

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติของแพกเตอร์สนามไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงและกระแสสลับ

The Study of field utilization factor under DC and AC condition



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72190
วัน,เดือน,ปี 12 ส.ย. 2550

b. 117 61520
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาคูณสมบัติของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและ
กระแสสลับ

The Study of field utilization factor under DC and AC condition



โดย
นายทววรรษ จันทวิมล
นายธนวิษ โปธิรุกษ์
นายพีระ ประยูรพิทักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช

ดร.วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของแพกเตอร์สนามไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
และกระแสสลับ

ผู้จัดทำ

- 
- 1.นายทวารธ จันทวิมล
 - 2.นายธนวิษ โปธิรุกข์
 - 3.นายพีระ ประยูรพิทักษ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและ กระแสสลับ

นายทววรรษ จันทวิมล
นายธนวิษ โปธิรุกษ์
นายพีระ ประยูรพิทักษ์
อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

การศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า จะสามารถศึกษาได้จากแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ โดยให้อากาศเป็นฉนวน ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้รายงานถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงและกระแสสลับของฉนวนอากาศ โดยจะพิจารณาจากลักษณะรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ – ระนาบ, ทรงกลม – ระนาบ, ร็อด – ระนาบ, ทรงกลม – ทรงกลม โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่ 0.5 ซม. ถึง 2.0 ซม. ในขั้นต้นได้เริ่มจากการทำนายการเกิดเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิด ด้วยการจำลองจากโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ จากนั้นได้ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ทดลอง การออกแบบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์และกล่องทดสอบได้ยึดแนวทางตามมาตรฐาน IEC 60052 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งจากการวิจัยพบว่าลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ ระยะแกป และขนาดของอิเล็กทรอนิกส์จะมีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า โดยในกรณีลักษณะอิเล็กทรอนิกส์นั้นพบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ – ระนาบ จะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าดีที่สุด และแบบร็อด – ระนาบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยที่สุดในกรณีของระยะแกปพบว่าที่ระยะแกปที่กว้างจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่ำ และที่ระยะแกปแคบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับผลของขนาดอิเล็กทรอนิกส์พบว่าเมื่ออิเล็กทรอนิกส์มีขนาดโตขึ้นก็จะมีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน และจะพบว่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าคือสิ่งที่บ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าในอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอจะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of field utilization factor under DC and AC condition

Tawawat Chantawimol

Taniwach Potiruk

Peera Prayoonpitak

Norasage Pattanadech Advisor

Dr.Vuttichai Chatpattananan Advisor

Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul Advisor

2006

ABSTRACT

The study of causes that effect to field utilization factor can be studied from the breakdown voltage which occurs from different types of electrodes that use the air as the insulator. This thesis represents the study of causes that effect to the breakdown voltage under DC and AC condition in the air insulator by determining the figures to tested electrodes: plane-plane, sphere-plane, rod-plane, sphere-sphere with gap spacing from 0.5 cm. to 2.0 cm. The breakdown and corona inception voltage of the test sample was predicted from the electric field phenomena of each test object obtained from finite element program. Designing electrodes and testing box are followed by the IEC 60052. The breakdown voltage from the experiments was compared with the prediction results. It was found that the shapes of the electrode, the gaps, and the sizes of the electrodes affect on the field utilization factor. In the case of the dimension of the electrodes, the electrodes in plane-plane figure give the best field utilization factor and the rod-plane figure give the least field utilization factor. For the gap spacing, the width gap spacing give a low value of the field utilization factor being opposite for the narrow ones. For the electrode sizes, the larger electrodes, the more utilization factors. Besides, the higher uniform field, the higher breakdown voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายทางผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ โดยเฉพาะอาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่คอยดูแลและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด คอยแนะนำข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อปริญญาานิพนธ์ ให้คำชี้แนะ แนะนำ แสดงความคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ พร้อมกันนี้ยังได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปริญญาานิพนธ์และการนำเสนอซึ่งมีในช่วงปลายภาคเรียนทั้งสองภาคเรียน ผู้จัดทำจึงสามารถจัดทำปริญญาานิพนธ์ที่สมบูรณ์ขึ้นมาได้ ทั้งนี้ผู้จัดทำจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นพี่ในห้องโครงการ ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล พร้อมทั้งความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาานิพนธ์

ผู้จัดทำขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณณ์และข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบและการประกอบสร้าง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักหอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน และทุกท่านที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือแนะนำด้านอื่น ๆ รวมไปถึงการจัดหาอุปกรณณ์ต่างๆ จนทำให้โครงการสำเร็จลงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุรพคณาจารย์ทุกท่าน ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านแก่ผู้จัดทำ ทางผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration).....	4
2.2 การเบรกดาวนในก๊าซ	8
2.2.1 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ.....	8
2.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ.....	9
2.2.3 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนในก๊าซ.....	9
2.2.4 การคำนวณแรงดันเบรกดาวนในอากาศ.....	11
2.3 แฟกเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน.....	12
2.4 อิเล็กโตรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile).....	12
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element).....	14
2.5.1 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์.....	14
2.5.2 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (FINITE ELEMENT: FEM).....	14
2.5.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์อีลิเมนต์.....	14
2.5.4 ข้อดีและข้อเสียของไฟไนต์อีลิเมนต์(FEM).....	16
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดสอบ.....	17
3.1 การออกแบบอิเล็กโตรด.....	17
3.1.1 อิเล็กโตรดแบบทรงกลม (Sphere).....	18
3.1.2 อิเล็กโตรดแบบร็อด (Rod).....	19
3.1.3 อิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile).....	20
3.2 การออกแบบกล่องทดสอบ.....	21
3.3 ไมโครมิเตอร์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.4	กำหนดกรบอบอกสำหรับติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์.....	23
3.5	ข้อที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง.....	24
3.6	ตัวอย่างรูปแบบชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์น.....	25
3.6.1	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ...	25
3.6.2	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ	26
3.6.3	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบ.....	27
บทที่ 4	การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	28
4.1	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์...	29
4.1.1	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ระนาบ-ระนาบ.....	29
4.1.2	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ทรงกลม-ทรงกลม.....	31
4.1.3	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ทรงกลม-ระนาบ.....	35
4.1.4	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบ รีด-ระนาบ.....	41
4.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด.....	43
4.2.1	เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง.....	43
4.2.2	ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	43
4.2.3	หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ.....	44
4.2.4	หม้อแปลงสำหรับทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	44
4.2.5	ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับทดสอบ PD.....	45
4.2.6	เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101.....	45
4.2.7	คาปาซิเตอร์ปรับเทียบ.....	46
4.2.8	โวลเตจดีไวเดอร์.....	46
4.2.9	สายนำส่งแรงสูง.....	47
4.2.10	สายเคเบิลวัด.....	47
4.2.11	ตะขอกราวน์.....	48
4.2.12	ตัวต้านทานน้ำ.....	48
4.2.13	โวลต์มิเตอร์.....	49
4.2.14	อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.15 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนและโคโรนาเริ่มเกิด.....	50
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	50
4.3.1 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนกระแสตรง.....	50
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนกระแสสลับ.....	52
4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบการเกิด PD (ทดสอบหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด)	54
4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	62
4.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนและโคโรนาเริ่มเกิด.....	62
4.4.2 วิเคราะห์ค่าแรงดันเบรกดาวนและโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง.....	75
4.4.3 วิเคราะห์ถึงคุณลักษณะขององค์ประกอบที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า.....	77
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุป.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำงาน.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element).....	90
ภาคผนวก ข แบบและภาพร่างของอีเล็กโตรดที่ใช้ในการทดลอง.....	93
ภาคผนวก ค การคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อทำนายการเกิดเบรกดาวนและโคโรนาเริ่มเกิด.....	100
ภาคผนวก ง การปรับเทียบแรงดันสูง-ต่ำของหม้อแปลง เพื่อใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน.....	105
ภาคผนวก จ เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม.....	119
กิตติกรรมประกาศ.....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....	4
2.2	การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนไนไดอิเล็กทรอนิกส์ตามลักษณะทางไฟฟ้า.....	5
2.3	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....	6
2.4	สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ 1 ซม. แรงดันที่ป้อนเท่ากับ 25 กิโลโวลต์ ชนิดของอิเล็กทรอนิกส์คือทองแดง.....	7
2.5	ระยะเวลาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	10
2.6	เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กทรอนิกส์ระนาบธรรมดาขนานกัน.....	13
2.7	การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี.....	13
2.8	วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ.....	15
2.9	การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ต่างๆ.....	16
3.1	อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม.....	18
3.2	อิเล็กทรอนิกส์แบบรีด.....	19
3.3	การออกแบบลักษณะอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี.....	20
3.4	อิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกีแบบระยะแกป 2 ซม.....	20
3.5	ลักษณะของกล่องทดสอบ.....	21
3.6	ลักษณะของส่วนบนและส่วนล่างของกล่องทดสอบ.....	22
3.7	ลักษณะของไมโครมิเตอร์.....	23
3.8	ลักษณะของก้านด้านบนและก้านด้านล่าง.....	24
3.9	ลักษณะของขั้วที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง.....	24
3.10	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ.....	25
3.11	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบที่ได้จากการประกอบสร้าง.....	25
3.12	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบที่ได้จากการออกแบบ.....	26
3.13	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบที่ได้จากการประกอบสร้าง.....	26
3.14	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบที่ได้จากการออกแบบ.....	27
3.15	ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบที่ได้จากการประกอบสร้าง.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	29
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกปของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม..	30
4.3 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร.....	31
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	32
4.5 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร.....	33
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	34
4.7 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	35
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	36
4.9 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	37
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	38
4.11 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	40
4.13 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร รีดปลายแหลมมี เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	41
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของ อิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ โดยรีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.....	42
4.15 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง พิกัด 220 V / 600 kV 10 mA.....	43
4.16 ตู้ควบคุมแรงดัน.....	43
4.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV 50 mA.....	44
4.18 หม้อแปลงทดสอบการเกิดดีสชาร์จ.....	44
4.19 ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับทดสอบ PD.....	45
4.20 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101.....	45
4.21 คาปาซิเตอร์ปรับเทียบ.....	46
4.22 RC โวลเตจดีไวเดอร์ AC 100 kV, DC 100 kV.....	46
4.23 สายนำส่งแรงสูง.....	47
4.24 สายเคเบิล.....	47
4.25 ตะขอราวน์.....	48
4.26 ตัวต้านทานน้ำ.....	48
4.27 โวลต์มิเตอร์.....	49
4.28 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง.....	49
4.29 ชุดทดสอบ.....	50
4.30 วงจรการทดลองการเกิดเบรกดาวน์ (กระแสตรง).....	50
4.31 วงจรการทดสอบจริงการเกิดเบรกดาวน์ (กระแสตรง).....	51
4.32 วงจรการทดลองการเกิดเบรกดาวน์ (กระแสสลับ).....	52
4.33 วงจรการทดสอบจริงการเกิดเบรกดาวน์ (กระแสสลับ).....	53
4.34 วงจรการทดลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	54
4.35 วงจรการทดสอบจริงการเกิดดีสชาร์จบางส่วน.....	55
4.36 โครนาเริ่มเกิดของอิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ ระยะแกป 2 เซนติเมตร ที่แรงดัน 4.93 กิโลโวลต์.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 โครโมนาเริ่มเกิดของอิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ ระยะแกป 1 เซนติเมตรที่แรงดัน 4.19 กิโลโวลต์.....	59
4.38 รีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร ทดสอบหาแรงดันโครโมนาเริ่มเกิด.....	60
4.39 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ.....	61
4.40 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม.....	61
4.41 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ.....	61
4.42 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ.....	61
4.43 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 27.43 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	62
4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	63
4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	64
4.46 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 29.52 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร.....	65
4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบ ทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	66
4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบ ทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	67
4.49 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 29.39 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	68
4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	เนื้อหา	หน้า
4.51	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	70
4.52	ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายแหลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 7.25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 2 เซนติเมตร รีดปลายแหลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร.....	71
4.53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายแหลม-ระนาบ โดยรีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 2 ซม.(แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด).....	72
4.54	กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กโตรดที่ระยะแกปต่างๆ (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ).....	81
4.55	กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ(ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ).....	82
4.56	กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม(ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ).....	83
4.57	กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโตรดแบบรีด-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ).....	83
ผ.ก.1	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโตรดแบบระนาบ – ระนาบ.....	90
ผ.ก.2	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโตรดแบบทรงกลม – ระนาบ.....	91
ผ.ก.3	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโตรดแบบรีด – ระนาบ.....	91
ผ.ก.4	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบต่างๆ.....	92
ผ.ข.1	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม.....	93
ผ.ข.2	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม.....	94
ผ.ข.3	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม.....	95
ผ.ข.4	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม....	96
ผ.ข.5	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม....	97
ผ.ข.6	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง1 ซม.	98
ผ.ข.7	แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟส์ที่ระยะแกป 2 ซม.....	99
ผ.ค.1	กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม้าเสมอ.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
ผ.ค.2	กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบที่ 1).....	102
ผ.ค.3	กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบที่ 2).....	103
ผ.ค.4	กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ.....	103
ผ.ง.1	เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงพิกัด 220 V / 600 kV 10 mA.....	105
ผ.ง.2	ตัวต้านทานน้ำ.....	106
ผ.ง.3	RC โวลเตจดีไวเดอร์ AC 100 kV , DC 100 kV.....	106
ผ.ง.4	กิโลโวลต์มิเตอร์.....	107
ผ.ง.5	สายเคเบิลวัด.....	107
ผ.ง.6	โวลต์มิเตอร์.....	108
ผ.ง.7	ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	108
ผ.ง.8	สายนำส่งแรงสูง.....	109
ผ.ง.9	ตะขอกราวน์.....	109
ผ.ง.10	วงจรปรับเทียบแรงดันสูง-ต่ำ ไฟฟ้ากระแสตรง.....	110
ผ.ง.11	การต่อวงจรในส่วนของการวัดแรงดันสูง.....	110
ผ.ง.12	กราฟแสดงผลการปรับเทียบแรงดันสูง-ต่ำกระแสตรง โดยให้แรงดันต่ำอยู่ที่แกน x และแรงดันสูงอยู่ที่แกน y.....	112
ผ.ง.13	หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV 50 mA.....	112
ผ.ง.14	ตัวต้านทานน้ำ.....	113
ผ.ง.15	RC โวลเตจดีไวเดอร์ AC 100 kV , DC 100 kV.....	113
ผ.ง.16	กิโลโวลต์มิเตอร์.....	114
ผ.ง.17	สายเคเบิล.....	114
ผ.ง.18	ออสซิลโลสโคป.....	115
ผ.ง.19	รูปคลื่นแรงดันทางด้านแรงสูง.....	115
ผ.ง.20	วงจรปรับเทียบแรงดันสูง-ต่ำ ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	116
ผ.ง.21	กราฟแสดงผลการปรับเทียบแรงดันสูง-ต่ำกระแสสลับ โดยให้แรงดันต่ำอยู่ที่แกน x และแรงดันสูงอยู่ที่แกน y.....	118
ผ.จ.1	กราฟความชื้นสัมบูรณ์อากาศ.....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม.....	2
3.1	ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม.....	18
3.2	ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด.....	19
4.1	ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	56
4.2	ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	57
4.3	ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่สภาวะมาตรฐาน.....	59
4.4	ค่าพื้นที่ได้กราฟของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	73
4.5	ค่า K ของอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	73
4.6	ค่าพื้นที่ได้กราฟของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	74
4.7	ค่า K ของอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	74
4.8	เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	75
4.9	เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	76
4.10	เปรียบเทียบค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง.....	77
4.11	สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสตรง).....	77
4.12	สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสสลับ).....	79
4.13	สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดสภาวะมาตรฐานและค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ และระยะแกปต่างๆ.....	80
ผ.ง.1	ผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	111
ผ.ง.2	ผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการออกแบบฉนวนหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้เรื่องของสนามไฟฟ้าเป็นอย่างดี ความสามารถในการใช้งานสนามไฟฟ้า (field utilization factor) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบ ผู้ออกแบบจะต้องพยายามออกแบบให้สัมประสิทธิ์การใช้งานสนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด เพราะจะทำให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเต็มที่และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ยาวนานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความรู้ในเรื่องการใช้งานสนามไฟฟ้ายังมีอยู่น้อยมาก โดยเฉพาะที่นำมาเผยแพร่สู่สาธารณะ

ทางกลุ่มผู้จัดทำจึงทำการศึกษาค้นคว้าองค์ประกอบที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งองค์ประกอบที่ได้ทำการศึกษานั้นจะช่วยให้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณลักษณะขององค์ประกอบที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการทำนายค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสมมาตร ไม่สมมาตรเล็กน้อยและค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของสนามไฟฟ้าไม่สมมาตรสูง
- 3) เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element)
- 4) เพื่อศึกษาและสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

- 1) ทดลองและจำลองการเกิดเบรกดาวน์โดยให้มีแรงดันไม่เกิน 50 กิโลโวลต์
- 2) ใช้โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ, ทรงกลม-ระนาบ, ทรงกลม-ทรงกลมและรีด-ระนาบ
- 3) ทดลองและประเมินผลการออกแบบสร้างหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ, ทรงกลม-ระนาบ, ทรงกลม-ทรงกลมและรีด-ระนาบ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEM โดยผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาปรับแก้โดยใช้แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสภาวะห้องทดลองให้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ทดลองและวิเคราะห์หาพฤติกรรมของค่าการใช้งานสนามไฟฟ้าของ อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ, ทรงกลม-ระนาบ, ทรงกลม-ทรงกลมและรีด-ระนาบ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและจำลอง
- 3) ทำการจำลองโครงการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเก็บข้อมูล
- 4) ออกแบบ สร้างแบบจำลอง ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดลอง
- 5) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานในโครงการวิศวกรรม

วิธีการดำเนินงาน	พ.ศ.2549						พ.ศ.2550			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) ศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและการทดสอบที่เกี่ยวข้อง	←-----→		←-----→							
2) ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและจำลอง		←-----→		←-----→						
3) ทำการจำลองโครงการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเก็บข้อมูล				←-----→		←-----→				
4) ออกแบบสร้างแบบจำลอง ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดลอง						←-----→		←-----→		
5) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง							←-----→			
							←-----→			

หมายเหตุ ←-----→ วางแผน

 ←-----→ ทำจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

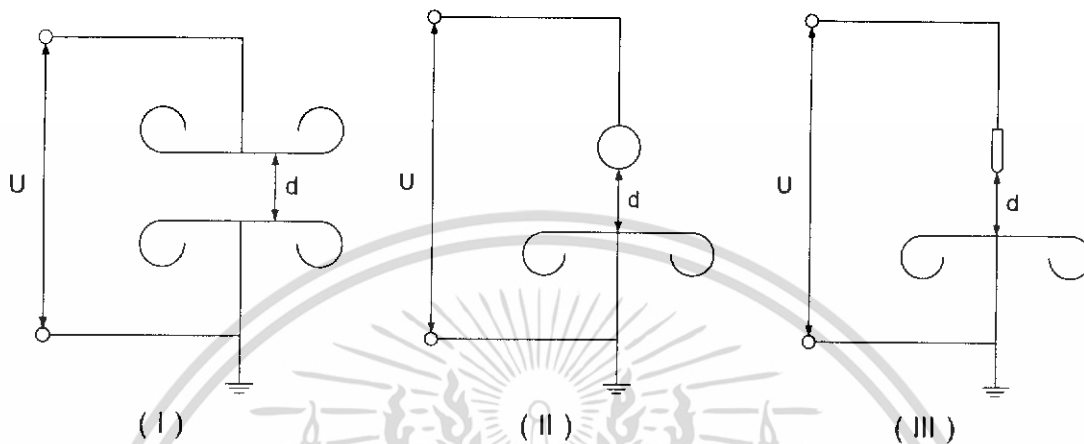
- 1) สามารถทำนายการเกิดเบรกดาวน์ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ต่าง ๆ จากการสังเกตสนามไฟฟ้าได้
- 2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงให้มีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการในอนาคต
- 3) สามารถพัฒนาคุณลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้
- 4) ได้ฝึกฝนทักษะการแก้ปัญหาในการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า (electric field configuration)



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- I: สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- II: สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)
- III: สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

โดยทั่วไป ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 2.1

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์นจะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์นจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ เช่น ระยะแกป, รูปลักษณะอิเล็กโตรด, ขนาดของอิเล็กโตรด เป็นต้น

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ(I)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

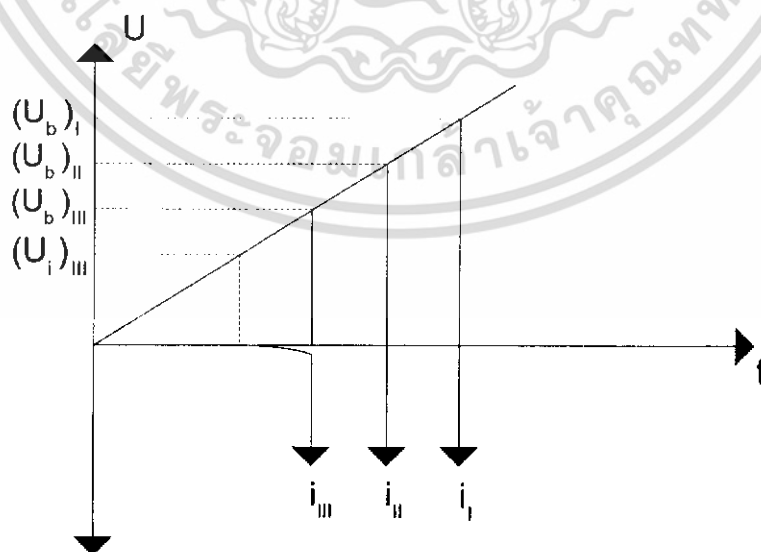
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาวน์นี้ก็คือค่าความคงทนทางไฟฟ้า (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

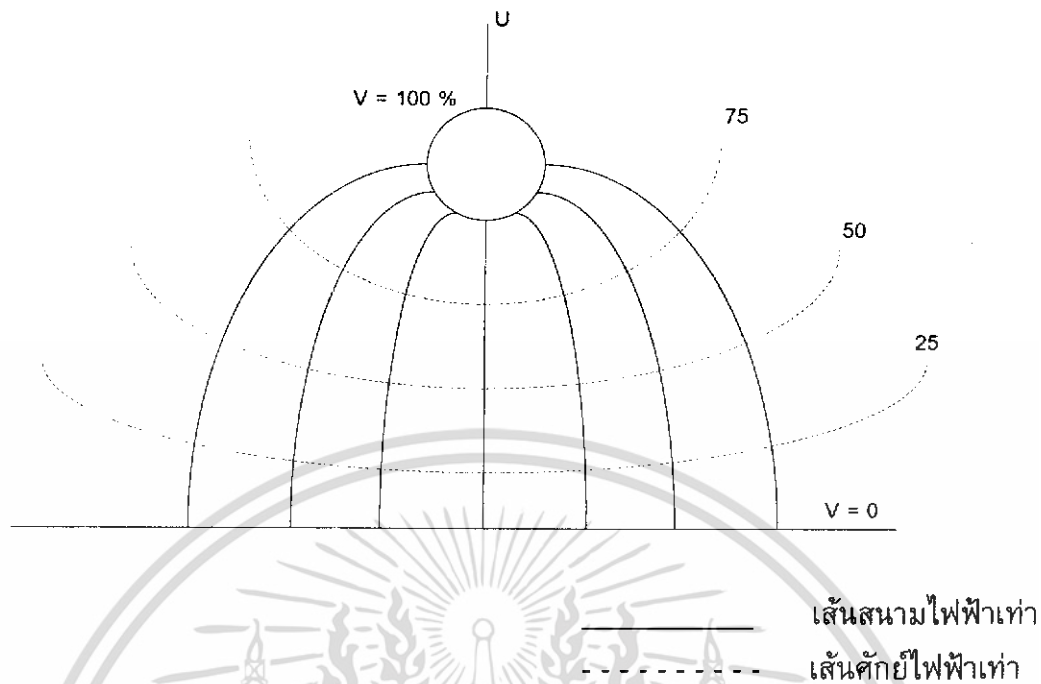
E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไปเพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา หรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะทางไฟฟ้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II,III)



รูปที่ 2.3 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่นอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1(II) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า จะได้ดังรูปที่ 2.3

ในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า [1]

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

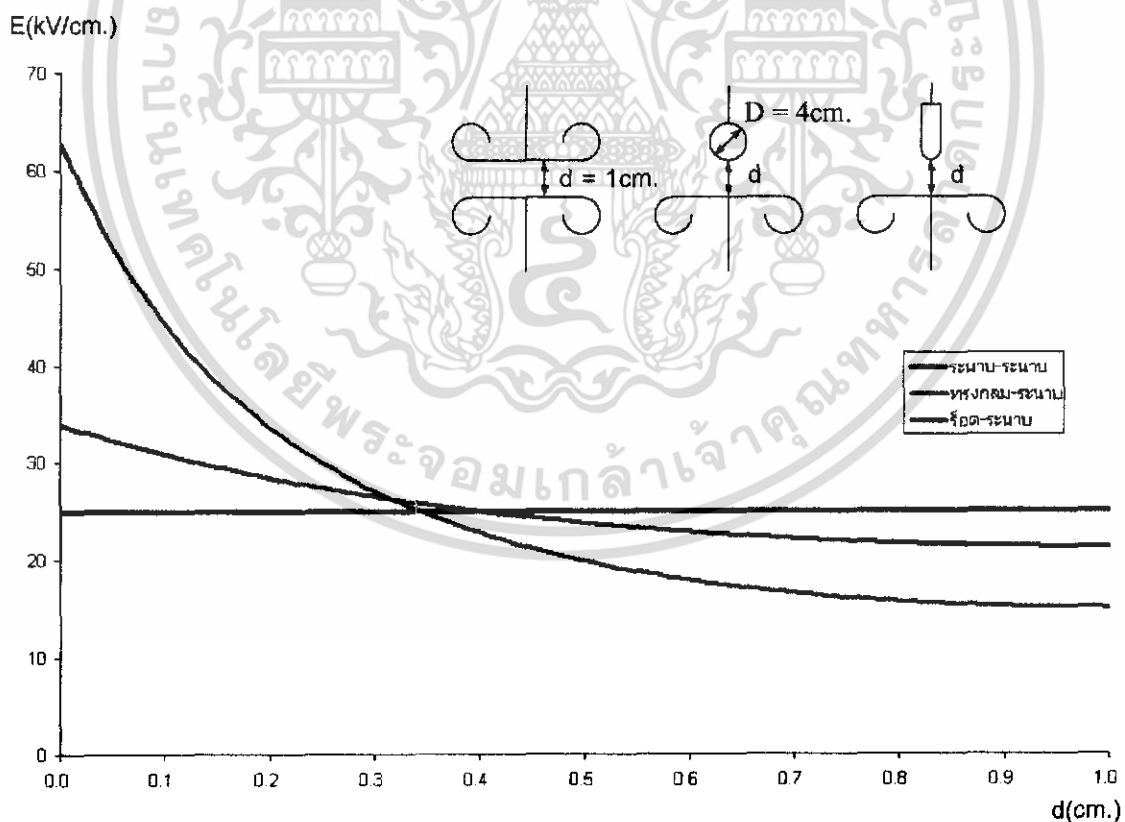
ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ II) ได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d \cdot \eta^*}$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ (2.4)

แสดงว่า อิเล็กโทรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวนก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับการที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (predischage) เกิดก่อนเบรกดาวน ดังอิเล็กโทรดรูปที่ 2.1 (II) กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวนลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวนทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (E_b)

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูปที่ 2.1 (III) เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบในรูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดแบบ III นี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวนจะยังไม่เกิด แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 ซม. แรงดันที่ป้อนเท่ากับ 25 กิโลโวลต์ ชนิดของอิเล็กโทรดคือ

ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าทางเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณได้จากสมการ (2.3) ไม่ได้เพราะ η^* จะเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามสมการ (2.4) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน โคโรนาเริ่มเกิดได้เพราะสนามไฟฟ้าทางเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ [1]

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่ E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด สมการ (2.5) นี้จะใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.6)$$

ในกรณีอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุหมอกว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรดรัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆอีกหลายประการ

2.2 การเบรกดาวน์ในก๊าซ

2.2.1 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ [2]

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในแก๊สระหว่างอิเล็กโทรดมากพอจนทำให้แก๊สมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอ ปัจจุบันมีทฤษฎีเป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎีด้วยกันคือ ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ (Townsend's theory) และเอกทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กลไกการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ [1]

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่ง สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะหายไปเมื่อมีการดีสชาร์จเกิดขึ้น ซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชัน โดยการไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้ต้องมีสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ รวมกับอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากผิวอิเล็กโทรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาวน การดีสชาร์จเบรกดาวนในช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1) เบรกดาวนแบบสมบูรณ์ คือ การเกิดเบรกดาวนตลอดแถบ เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนสมบูรณ์ว่าแรงดันเบรกดาวน (Breakdown Voltage)
- 2) เบรกดาวนเพียงบางส่วน คือ การเกิดเบรกดาวนไม่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดก่อนเบรกดาวนแบบสมบูรณ์ เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนเพียงบางส่วนว่า แรงดันเริ่มเกิด (Inception Voltage)

2.2.3 การคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนในก๊าซ

การเกิดเบรกดาวนในก๊าซมี 2 แบบคือ เบรกดาวนโดยตรง ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และอีกแบบหนึ่งคือเบรกดาวนแบบโคโรนา คือจะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน เป็นลักษณะเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวนคำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้

2.2.3.1 แรงดันเบรกดาวนโดยตรงในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ถ้าสนามไฟฟ้าเป็นแบบสม่ำเสมอ คือ E มีค่าเท่ากันตลอดแถบ α ก็มีค่าคงตัว การอินทิเกรตจะทำได้ง่าย โดยมีขอบเขตของการอินทิเกรตเท่ากับระยะของแถบ d นั่นคือ

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = \ln N_c = K \quad (2.7)$$

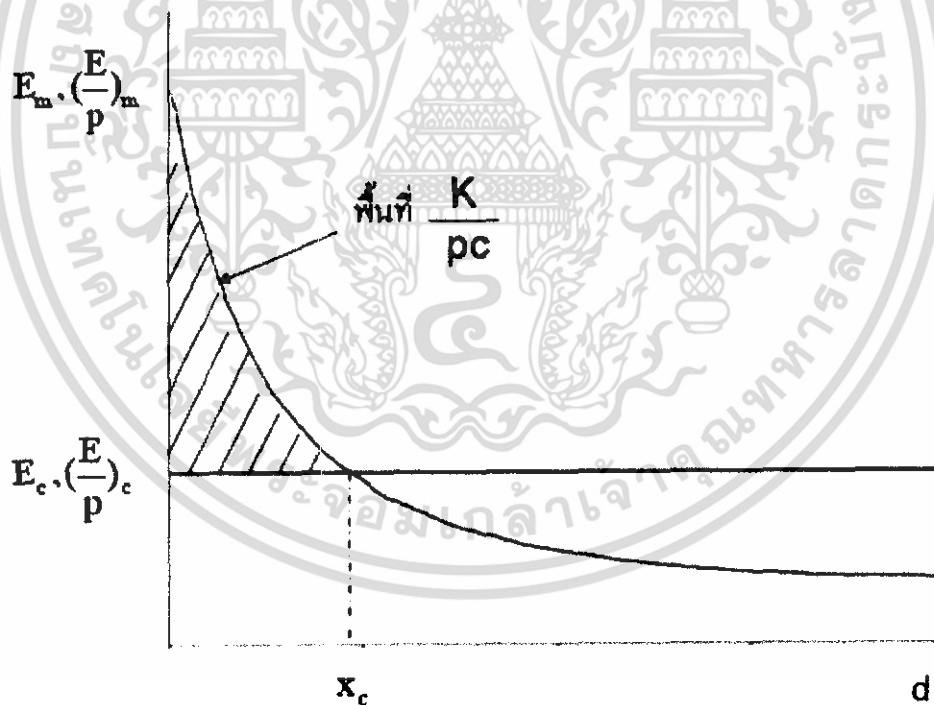
N_c ตามข้อเสนอของ Rather เท่ากับ 18 แต่ความเป็นจริงค่า K อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า K ในช่วงนี้ไม่มีผลสำคัญต่อแรงดันเบรกดาวน ค่า $K=18$ จึงเป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณกันอยู่ทั่วไป

2.2.3.2 แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ที่เกิดเบรกดาวน์แบบโดยตรง สามารถใช้สมการ (2.7) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซได้ ถ้าทราบสนามไฟฟ้ากระจาย $E(x)$ ของแก๊ส การอินทิเกรตจะทำไปตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงสุด และเนื่องจาก α มีค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha = f[E(x)]$ และความดันก๊าซ p ฉะนั้นขอบเขตการอินทิเกรตจะเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้า ที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรด หรือเท่ากับระยะของอะวาลานซ์วิกฤต X_c ดังนั้นสมการ (2.7) จึงเป็น

$$\int_0^{x_c} \alpha[E(x), p] dx = K \quad (2.8)$$

จุดเริ่มต้นอินทิเกรตจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m โดยทั่วไปก็คือ ที่ผิวของอิเล็กโทรดนั่นเอง จุดปลายของการอินทิเกรตก็คือที่ $\alpha = 0$ เป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ดังในรูปที่ 2.5 (หมายเหตุ E_c ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซ)



รูปที่ 2.5 ระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 การคำนวณแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โคโรนาเริ่มเกิดก่อนเบรกดาวน การหาค่าตามเงื่อนไขในรูปที่ 2.5 นั้นใช้หาได้เฉพาะแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i (corona inception voltage) เท่านั้น และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m ก็คือ E_i ส่วนแรงดันโคโรนาเบรกดาวนนั้นหาตามวิธีนี้ได้ เพราะประจุค้างจากโคโรนาทำให้สนามไฟฟ้าในแก๊ปบิดเบือนไปจากค่าตามมิติเชิงเรขาคณิต

ค่า α มีความสัมพันธ์กับความดันแก๊ซ p และสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha/p = f(E/p)$ ซึ่งแก๊ซแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน เช่น ฟังก์ชันของอากาศและแก๊ซ SF_6 อาจเขียนความสัมพันธ์ α/p แบบทั่วไปได้ว่า

$$\frac{\alpha}{p} = C \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^n \quad (2.9)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงตัว

