุณหภูมิวางอยู่บนอิเล็กโตรดกราวด์เกิดการเคลื่อนที่โดยไม่พึงประสงค์ ทำให้ค่าพัลส์กระแสดีซาร์จที่วัดได้นั้นเกิดความผิดพลาดได้

2) ค่าความต้านทานของความต้านทานชั้นที่ออกแบบสร้าง ควรมีค่าความต้านทานค่าคงที่เมื่อมีความถี่เพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงไป ถ้าค่าความต้านทานชั้นที่มีค่าคงที่ ผลของค่าที่วัดได้ก็จะมี ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3) ควรมีการสร้างเครื่องป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ ที่สามารถกำหนดค่าของแรงดันที่ต้องการได้ เนื่องจากเครื่องป้อนแรงดันที่ใช้ในการทดลอง ต้องขึ้นแรงดันด้วยวิธีการหมุน ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันจึงไม่คงที่ รวมถึงค่าของแรงดันที่ต้องการก็มีความคลาดเคลื่อนด้วยเช่นกัน

4) ในอนาคตถ้าโครงการนี้ได้รับเงินทุนมากขึ้น ก็อาจจำลองอุปกรณ์การทดสอบเพื่อให้อาจสามารถทดสอบการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจริงโดยการอัดแก๊ส SF<sub>6</sub> ในการทดสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ABB company. “GIS ELK-14 – the modular system for gas-insulated switchgear up to 300kV”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/9af6bccabda35c6bc1257956003aaf12/file/ELK-14\\_14\\_300\\_1HC0008262AKEEn.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/9af6bccabda35c6bc1257956003aaf12/file/ELK-14_14_300_1HC0008262AKEEn.pdf) [ 10 กันยายน 2554 ]
- [2] K. Sakai, S. Tsuru, D.L. Abella, and M. Hara, “Conducting Particle Motion and Particle-initiated Breakdown in dc Electric Field Between Diverging Conducting Plates in Atmospheric Air”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 No. 1, 1999 February, 122-130.
- [3] Koh-ichi Sakai, Dan Labrado Abella, Junya Suehiro and Masanori Hara, “Charging and Behavior of a Spherically Conducting Particle on a Dielectrically coated Electrode in the Presence of Electrical Gradient Force in Atmospheric Air”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9 No. 4, 2002 August, 577-587.
- [4] Sven P. Hornfeldt, “Lifting Force on Metallic Particles in GIS System”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13 No. 4, 2006 August, 838-841.
- [5] ธนัย อินทรใจเอื้อ และคณะ, “การศึกษาการแยกประเภทของการเกิดพาร์เชียลดีสชาร์จ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [6] พีรพงษ์ แทนหิน และคณะ, “การศึกษาผลของสัญญาณรบกวนต่อการวัดดีสชาร์จบางส่วน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [7] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, พิมพ์ครั้งที่ 3, พ.ศ. 2549.
- [8] ผศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] Working Group D1.33, “Guide For Partial Discharge Measurements In Compliance To IEC 60270 ”, 2008 December.
- [10] P. Norasage, “Partial Discharge Inception Voltage Characteristics Of Mineral Oil”, 2008 December.
- [11] H. Okubo, N. Hayakawa and A. Matsushita, “The Relationship Between Partial Discharge Current Pulse Waveforms and Physical Mechanisms”, 2002 May/June.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

### THE STUDY OF MOVEMENT OF PARTICLE UNDER DC ELECTRIC FIELD

นายฐานพวงศ์ ชัยสุราษฎร์<sup>1</sup> นายณิธิพัฒน์ โรจนเรืองไชย<sup>2</sup> นายณรงค์เดช โทธีมล<sup>3</sup> นายณรงค์ฤทธิ์ ศิริกุล<sup>4</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมจุกุณฑลนครราชสีมา

เลขที่ 1 ซอย จลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email : Narongrit\_nt@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการศึกษาแรงทางไฟฟ้าของสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้อนุภาคยกตัวจากอิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบ (plane-plane electrode) พร้อมตรวจจับพัลส์กระแสดีเอสอาร์บางส่วนที่เกิดจากอนุภาคเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงกับอิเล็กโทรดกราวด์ด้วยความดันทานชั้นที่ได้ออกแบบสร้าง โดยแบ่งการทดสอบเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทดลองที่ระยะแกป 1 cm. ทำการตรวจจับพัลส์กระแสดีเอสอาร์พัลส์แรกที่เกิดจากอนุภาคเริ่มยกตัว กรณีที่ 2 ทดลองที่ระยะแกป 1 cm. ทำการตรวจจับพัลส์กระแสดีเอสอาร์ในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดแรงสูง กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ แต่เปลี่ยนระยะแกปเป็น 1.5 cm. ผลการทดลองพบว่า รูปคลื่นสัญญาณพัลส์กระแสดีเอสอาร์ที่ระยะแกปทั้ง 2 มีลักษณะไม่แตกต่างกัน สิ่งที่แตกต่างกันคือ ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีเอสอาร์ ระยะเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีเอสอาร์ (pulse duration) และค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีเอสอาร์ (energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดแรงสูง บทความฉบับนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาพลังงานของพัลส์กระแสดีเอสอาร์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) ที่ทำให้เกิด SF<sub>6</sub> เสื่อมสภาพความเป็นฉนวนต่อไป

**คำสำคัญ:** พัลส์กระแสดีเอสอาร์, ระยะเวลาเกิดพัลส์กระแสดีเอสอาร์, พลังงานพัลส์กระแสดีเอสอาร์

#### Abstract

A paper studies the electrical force of DC electrical field which is able to lift the particle from plane-plane electrode and detects PD current pulse originated from the movement of particle in the plane-plane electrode with 50 Ω shunt-resistance. The test is grouped into 4 cases: (1) To detect the first PD current pulse when the particle begins lifting from ground electrode system (2) To detect PD current pulse

while the particle is moving between high-voltage and grounded electrode. The other cases are similar to those ones, but gap distance is changed from 1 cm. to 1.5 cm. The tests can conclude that the PD current pulse of both gap distances normally are not much different in shapes, but different in each components of PD current pulse such as amplitude, time duration and energy of PD pulse current which are depended on the voltage supplying to plane-plane electrode. This fundamental study could be applied for the movement of particle in GIS (gas insulated system) which leads to degradation of SF<sub>6</sub> insulation

Keyword: PD pulse current, Time duration, Energy of PD pulse current

#### 1. บทนำ

ภายในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) จะมีบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับโครงสร้างและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น ถ้าหากมีอนุภาคตัวนำอิสระในระบบฉนวนซึ่งอาจเกิดได้จากหลายๆ ปัจจัย เช่น เกิดจากการบำรุงรักษาระบบ หรือเกิดจากการชำรุดของอุปกรณ์ภายในระบบ สนามไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของอนุภาคตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำต่ออนุภาคตัวนำ โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่อยู่ระหว่างตัวนำกับตัวโครงกราวด์ของระบบ GIS เหตุการณ์ดังกล่าวจะทำให้ความสามารถในการฉนวนของแก๊สลดลงเนื่องจากการเกิดดีเอสอาร์บางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

#### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัวขึ้นจากอิเล็กโทรดกราวด์  $V_L$  คือ

$$V_L = 0.5d \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการศึกษานานาชาติ โดยอนุภาคตัวนำอิสระในระบบฉนวนแก๊ส GIS (gas insulated system) ที่ทำให้เกิด SF<sub>6</sub> เสื่อมสภาพความเป็นฉนวนต่อไป

เมื่อ a คือ รัศมีของอนุภาคค้ำน้ำ (m)

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

$\epsilon_s$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งเท่ากับ 1.0 สำหรับอากาศ

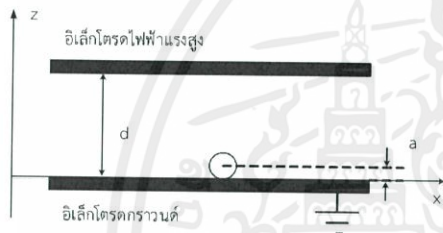
G คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ  $9.8 \text{ m/s}^2$

D คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดด้านแรงสูงกับอิเล็กโทรดด้านกราวนด์

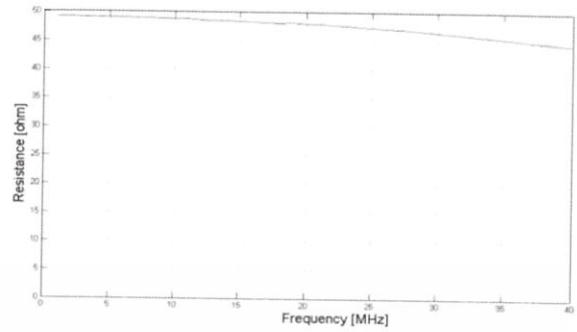
$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  $\rho_p = 7878 \text{ kg/m}^3$  สำหรับเหล็ก

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของตัวกลางโดยรอบ  $\rho_s = 1.184 \text{ kg/m}^3$  สำหรับอากาศ

$V_L$  คือ แรงดันที่ทำให้อนุภาคเริ่มยกตัว (V)



รูปที่ 1 ระบบอิเล็กโทรดและอนุภาคที่ใช้พิจารณา



รูปที่ 2 กราฟค่าความต้านทานของพลาสมาที่ความถี่เพิ่มขึ้น

### 3.2 การทดสอบตรวจจับพัลส์กระแสดีเอสอาร์ด้วยความต้านทานที่ได้ออกแบบสร้าง

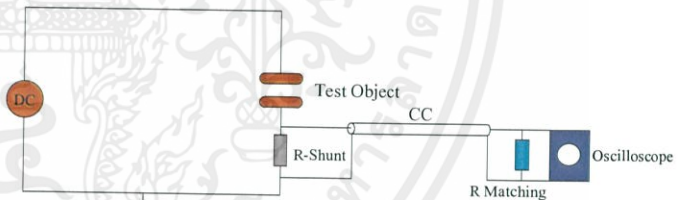
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) DC Transformer 600 kV, 10 mA
- 2) Universal Voltage Divider/Rated Voltage 100 kV
- 3) R Shunt ขนาด  $50 \Omega$
- 4) อนุภาครวมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm.
- 5) Oscilloscope RIGOL 100 MHz 2GSa/s
- 6) สายวัดสัญญาณ RG8
- 7) แท่นวางวัสดุทดสอบ

### 3. การออกแบบการทดสอบ

#### 3.1 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่ได้ออกแบบสร้าง

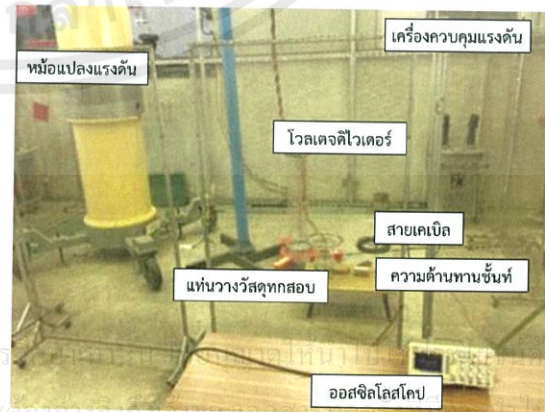
กระบวนการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานชั้นที่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจากค่าความถี่ 1 MHz - 40 MHz โดยใช้เครื่องทดสอบการตอบสนองความถี่ โดยจะต่อวงจรตาม รูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลการทดสอบ



รูปที่ 3 การทดสอบการตอบสนองความถี่ของความต้านทานชั้นที่



รูปที่ 5 วงจรการทดสอบ

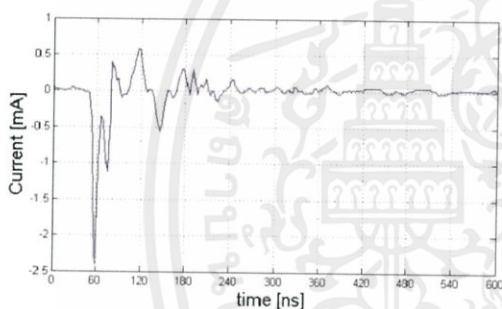
4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบเพื่อตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จที่เกป 1 cm.