$(E/p)_c$ คือ สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน (รูปที่ 2.5)

n คือ เลขยกกำลังขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ซ เช่น อากาศ $n = 2$ และ SF_6 $n = 1$

การหาค่าแรงดันเบรกดาวนโดยตรง U_b หาได้จากกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน E_b โดยใช้สมการ

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.10)$$

กรณีแรงดันโคโรนาเบรกดาวน ความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด $E_m = E_i$ จะได้แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^*$$

โดยที่ d คือ ระยะแก๊ป

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.2.4 การคำนวณแรงดันเบรกดาวนในอากาศ

2.2.4.1 แรงดันเบรกดาวนของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\eta^* = 1$ ฉะนั้น จาก $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ จะได้สมการแรงดันเบรกดาวน

$$U_b = E_b \cdot d$$

ค่า E_b ของอากาศหาได้จากสมการ (2.9) จากเงื่อนไขเบรกดาวนสมการ (2.7)

$$\alpha d = K$$

และสมการ(2.9) สำหรับอากาศ $n = 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้	$U_b = 24.4d + 6.72\sqrt{pd}$	kV	(2.11)
ถ้าความดันบรรยากาศ จะได้	$U_b = 24.4d + 6.72\sqrt{d}$	kV	
นั่นคือค่าความคงทนของอากาศ	$E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}}$	kV/cm	(2.12)

2.2.4.2 แรงดันเบรกดาว์นของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

(เล็กน้อย)

ในการหาค่าแรงดันเบรกดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยนั้นจะมีค่า η^* โดยที่ค่า η^* นั้นจะมีค่าไม่เท่ากับ 1 ดังนั้นในการหาค่า E_b ของอากาศ ทำการหาโดยสามารถใช้สมการของการคำนวณแรงดันเบรกดาว์นของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (สมการ 2.12) และนำค่า E_b ที่ได้มาหาค่าแรงดันเบรกดาว์นจากสมการ

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$$

2.2.4.3 แรงดันเบรกดาว์นของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (สูง)

ในการหาค่าแรงดันเบรกดาว์นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ยังไม่สามารถหาข้อพิสูจน์เกี่ยวกับสมการการคำนวณแรงดันเบรกดาว์นได้อย่างเป็นที่แน่ชัด จึงได้แต่ทำนายแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดโดยอาศัยสมการ

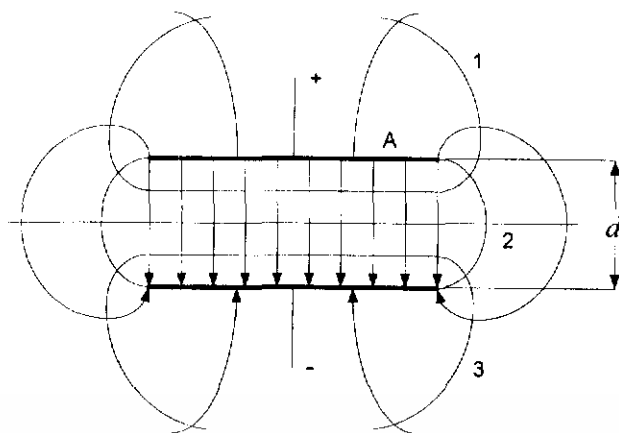
$$U_c = E_c \cdot d \cdot \eta^*$$

2.3 แฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาว์น [3]

แฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน เช่น ระยะแกปรัดมีความโค้ง (r), รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration), ลักษณะผิว, ช่วงเวลาป้อนแรงดัน, ความถี่ (f), รูปคลื่นแรงดัน, อุณหภูมิ (T), ความดันอัดก๊าซ (p), ความชื้น (h), ขั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แฟกเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้จะมีผลต่อแรงดันเบรกดาว์น โดยค่าของแฟกเตอร์เหล่านี้จะมีผลต่อแรงดันเบรกดาว์นในลักษณะที่แตกต่างกันไป

2.4 อิเล็กโทรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile) [1]

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั้น เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอสูงสุดที่ฉนวนนั้นทนได้ ฉะนั้นการทดลองหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน จำเป็นต้องใช้อิเล็กโทรดที่สร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมออย่างแท้จริง นั่นคือสนามไฟฟ้าในปริมาตรระหว่างอิเล็กโทรดนั้นจะต้องเท่ากันทุกจุด ความเครียดสนามไฟฟ้านอกปริมาตรนี้แล้วจะต้องมีค่าน้อยกว่า $E=U/d$ เมื่อ U คือแรงดันที่ป้อน d คือระยะแกบระหว่างแผ่นระนาบ ฉะนั้นจะทำให้เกิดการเบรกดาว์นของฉนวนขึ้นในบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นการคำนวณค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั้น จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

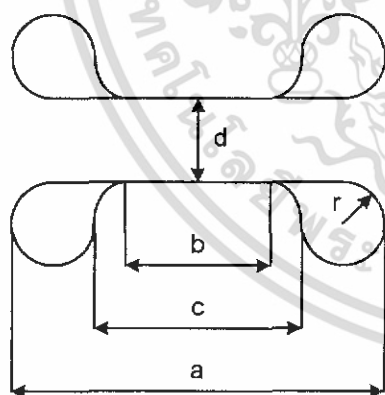


รูปที่ 2.6 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอเล็กโตรดระนาบขนานกัน

จะใช้อเล็กโตรดแผ่นระนาบขนานกัน โดยที่ไม่มีการทำขอบพิเศษมาวางขนานกันเท่านั้นไม่พอ เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบระนาบนั้น จะมีค่าสูงกว่าในบริเวณภายในระหว่างอเล็กโตรด ดังรูปที่ 2.6 ถ้าทำขอบโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า 1 และ 3 จะได้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอดีกว่า

หลักการออกแบบอเล็กโตรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี

ในการออกแบบอเล็กโตรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกีนั้น จะออกแบบโดยใช้ข้อมูลของระยะแกปสูงสุดเป็นตัวกำหนดลักษณะของอเล็กโตรด ซึ่งข้อมูลสำหรับการออกแบบนั้นได้ทำการศึกษาจากข้อมูลที่มีอยู่ แล้วนำมาพัฒนาเพื่อให้เข้ากับการทดลอง



กำหนดให้ d คือ ระยะแกปสูงสุด

$$a = 4.3d$$

$$b = 2.5d$$

$$c = 3d$$

$$r = 0.5d$$

รูปที่ 2.7 การออกแบบอเล็กโตรดระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

2.5.1 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการประยุกต์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสามารถประยุกต์ใช้กับงานหลายๆด้านโดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสมภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์ เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น ประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกร นักออกแบบทั่วไป อย่างไรก็ตามผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.5.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FINITE ELEMENT: FEM) ปัญหาแต่ละ

ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ เมื่อทำการแก้ปัญหาดังกล่าว ค่าผลเฉลยแน่นอนตรง (exact solution) ที่ได้ของปัญหานั้นจะประกอบไปด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ ตามตำแหน่งต่างๆบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแน่นอนตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมาย หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน จากวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวทำให้พอทราบว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจะสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ เพราะฉะนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งก็คือปัญหาที่กำลังพิจารณาทั้งหมด จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

2.5.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์เอลิเมนต์

1. รู้จักขอบเขตของงานหรือวัสดุที่จะทำการวิเคราะห์ จากรูปที่ 2.9(ก) [4] คือ ขอบเขตของงานหรือวัสดุที่จะทำการวิเคราะห์ซึ่งประกอบไปด้วย

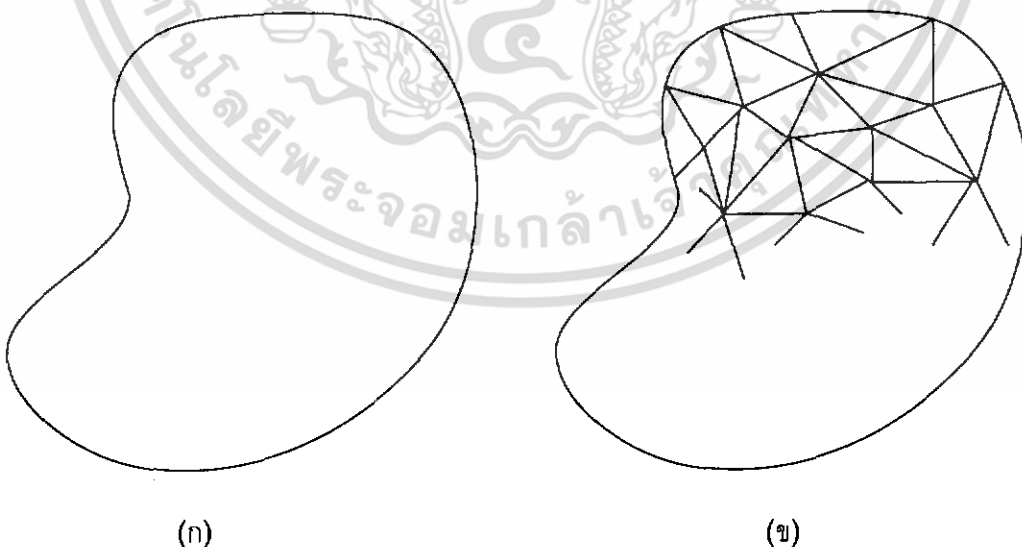
- 1.1 ระบบ คือ ลักษณะทางกายภาพของงานหรือวัสดุที่จะนำมาวิเคราะห์ อาจเป็นของแข็ง (Solids), ของเหลว (Liquids), ก๊าซ (Gases), อากาศ (Air) หรือส่วนผสมอันเนื่องมาจากวัสดุสองชนิด

- 1.2 โดเมน คือตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ส่วนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

- 1.3 สมการบังคับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณต่างๆ ในลักษณะต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง อันเกิดจากสมบัติทางกายภาพ เช่น มวล โมเมนตัม หรือ พลังงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการด้วย

- 1.4 เงื่อนไข คือ ข้อกำหนดภายใน จากแรง (force), อุณหภูมิ (temperature), กระแส (current), สนาม (field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบซึ่งกันและกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระบบ การกระตุ้นจากโหลดภายในขอบเขตที่เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เรียกว่า "boundary condition"

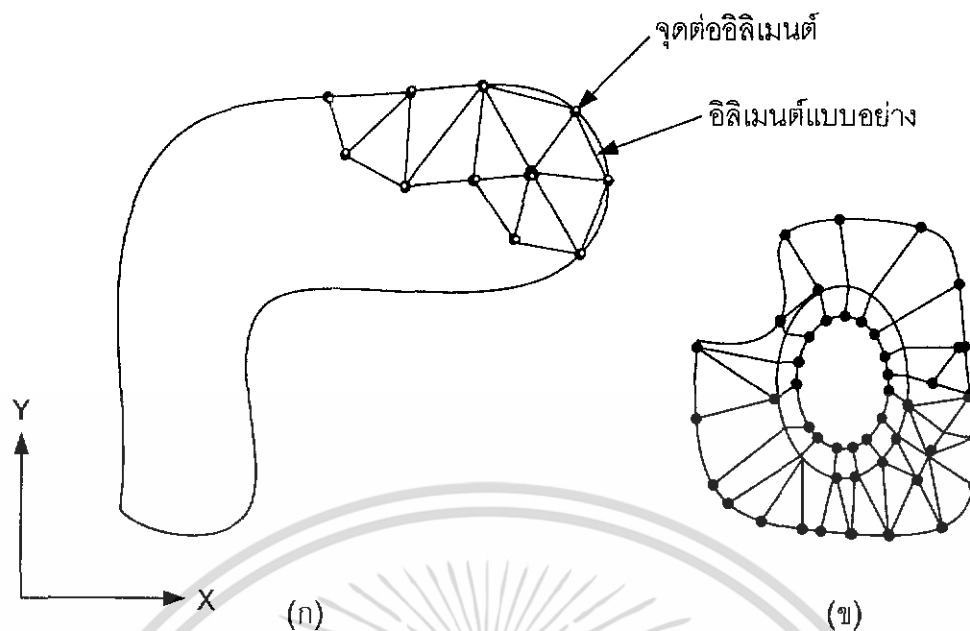
2. ทำการแบ่งขอบเขตงานหรือวัสดุ ออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า "อีลิเมนต์ (element)" ดังรูปที่ 2.9(ข) [5] แล้วทำการพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อย จากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบ Interpolation Function จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์ (Matrix) แล้วพิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (Coefficient Matrix) ให้อยู่ในลักษณะของฟังก์ชัน (x,y,z) หรือที่เรียกว่า "สัมประสิทธิ์โอบอล (global coefficient)" หลังจากนั้นทำการแทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรม จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เช่น เวลา, ระยะทาง, อุณหภูมิ, ศักย์ไฟฟ้า, สมการและเงื่อนไขที่ต้องการหา จะอยู่ในรูปของ โหนด (x,y) 2 มิติ หากเป็น โหนด (x,y,z) ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติในการหาจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสี่เหลี่ยมของโหนดใกล้เคียง



รูปที่ 2.8 วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ

- ก) ขอบเขตของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์
- ข) การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นโครงข่าย (Mesh)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ต่างๆ

ก) การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย

ข) การวิเคราะห์หาผลเฉลยด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์

2.5.4 ข้อดีและข้อเสียของไฟไนต์อีลิเมนต์(FEM) [5]

1. สามารถใช้ได้กับรูปทรงได้หลายรูปทรงหรือรูปทรงที่ยุ่งยากโดยใช้การแบ่งเป็นอีลิเมนต์ สามเหลี่ยม 2 มิติในการแทนค่าทั้ง ขอบเขต(boundary)
 2. สามารถใช้ได้กับขอบเขตปัญหาทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และแบบไม่เชิงเส้น (Non Linear) ได้
 3. สามารถใช้ได้กับปัญหาที่เป็นสารเนื้อเดียว และสารเนื้อผสม
 4. สามารถใช้กับ Higher-Order Element ได้
 5. สามารถใช้ได้กับปัญหาขอบเขตได้เกือบจะทุกกรณี
- สำหรับข้อเสียนั้นเป็นปัญหาที่ยุ่งยากเกี่ยวกับการแบ่งโครงข่าย (Mesh) ให้มีความถูกต้องและเวลาในการคำนวณจะช้ามากถ้าจำนวนโหนดมาก

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดสอบ

3.1 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

โลหะที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ส่วนน้อยจะเป็นโลหะที่บริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% จะถูกใช้เป็นลวดตัวนำ เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงมาก หรืออะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง(99.99% Al) จะถูกใช้สำหรับตักแต่งเนื่องจากเป็นโลหะที่มีความพื้นผิวที่วาว แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นโลหะที่มีโลหะอื่นหรือโลหะผสมอยู่เพื่อทำให้โลหะนั้นมีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น เช่น ทำให้แข็งแรง ไม่เกิดสนิม ขยายตัวน้อย และทนต่อการกัดกร่อน

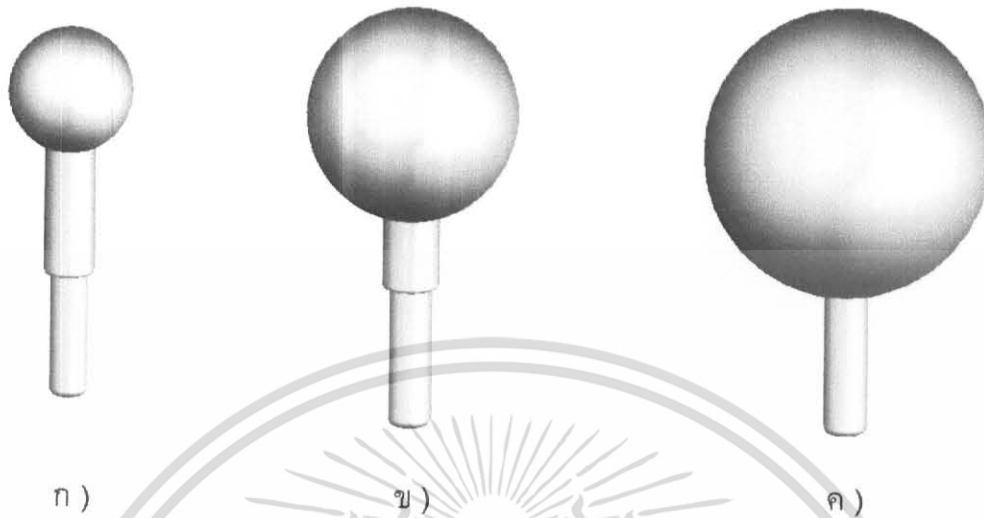
โดยโลหะที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ นั้นจะทามาจากโลหะผสมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัลลอยด์ซึ่งเป็นของผสมของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปหรืออาจจะเป็นโลหะผสมกับอโลหะ ซึ่งในการศึกษาโครงการวิศวกรรมนี้จะนำทองเหลืองมาใช้ในการสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ โดยทองเหลือง (brass) นั้น จะประกอบไปด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ ทองแดง 70% และสังกะสี 30% หรืออาจจะประกอบด้วยทองแดงและสังกะสีประมาณ 5-40% โลหะผสมเหล่านี้จะมีค่าความแข็งแรงปานกลาง (34-54 ksi ; 234-374MPa) ในสภาวะหลังจากถูก annealed และจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อถูก cold-worked [6]

อิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบหาค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านั้น จะมีด้วยกันอยู่ 3 ลักษณะ ดังนี้

- อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม (Sphere)
- อิเล็กทรอนิกส์แบบรีด (Rod)
- อิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile)

3.1.1 อิเล็กโตรดแบบทรงกลม (Sphere)

จะมีด้วยกัน 3 แบบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 อิเล็กโตรดแบบทรงกลม

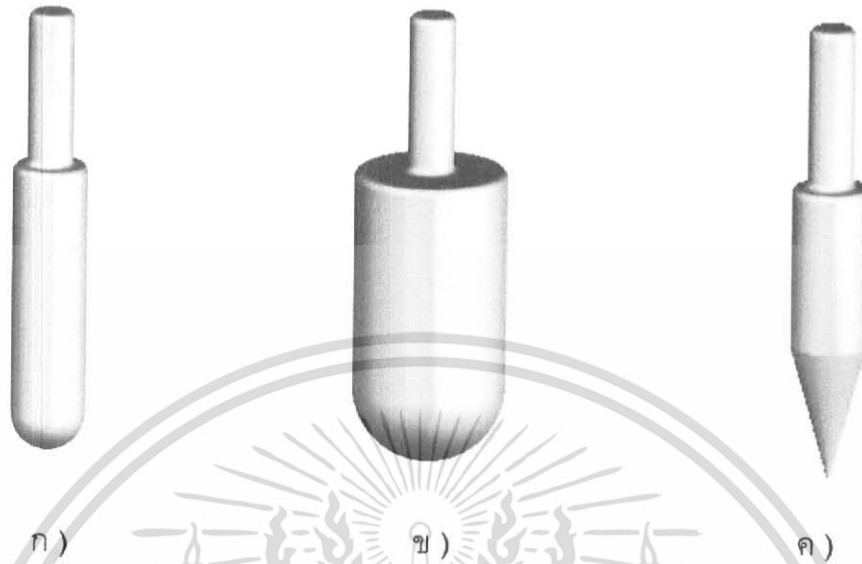
ตารางที่ 3.1 ขนาดของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม

แบบ	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	ก้าน(ซม.)		เกลียว(ซม.)		ความยาว รวม(ซม.)
		เส้นผ่าศูนย์กลาง	ยาว	เส้นผ่าศูนย์กลาง	ยาว	
ก	2	0.8	2	0.6	2	6
ข	3	0.8	1	0.6	2	6
ค	4	-	-	0.6	2	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อิเล็กโทรดแบบรีด (Rod)

จะมีด้วยกัน 3 แบบ ดังนี้



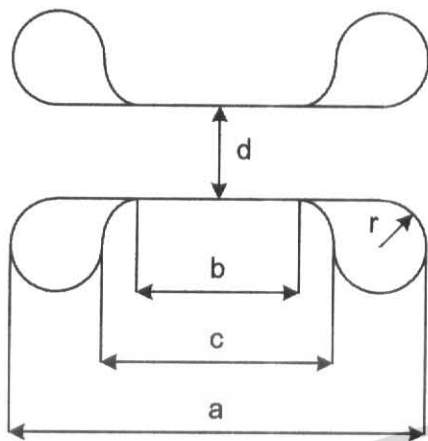
รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรดแบบรีด

ตารางที่ 3.2 ขนาดของอิเล็กโทรดแบบรีด

แบบ	มีลักษณะ	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	เกลียว(ซม.)		ความยาวรวม(ซม.)
			เส้นผ่าศูนย์กลาง	ยาว	
ก	ปลายมน	1	0.6	2	6
ข	ปลายมน	2	0.6	2	6
ค	ปลายแหลม	1	0.6	2	6

ในการทดลอง **Partial Discharge** เพื่อหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดด้วยอิเล็กโทรดแบบรีดปลายมนนั้น พบว่า แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าสูงห่างจากแรงดันเบรกดาว์นของรีดไม่มากนัก จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดเบรกดาว์นเมื่อทำการทดลองต่อไป ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบอิเล็กโทรดแบบรีดปลายแหลมเพื่อใช้ในการทดลอง **Partial Discharge** มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ค)

3.1.3 อิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี (Rogowski profile)



กำหนดให้ d คือ ระยะแกปสูงสุด

$$a = 4.3d$$

$$b = 2.5d$$

$$c = 3d$$

$$r = 0.5d$$

รูปที่ 3.3 การออกแบบลักษณะอิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี

เนื่องจากการออกแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกีนั้น ได้ทำการออกแบบโดยใช้ข้อมูลของระยะแกปสูงสุดเป็นตัวกำหนดลักษณะของอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 3.3

ดังนั้น จึงออกแบบอิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกี โดยยึดระยะแกปที่จะใช้ในการทำการทดลองเป็นหลัก ดังต่อไปนี้

- แบบระยะแกป 2 ซม.



รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดแบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกีแบบระยะแกป 2 ซม.

มีลักษณะ - ตัวก้านมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 ซม. ยาว 2.6 ซม.

- เกลียวมี่เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 ซม. ยาว 2 ซม.

- ความยาวรวม 6 ซม.

- ส่วนอื่นๆจะมีขนาดขึ้นอยู่กับระยะแกป ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

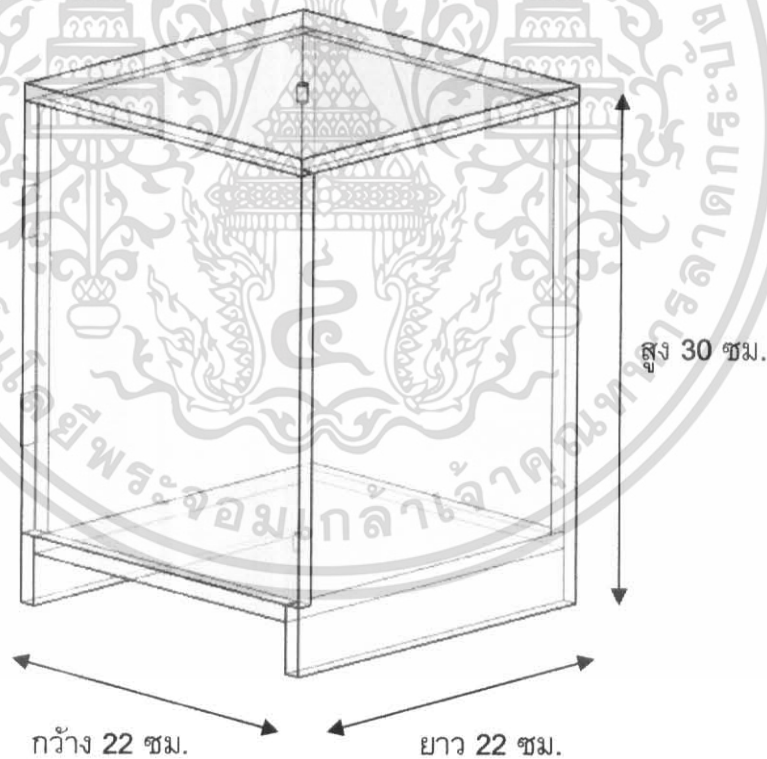
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบกล่องทดสอบ

ในส่วนของกล่องทดสอบที่จะนำมาใช้ในการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการทดสอบ นั้น ได้ทำการออกแบบโดยคำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อสนามไฟฟ้า ซึ่งถ้าออกแบบไม่ดีอาจจะทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้ จากมาตรฐาน IEEE [7] ได้กำหนดให้ระยะห่างจากวัสดุอื่นใดควรจะมีระยะห่างจากจุดที่เกิดการเบรกดาวนที่ผิวของอุปกรณ์ทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ $1.5d$ (เมื่อ d คือ ระยะแกป)

นอกจากนั้นแล้วยังต้องคำนึงถึงเรื่องของการปรับระยะแกปซึ่งจะใช้ไมโครมิเตอร์ในการปรับระยะอีกด้วย ในการทำการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบในระบบเปิด โดยการทำให้อากาศมีลักษณะที่มีฝาปิดทั้ง 6 ด้าน การออกแบบกล่องทดสอบมีลักษณะดังต่อไปนี้

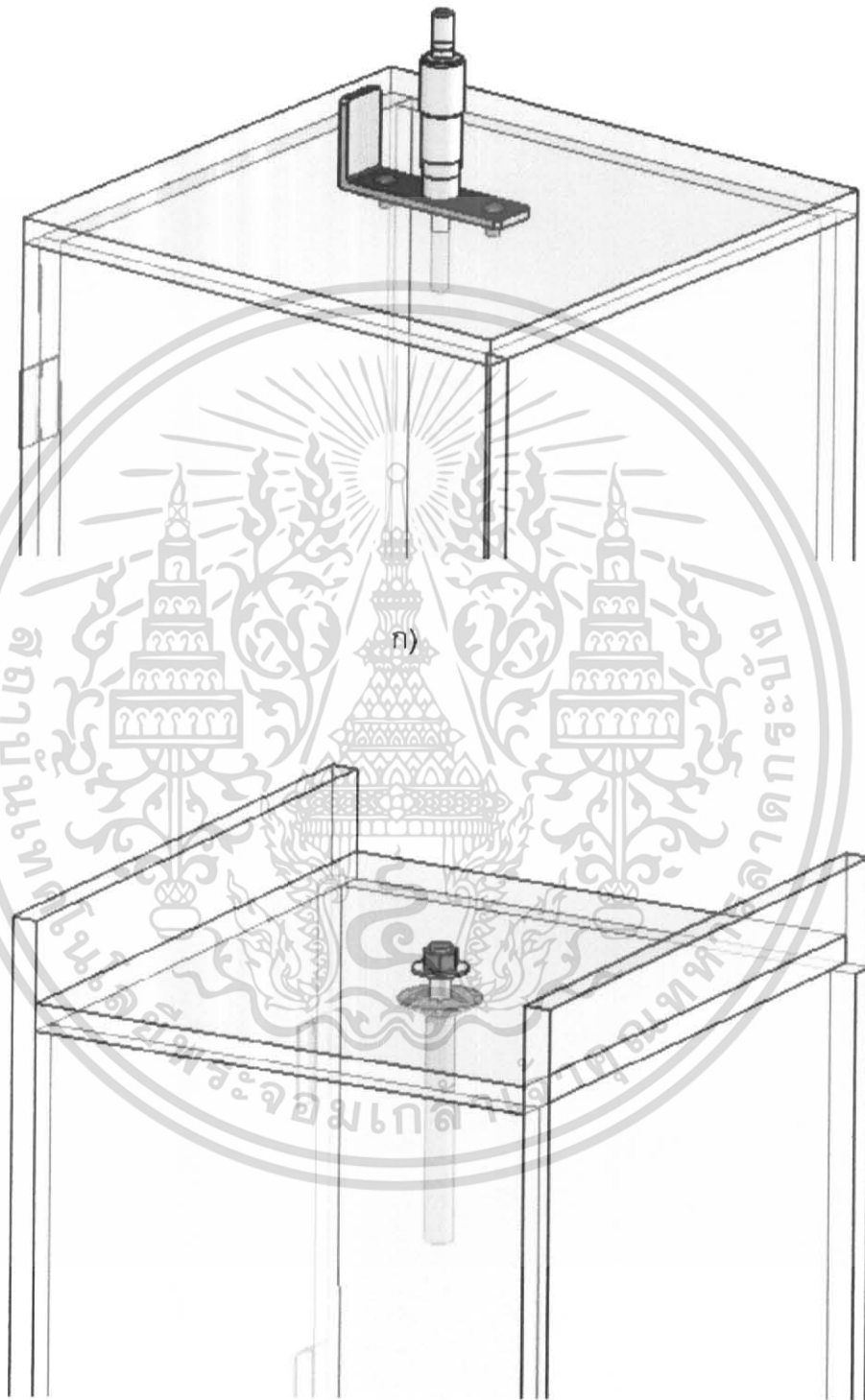
ตัวกล่องจะมีขนาด กว้าง 22 ซม. x ยาว 22 ซม. x สูง 30 ซม. โดยจะมีด้านหนึ่งที่สามารถเปิดปิดเพื่อทำการเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำตัวกล่องจะทำมาจากแผ่นอะครีลิกซึ่งมีความหนาประมาณ 1 ซม. เนื่องจากอะครีลิกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน อีกทั้งยังมีลักษณะที่โปร่งแสงทำให้มองเห็นสภาพภายในกล่องได้ ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของกล่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบนของกล่องจะทำการเจาะรูสำหรับติดตั้งไมโครมิเตอร์ และด้านล่างของกล่อง จะทำการเจาะรูเพื่อยึดก้านทรงกระบอกเข้ากับตัวกล่องทดสอบโดยการใช้นอตขันยึดที่ฐานของ ก้านดังรูปที่ 3.6



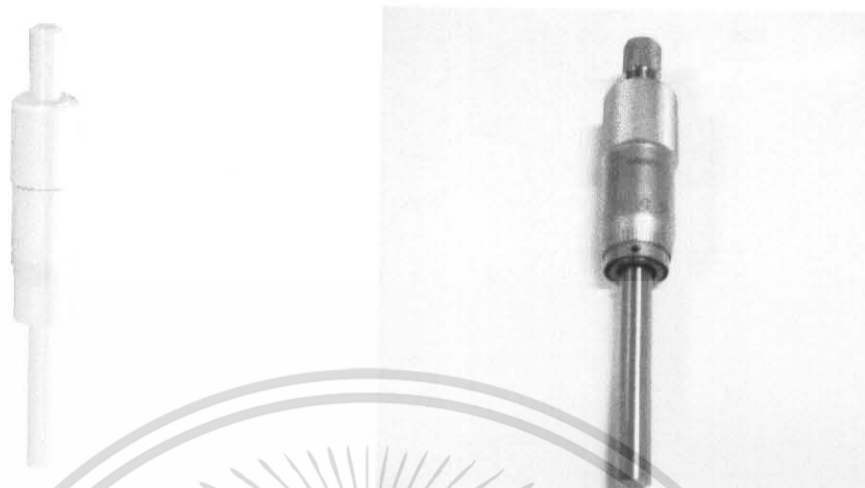
ข)

รูปที่ 3.6 ลักษณะของส่วนบนและส่วนล่างของกล่องทดสอบ

ก) ส่วนบน ข) ส่วนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ไมโครมิเตอร์



รูปที่ 3.7 ลักษณะของไมโครมิเตอร์

ไมโครมิเตอร์ที่นำมาใช้นั้นได้ทำการตัดแปลงให้เหมาะสมกับกล่องทดสอบ ซึ่งจะใช้ไมโครมิเตอร์นี้ในการปรับระยะแกป ซึ่งสามารถทำการปรับระยะแกปได้ตั้งแต่ 0 mm. ถึง 25 mm. โดยมีความละเอียดเท่ากับ 0.01 mm.

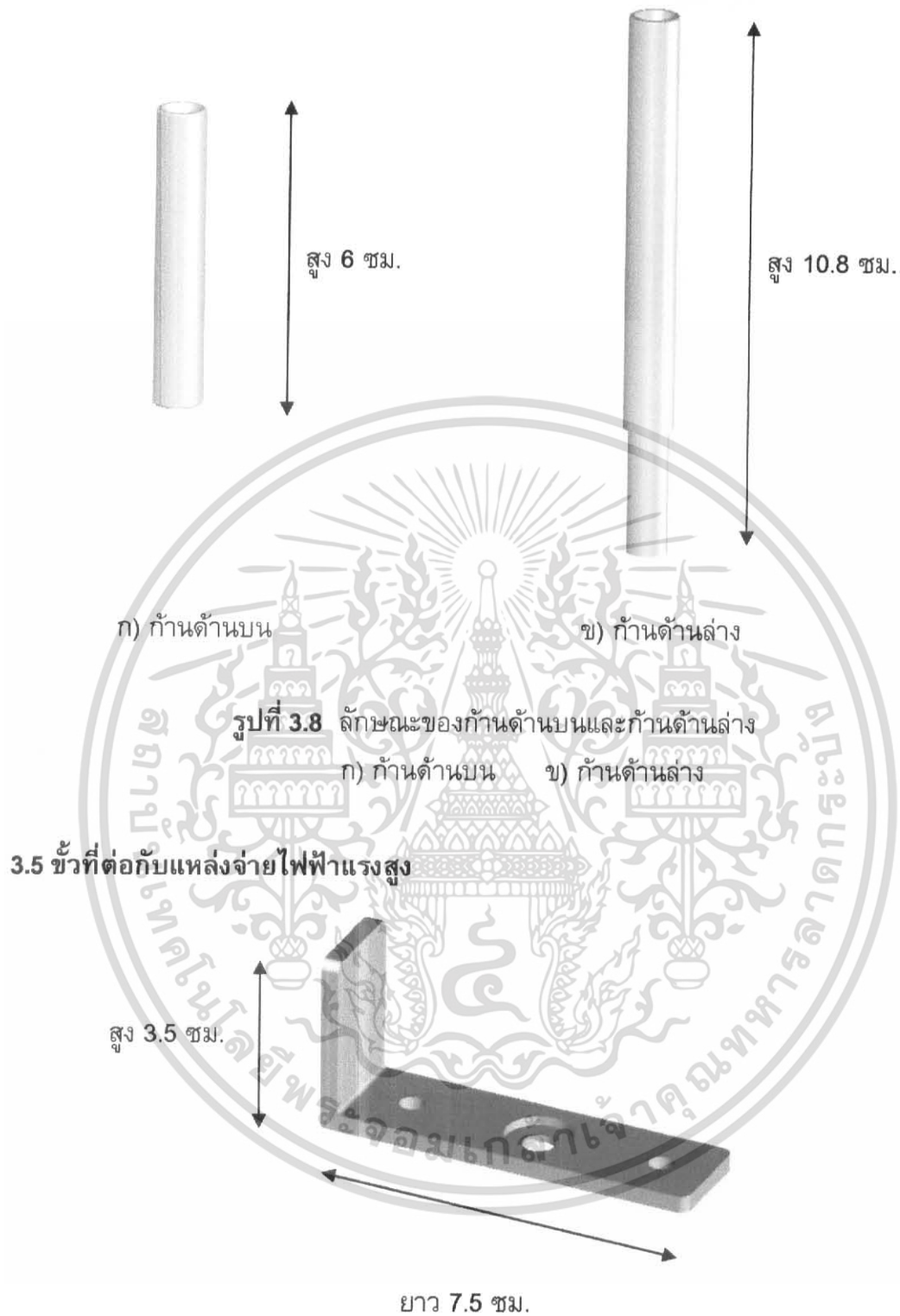
3.4 ก้านทรงกระบอกสำหรับติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของก้านยึดอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะใช้วัสดุจำพวกสแตนเลส เนื่องจากก้านยึดด้านบนจะทำการต่อกับแหล่งจ่ายไฟและก้านยึดด้านล่างจะทำการต่อกับกราวด์ จึงเลือกใช้สแตนเลสมาทำเพราะมีความสามารถในการนำไฟฟ้า มีความแข็งแรงและราคาไม่แพง

ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60052: 2002 -10 ได้กำหนดไว้ว่าขนาดความยาวของก้านทรงกระบอกจะต้องไม่น้อยกว่าขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกปทรงกลม และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของก้านทรงกระบอกจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5D ของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกปทรงกลม

ดังนั้น จึงสามารถนำข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการเลือกขนาดของก้านทรงกระบอกดังต่อไปนี้

- ก้านด้านบน จะมีความยาว 6.0 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.
- ก้านด้านล่าง จะมีความยาว 10.8 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.