4.1.1 เมื่ออนุภาคเริ่มขกตัวจากอิเล็กโตรครราวน์ดที่ระยะเกป 1 cm. โดยตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์ม - แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มขกตัว 13.0 kV

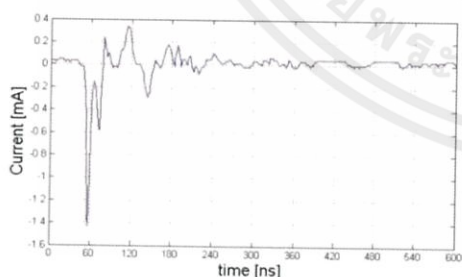


รูปที่ 6 อนุภาคเริ่มขกตัวจากระนาบกราวด์เกป 1.0 cm..



รูปที่ 7 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จขณะอนุภาคเริ่มขกตัว

4.1.2 เมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรครราวน์ดที่ระยะเกป 1 cm. โดยตรวจจับผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์ม



รูปที่ 8 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จเมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรคร

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของพัลส์กระแสดีสชาร์จที่ระยะเกป 1.0 cm.

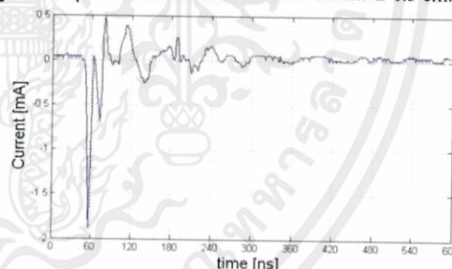
ตำแหน่งอนุภาค	$I_{Peak}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu$ W)	Energy ( $\mu$ J)	ช่วงความถี่ (MHz)
เริ่มขก	2.40	250	8.5	3.864	966	10 - 25
ระหว่างอิเล็กโตรคร	1.44	260	5.2	1.185	308	10 - 30

4.2 การทดสอบเพื่อตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จที่เกป 1.5 cm.

4.2.1 เมื่ออนุภาคเริ่มขกตัวจากอิเล็กโตรครราวน์ดที่ระยะเกป 1.5 cm. โดยตรวจจับพัลส์กระแสดีสชาร์จผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์ม - แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มขกตัว 19.0 kV

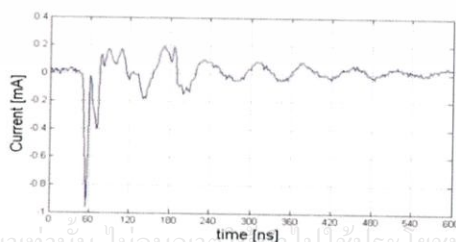


รูปที่ 9 อนุภาคเริ่มขกตัวจากระนาบกราวด์เกป 1.5 cm..



รูปที่ 10 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จขณะอนุภาคที่เริ่มขก

4.2.2 เมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรครราวน์ดที่ระยะเกป 1.5 cm. โดยตรวจจับผ่านความต้านทานชั้นที่ขนาด 50 โอห์ม



รูปที่ 11 กราฟพัลส์กระแสดีสชาร์จเมื่ออนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 องค์ประกอบพัลส์กระแสดีสชาร์จที่ระยะแกป 1.5 cm.

ตำแหน่งอนุภาค	$I_{Peak}$ (mA)	Pulse Duration (ns)	Rise Time (ns)	Power ( $\mu$ W)	Energy ( $\mu$ J)	ช่วงความถี่ (MHz)
เริ่มยก	1.8	510	6.0	2.691	1372.5	10-25
ระหว่างอิเล็กโตรด	0.96	560	4.5	0.627	351	10-25