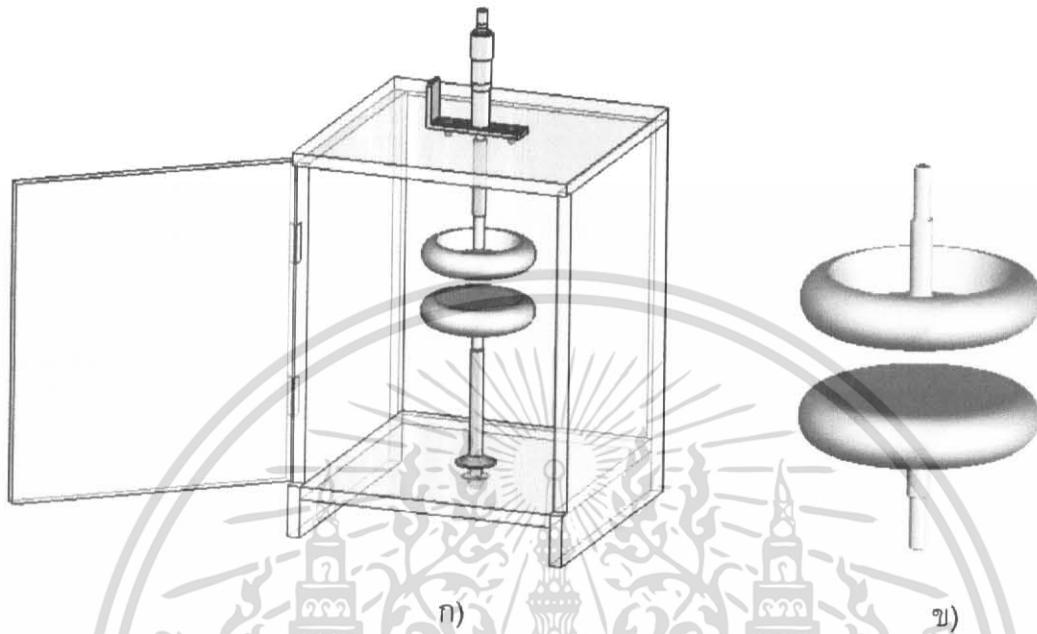


รูปที่ 3.9 ลักษณะของขั้วที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

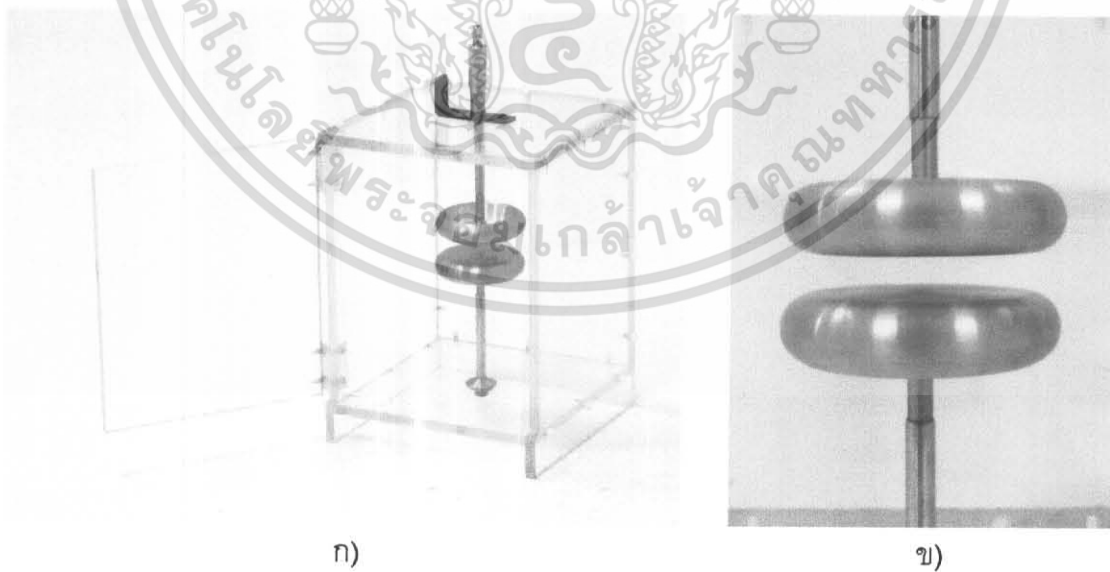
ลักษณะของขั้วต่อกับไฟฟ้าแรงสูงนั้น ได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับการติดตั้งเข้ากับตัวกล่องทดสอบ ซึ่งทำมาจากแผ่นทองแดงเพราะแผ่นทองแดงมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ตัวอย่างรูปแบบชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวห์

3.6.1 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวห์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ระนาบ - ระนาบ



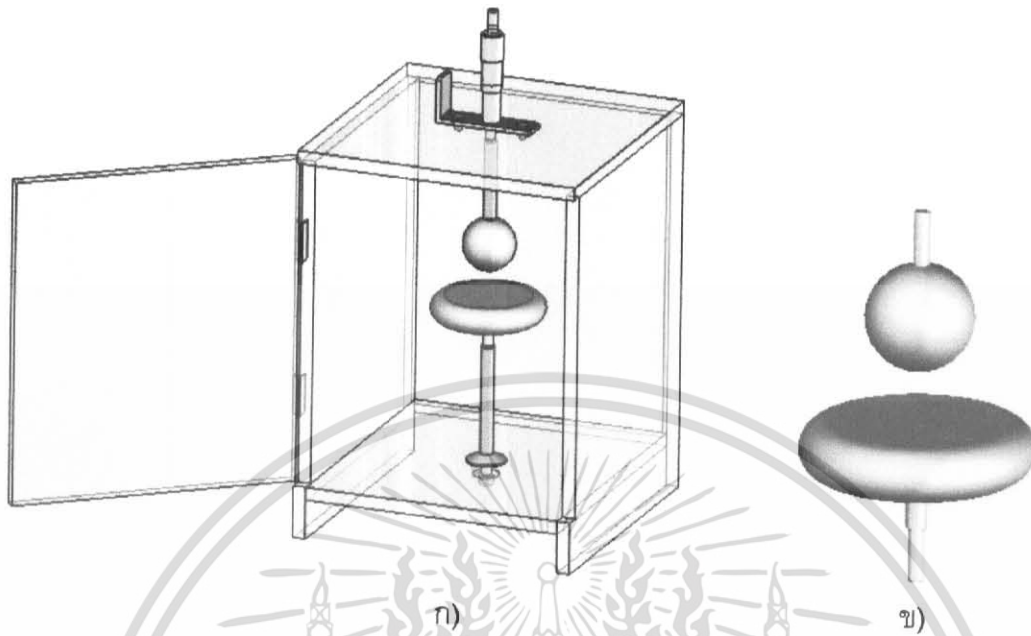
รูปที่ 3.10 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวห์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ
ที่ได้จากการออกแบบ
ก) ชุดทดสอบ ข) อิเล็กทรอนิกส์ระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวห์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ
ที่ได้จากการประกอบสร้าง

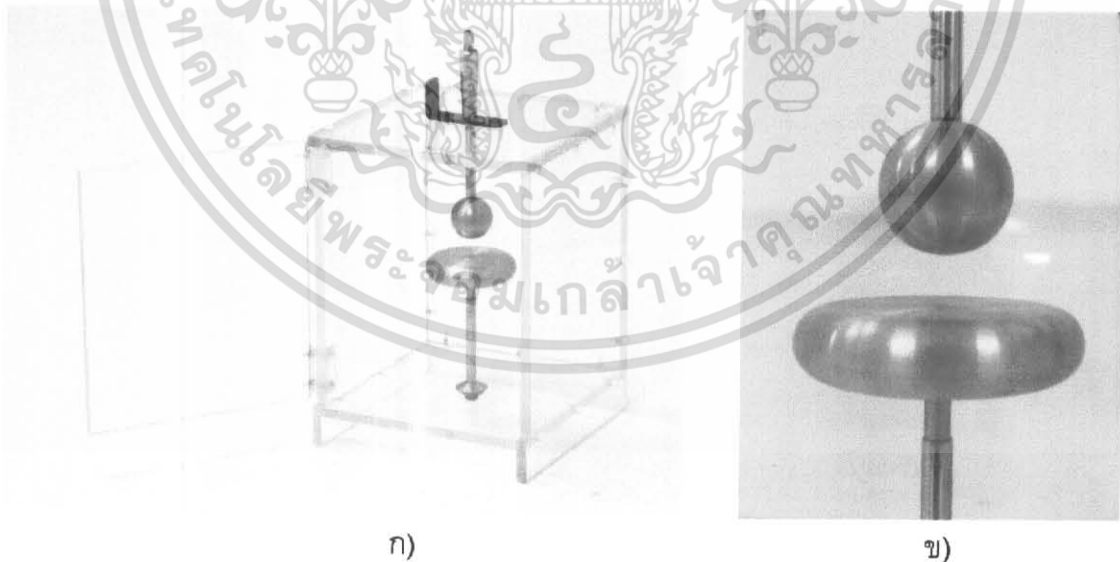
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ทรงกลม - ระนาบ



รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ
ที่ได้จากการออกแบบ

ก) ชุดทดสอบ ข) อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม-ระนาบ



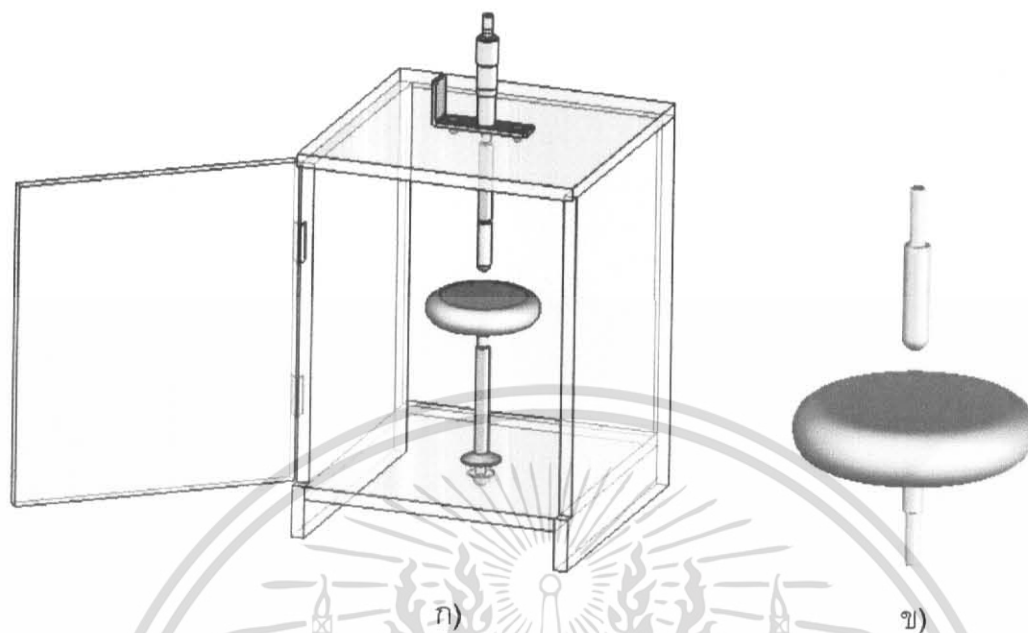
ก)

ข)

รูปที่ 3.13 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ
ที่ได้จากการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ร็อด - ระนาบ



รูปที่ 3.14 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบร็อด-ระนาบ
ที่ได้จากการออกแบบ

ก) ชุดทดสอบ ข) อิเล็กทรอนิกส์ร็อด-ระนาบ



ก)

ข)

รูปที่ 3.15 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบร็อด-ระนาบ
ที่ได้จากการประกอบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อทำการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น ต่อไปจะนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบไว้มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ทำการจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ในส่วนนี้จะเป็นการสมมติค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์น เพื่อหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ แล้วนำค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ, ทรงกลม-ทรงกลม, ทรงกลม-ระนาบ, ร็อด-ระนาบ ไปพล็อตกราฟเพื่อนำไปหาค่าแรงดันเบรกดาว์น และค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

2. ทำการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ, ทรงกลม-ทรงกลม, ทรงกลม-ระนาบ, ร็อด-ระนาบ ที่ระยะแก๊ปต่างๆ (ไม่เกิน 2 เซนติเมตร) โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ และทดสอบหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของอิเล็กทรอนิกส์แบบร็อดปลายแหลม

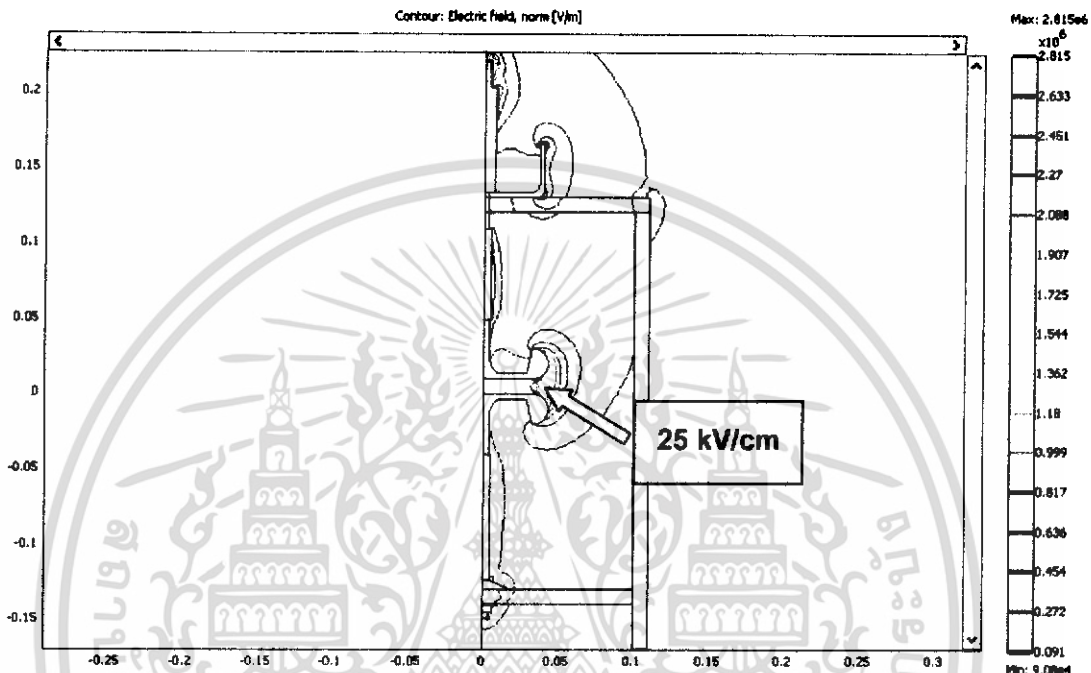
3. วิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยทำการนำค่าแรงดันเบรกดาว์นและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทดสอบมาทำการพิสูจน์เงื่อนไขการเกิดเบรกดาว์นว่ามีค่าตามทฤษฎีหรือไม่และทำการนำค่าแรงดันเบรกดาว์น, แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้ทำนายไว้ในตอนแรกมาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงว่ามีแนวโน้มถูกต้องเพียงใด สุดท้ายวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะขององค์ประกอบที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

4.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์

4.1.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

แบบระนาบ-ระนาบ

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
2. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
3. ระบายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ระบายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 25 \text{ kV/cm}$$

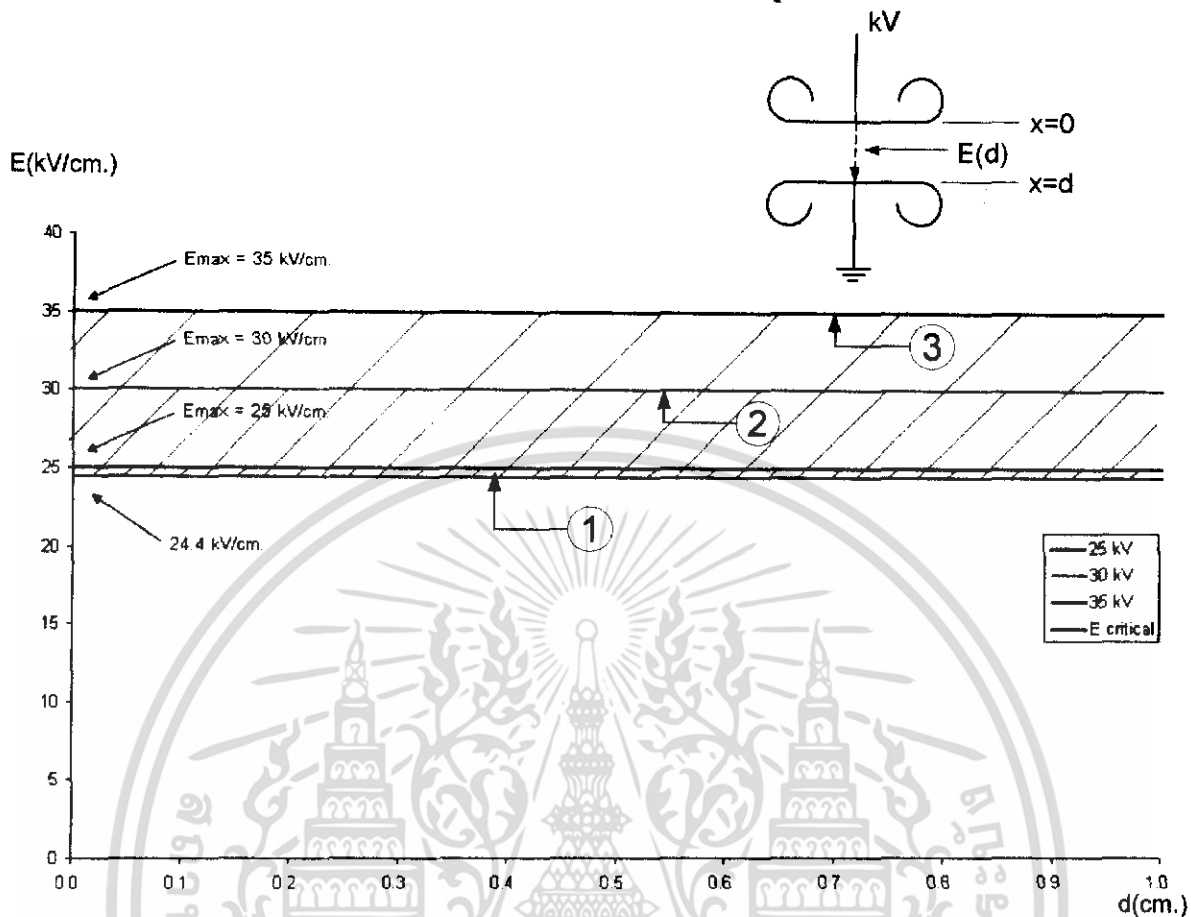
$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{25}{25} = 1$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกปของอิลเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) กับระยะห่างระหว่างระนาบ (d) จะได้

เงื่อนไข (1) ป้อนแรงดัน 25 kV ให้กับอิลเล็กโตรด

ผลการคำนวณ $E_{max} = 25 \text{ kV/cm}$. พื้นที่ใต้กราฟ = 0.6

(2) ป้อนแรงดัน 30 kV ให้กับอิลเล็กโตรด

ผลการคำนวณ $E_{max} = 30 \text{ kV/cm}$. พื้นที่ใต้กราฟ = 5.6

(3) ป้อนแรงดัน 35 kV ให้กับอิลเล็กโตรด

ผลการคำนวณ $E_{max} = 35 \text{ kV/cm}$. พื้นที่ใต้กราฟ = 10.6

พื้นที่ใต้กราฟที่ทำให้เกิดเบรกดาวนคือ $6.72 \times \sqrt{d} = 6.72$ เมื่อ $d=1\text{cm}$. (ดูภาคผนวก ค)

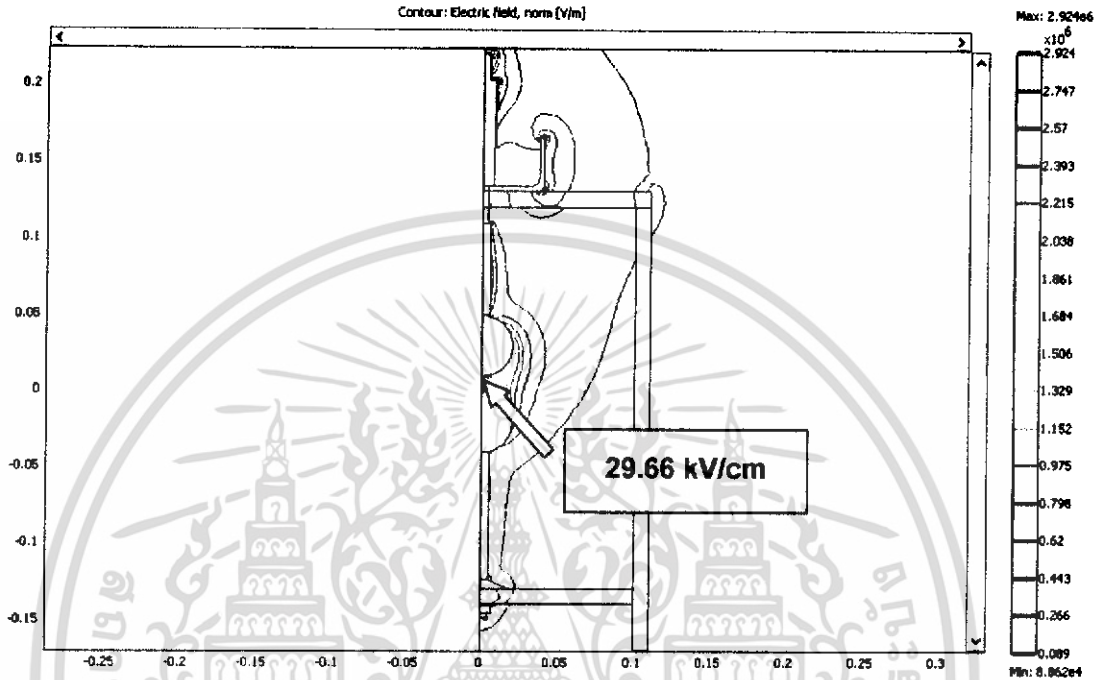
จากผลการคำนวณ จึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวนได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 31 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เพราะเมื่อหาพื้นที่ใต้กราฟออกมามีค่ามากกว่า 6.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

แบบทรงกลม-ทรงกลม

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค้ำยอด)
2. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
3. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

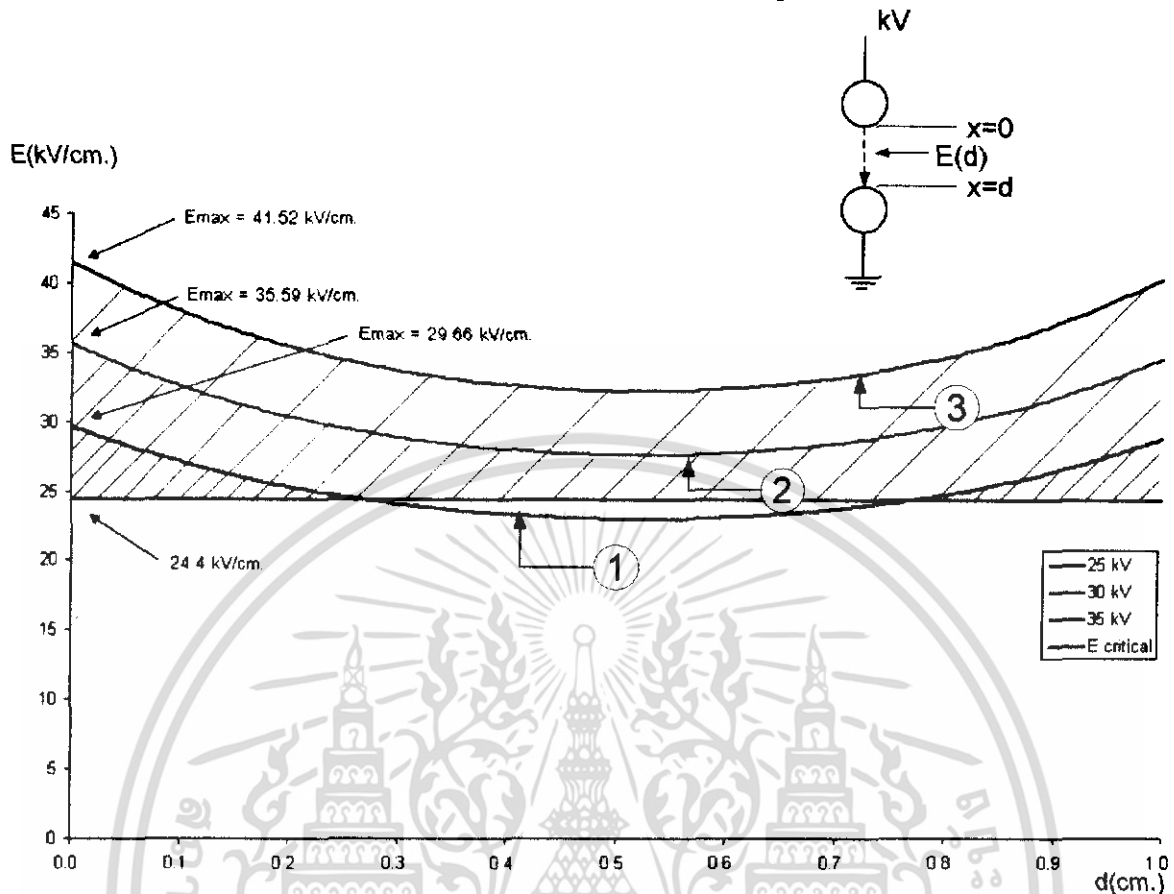
$$E_{\max} = 29.66 \text{ kV/cm}$$

$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{25}{29.66} = 0.84$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอีเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแกป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) กับระยะแกป (d) เงื่อนไขที่ทำให้เริ่มเกิดการเบรกดาวน์คือ $\int_0^d \alpha(x) dx = K$ ซึ่งค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20 (ดูภาคผนวก ค)

จะได้ (1) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดัน 25 kV คือ

$$\int_0^{x_c} C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx + \int_{x_c}^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 1.3$$

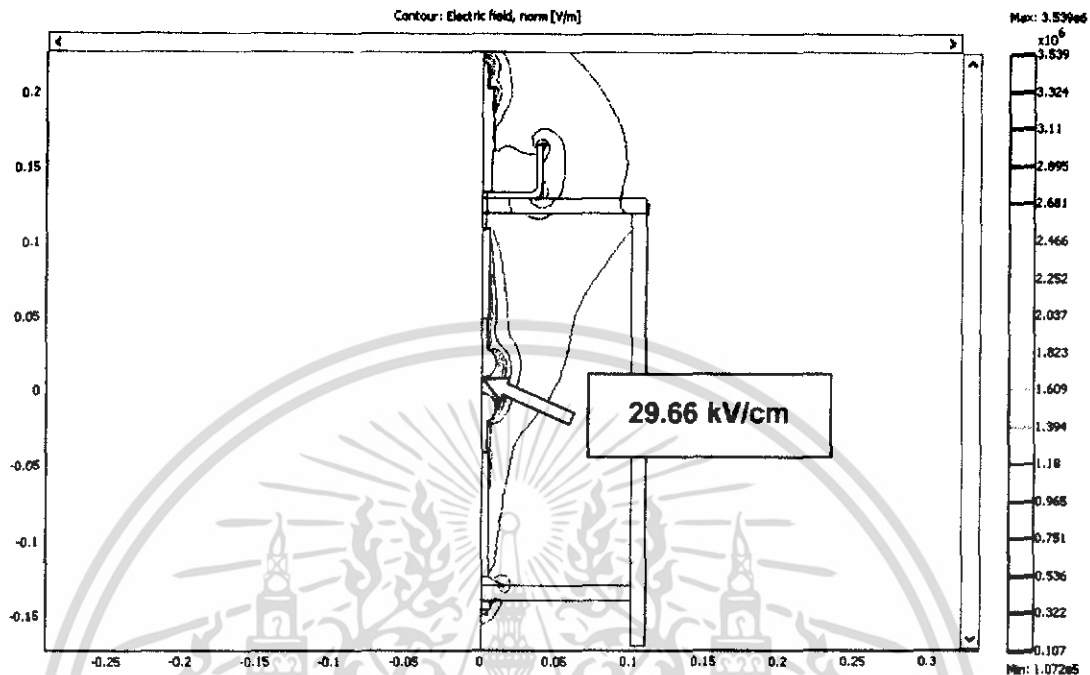
(2) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดัน 30 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 14.48$

(3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดัน 35 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 47.46$

เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 29 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ เพราะเมื่อหาเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์แล้วมีค่ามากกว่า 10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค้ำยอด)
2. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
3. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

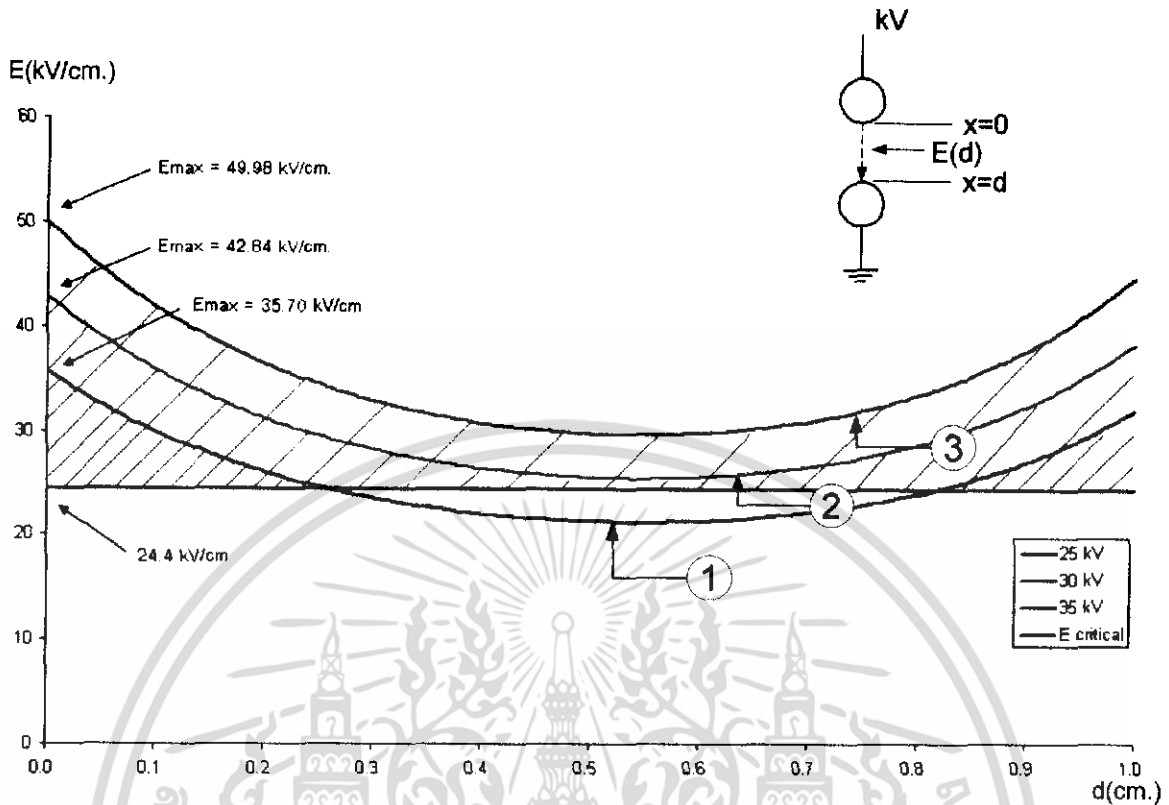
$$E_{\max} = 35.70 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{av}} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{25}{35.70} = 0.7$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ระยะแกป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า(E) กับระยะแกป(d) เงื่อนไขที่ทำให้เริ่มเกิดการเบรกดาวนก็คือ $\int_0^d \alpha(x) dx = K$ ซึ่งค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20

จะได้ (1) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 25 kV คือ

$$\int_0^x C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 pdx + \int_x^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 pdx = 4.52$$

(2) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 30 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 pdx = 20.67$

(3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 35 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 pdx = 55.94$

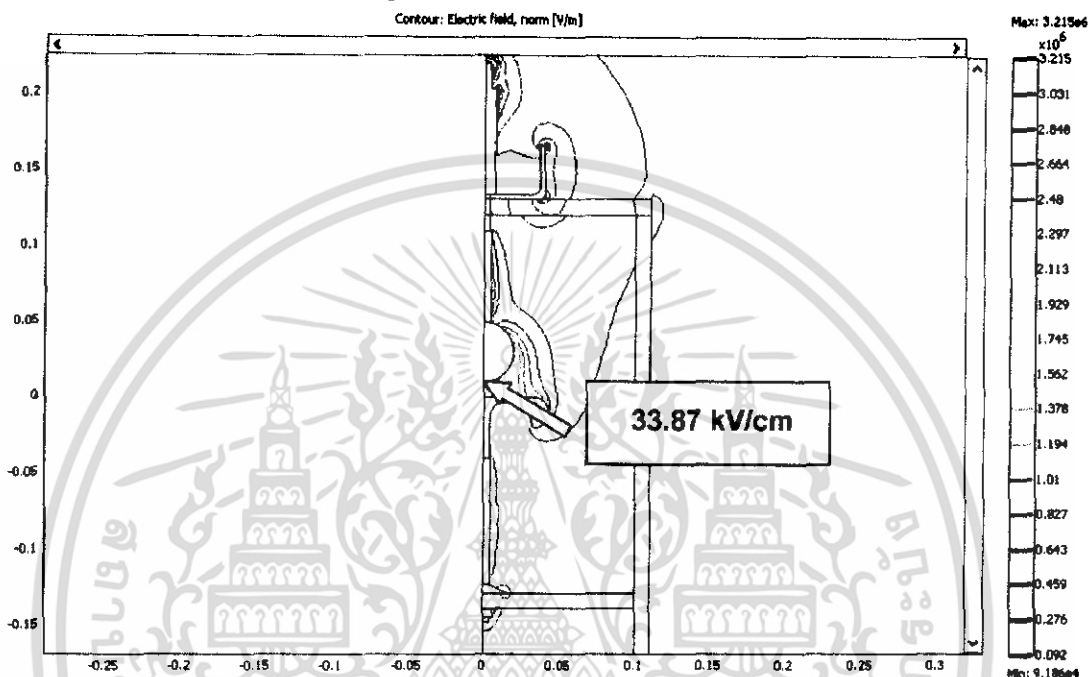
เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวนได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 28 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เพราะเมื่อหาเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนแล้วมีค่ามากกว่า 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

แบบทรงกลม-ระนาบ

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
2. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
3. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร
4. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 33.87 \text{ kV/cm}$$

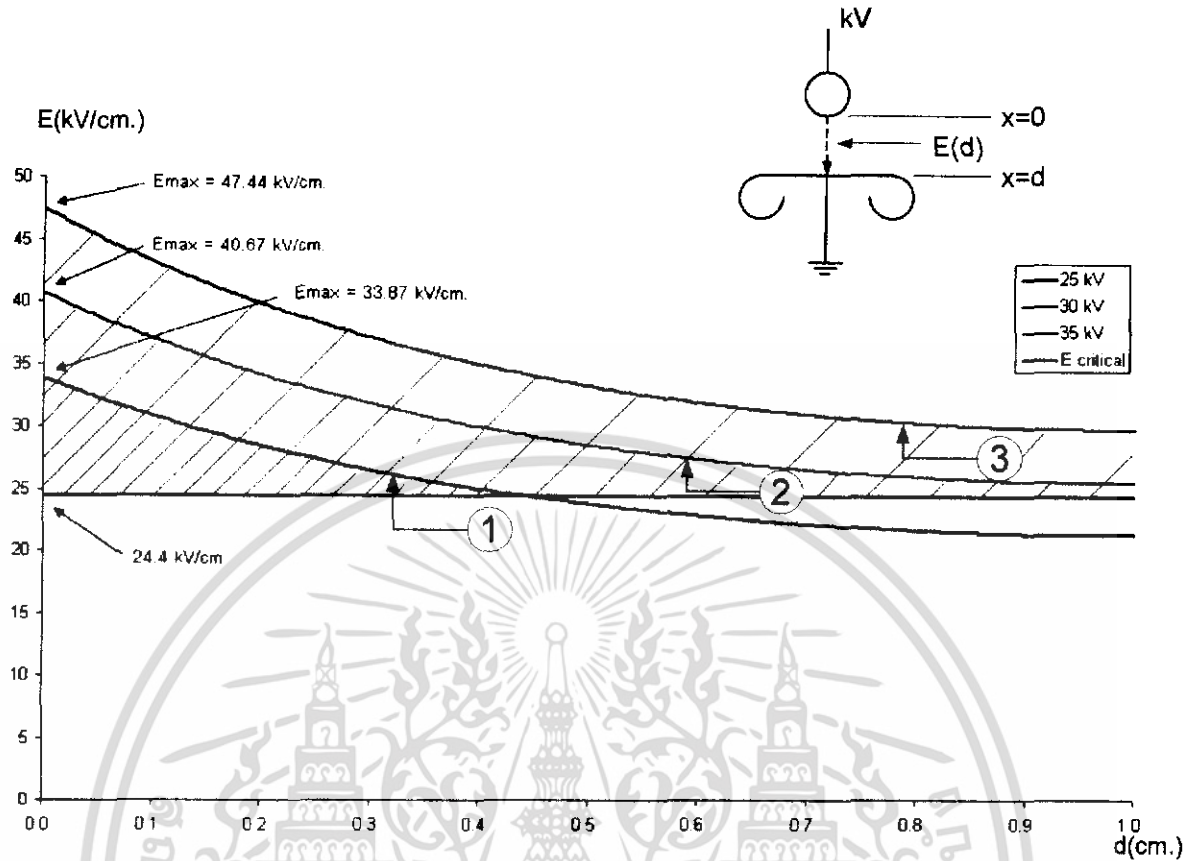
$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{25}{33.87} = 0.74$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า(E) กับระยะแกป(d) เงื่อนไขที่ทำให้เริ่มเกิดการเบรกดาวนก็คือ $\int_0^{x_c} \alpha(x) dx = K$ ซึ่งค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20

จะได้ (1) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 25 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 4.12$

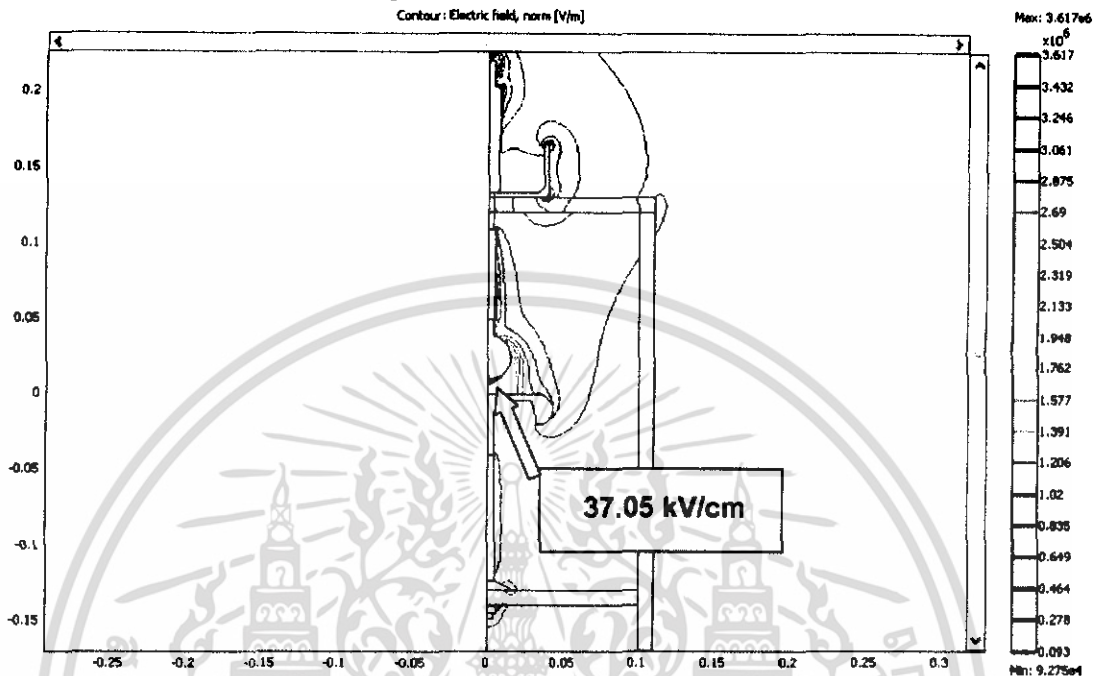
(2) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 30 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 19.90$

(3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 35 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 54.83$

เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวนได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 28 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เพราะเมื่อหาเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนแล้วมีค่ามากกว่า 10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
2. ระยะแก๊ป 1 เซนติเมตร
3. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร
4. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแก๊ป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

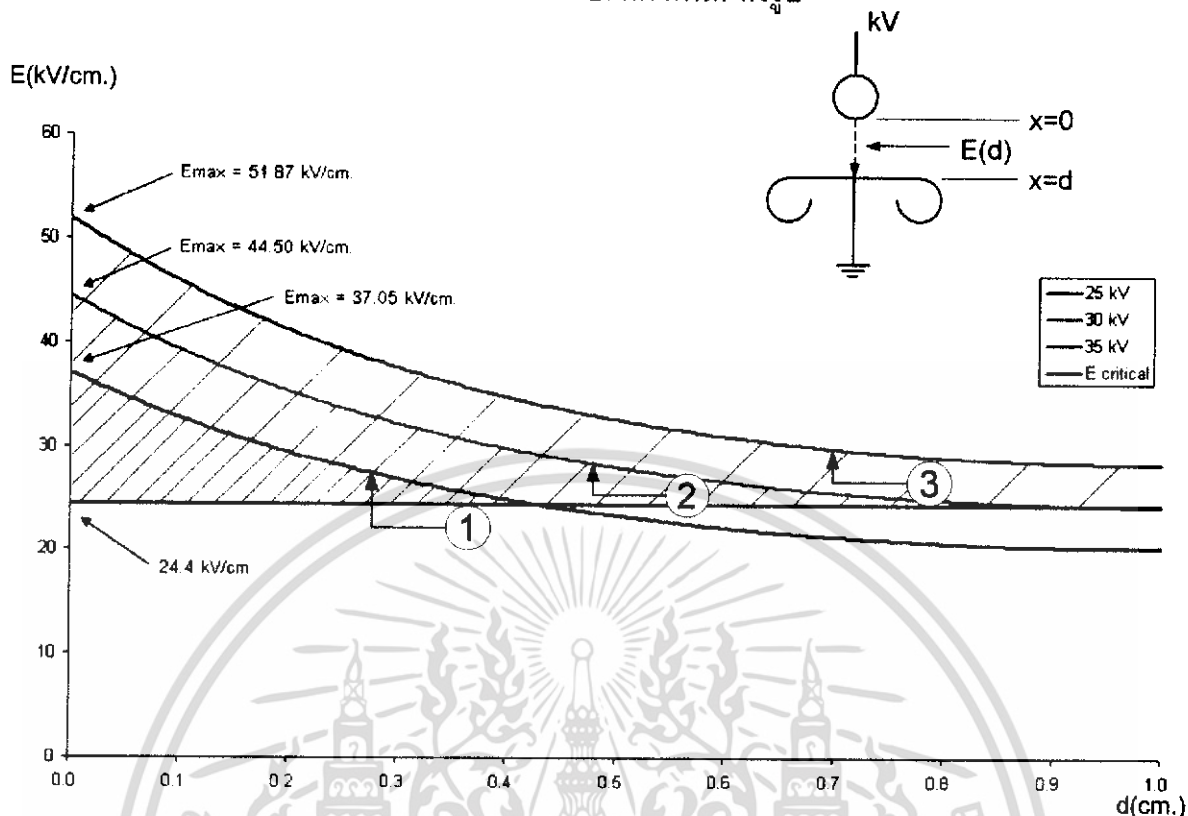
$$E_{\max} = 37.05 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{av}} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{25}{37.05} = 0.67$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป จะได้กราฟดังรูป

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป ของอีเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแก๊ป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า(E) กับระยะแก๊ป(d) เงื่อนไขที่ทำให้เริ่มเกิดการเบรกดาวนก็คือ $\int_0^x \alpha(x) dx = K$ ซึ่งค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20

จะได้ (1) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 25 kV คือ $\int_0^x C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 6.88$

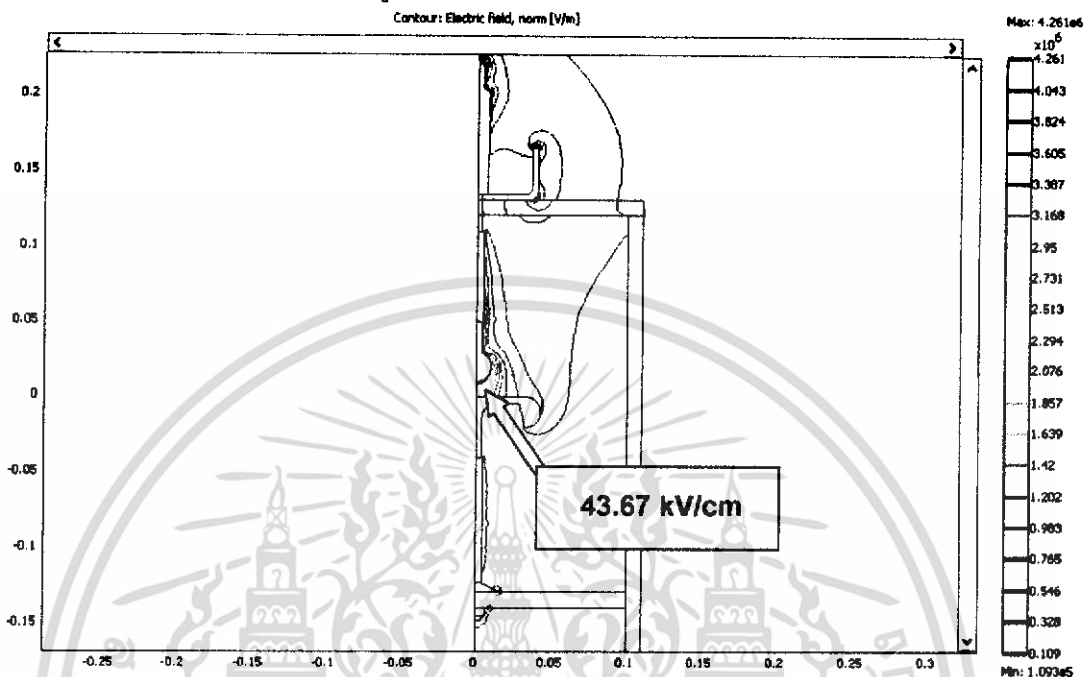
(2) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 30 kV คือ $\int_0^x C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 25.36$

(3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 35 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 62.28$

เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวนได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 27 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เพราะเมื่อหาเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนแล้วมีค่ามากกว่า 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ (แรงดันค้ำยอด)
2. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
3. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร
4. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 43.67 \text{ kV/cm}$$

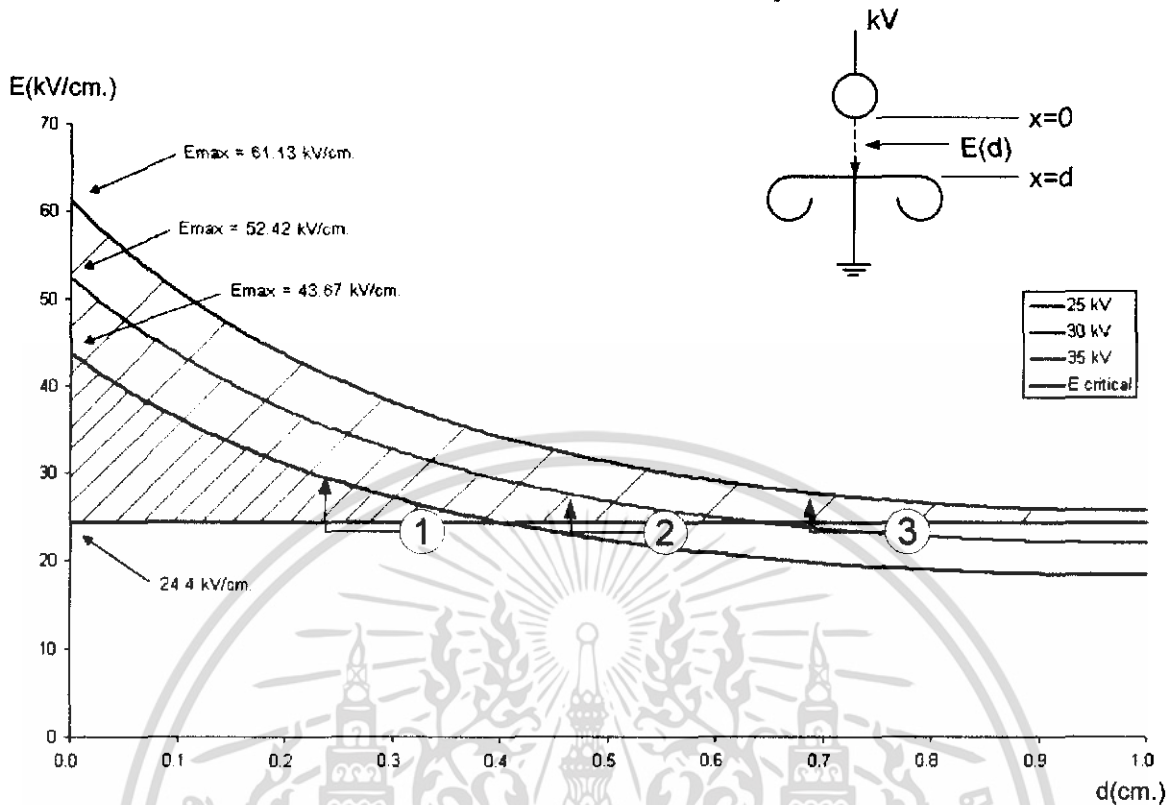
$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{25}{1} = 25 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{25}{43.67} = 0.57$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 30 และ 35 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป ของอิล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแก๊ป 1 ซม.

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) กับระยะแก๊ป (d) เงื่อนไขที่ทำให้เริ่มเกิดการเบรกดาวนก็คือ $\int_0^x \alpha(x) dx = K$ ซึ่งค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20

จะได้ (1) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 25 kV คือ $\int_0^x C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 14.19$

(2) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 30 kV คือ $\int_0^x C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 39.27$

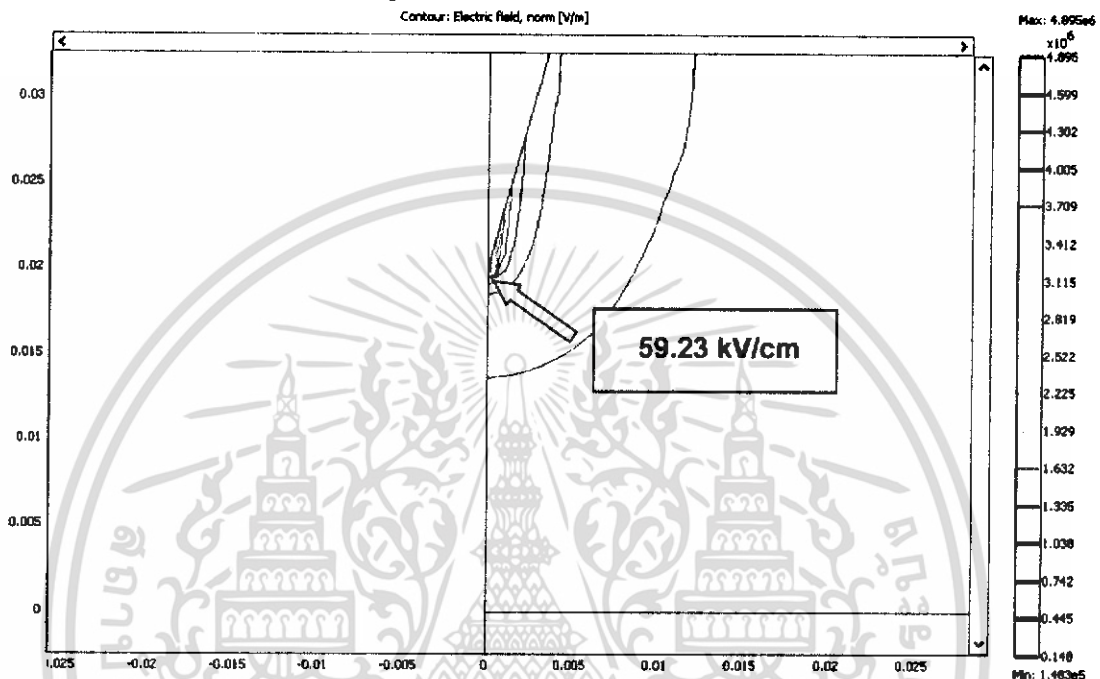
(3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 35 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 81.79$

เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันเบรกดาวนได้ว่า แรงดันตั้งแต่ 24 กิโลโวลต์ ขึ้นไปเป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ เพราะเมื่อหาเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนแล้วมีค่ามากกว่า 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบ

1. แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
2. ระยะแกป 2 เซนติเมตร
3. รีดปลายแหลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
4. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร รีดปลายแหลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

จากผลการจำลองพบว่า

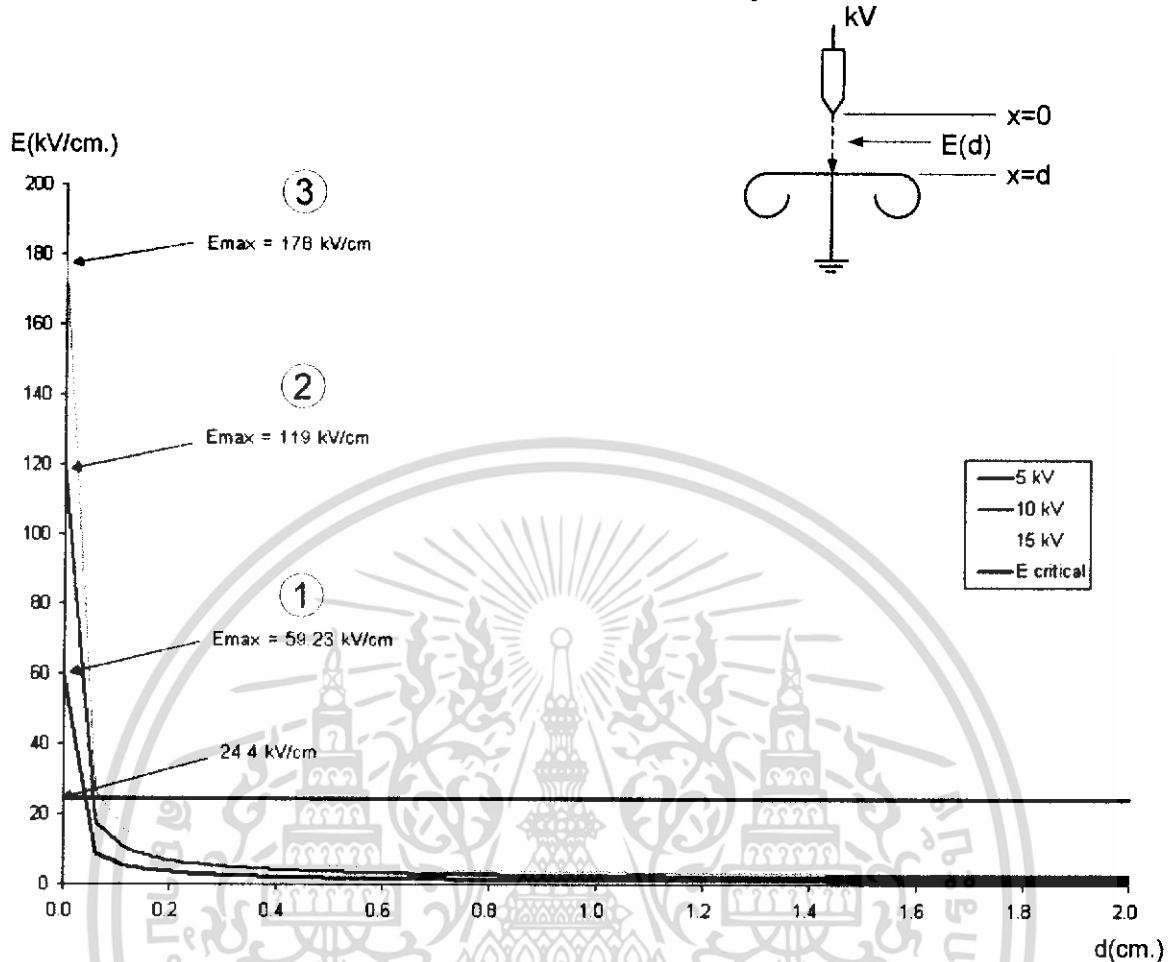
$$E_{\max} = 59.23 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{av}} = \frac{V}{d} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{2.5}{59.23} = 0.04$$

และเมื่อทำการป้อนแรงดันที่ 10 และ 15 กิโลโวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป

โปรแกรม FEM จะคำนวณหาค่า E ตามแนวระยะที่กำหนด ดังรูป



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป ของอิเล็กโทรดแบบรีด-ระนาบ โดยรีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแก๊ป 1 ซม.

จะได้ (1) ที่ 5 kV $E_{max}(59.23 \text{ kV/cm}) > E_{critical}(24.4 \text{ kV/cm})$ แสดงว่าเริ่มเกิดโคโรนา
 (2) ที่ 10 kV $E_{max}(119 \text{ kV/cm}) \gg E_{critical}(24.4 \text{ kV/cm})$ แสดงว่าเกิดโคโรนาชัดเจนขึ้น
 (3) ที่ 15 kV $E_{max}(178 \text{ kV/cm}) \gg E_{critical}(24.4 \text{ kV/cm})$ แสดงว่าเกิดโคโรนาชัดเจนขึ้น

เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำนายค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ว่า แรงดันที่ทดสอบ 5, 10, 15 กิโลโวลต์ เป็นค่าแรงดันที่น่าจะทำให้เกิดโคโรนาเริ่มเกิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสดร่ง, กระแสสลับ และแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

4.2.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสดร่ง

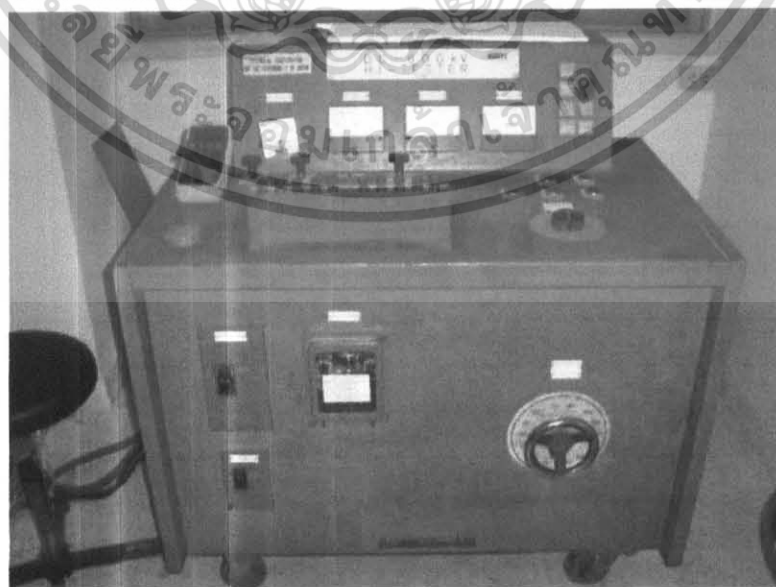
เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสดร่งมีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสดร่งให้กับชุดทดสอบโดยมีพิกัดแรงดัน 220 V / 600 kV และชนิดของแรงดันเอาต์พุตเป็นแบบ Negative



รูปที่ 4.15 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสดร่ง พิกัด 220 V / 600 kV 10 mA

4.2.2 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มหรือลดแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลง และทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อเกิดการสปาร์กหรือการเบรกดาวน์



รูปที่ 4.16 ตู้ควบคุมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ

หม้อแปลงมีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดทดสอบโดยมีพิกัดแรงดัน 100 kV พิกัดกำลังไฟฟ้า 5 kVA



รูปที่ 4.17 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV 50 mA

4.2.4 หม้อแปลงสำหรับทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

มีหน้าที่จ่ายแรงดันเพื่อใช้ในการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน โดยมีพิกัดแรงดัน 460 V/75 kV พิกัดกำลัง 40 kVA 50/50 Hz

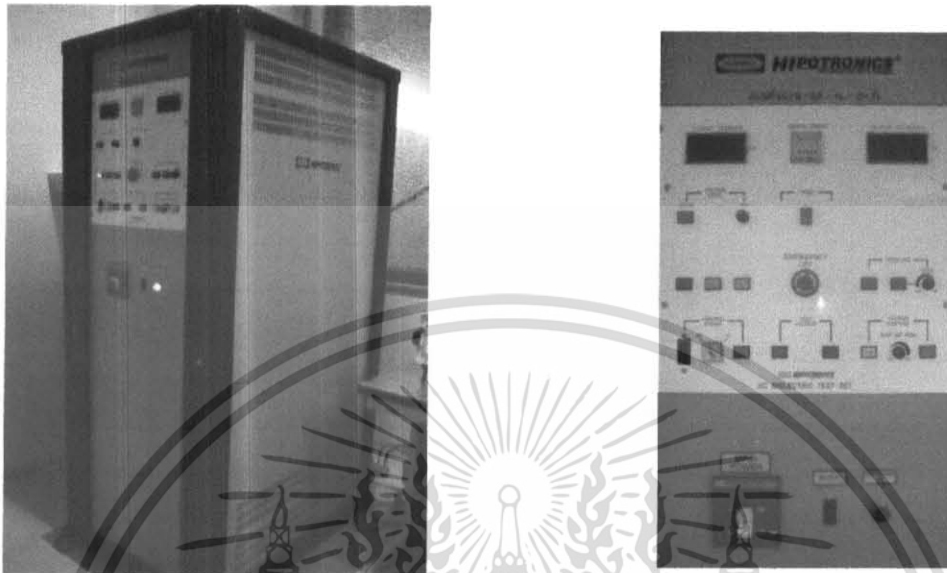


รูปที่ 4.18 หม้อแปลงทดสอบการเกิดดีสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับทดสอบ PD

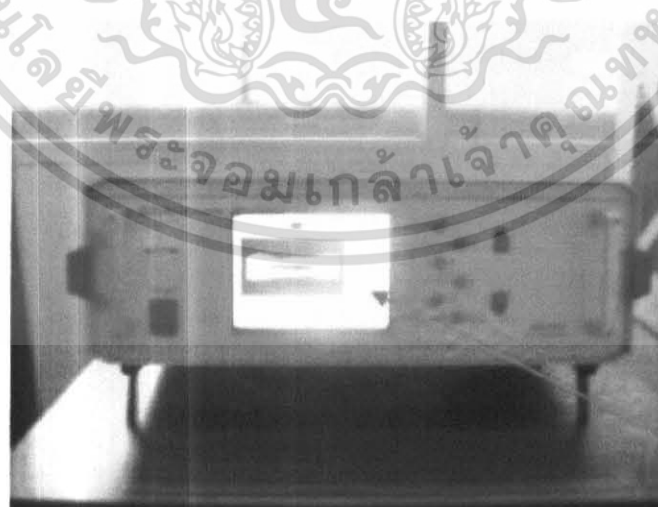
เป็นอุปกรณ์ในการปรับแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบการเกิด
 ดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.19 ชุดควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับทดสอบ PD

4.2.6 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101

ในการตรวจจับโคโรนาจะใช้กล่องตรวจจับโคโรนา PD DETECTOR
 DDX-9101 ใช้สำหรับทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน



หน้าจอแสดงผล

รูปที่ 4.20 เครื่อง PD DETECTOR DDX-9101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 คาปาซิเตอร์ปรับเทียบ



รูปที่ 4.21 คาปาซิเตอร์ปรับเทียบ

4.2.8 โวลต์เจดีไวเดอร์

เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันโดยการแบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนให้แรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ วัดได้ โดยการนำเอา impedance ค่าสูงๆ ต่อขนานกับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอา impedance ที่มีแรงดันตกคร่อมส่วนน้อยออกมาวัด

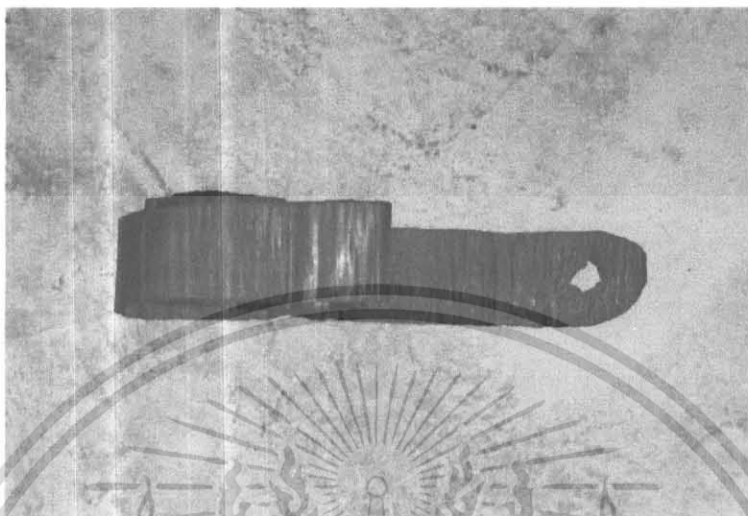


รูปที่ 4.22 RC โวลต์เจดีไวเดอร์ AC 100 kV , DC 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 สายนำส่งแรงสูง