## 5. การสรุปผล

ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณพัลส์กระแสดีสชาร์จในแต่ละกรณีมีลักษณะไม่แตกต่างกันมาก โดยสิ่งที่มีค่าแตกต่างกันคือ ค่าสูงสุดของพัลส์ กระแสดีสชาร์จ ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ และค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จ โดยที่ระยะแกปเท่ากัน ค่าสูงสุดของพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จในขณะที่อนุภาคเริ่มยกตัวมีค่าสูงกว่าตอนที่อนุภาคกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดกราวนด์กับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งทั้งสองกรณีนี้มีช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จใกล้เคียงกัน ส่วนที่ระยะแกปต่างกันพบว่า ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จ และค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโตรดแรงสูง ถ้าป้อนแรงดันสูงขึ้นเพื่อให้อนุภาคเริ่มยกตัวเมื่อมีระยะแกปเพิ่มขึ้น จะทำให้ช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จและค่าพลังงานของพัลส์กระแสดีสชาร์จมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สรุปได้ว่า อนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงกับอิเล็กโตรดกราวนด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อากาศเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนเนื่องจากการเกิดไอออนในเซชัน พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคทำให้อากาศเกิดไอออนในเซชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบจากการเกิดไอออนในเซชันตามปกติ จากทฤษฎีทาวน์เซนดในระบอบอิเล็กโตรดแบบระนาบกับระนาบ โดยป้อนแรงดันสูงขึ้นจะทำให้พัลส์กระแสดีสชาร์จเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีช่วงเวลาการเกิดพัลส์กระแสดีสชาร์จเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานของการเคลื่อนที่ของอนุภาค ถ้าป้อนแรงดันสูงขึ้นยังทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีพลังงานสูงขึ้น และทำให้อากาศแตกตัวเกิดกลุ่มหมอกอิเล็กโตรนกลุ่มใหญ่มากขึ้นตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ จนนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้ในที่สุด

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรณเรศฐ พัฒนเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท และรองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุษวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้ข้อเสนอแนะ

และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะคุณบุษยพล เพาพาน และคุณบัญญัติ ลีลาจรีกุล รวมไปถึงคุณเพทาย นิมสนอง ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ABB company. "GIS ELK-14 – the modular system for gas insulated switchgear up to 300kV". 10 กันยายน 2554.
- [2] K. Sakai, S. Tsuru, D.L. Abella, and M. Hara. "Conducting Particle Motion and Particle-initiated Breakdown in de Electric Field Between Diverging Conducting Plates in Atmospheric Air". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 No. 1, 1999 February, 122-130.
- [3] Koh-ichi Sakai, Dan Labrado Abella, Junya Suehiro and Masanori Hara. "Charging and Behavior of a Spherically Conducting Particle on a Dielectrically coated Electrode in the Presence of Electrical Gradient Force in Atmospheric Air". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9 No. 4, 2002 August, 577-587.
- [4] Sven P. Hornfeldt. "Lifting Force on Metallic Particles in GIS System". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13 No. 4, 2006 August, 838-841.
- [5] ธนัย อินทรใจเอื้อ และคณะ. "การศึกษาการแยกประเภทของการเกิดพาร์เซิลดีสชาร์จ". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [6] พีรพงษ์ แทนหิน และคณะ. "การศึกษาผลของสัญญาณรบกวนต่อการวัดดีสชาร์จบางส่วน". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [7] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 3, พ.ศ. 2549.
- [8] ผศ.ดร. บรรณเรศฐ พัฒนเดช. "วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า". ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] Working Group D1.33. "Guide For Partial Discharge Measurements In Compliance To IEC 60270 ". 2008 December.
- [10] P. Norasage. "Partial Discharge Inception Voltage Characteristics Of Mineral Oil". 2008 December.

## ประวัติผู้เขียน



นายฐาปนพงศ์ ชัยสุราษฎร์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2535 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนิคมศิลป์อนุสรณ์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: thapanapong\_teem@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอธัญบุรี



นายณิพัฒน์ โรจนเรืองไชย เกิดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนโรงเรียนสุนทรวิทย์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: natepat.roj@gmail.com

สถานที่ฝึกงาน: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกรุงเทพฯ



นายณรงค์เดช โพธิ์มิล เกิดเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ.2534 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนช่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: intuitivewisdom.np@gmail.com

สถานที่ฝึกงาน: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกรุงเทพฯ



นายณรงค์ฤทธิ์ ศิริกุล เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ.2535 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: Narongrit\_nt@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: บริษัท บีทีอี จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้