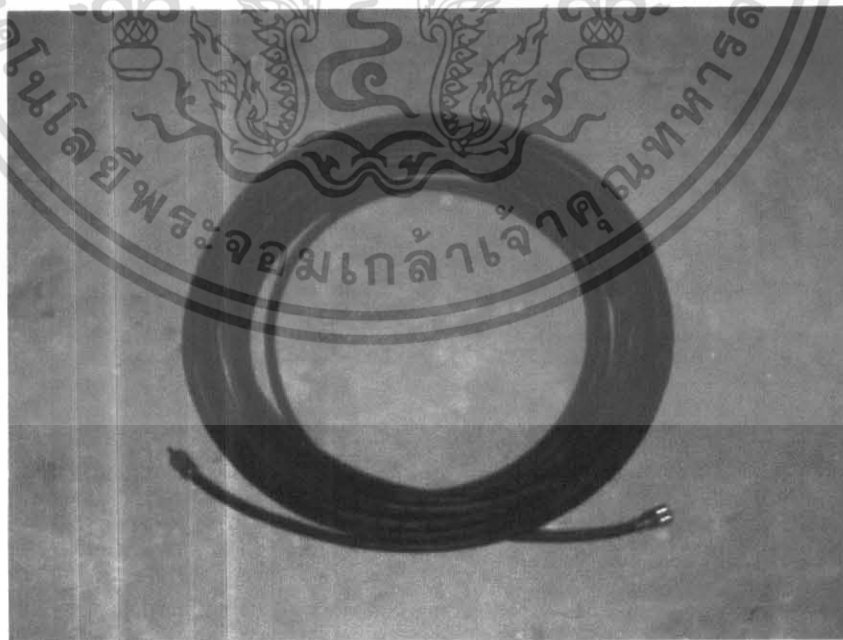
สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ 4.23 สายนำส่งแรงสูง

4.2.10 สายเคเบิลวัด

สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดจากโวลเตจดีไวเดอร์มายังเครื่องมือวัดแรงต่ำ



รูปที่ 4.24 สายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.11 ตะขอกรรวน

ในระบบแรงดันสูงเมื่อลดระดับแรงดันหมดแล้ว แต่ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดลองจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นจึงต้องมีตะขอกรรวนเอาไว้สัมผัสกับอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์ดีสชาร์จประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ให้หมดก่อนที่จะเข้าไปในบริเวณทดสอบ และตะขอกรรวนควรสัมผัสกับอุปกรณ์ตลอดเวลาเมื่อบุคคลกำลังปฏิบัติงานอยู่ในบริเวณที่ทดสอบ



รูปที่ 4.25 ตะขอกรรวน

4.2.12 ตัวต้านทานน้ำ

ตัวต้านทาน มีหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเนื่องจาก ในการทดสอบทุกครั้งจะเกิดการสปาร์กระหว่างหัวอิเล็กโทรด หมายถึง เกิดการลัดวงจรที่หม้อแปลง และขดลวดของหม้อแปลงจะได้รับกระแสสูง ดังนั้นตัวต้านทานจึงเป็นตัวลดกระแสเพื่อป้องกันขดลวดของหม้อแปลงเมื่อเกิดการสปาร์ก

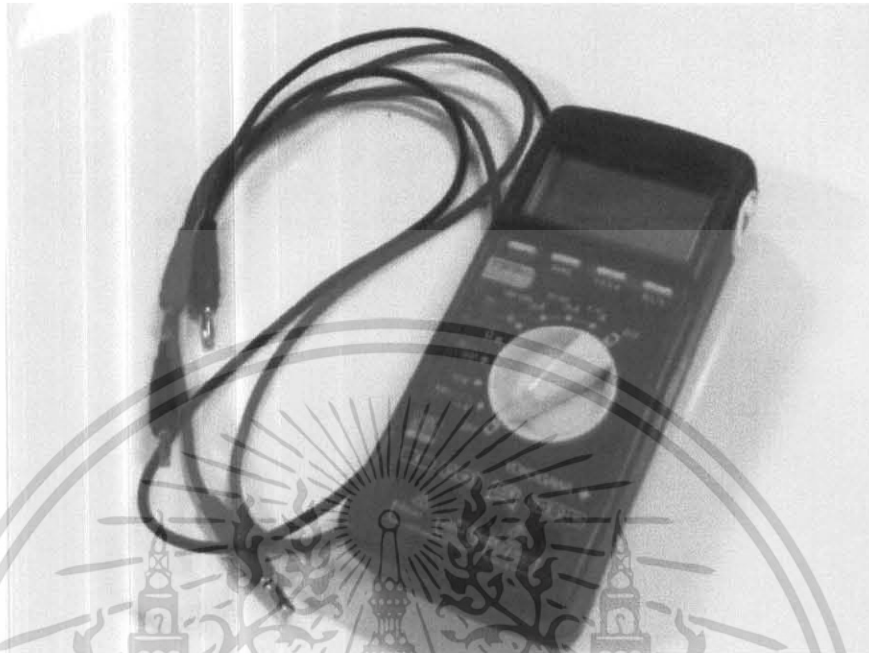


รูปที่ 4.26 ตัวต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.13 โวลต์มิเตอร์

โวลต์มิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ ใช้สำหรับวัดแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลง และวัดแรงดันที่ออกจากโวลเตจติไวเดอร์

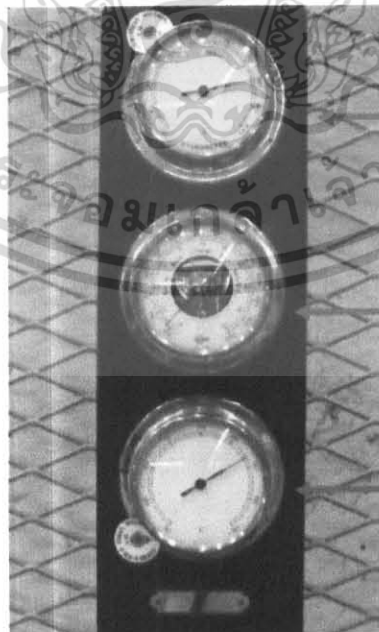


รูปที่ 4.27 โวลต์มิเตอร์

4.2.14 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้อง

เป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับวัดค่าความดันอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิใน

ห้องทดสอบ



ความดันอากาศ

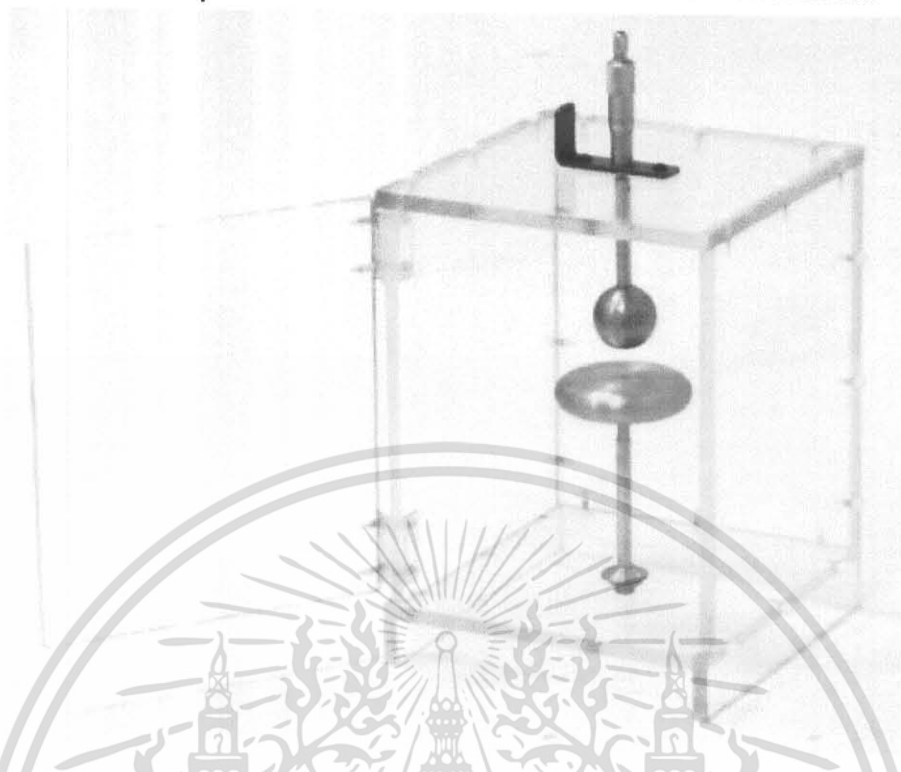
ความชื้นสัมพัทธ์

อุณหภูมิ

รูปที่ 4.28 อุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

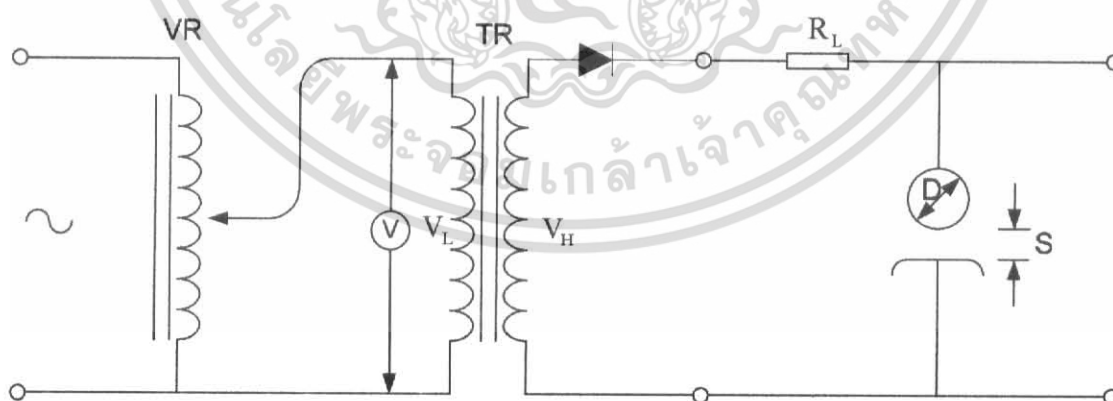
4.2.15 ชุดทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นและโคโรนาเริ่มเกิด



รูปที่ 4.29 ชุดทดสอบ

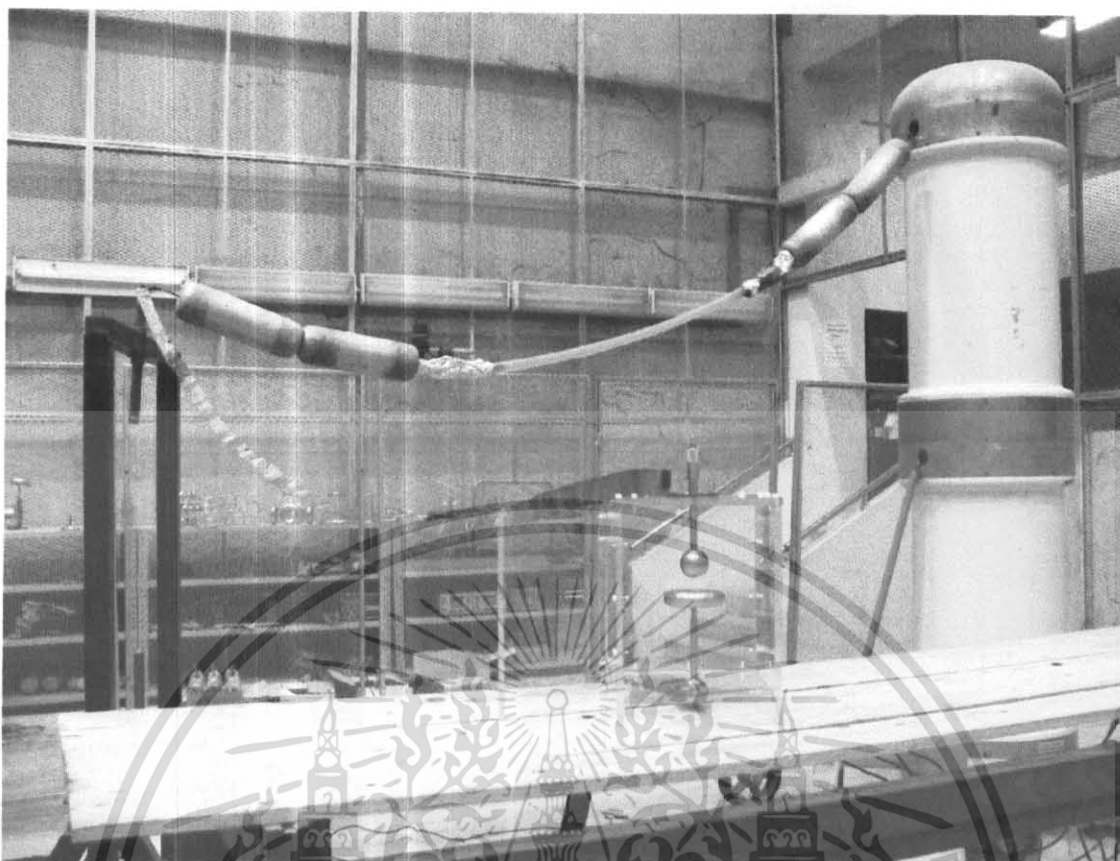
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

4.3.1 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นกระแสตรง



รูปที่ 4.30 วงจรการทดลองการเกิดเบรกดาว์น (กระแสตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



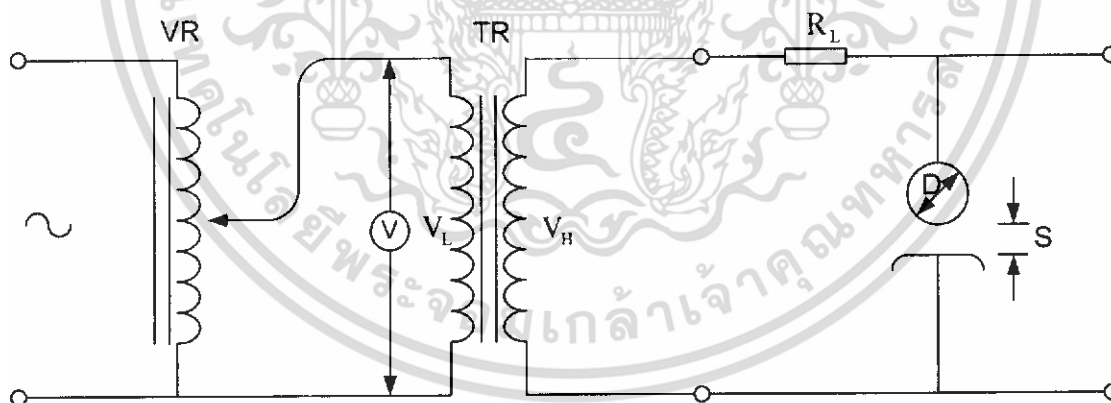
รูปที่ 4.31 วงจรการทดสอบจริงการเกิดเบรกดาวน (กระแสตรง)

1. ทำการปรับเทียบระบบวัดของเครื่องกำเนิดแรงสูงกระแสตรง เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูง เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง)
2. ต่อดังตามรูป 4.31
3. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อนำไปหาค่าความชื้นสัมบูรณ์จากกราฟ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ)
4. ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงต่ำ จนเกิดการเบรกดาวน โดยชุดทดสอบใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ และบันทึกค่าแรงดันที่ได้
5. ทดลองซ้ำในข้อ 2 อีก 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยออกมา
6. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4 บันทึกผลการทดลอง
7. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4 บันทึกผลการทดลอง
8. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

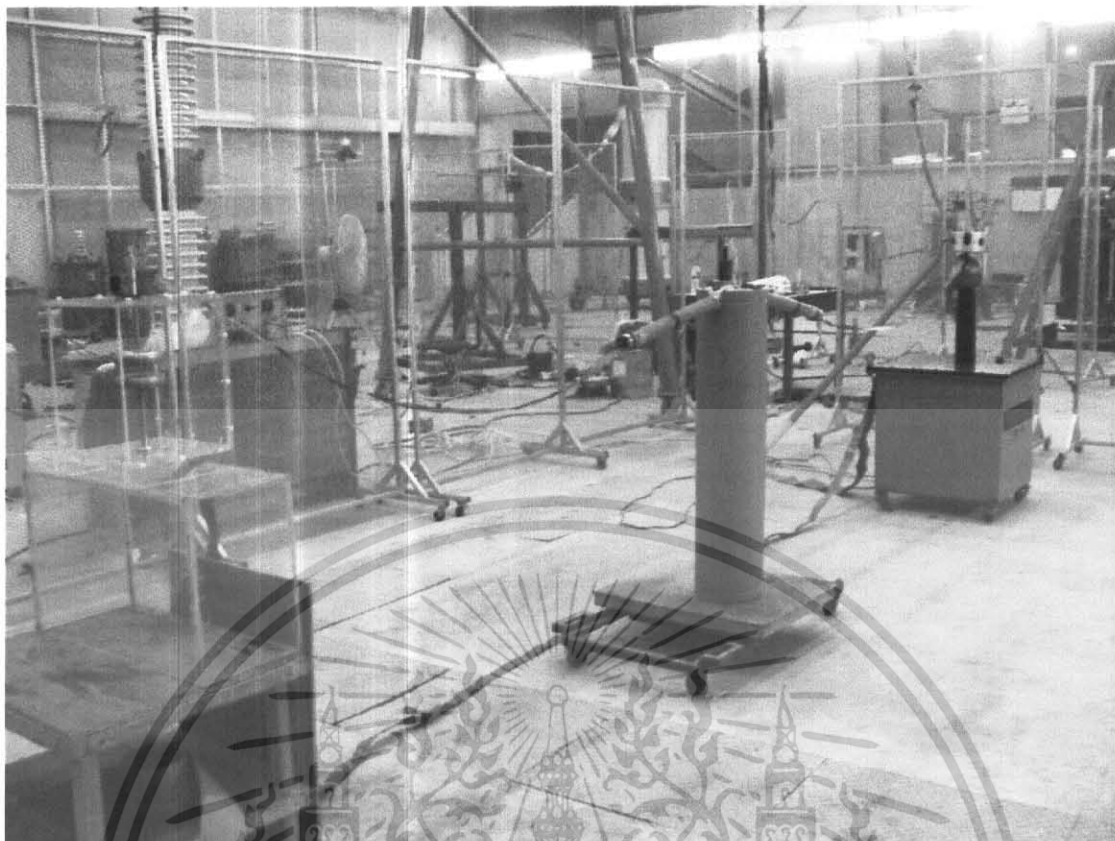
9. เปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
10. เปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
11. เปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบรีด-ระนาบ โดยรีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
12. เปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบรีด-ระนาบ โดยรีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาว์นกระแสสลับ



รูปที่ 4.32 วงจรการทดลองการเกิดเบรกดาว์น (กระแสสลับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 วงจรการทดสอบจริงการเกิดเบรกดาว์น (กระแสล้น)

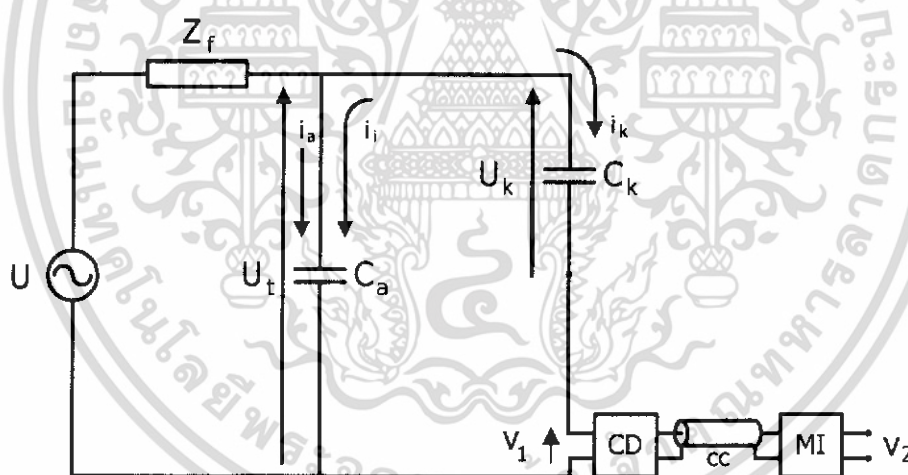
1. ทำการปรับเทียบระบบวัดของหม้อแปลง เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูง เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง)
2. ต่อยังตามรูป 4.33
3. จดบันทึกค่าอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อนำไปหาค่าความชื้นสัมบูรณ์จากกราฟ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ)
4. ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงต่ำ จนเกิดการเบรกดาว์น โดยชุดทดสอบใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ และบันทึกค่าแรงดันที่ได้
5. ทดลองซ้ำในข้อ 2 อีก 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยออกมา
6. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4 บันทึกผลการทดลอง
7. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4 บันทึกผลการทดลอง
8. เปลี่ยนอิเล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เปลี่ยนน็เล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
10. เปลี่ยนน็เล็กโตรดเป็นแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
11. เปลี่ยนน็เล็กโตรดเป็นแบบรีด-ระนาบ โดยรีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง
12. เปลี่ยนน็เล็กโตรดเป็นแบบรีด-ระนาบ โดยรีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 3, 4 และ 5 บันทึกผลการทดลอง

4.3.3 ขั้นตอนการทดสอบการเกิด PD (ทดสอบหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่ม

เกิด)



รูปที่ 4.34 วงจรการทดลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อ U คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง

C_k คือ Coupling Capacitor 100 kV

C_a คือ Test Object

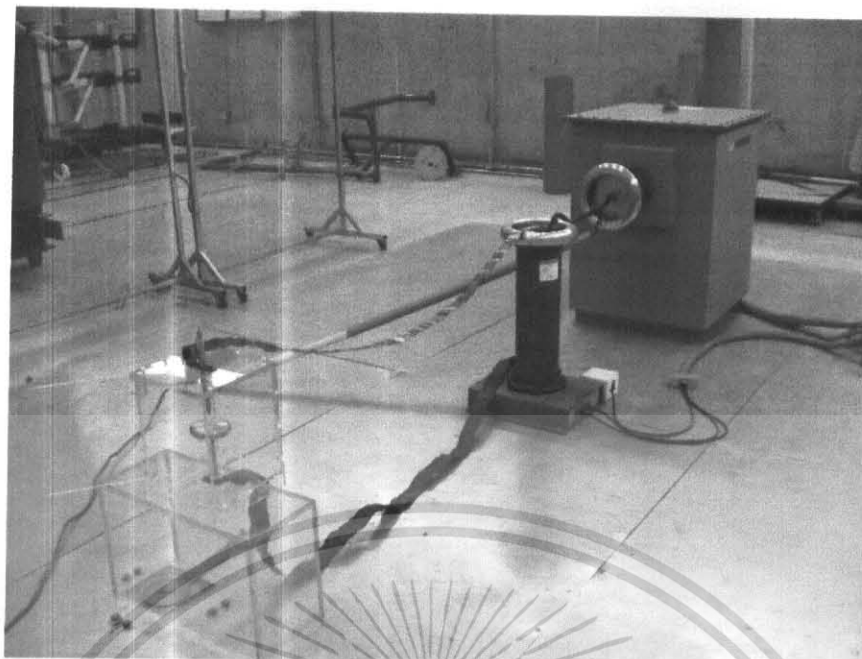
Z_f คือ ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์

CD คือ อุปกรณ์รับสัญญาณ(Coupling device)

MI คือ เครื่องมือวัด(Measuring instrument)

CC คือ สายเคเบิลนำสัญญาณ(Connecting cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 วงจรการทดสอบจริงการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

1. ต่อวงจรตามรูป 4.35 โดยอุปกรณ์ทดสอบ (C_u) จะใช้อิเล็กโตรดแบบรีดปลายแหลม-ระนาบโดยเส้นผ่าศูนย์กลางของรีดมีขนาด 1 เซนติเมตร และระยะแกปมีขนาด 2 เซนติเมตร โดยต่อรีดปลายแหลมเข้ากับด้านไฟฟ้าแรงสูง และต่อระนาบทางด้านกราวด์ เพื่อหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด
2. ขั้นตอนการเริ่มปรับเทียบเครื่องวัด PD
3. บ้อนแรงดันทดสอบให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบวัด PD ค่อยๆ เพิ่มแรงดันครั้งละ 1 กิโลโวลต์
4. บันทึกค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขณะเกิด PD
5. ทำการเปลี่ยนระยะแกป ให้มีระยะห่าง 2 เซนติเมตร
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และ 4

ค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดสอบนั้นจะต้องทำการปรับเทียบให้เป็นค่าแรงดันเบรกดาวนทางด้านแรงสูง โดยดูค่าการปรับเทียบได้จากภาคผนวก ง เมื่อทำการปรับเทียบแล้ว จะต้องนำค่าแรงดันเบรกดาวนทางด้านแรงสูงที่ได้จากการทดสอบไปทำการปรับแก้ด้วยค่าแฟกเตอร์แก้ไข (ภาคผนวก จ) เพื่อให้ค่าแรงดันเบรกดาวนที่ได้จากการทดสอบนั้นเปลี่ยนเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนตามมาตรฐาน

ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐานแสดงไว้ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสตรง)

ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 24-26 °C

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความชื้นสัมพัทธ์ 63-68 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 13-16 gm⁻³

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแก๊ป (cm)	แรงดันเบรกดาวน์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน (kV)
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	14.09
	1	27.43
	1.5	39.64
	2	47.72
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	16.72
	1	29.52
	1.5	39.82
	2	50.53
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	14.31
	0.7	18.70
	0.9	24.28
	1	26.96
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	15.38
	1	29.39
	1.5	37.23
	2	45.41
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	14.98
	1	25.48
	1.5	32.83
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	14.48
	0.7	17.97
	0.9	21.32
	1	22.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวนที่ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน (kV)
ร็อด-ระนาบ (ร็อด ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	14.66
	1	23.63
	1.5	29.41
	2	33.61
ร็อด-ระนาบ (ร็อด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	13.46
	1	18.14
	1.5	20.79
	2	24.65

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 24-26 °C

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความชื้นสัมพัทธ์ 63-68 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 13-16 gm⁻³

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวนที่ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน (kV)
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	17.18
	1	31.95
	1.5	43.85
	2	57.04
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	17.37
	1	32.05
	1.5	45.82
	2	58.21
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	17.86
	0.7	23.73
	0.9	29.22
	1	32.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน (kV)
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	17.76
	1	30.94
	1.5	41.20
	2	49.29
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	16.80
	1	28.47
	1.5	36.94
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	17.47
	0.7	22.16
	0.9	25.72
	1	27.35
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	16.84
	1	26.94
	1.5	33.22
	2	37.87
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	15.54
	1	21.85
	1.5	25.43
	2	28.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่สภาวะมาตรฐาน

ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 24 °C

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความชื้นสัมพัทธ์ 64.5 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 14 gm⁻³

รูปแบบอิเล็กโทรด	ระยะแกป (cm)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดค่ายอด สภาวะมาตรฐาน (kV)
รีดปลายแหลม-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	4.36
	2	5.13

รูปที่ 4.36 โคโรนาเริ่มเกิดของ
อิเล็กโทรดแบบ
รีด-ระนาบ ระยะแกป
2 เซนติเมตร ที่แรงดัน
4.93 กิโลโวลต์

รูปที่ 4.37 โคโรนาเริ่มเกิดของ
อิเล็กโทรดแบบ
รีด-ระนาบ ระยะแกป
1 เซนติเมตร ที่แรงดัน
4.19 กิโลโวลต์

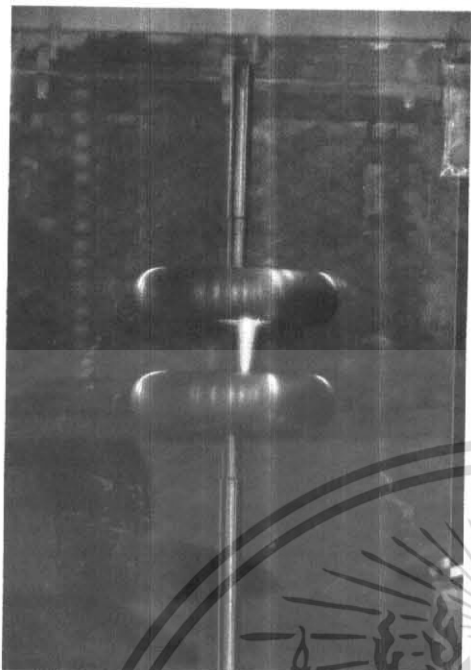
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



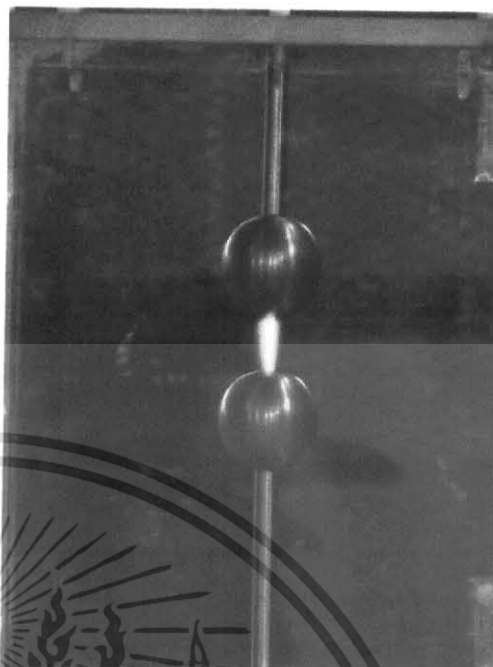
รูปที่ 4.38 รีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
 ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร
 ทดสอบหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

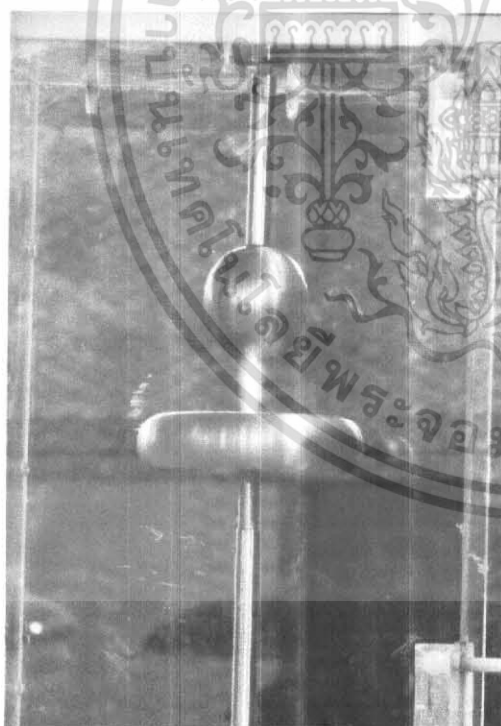
ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.39 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 4.40 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม



รูปที่ 4.41 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 4.42 ลักษณะการเกิดเบรกดาว์นของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

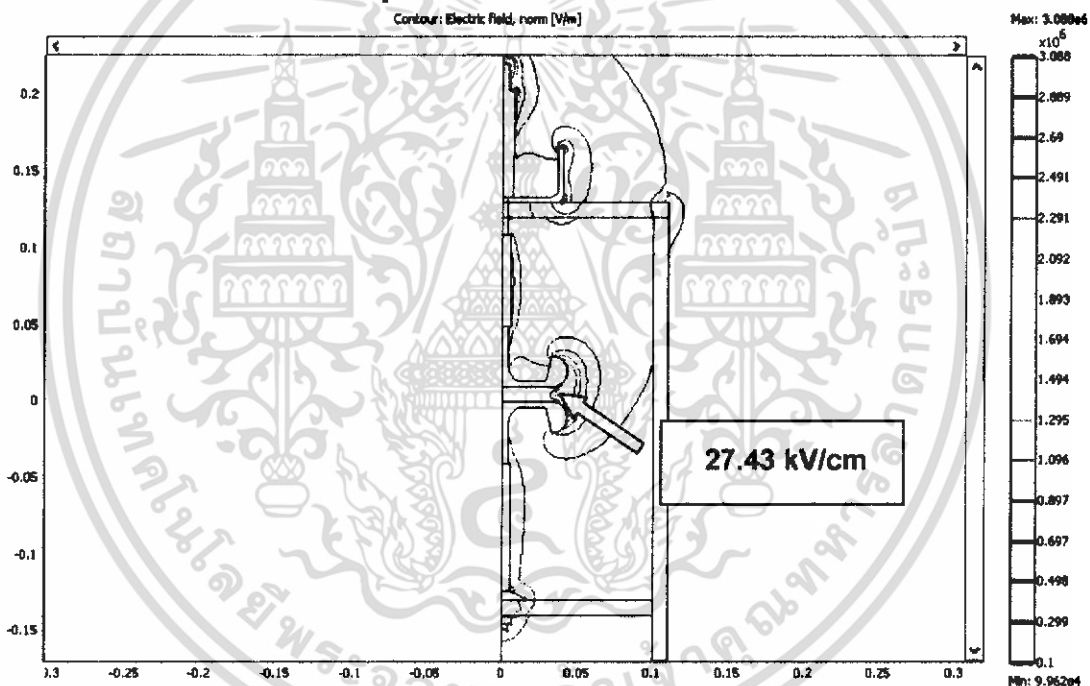
4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ได้กราฟเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิด

ต่อไปจะเป็นการยกตัวอย่างการนำค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จริงจากการทดสอบ มาทำการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ แล้วพิสูจน์ดูว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์และค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทดสอบนั้นจะสอดคล้องกับการทำนายค่าแรงดันเบรกดาวน์และค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในทางทฤษฎีมากน้อยเพียงใด

4.4.1.1 อีเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ

1. ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
2. แรงดันไฟฟ้า 27.43 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
3. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
4. ระบายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.43 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอีเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 27.43 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ระบายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

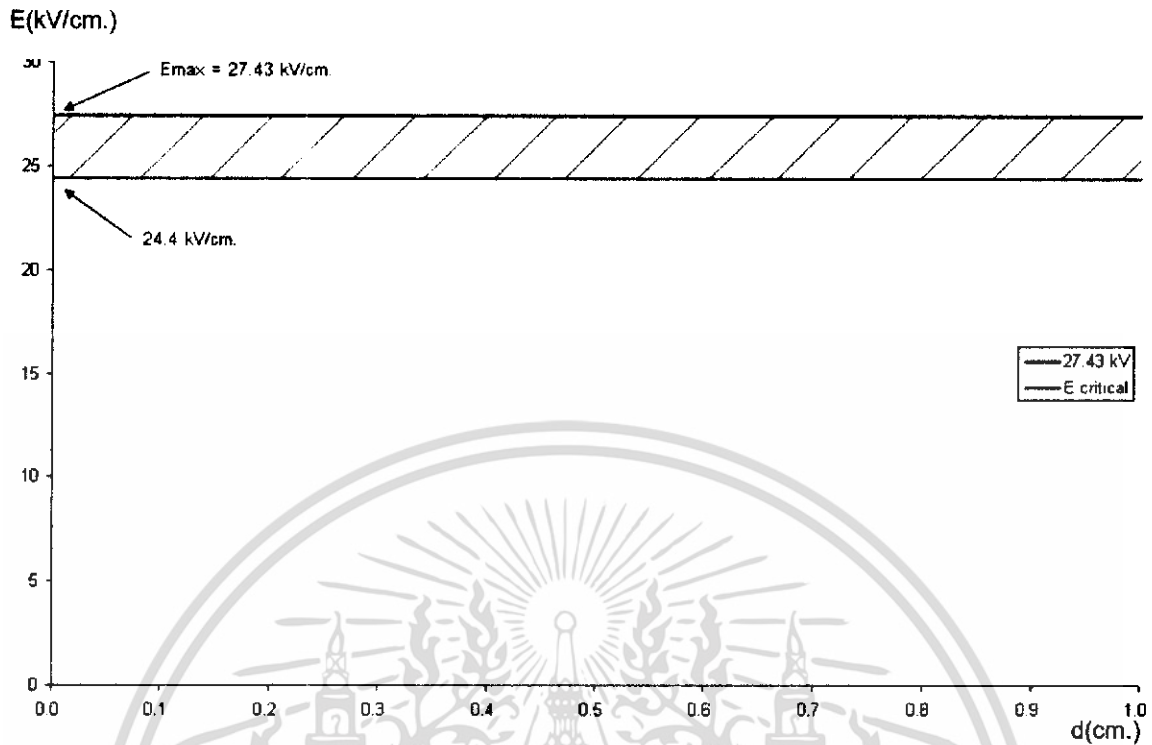
จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 27.43 \text{ kV/cm}$$

$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{27.43}{1} = 27.43 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{27.43}{27.43} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง)

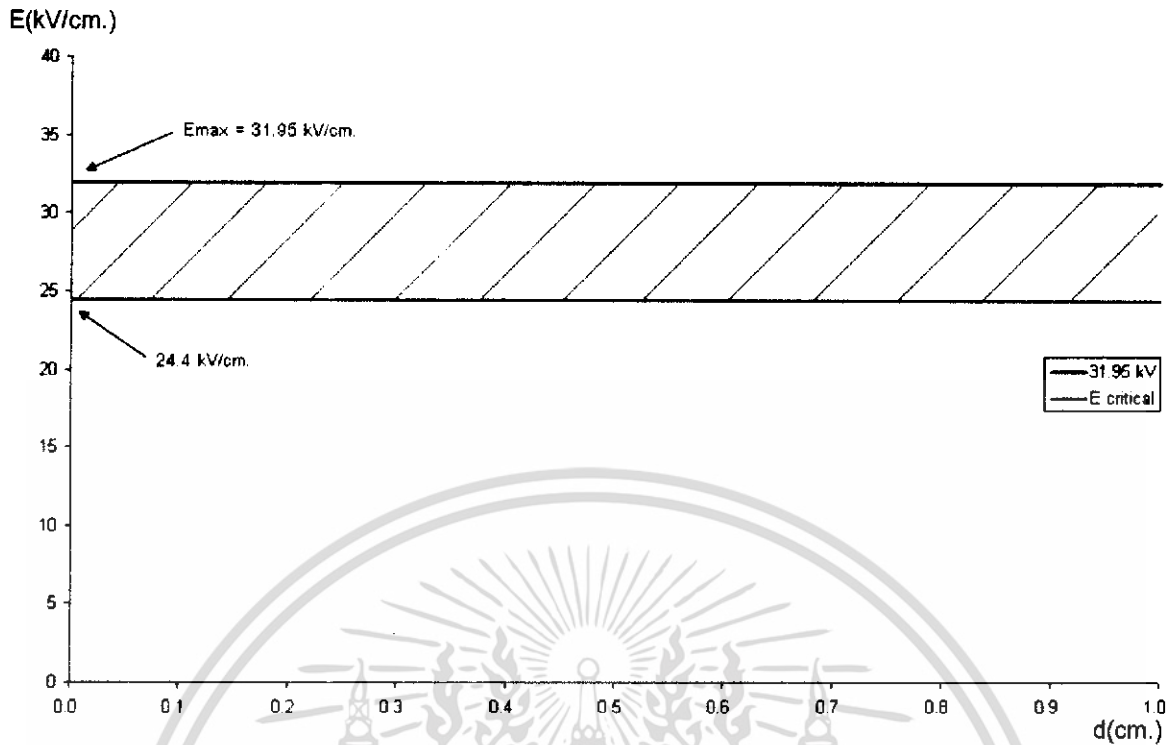
จะได้ พื้นที่จากสมการ $6.72 \times \sqrt{d} = 6.72 \times \sqrt{1} = 6.72$

พื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการป้อนแรงดัน 27.43 kV เท่ากับ **3.03**

พื้นที่ได้กราฟมีค่า **น้อยกว่า** พื้นที่จากสมการ

ดังนั้น การเบรกดาว์นที่เกิดขึ้นไม่สอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาว์นตามหลักทฤษฎี ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อ การเกิดเบรกดาว์น

และเมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 31.95 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด) แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ โดยระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

จะได้ พื้นที่จากสมการ $6.72 \times \sqrt{d} = 6.72 \times \sqrt{1} = 6.72$

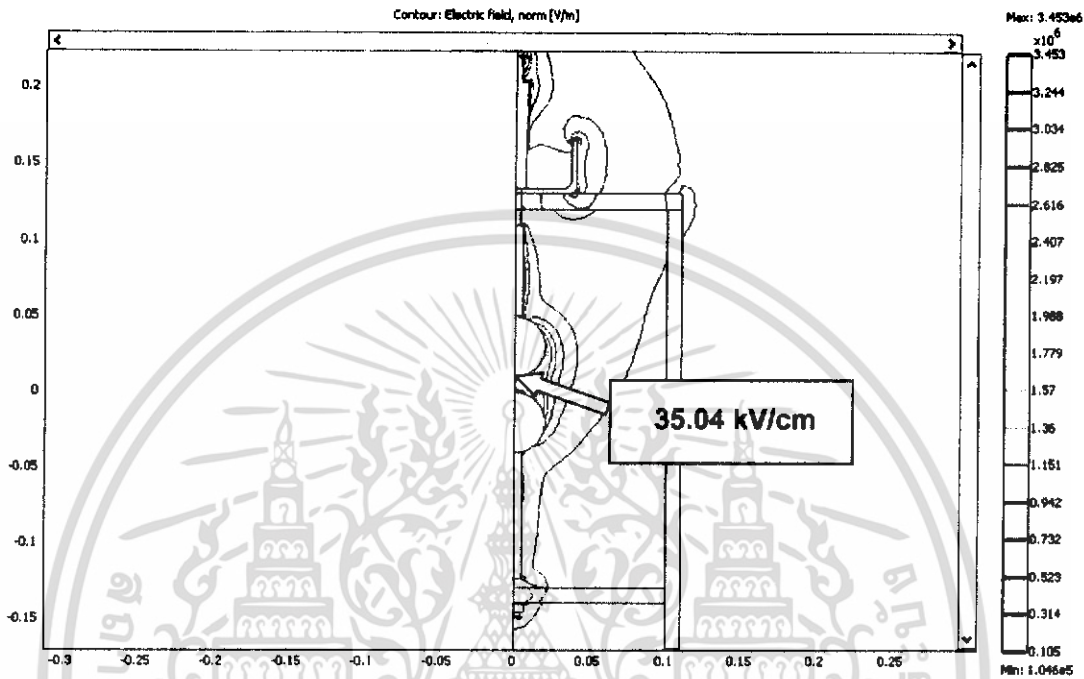
พื้นที่ได้กราฟที่ได้จากการป้อนแรงดัน 31.95 kV เท่ากับ **7.55**

พื้นที่ได้กราฟมีค่า **มากกว่า** พื้นที่จากสมการ

ดังนั้น การเบรกดาวนที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาวนตามหลักทฤษฎี

4.4.1.2 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม

1. ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
2. แรงดันไฟฟ้า 29.52 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
3. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
4. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร



รูปที่ 4.46 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ทรงกลม แรงดันไฟฟ้า 29.52 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร

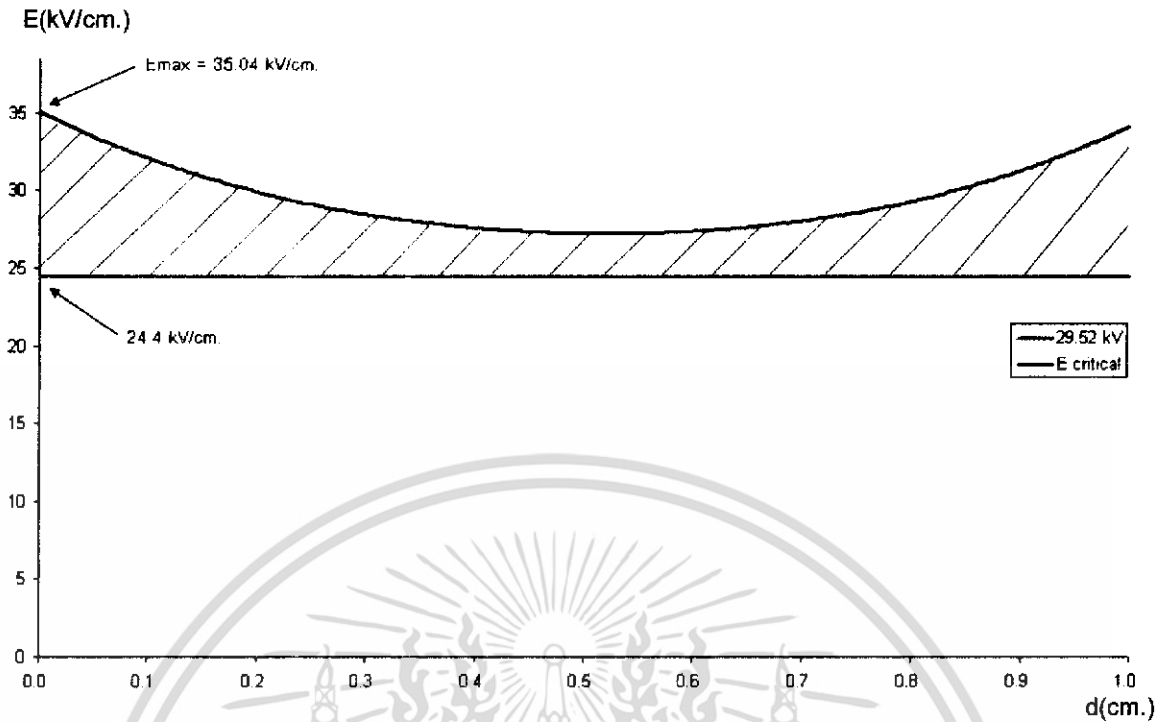
จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 35.04 \text{ kV/cm}$$

$$E_{av} = \frac{V}{d} = \frac{29.52}{1} = 29.52 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} = \frac{29.52}{35.04} = 0.84$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

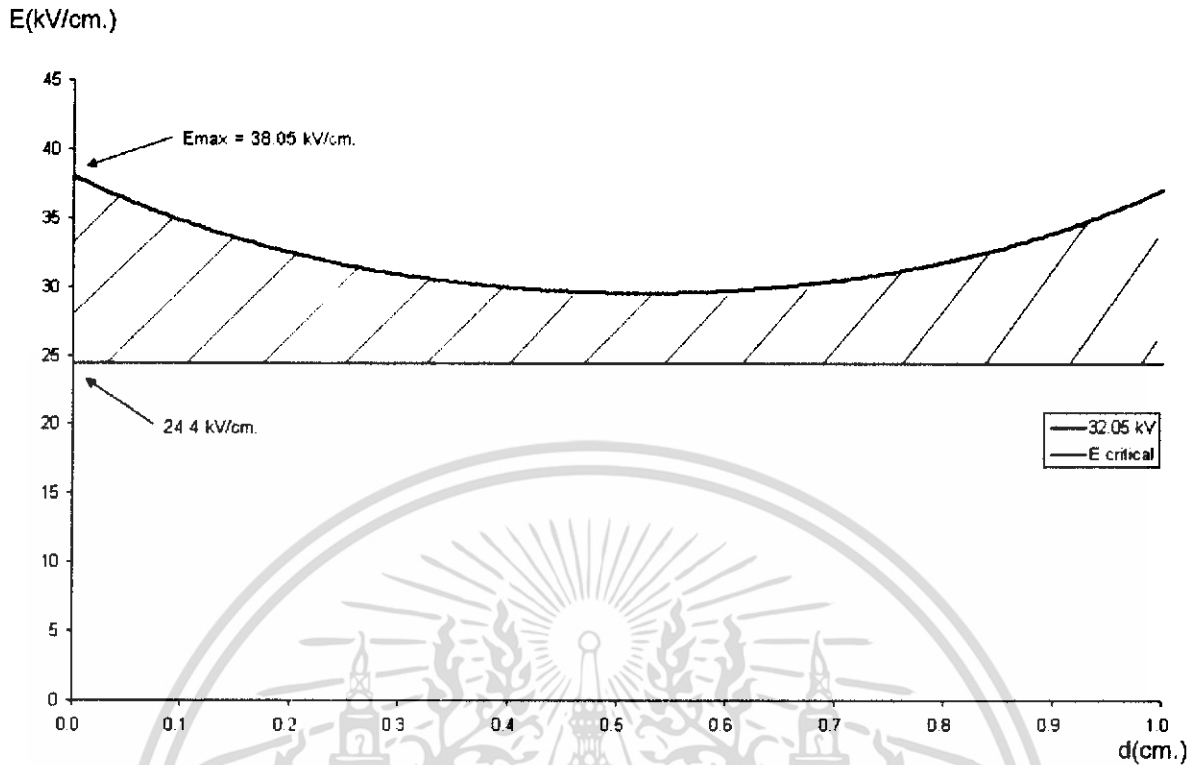


รูปที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของอิเล็กทรอนิกส์แบบ ทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง)

จะได้ เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 29.52 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_c \right]^2 p dx = 12.14$

ดังนั้น การเบรกดาวนที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาวนตามหลักทฤษฎี

และเมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 32.05 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด) แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป



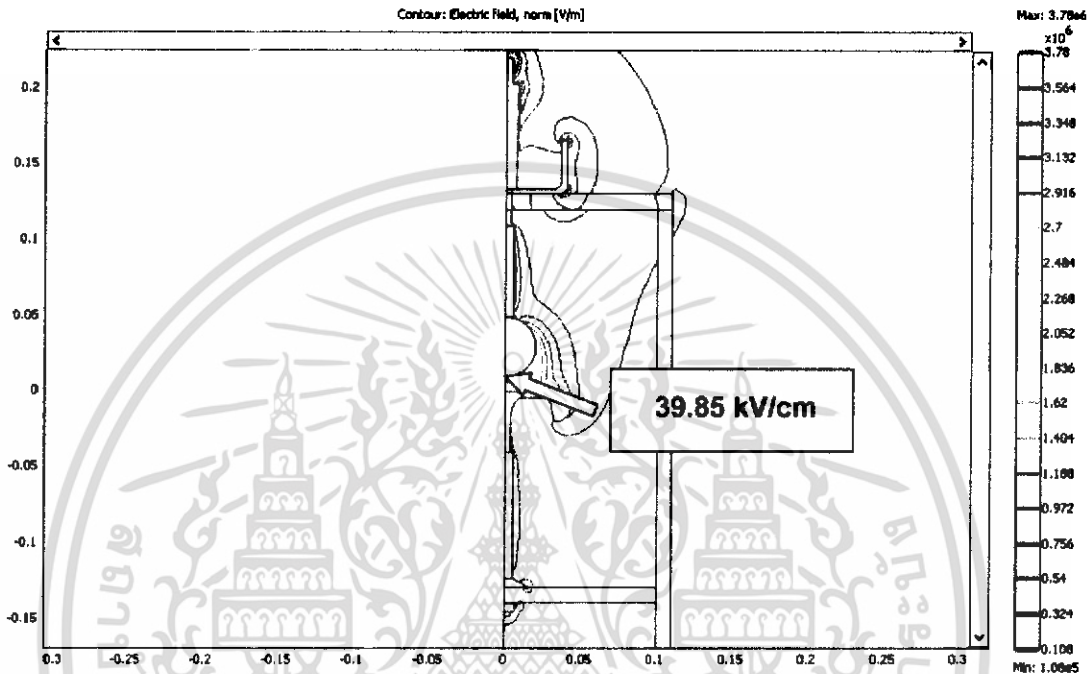
รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป ของ อิเล็กโตรดแบบ ทรงกลม-ทรงกลม โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระยะแก๊ป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

จะได้ เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดัน 32.05 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 p dx = 25.58$

ดังนั้น การเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาวน์ตามหลักทฤษฎี

4.4.1.3 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ

1. ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
2. แรงดันไฟฟ้า 29.39 กิโลโวลต์ (แรงดันต่ำสุด)
3. ระยะแกป 1 เซนติเมตร
4. ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร
5. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.49 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 29.39 กิโลโวลต์ ระยะแกป 1 เซนติเมตร ทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

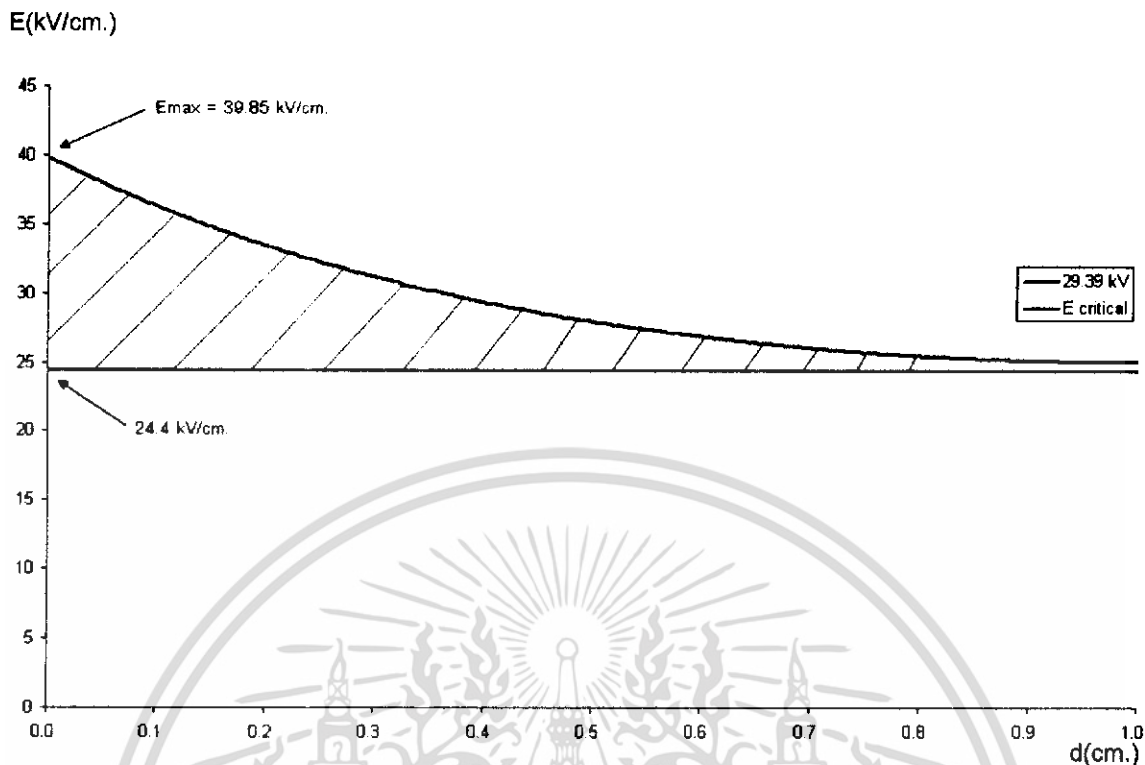
จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 39.85 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{av}} = \frac{V}{d} = \frac{29.39}{1} = 29.39 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{29.39}{39.85} = 0.74$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

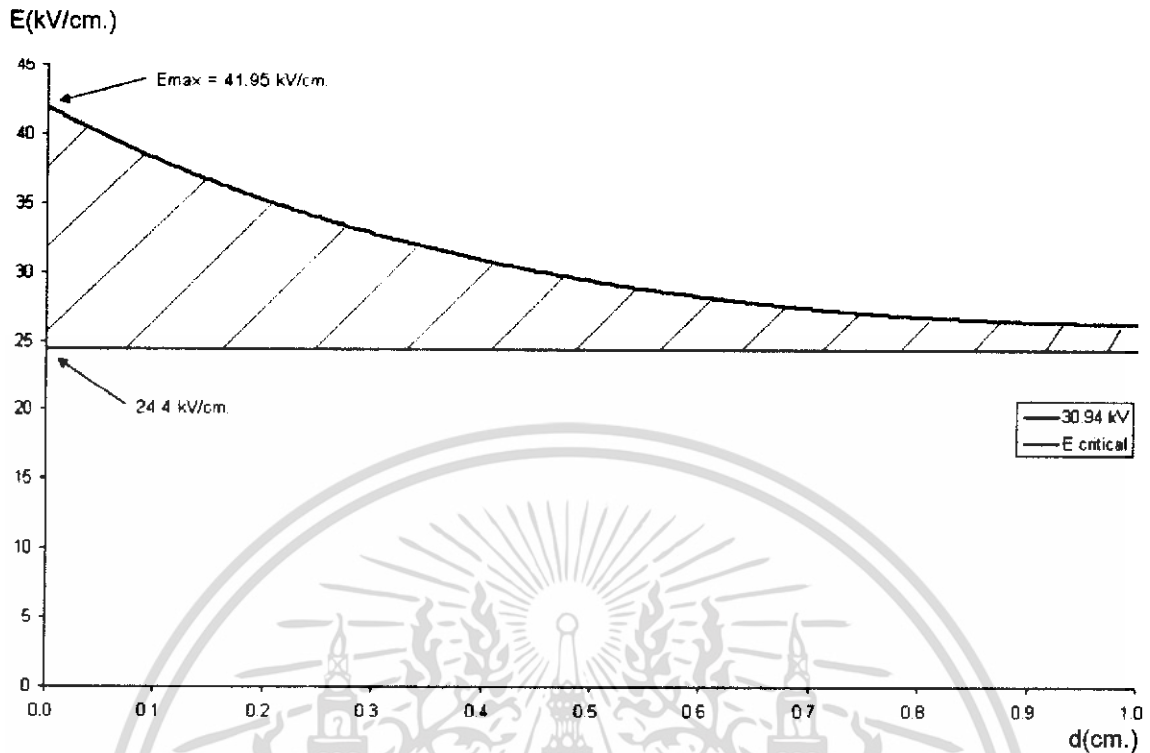


รูปที่ 4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสตรง)

จะได้ เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนีย์ที่แรงดัน 29.39 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 p dx = 17.07$

ดังนั้น การเบรกดาวนีย์ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาวนีย์ตามหลักทฤษฎี

และเมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสสลับ 30.94 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด) แล้ว ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป จะได้กราฟดังรูป



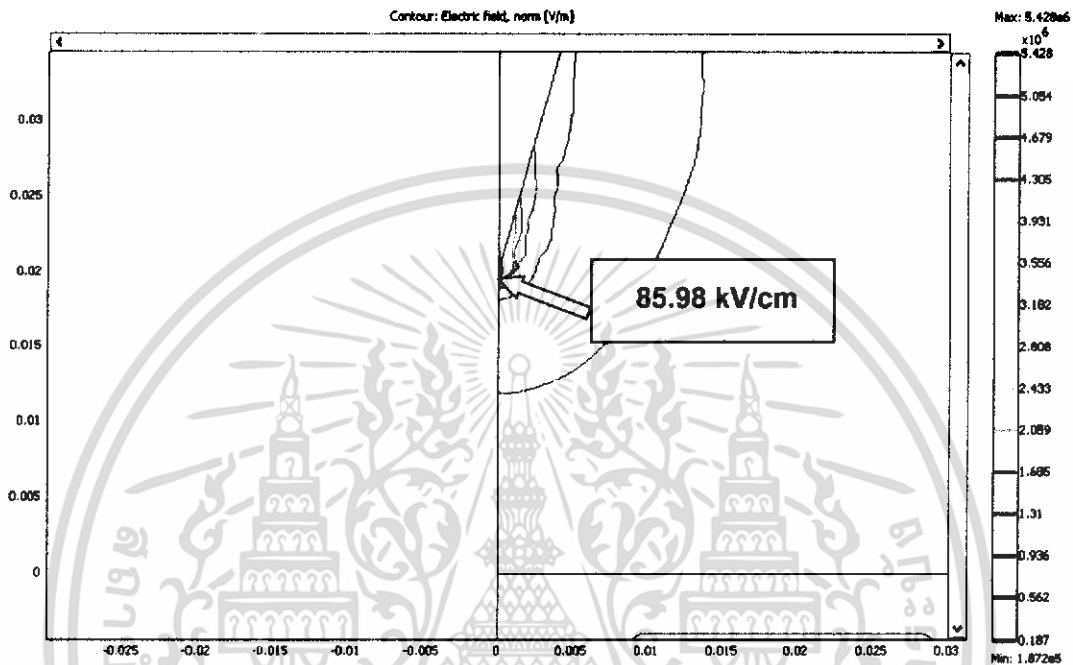
รูปที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแก๊ป ของ อิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ระนาบ โดยทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแก๊ป 1 ซม. (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

จะได้ เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนที่แรงดัน 30.94 kV คือ $\int_0^d C \left[\frac{E(x)}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 p dx = 24.92$

ดังนั้น การเบรกดาวนที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทำนายการเกิดเบรกดาวนตามหลักทฤษฎี

4.4.1.4 อิเล็กโทรดแบบรีด-ระนาบ

1. ทดสอบหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด
2. แรงดันไฟฟ้า 7.25 กิโลโวลต์ (แรงดันค่ายอด)
3. ระยะแกป 2 เซนติเมตร
4. รีดปลายแหลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.52 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบรีดปลายแหลม-ระนาบ แรงดันไฟฟ้า 7.25 กิโลโวลต์ ระยะแกป 2 เซนติเมตร รีดปลายแหลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ระนาบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

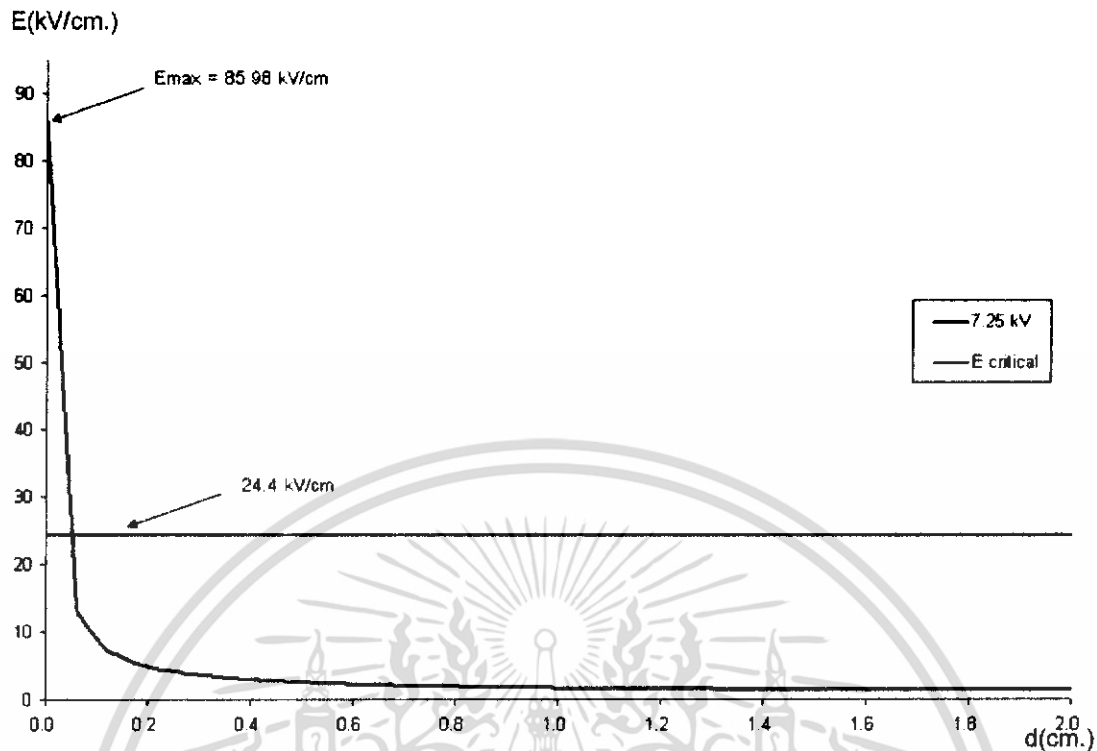
จากผลการจำลองพบว่า

$$E_{\max} = 85.98 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{av}} = \frac{V}{d} = \frac{7.25}{2} = 3.63 \text{ kV/cm}$$

$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} = \frac{3.63}{85.98} = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแกป ของ อิเล็กโตรดแบบรีดปลายแหลม-ระนาบ โดยรีดปลายแหลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 ซม. ระยะแกป 2 ซม. (แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด)

จะได้ ที่ 7.25 kV $E_{max}(85.98 \text{ kV/cm}) > E_{o\text{อากาศ}}(24.4 \text{ kV/cm})$ แสดงว่าเริ่มเกิดโคโรนา

ดังนั้น การเกิดโคโรนาเริ่มเกิดสอดคล้องกับการทำนายโคโรนาเริ่มเกิดตามหลักทฤษฎี

การหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ, เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในการทดลองที่เหลืองจะแสดงไว้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของอิเล็กโตรดแบบระนาบ-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟตามทฤษฎี $6.72 \times \sqrt{d}$	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	4.75	1.89
	1	6.72	3.03
	1.5	8.23	3.05
	2	9.50	-

ตารางที่ 4.5 ค่า K ของอิเล็กโตรดแบบต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	ค่า K
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	16.65
	1	12.14
	1.5	8.04
	2	10.45
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	4.45
	0.7	3.63
	0.9	7.05
	1	8.98
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	9.10
	1	17.07
	1.5	11.74
	2	13.70
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	7.88
	1	8.03
	1.5	8.22
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	7.65
	0.7	6.53
	0.9	7.32
	1	7.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

รูปแบบอิเล็กโทรด	ระยะแกป (cm)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟตามทฤษฎี $6.72 \times \sqrt{d}$	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	4.75	4.98
	1	6.72	7.55
	1.5	8.23	7.26
	2	9.50	8.30

ตารางที่ 4.7 ค่า K ของอิเล็กโทรดแบบต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

รูปแบบอิเล็กโทรด	ระยะแกป (cm)	ค่า K
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	21.65
	1	25.58
	1.5	29.78
	2	33.74
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	26.96
	0.7	28.68
	0.9	30.28
	1	32.68
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	26.00
	1	24.92
	1.5	24.24
	2	24.13
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	19.00
	1	18.06
	1.5	18.84
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	27.25
	0.7	23.09
	0.9	24.06
	1	24.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางแสดงพื้นที่ใต้กราฟและค่า K จะสังเกตว่าในกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ผลที่ได้จากการทดสอบส่วนมากเมื่อนำมาทำการพิสูจน์ด้วยทฤษฎีการเกิดเบรกดาว์นพบว่ามีความไม่สอดคล้องกับทางทฤษฎีเมื่อกำหนดให้พื้นที่ใต้กราฟภายใต้เงื่อนไขการเริ่มเกิดเบรกดาว์นเท่ากับ $6.72 \times \sqrt{d}$ และค่า K อยู่ในช่วง 10-20 ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องมาจากเกิดการค้ำของประจุในหม้อแปลงทดสอบหรือในตัวอิเล็กทรอนิกส์ จึงทำให้เกิดการเบรกดาว์นเร็วทำให้ค่าแรงดันเบรกดาว์นมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันเบรกดาว์นทางทฤษฎี ในกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะสังเกตว่าผลที่ได้จากการทดสอบส่วนมากเมื่อนำมาพิสูจน์ด้วยทฤษฎีการเกิดเบรกดาว์นพบว่ามีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีจริงและในกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อนำมาพิสูจน์พบว่ามีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีเช่นเดียวกัน

4.4.2 วิเคราะห์ค่าแรงดันเบรกดาว์นและโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

ค่าแรงดันเบรกดาว์นและโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดสอบจริงแสดงไว้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์นที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาว์น ค่ายอด จากการทำนาย (kV)	แรงดันเบรกดาว์น ค่ายอด จากการทดสอบจริง (kV)
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 31	27.43
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	1	> 29	29.52
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	1	> 28	26.96
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 28	29.39
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 27	25.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8(ต่อ) เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทำนาย (kV)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทดสอบจริง (kV)
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 24	22.80

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทำนาย (kV)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทดสอบจริง (kV)
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 31	31.95
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	1	> 29	32.05
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	1	> 28	32.05
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 28	30.94
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 27	28.47
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	> 24	27.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทำนาย (kV)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด จากการทดสอบจริง (kV)
รีดปลายแหลม-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	2	> 5	7.25

จากตารางเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบจะสังเกตว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ทดสอบกับไฟฟ้ากระแสตรงบางส่วนมีค่าแรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันที่ทำนายไว้อาจมีผลจากปัจจัยอื่น เช่น เกิดการค้ำของประจุภายในหม้อแปลง ส่วนในการทดสอบกับไฟฟ้ากระแสสลับและโคโรนาเริ่มเกิดพบว่าค่าแรงดันที่ได้มีแนวโน้มเป็นไปตามที่ได้ทำนายไว้

4.4.3 วิเคราะห์ถึงคุณลักษณะขององค์ประกอบที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ สามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวน์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กโตรด และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	E_{max} (kV/cm)	E_{av} (kV/cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด สภาวะมาตรฐาน (kV)	η^*
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	28.18	28.18	14.09	1
	1	27.43	27.43	27.43	1
	1.5	26.43	26.43	39.64	$\cong 1$
	2	23.89	23.86	47.72	$\cong 1$
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	36.30	33.44	16.72	0.92
	1	35.04	29.52	29.52	0.84
	1.5	34.75	26.55	39.82	0.76
	2	36.63	25.27	50.53	0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวน์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กโตรด และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสตรง)

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	E_{max} (kV/cm)	E_{av} (kV/cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด สภาวะมาตรฐาน (kV)	η^*
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	33.88	28.62	14.31	0.84
	0.7	33.86	26.71	18.70	0.79
	0.9	37.13	26.98	24.28	0.73
	1	38.53	26.96	26.96	0.7
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	36.06	30.76	15.38	0.85
	1	39.85	29.39	29.39	0.74
	1.5	38.28	24.82	37.23	0.65
	2	39.17	22.71	45.41	0.58
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	36.93	29.96	14.98	0.81
	1	37.08	25.48	25.48	0.69
	1.5	38.06	21.89	32.83	0.58
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	39.30	28.96	14.48	0.74
	0.7	38.52	25.67	17.97	0.67
	0.9	39.53	23.69	21.32	0.6
	1	39.84	22.80	22.80	0.57
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	39.75	29.32	14.66	0.74
	1	41.14	23.63	23.63	0.57
	1.5	41.54	19.61	29.41	0.47
	2	41.67	16.81	33.61	0.4
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	46.98	26.92	13.46	0.57
	1	45.68	18.14	18.14	0.4
	1.5	44.99	13.86	20.79	0.31
	2	48.34	12.33	24.65	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวน์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กโตรด และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	E_{max} (kV/cm)	E_{av} (kV/cm)	แรงดันเบรกดาวน์ ค่ายอด สภาวะมาตรฐาน (kV)	η^*
ระนาบ-ระนาบ (ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	34.36	34.36	17.18	1
	1	31.95	31.95	31.95	1
	1.5	23.24	29.23	43.85	$\cong 1$
	2	28.55	28.52	57.04	$\cong 1$
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 4 cm.)	0.5	37.71	34.74	17.37	0.92
	1	38.05	32.05	32.05	0.84
	1.5	39.99	30.55	45.82	0.76
	2	42.19	29.11	58.21	0.69
ทรงกลม-ทรงกลม (ทรงกลม ϕ 2 cm.)	0.5	42.28	35.72	17.86	0.84
	0.7	42.96	33.90	23.73	0.79
	0.9	44.68	32.47	29.22	0.73
	1	45.81	32.05	32.05	0.7
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 4 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	41.61	35.52	17.76	0.85
	1	41.95	30.94	30.94	0.74
	1.5	42.36	27.47	41.20	0.65
	2	42.52	24.65	49.29	0.58
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 3 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	41.41	33.60	16.80	0.81
	1	42.24	28.47	28.47	0.67
	1.5	42.82	24.63	36.94	0.58
ทรงกลม-ระนาบ (ทรงกลม ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	47.43	34.94	17.47	0.74
	0.7	47.53	31.66	22.16	0.67
	0.9	47.69	28.58	25.72	0.6
	1	47.79	27.35	27.35	0.57
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 2 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	45.69	33.68	16.84	0.74
	1	46.89	26.94	26.94	0.57
	1.5	46.92	22.15	33.22	0.47
	2	46.98	18.94	37.87	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ค่ายอดสภาวะมาตรฐาน และค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กโตรด และระยะแกปต่างๆ (ไฟฟ้ากระแสสลับ)

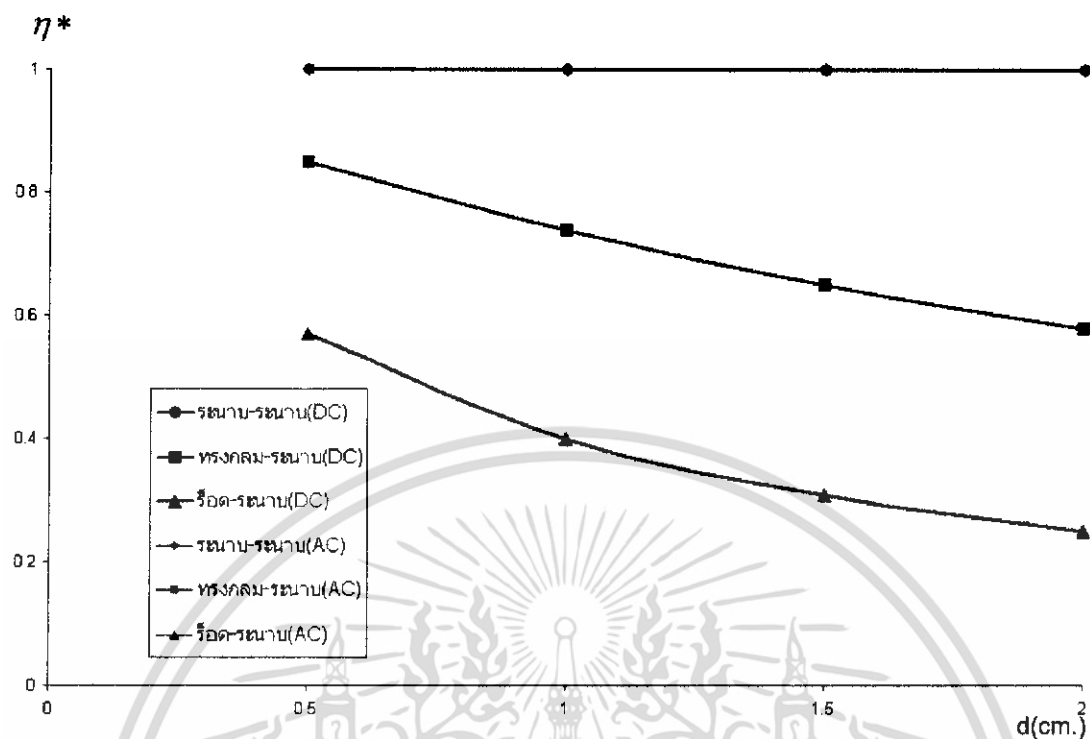
รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะแกป (cm)	E_{max} (kV/cm)	E_{av} (kV/cm)	แรงดันเบรกดาวนีย์ ค่ายอด สภาวะมาตรฐาน (kV)	η^*
รีด-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	0.5	54.24	31.08	15.54	0.57
	1	55.03	21.85	21.85	0.4
	1.5	54.98	16.95	25.43	0.31
	2	55.30	14.10	28.20	0.25

ตารางที่ 4.13 สรุปค่า E_{max} , ค่า E_{av} , ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดสภาวะมาตรฐานและค่า η^* ของรูปแบบอิเล็กโตรด และระยะแกปต่างๆ

รูปแบบอิเล็กโตรด	ระยะ แกป (cm)	E_{max} (kV/cm)	E_{av} (kV/cm)	แรงดันโคโรนา เริ่มเกิด สภาวะมาตรฐาน* (kV)	η^*
รีดปลายแหลม-ระนาบ (รีด ϕ 1 cm. ระนาบ ϕ 6.6 cm.)	1	317	6.17	6.17	0.02
	2	85.98	3.63	7.25	0.04

เมื่อได้ค่าต่างๆ ตามตารางมาแล้ว สามารถนำค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามาพล็อตกราฟเพื่อพิจารณาคูณลักษณะขององค์ประกอบที่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

กราฟแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กโทรดและระยะแกป

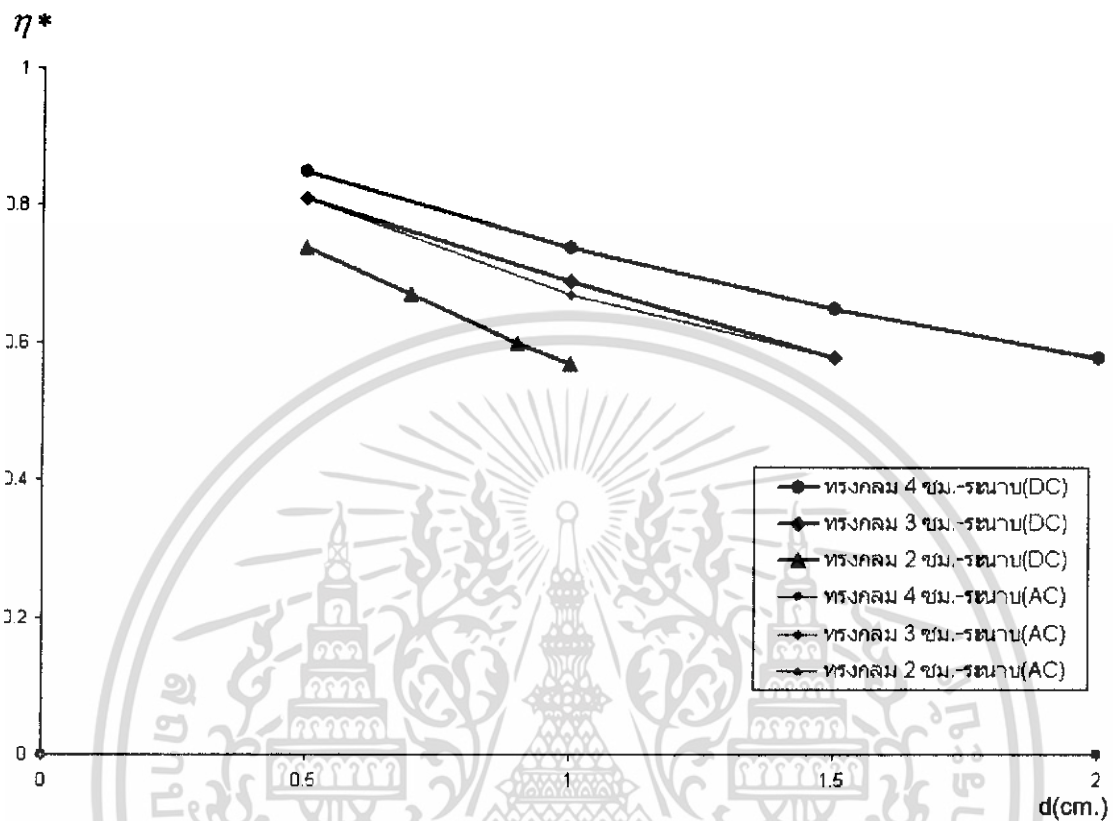


รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กโทรดที่ระยะแกปต่างๆ (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ)

จากกราฟจะพบว่า การเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กโทรดจะมีผลทำให้ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยที่อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงที่สุด ส่วนอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลงมา และอิเล็กโทรดแบบรีด-ระนาบจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีอิเล็กโทรดมีลักษณะเหมือนกันและระยะแกปเท่ากันนั้น จะมีค่าเท่ากัน

ในกรณีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเมื่อระยะแกปมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ ส่วนในกรณีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงนั้น เมื่อระยะแกปมีค่าเพิ่มขึ้นค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อระยะแกปลดลง โดยค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีอิเล็กโทรดมีลักษณะเหมือนกันและระยะแกปเท่ากันนั้น จะมีค่าเท่ากัน

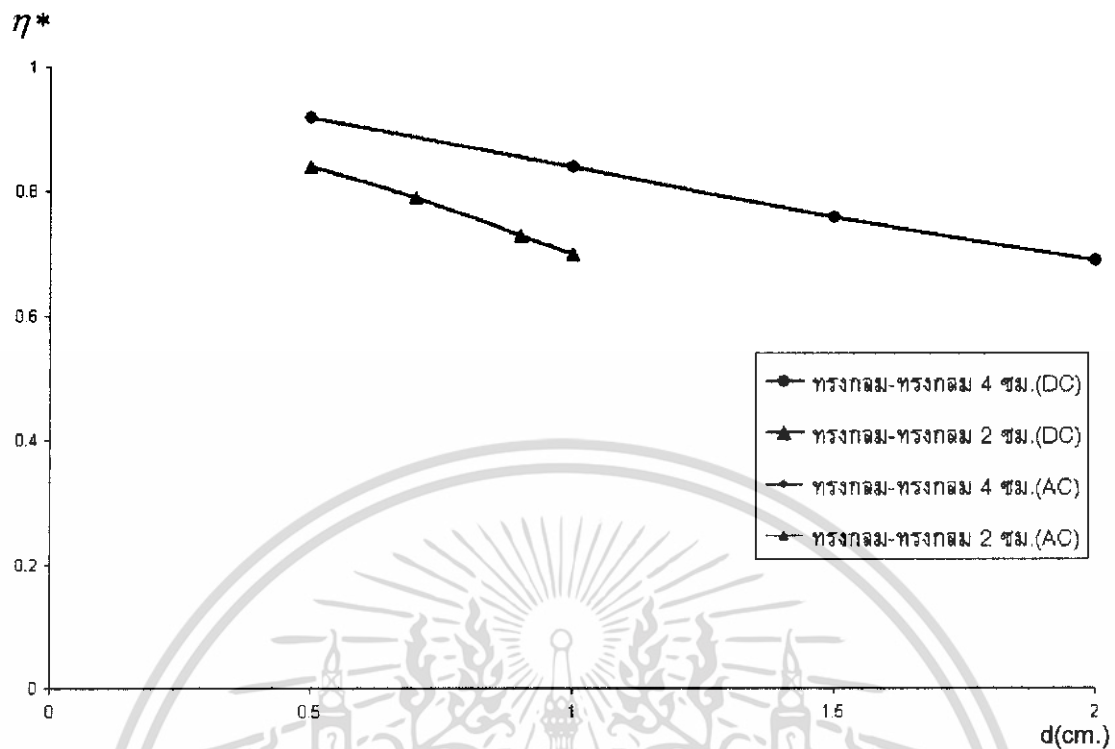
กราฟแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโทรด
อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 4.55 กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ)

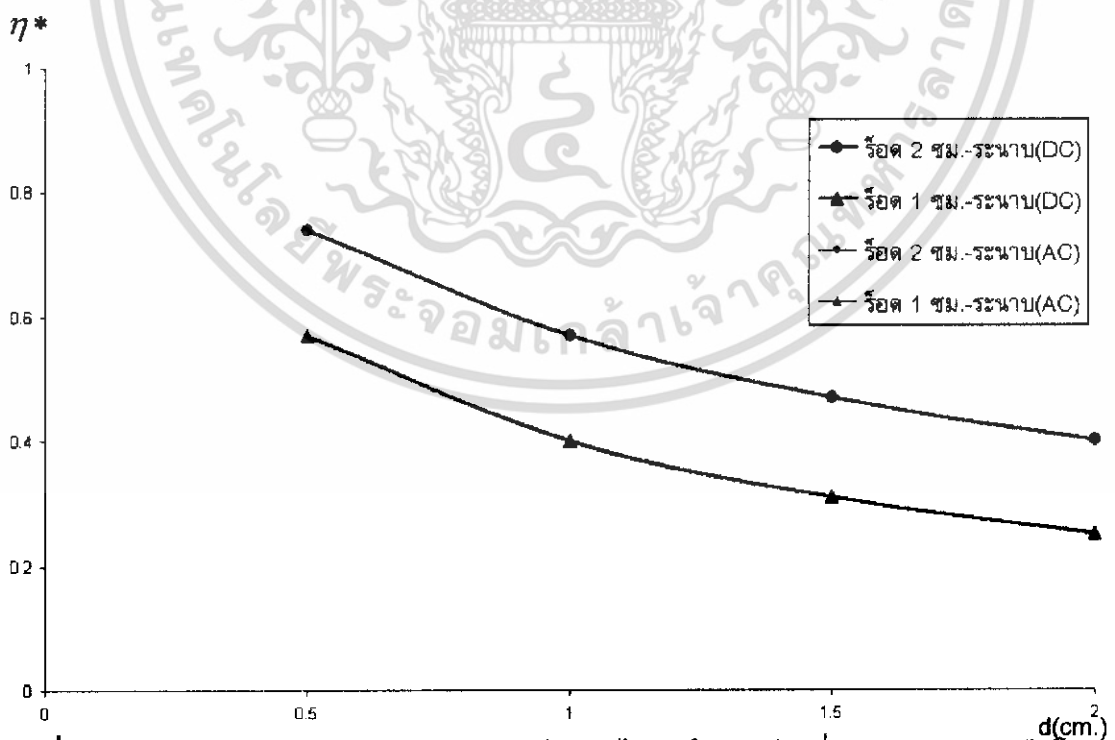
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม - ทรงกลม



รูปที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลม-ทรงกลม (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ)

อิเล็กทรอนิกส์แบบรีด - ระนาบ



รูปที่ 4.57 กราฟเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีเปลี่ยนขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีด-ระนาบ (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะพบว่า การหาค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบ ทรงกลม - ระนาบ แบบทรงกลม - ทรงกลมและแบบรีด - ระนาบ เมื่ออิเล็กทรอนิกส์มีขนาด ลดลงค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลงด้วย แสดงว่าสนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นถ้าอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่อิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเหมือนกันและระยะแยก เท่ากันนั้น จะมีค่าเท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้คือ ระยะแกป รูปแบบอิเล็กโทรด และขนาดของอิเล็กโทรด โดยที่ปัจจัยต่างๆ จะมีอิทธิพลต่อแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

กรณีที่หนึ่ง ระยะแกป จะมีผลทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะแกปมีระยะห่างลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า ระยะแกปแปรผกผันกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งนั้นก็หมายความว่าสนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อระยะแกปลดลงนั่นเอง ดังรูปที่ 4.54

กรณีที่สอง รูปแบบอิเล็กโทรด จะมีผลทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลง โดยที่อิเล็กโทรดแบบระนาบ - ระนาบ จะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงที่สุด ส่วนอิเล็กโทรดแบบทรงกลม - ระนาบ จะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยที่สุด และจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบรีด - ระนาบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด จะได้มาจากอิเล็กโทรดแบบระนาบ - ระนาบ อิเล็กโทรดแบบทรงกลม - ระนาบ จะมีความสม่ำเสมอลดลงมา และอิเล็กโทรดแบบรีด - ระนาบ มีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดดังรูปที่ 4.54

กรณีที่สาม ขนาดของอิเล็กโทรด จะมีผลทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดลดลง หรือก็คืออาจกล่าวได้ว่าขนาดของอิเล็กโทรดแปรผันตรงกับแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าสนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อขนาดอิเล็กโทรดมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจากการที่เมื่อขนาดอิเล็กโทรดลดลง ก็จะมีพฤติกรรมคล้ายรีดมากขึ้น จึงทำให้มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยลงดังรูปที่ 4.55 ถึงรูปที่ 4.57

โดยจากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ได้จากการบ่อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ในกรณีที่อิเล็กโทรดที่เหมือนกัน ในระยะแกปเดียวกัน ค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันหรือเกือบจะใกล้เคียงกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.11 และ 4.12 ทำให้สามารถบอกได้ว่าค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ายังมีผลกับค่าแรงดันเบรกดาวนด์ด้วย โดยเมื่อพิจารณาในกรณีรูปแบบอิเล็กโทรดแตกต่างกัน ระยะแกปเดียวกันอิเล็กโทรดที่มีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าสูงนั้น (ดูจากค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ถ้ามีค่ามากสนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอสูง) จะมีค่าแรงดันเบรกดาวนด์มากกว่าอิเล็กโทรดที่มีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าน้อย โดยจะมีผลของค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าเป็นตัวพิจารณาค่า แรงดันเบรกดาวนด์ โดยที่อิเล็กโทรดที่มีความสม่ำเสมอสนามไฟฟ้าสูงจะมีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าน้อย ทำให้มีค่าแรงดันเบรกดาวนด์สูงกว่า และในกรณีที่พิจารณาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของอิเล็กโตรดก็เช่นเดียวกัน อิเล็กโตรดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้มีค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้ามากกว่าอิเล็กโตรดที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้มีค่าแรงดันเบรกดาวน้มากกว่าด้วย ส่วนในกรณีที่พิจารณาระยะแถบนั้น ในกรณีที่ระยะแถบมีค่ามากขึ้นจะทำให้มีค่าแรงดันเบรกดาวน้มากขึ้นด้วย โดยที่ผลของค่าแพกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าของระยะแถบ จึงทำให้เมื่อระยะแถบมีค่ามากขึ้น ค่าแพกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงซึ่งทำให้ทั้งสองค่านี้แปรผกผันซึ่งกันและกัน

จากการศึกษาวิธีการทำนายค่าแรงดันเบรกดาวน้มันที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้ากับระยะแถบ จะพบว่าหากต้องการให้เกิดแรงดันเบรกดาวน้มัน พื้นที่ที่อยู่ระหว่างเส้นกราฟและเส้นสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศจะต้องมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ $Area = 6.72 x \sqrt{d}$ สำหรับกรณีอิเล็กโตรดแบบระนาบ - ระนาบ และ $\int_0^d \alpha(x) dx = K$ สำหรับกรณีอิเล็กโตรดแบบทรงกลม-ทรงกลมและทรงกลม - ระนาบ สำหรับกรณีอิเล็กโตรดแบบรีด - ระนาบจะใช้วิธีสังเกตจากจุดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด หากพบว่ามีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตจะถือว่าเกิดโคโรนาเริ่มเกิด ถ้าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตมากขึ้น จะถือได้ว่ามีโคโรนาเกิดขึ้นอย่างชัดเจน

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน้มันและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) พบว่าแรงดันเบรกดาวน้มันที่ได้จากการทดลองด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบจะมีค่าพื้นที่ใต้กราฟและค่า K น้อยกว่าค่าที่ได้จากการแทนค่าในสมการที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ ทั้งที่ในทางทฤษฎีจะไม่เกิดแรงดันเบรกดาวน้มัน ซึ่งก็น่าจะเกิดจากการที่มีประจุค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดลอง จึงทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน้มันที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น แต่ในขณะเดียวกันแรงดันเบรกดาวน้มันที่ได้จากการทดลองด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะพบว่าเมื่อนำไปหาพื้นที่ใต้กราฟและค่า K จะได้พื้นที่ที่มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำงาน

1. การทำนายการเกิดเบรกดาวนหรือโคโรนาเริ่มเกิด ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟซึ่งได้จากการทดลองจะพบว่ามีอยู่หลายกรณีที่ไม่สอดคล้องกัน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนหรือโคโรนาเริ่มเกิด ถ้าสามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้ ผลที่ได้ อาจมีความถูกต้องมากขึ้นหรือมีค่าที่สอดคล้องกับทฤษฎีมากขึ้น

2. ในการประกอบสร้างชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ นั้น เมื่อนำมาทำการประกอบสร้างจริง จะพบว่า ต้องมีการปรับเปลี่ยนแบบให้มีความเหมาะสมกับความสามารถในการประกอบสร้างชิ้นงานหรืออุปกรณ์ทดสอบขึ้นจริง โดยจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำและความสามารถของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบสร้างด้วย

3. ในการศึกษาเรื่องโคโรนาเริ่มเกิดจากอิเล็กทรอนิกส์แบบรีดปล่อยอนุภาคที่ได้ ออกแบบไว้สามารถทำได้จริงแต่จะพบว่า ในการหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดนั้นจะมีความเสี่ยงอันตรายต่ออุปกรณ์การทดลอง ดังนั้น จึงได้ทำการออกแบบรีดขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในการหาโคโรนาเริ่มเกิดโดยเฉพาะ โดยจะมีลักษณะเป็นรีดปล่อยแหลมแทน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] เดช สุขะพิริยะ, "การคำนวณหาสนามไฟฟ้าสูงของแก๊ปทรงกลม – ระนาบ ด้วยวิธีจำลองประจุ," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า: เล่ม 1**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [4] จิรเทพ สังข์ขาว, เฉลิมเกียรติ อ่อนอัฐ, ดำรง ทรงเจริญ, "อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูง," **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535, หน้า 84-85.
- [5] คมสัน เพ็ชรรักรักษ์, "การคำนวณหาสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์-อีลีเมนต์," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- [6] กษณะ แก้ววิจิตร, สาวิณี หลุดพา, อภิวัตน์ ศรีมีเทียน และ อัครพล วิญญูตระกูล, "การศึกษาและการออกแบบโคโรนาซีลด์," **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [7] เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์, "การจำลองรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [8] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, **วัสดุวิศวกรรม**, THIRD EDITION, กรุงเทพฯ, บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2545.
- [9] IEEE Standard 4 (1995), "Voltage measurement by means of sphere gaps and rod gaps", 1995.
- [10] IEC 60052 2002-10, "Voltage measurement by means of standard air gaps", 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

1. โปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์

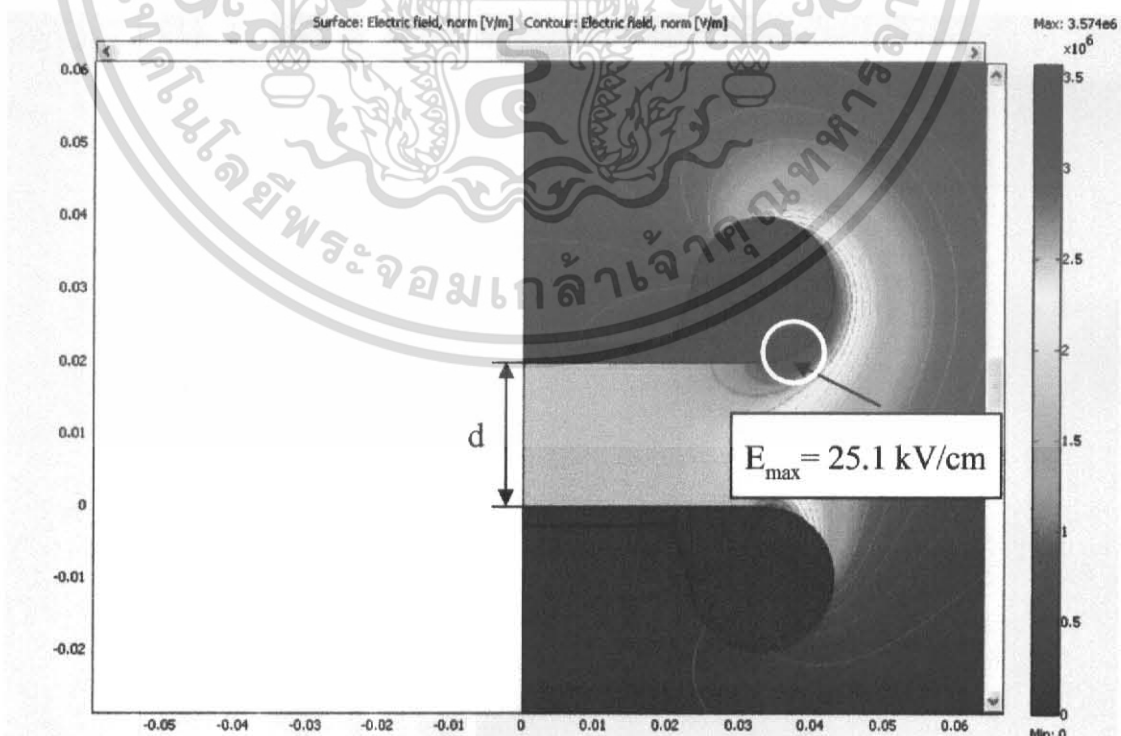
โครงการนี้เป็นโครงการที่จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะของแพคเกจสนามไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาถึงรูปแบบและลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยทั่วไปลักษณะของรูปแบบสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรดซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- 2) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)
- 3) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณและเวลาในการศึกษาโครงการ จึงได้มีการนำเอาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) มาใช้ โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและจุดที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดรวมถึงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจึงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์

2. ตัวอย่างการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element)

2.1 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบระนาบ - ระนาบ

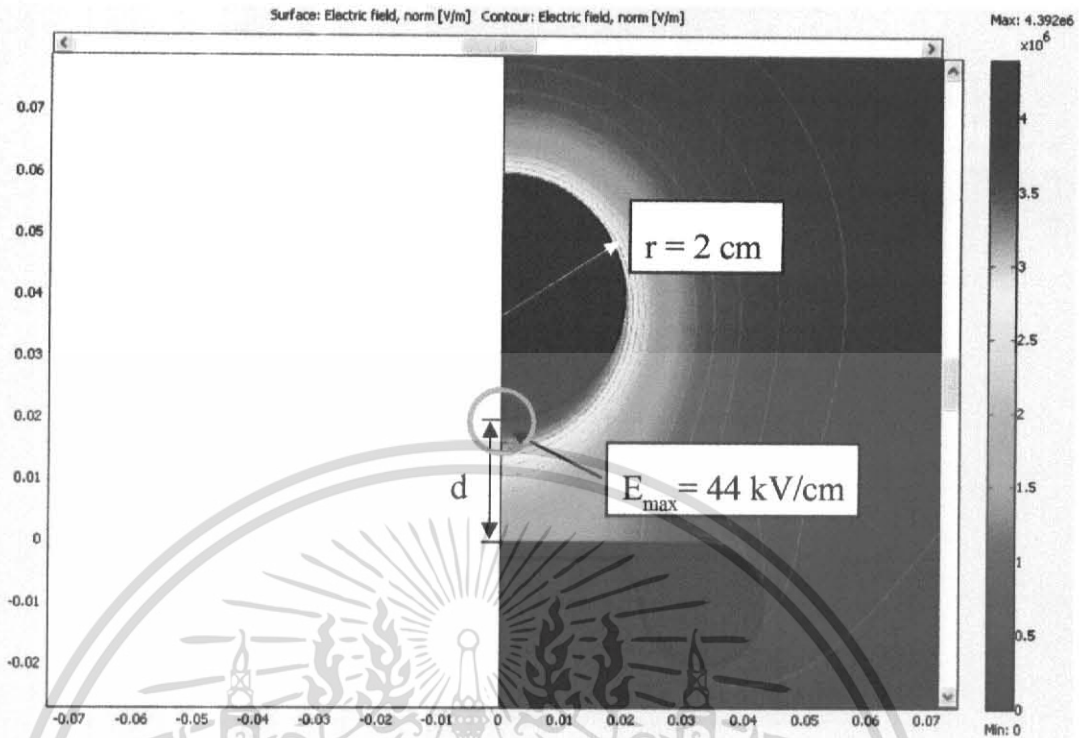


รูปที่ ผ.ก.1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบระนาบ - ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

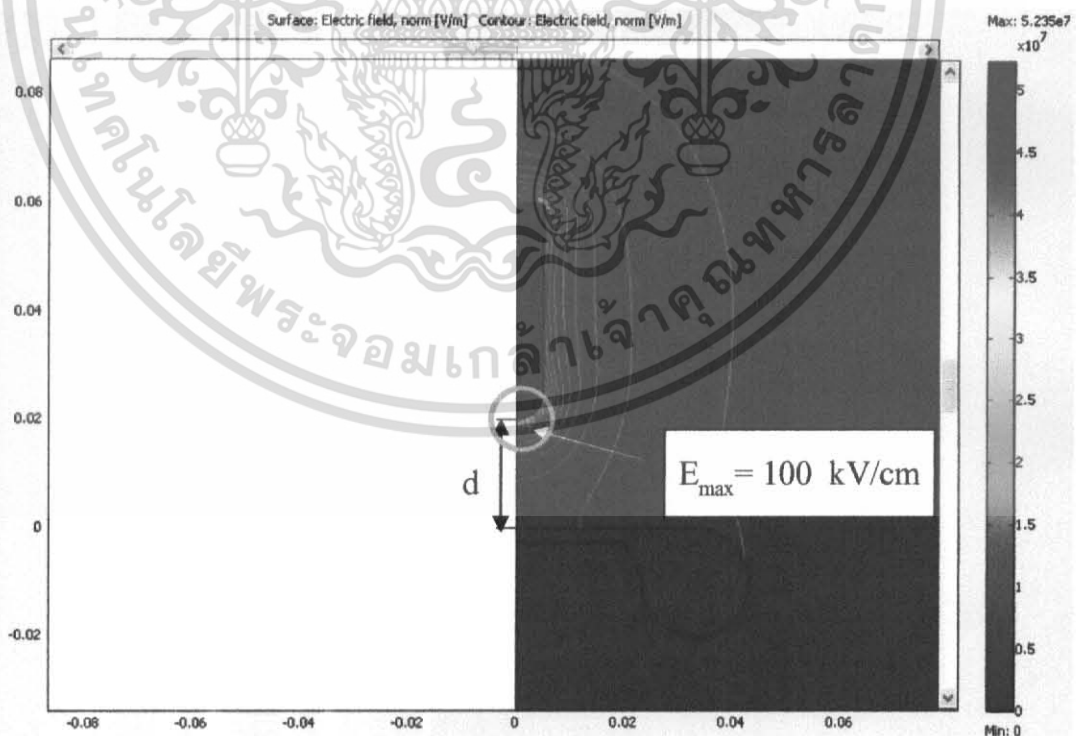
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบทรงกลม - ระนาบ



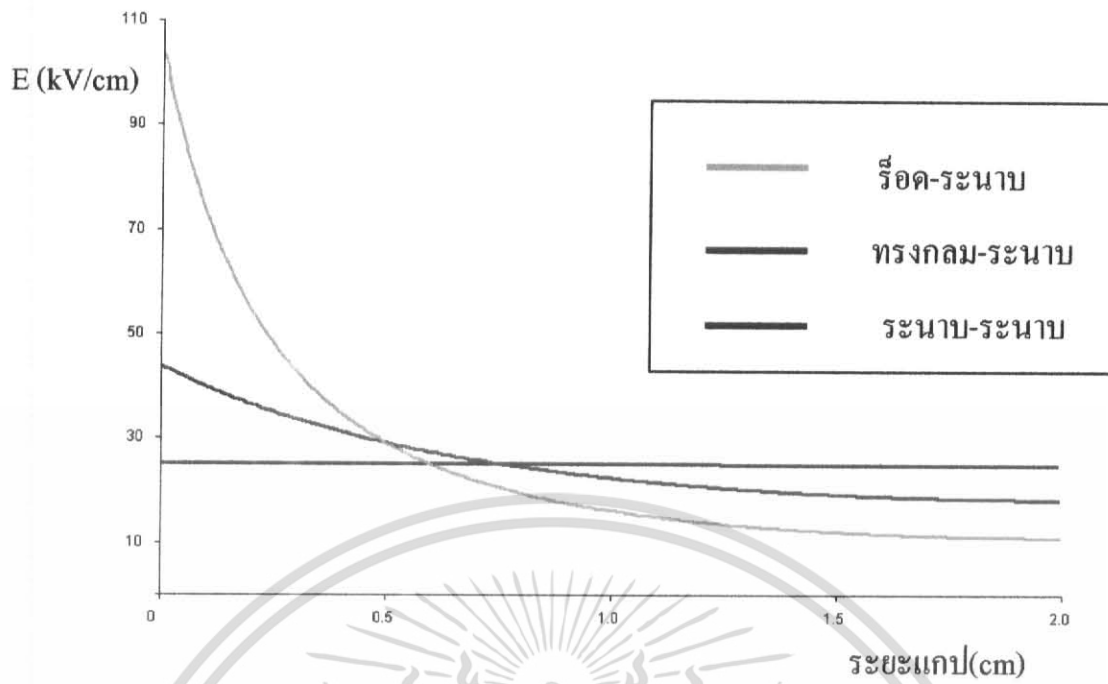
รูปที่ ผ.ก.2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบทรงกลม - ระนาบ

2.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบรีด - ระนาบ



รูปที่ ผ.ก.3 ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบรีด - ระนาบ

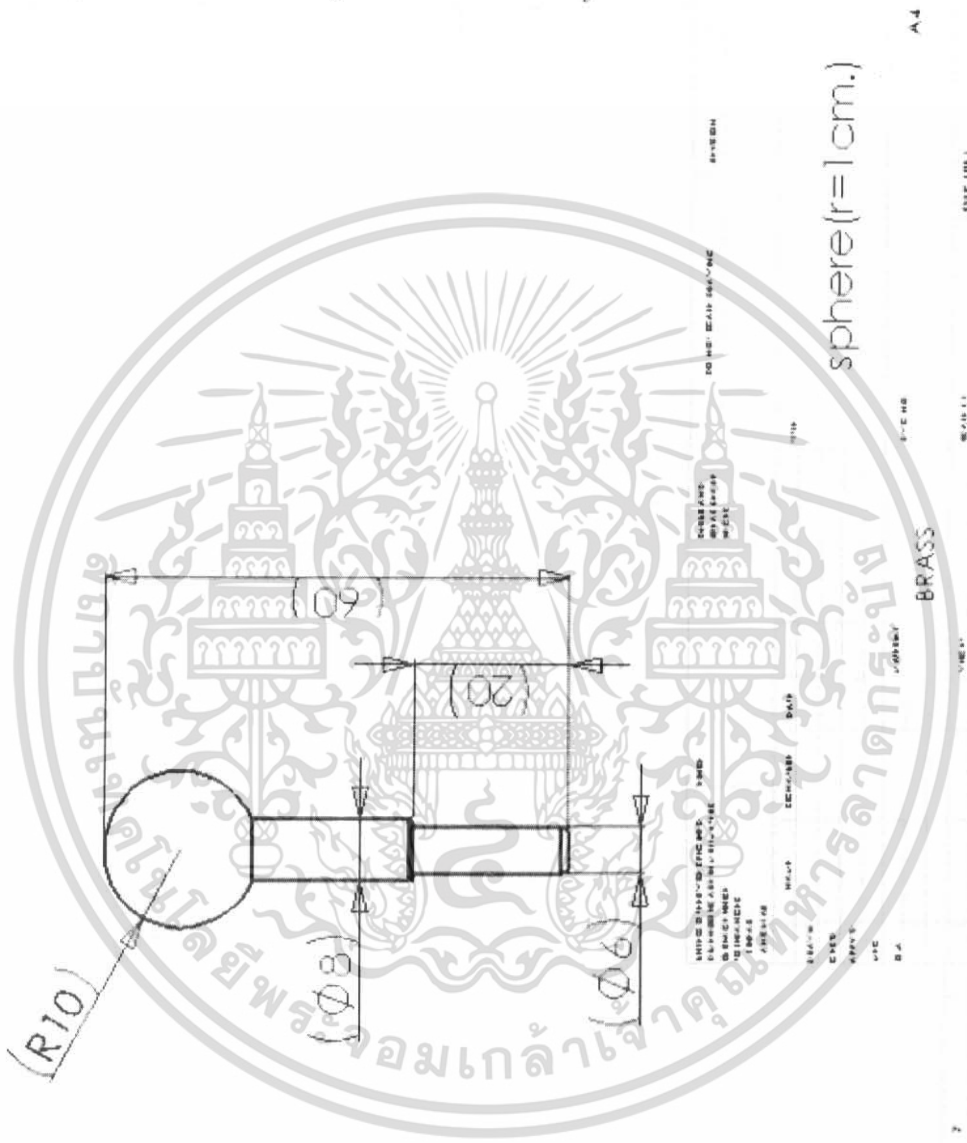
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แบบและภาพร่างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ผ.ข.1 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.2 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



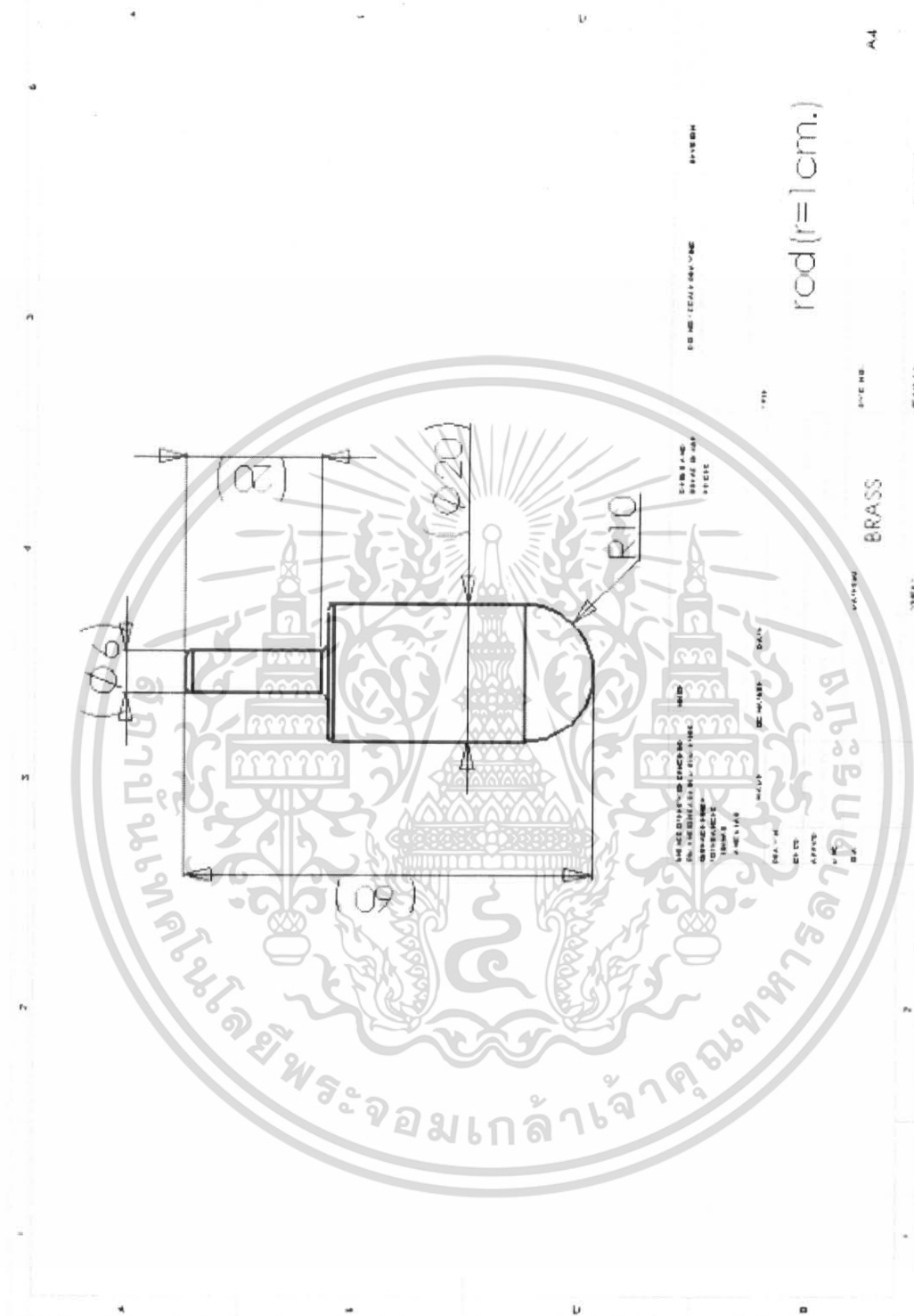
รูปที่ ผ.ข.3 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



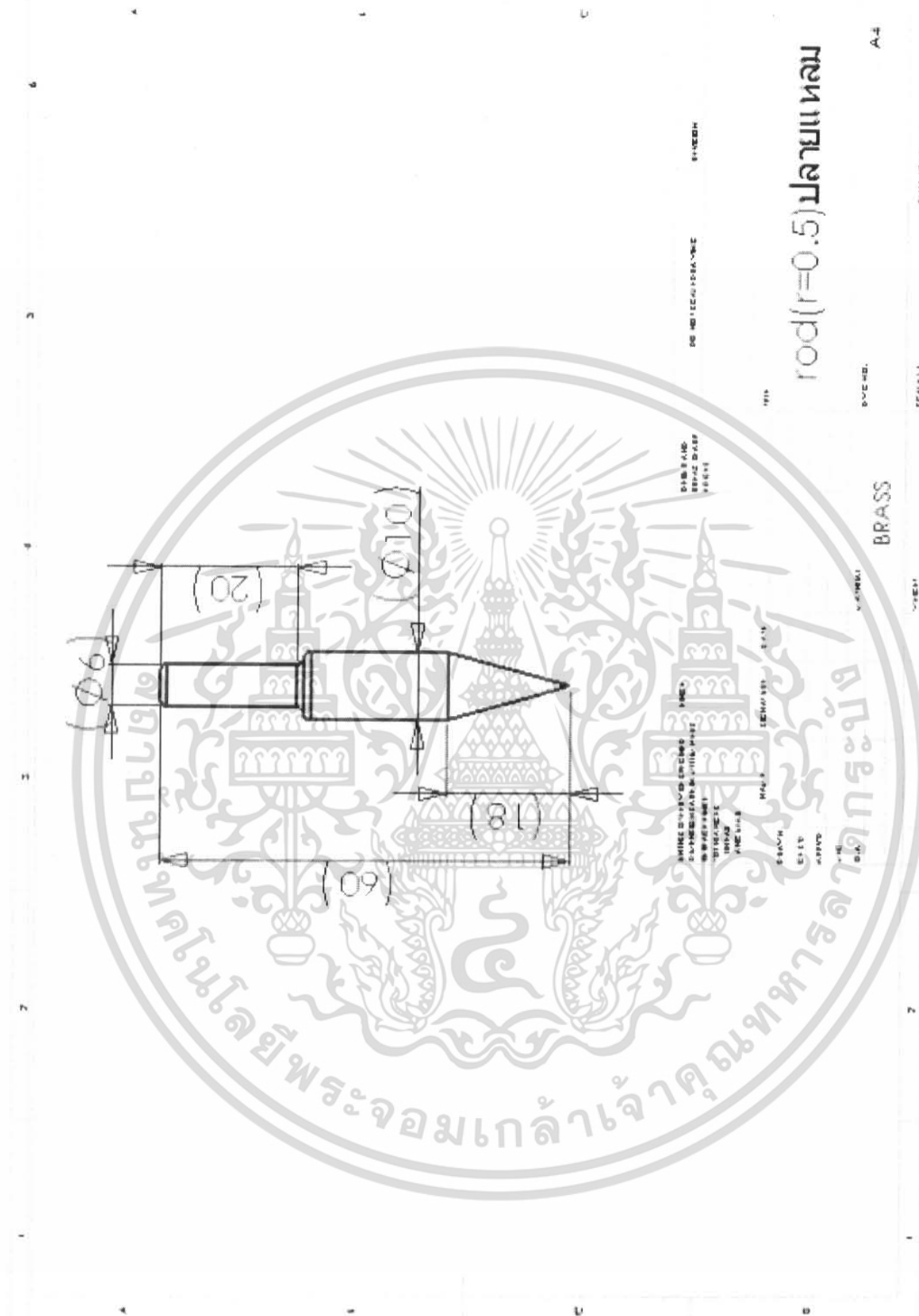
รูปที่ ผ.ข.4 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีดปลายมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



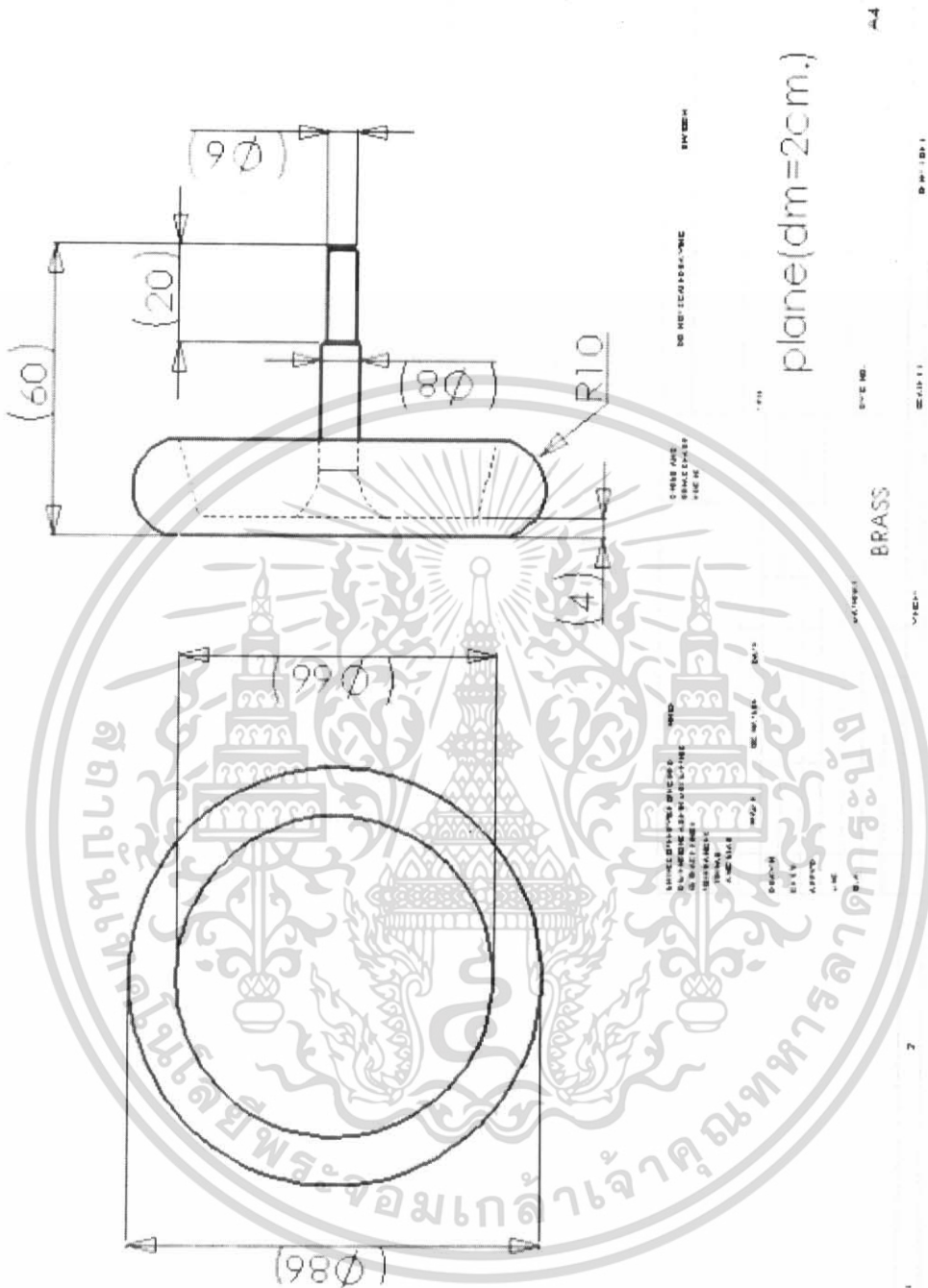
รูปที่ ผ.ช.5 แบบและขนาดของอิเล็กโตรดแบบรีดปลายมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ช.6 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบรีดปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.7 แบบและขนาดของอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบขอบโค้งโรกอฟสกีระยะแกป 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อทำนายการเกิดเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิด

การทำนายการเกิดเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิด สามารถทำนายได้โดยอาศัยเงื่อนไขการเบรกดาวน์ตามทฤษฎีทาวน์เซนต์หรือทฤษฎีสตรีมเมอร์ของ Meek และ Loeb และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rather ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้จะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกซึ่งเกิดจากการไอออไนเซชันในอะวาแลนซ์ถึงค่าวิกฤต

ค่าที่บอกถึงการเกิดไอออไนเซชัน คือ สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันยังผล (Effective Ionization Coefficients, α) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นของก๊าซดังสมการที่ 1

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

$$\frac{\alpha}{p} = C \left[\frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p}\right)_c \right]^2 - A \quad (1)$$

โดยที่ E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า

p คือ ความดันของก๊าซ

α คือ ค่าเฉลี่ยการชนไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวเคลื่อนที่เป็นระยะ 1 ซม.

$(E/p)_c$ คือ สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน

A เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะถือว่ามีผลน้อยมาก

C คือ ค่าคงที่ของซุมันน์ มีค่าเท่ากับ 0.399 cm./kV^2

กลไกการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์ของ Meek และ Loeb และเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์ของ Rather ได้กล่าวไว้ว่า เบรกดาวน์จะเริ่มเกิดตามเงื่อนไขในสมการที่ 2

$$\int_0^{x_c} \alpha(x) dx = K \quad (2)$$

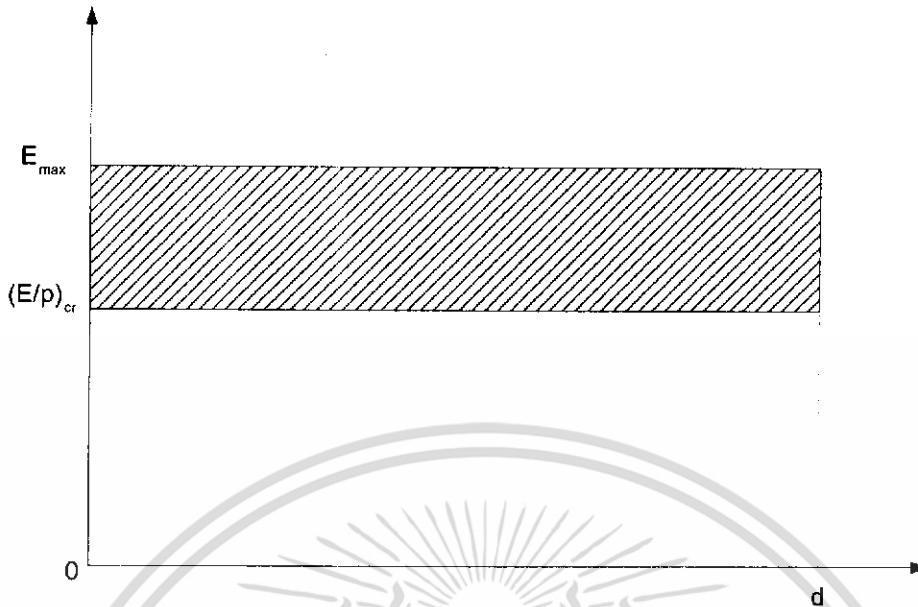
โดยที่ x_c = Critical avalanche length

$\alpha(x)$ = Effective ionization coefficient

K = Streamer constant

ในการทำนายการเริ่มเกิดเบรกดาวน์และโคโรนาเริ่มเกิดนั้นจะให้ค่า K มีค่าอยู่ในช่วง 10-20 ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณกันอยู่ทั่วไป โดยจะสามารถแบ่งลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นกรณีต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- กรณีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ ผ.ค.1 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

$$\int_0^d \alpha dx = C \left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right]^2 pd = K$$

$$\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c = \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{pd}}$$

$$\left[\left(\frac{E}{p} \right) - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right] d = \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \sqrt{\frac{d}{p}}$$

เมื่อ p คือ ความดันอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 และ $\frac{K}{C} = 45.1 \text{ kV}^2 / \text{cm}$ จะได้ว่า

$$(E - E_c) d = \sqrt{45.1} \times \sqrt{d}$$

$$(E - E_c) d = 6.72 \times \sqrt{d}$$

ซึ่งในกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นั้น $(E - E_c) d$ ก็คือ พื้นที่ใต้กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน นั้นเอง ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{Area} = 6.72 \times \sqrt{d} \quad (3)$$

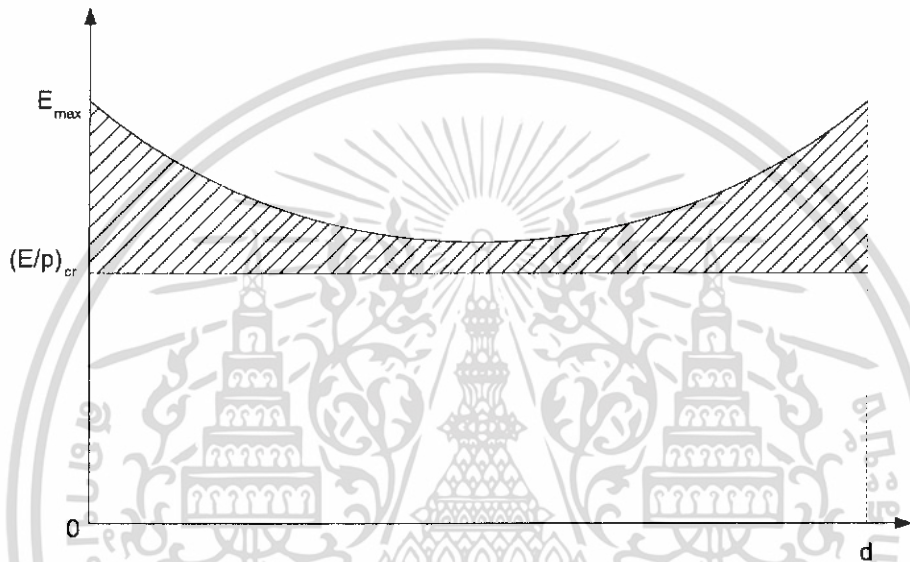
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $(E/p)_c$ คือ สนามไฟฟ้าวิกฤตต่อความดัน

d คือ ระยะแกป (cm.)

ซึ่งสมการที่ 3 สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเพื่อทำนายการเกิดเบรกดาวน์ โดยจะนำเอาค่าพื้นที่ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3 ไปเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟซึ่งได้จากการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element) ดังรูปที่ ผ.ค.1

- กรณีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

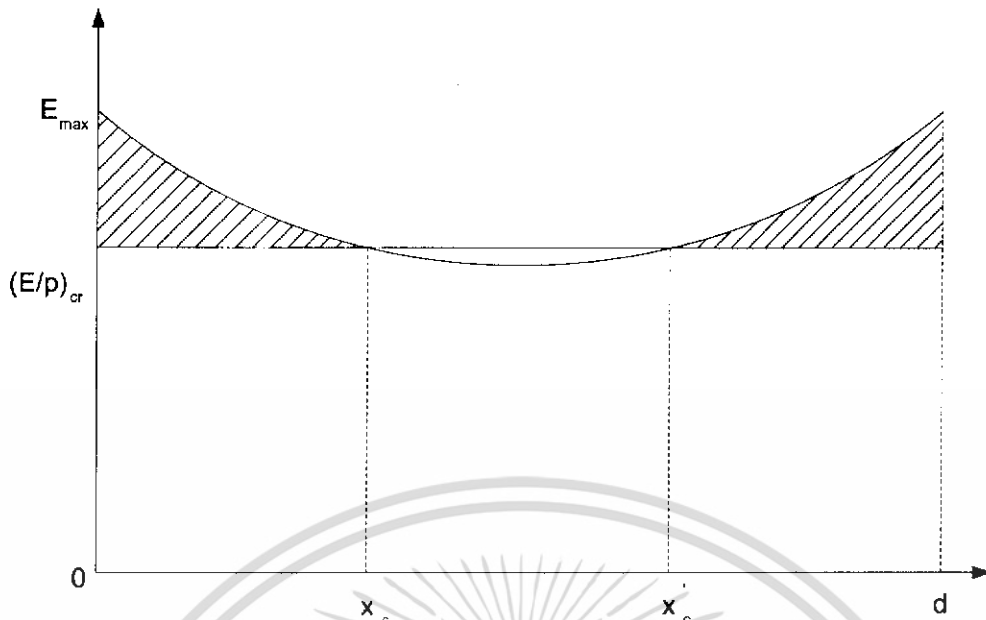


รูปที่ ผ.ค.2 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบที่ 1)

กรณีที่สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยมีลักษณะของกราฟดังรูปที่ ผ.ค. 2 ช่วงการอินทิเกรตของสมการที่ 2 จะเป็นค่า 0 ถึง d ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\int_0^d \alpha(x) dx = K \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

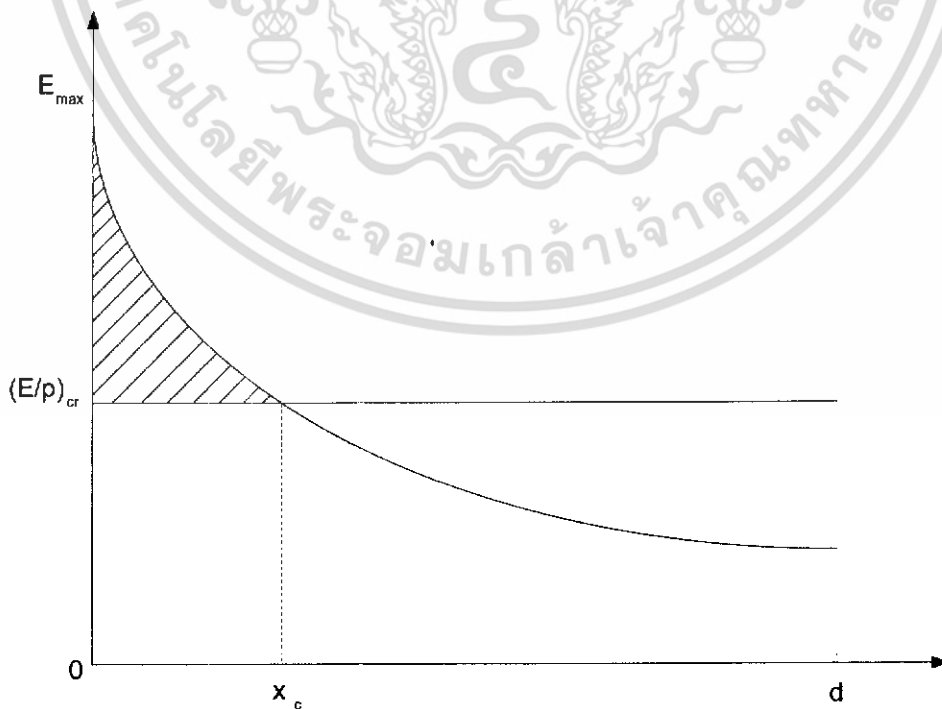


รูปที่ ผ.ค.3 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบที่ 2)

บางกรณีจะพบว่ารูปกราฟมีลักษณะดังรูปที่ ผ.ค.3 ดังนั้น จะได้ช่วงอินทิเกรทของสมการที่ 2 เป็นค่าตั้งแต่ 0 ถึง x_c และตั้งแต่ x_c ถึง d ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\int_0^{x_c} \alpha(x) dx + \int_{x_c}^d \alpha(x) dx = K \quad (5)$$

- กรณีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง



รูปที่ ผ.ค.4 กราฟความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ผ.ค.4 การกระจายของสนามไฟฟ้าจะไม่สม่ำเสมอสูง ดังนั้น การอินทิเกรตของสมการที่ 2 จะอยู่ในช่วง 0 ถึง x_c ดังสมการที่ 6

$$\int_0^{x_c} \alpha dx = K \quad (6)$$

จากทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนีย์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า ถ้าค่าที่ได้จากเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวนีย์ในสมการที่ 2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า K ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10-20 หรือในกรณีของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอถ้าพื้นที่ซึ่งได้จากการจำลองมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่ที่ได้จากสมการที่ 3 จะสามารถทำนายได้ว่าอาจจะเกิดการเบรกดาวนีย์หรือมีโคโรนาเริ่มเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก การเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของหม้อแปลง เพื่อใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้า เบรกดาวน

ในการทำการทดลอง พบว่าไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการวัดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องมือวัด และในทางปฏิบัติในการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาทางด้านทุติยภูมินั้นจะมีค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าไม่ตรงกับค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง จึงต้องทำการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำ เพื่อหาค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมา

1. การเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทำการเปรียบเทียบแรงดันสูง-แรงดันต่ำเพื่อนำค่าแรงดันที่ได้ไปใช้อ้างอิงในการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวนนั้น จะใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้ในการทำการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

- เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงพิกัด 220 V / 600 kV 10 mA

มีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดทดสอบโดยมีพิกัดแรงดัน 220 V / 600 kV และชนิดของแรงดันเอาต์พุตเป็นแบบ Negative

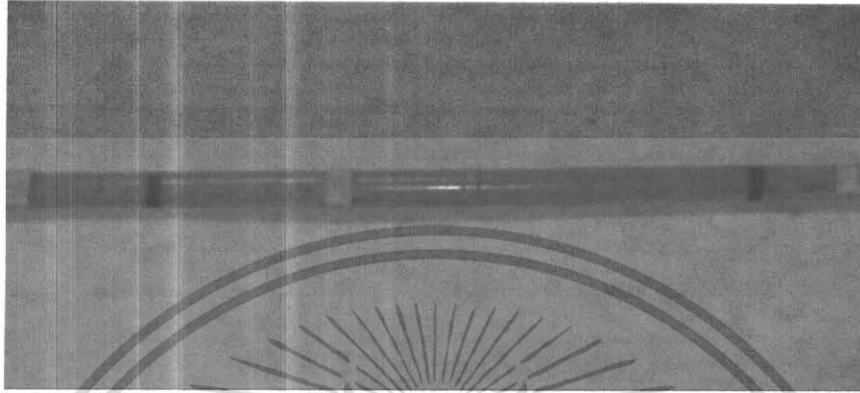


รูปที่ ผ.ง.1 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงพิกัด 220 V / 600 kV 10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวต้านทานน้ำ

มีหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงเนื่องจาก ในการทดสอบทุกครั้งจะเกิดการสปาร์ก ระหว่างหัวอิเล็กโทรด หมายถึง เกิดการลัดวงจรที่หม้อแปลง และขดลวดของหม้อแปลงจะได้รับ กระแสสูง ดังนั้นตัวต้านทานจึงเป็นตัวลดกระแสเพื่อป้องกันขดลวดของหม้อแปลงเมื่อเกิดการ สปาร์ก



รูปที่ ผ.ง.2 ตัวต้านทานน้ำ

- โวลต์เจดิวไฮเดอรั ขนาด 100 kV

เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันโดยการแบ่งทอนแรงดันสูง ๆ ออกเป็นส่วนให้แรงดันต่ำ พอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ วัดได้ โดยการนำเอาอิมพีแดนซ์ ค่าสูงๆต่อขนานกับแรงดันที่จะวัด แล้วแบ่งเอาอิมพีแดนซ์ที่มีแรงดันตกคร่อมส่วนน้อยออกมาวัด



รูปที่ ผ.ง.3 RC โวลต์เจดิวไฮเดอรั AC 100 kV , DC 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กิโลโวลต์มิเตอร์

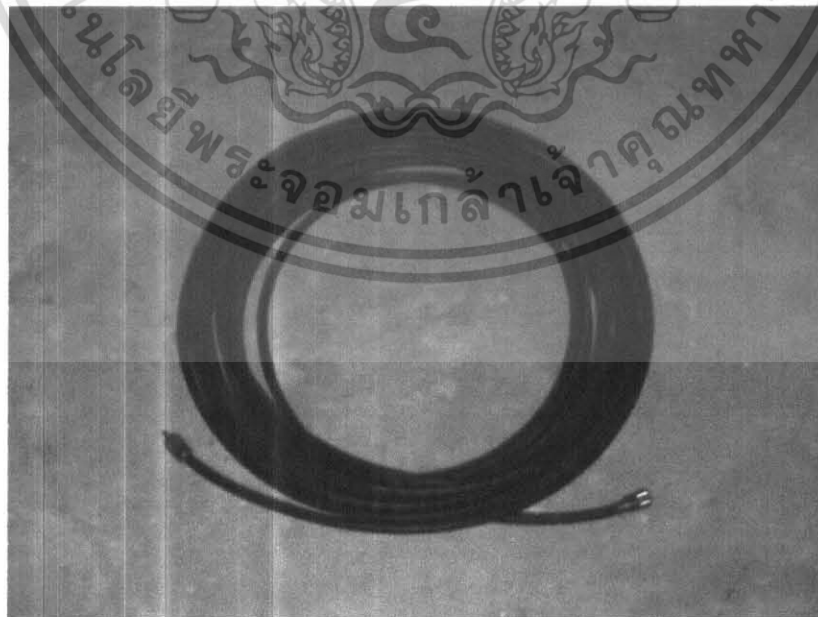
ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันสูงทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เพื่อนำค่าไป
เปรียบเทียบกับค่าแรงดันต่ำทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ ผ.ง.4 กิโลโวลต์มิเตอร์

- สายเคเบิลวัด

สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดจากโวลเตจดีไวเดอร์มายัง
เครื่องมือวัดแรงต่ำ

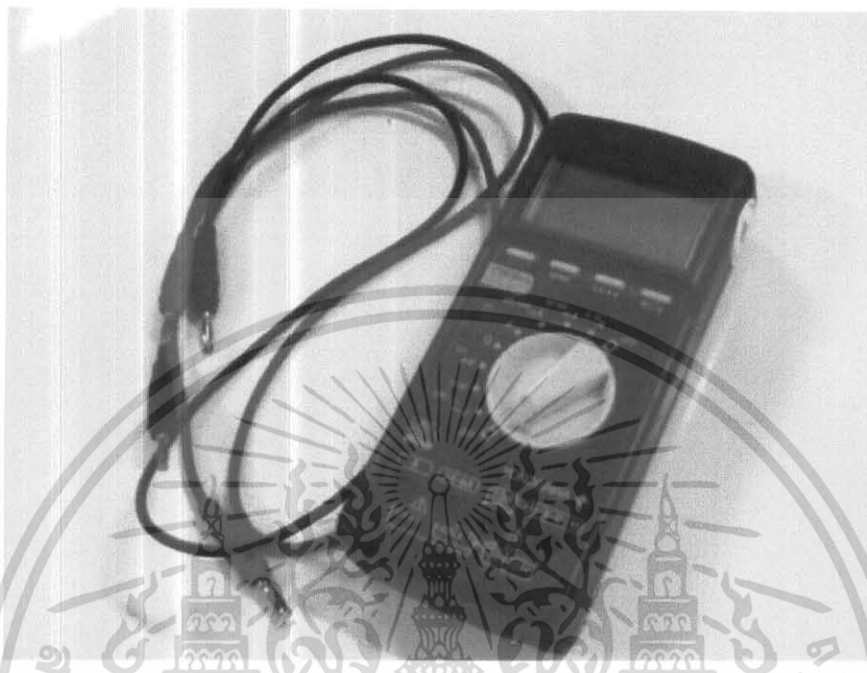


รูปที่ ผ.ง.5 สายเคเบิลวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โวลต์มิเตอร์

โวลต์มิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ ใช้สำหรับวัดแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลง และวัดแรงดันที่ออกจากโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ ผ.ง.6 โวลต์มิเตอร์

- ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

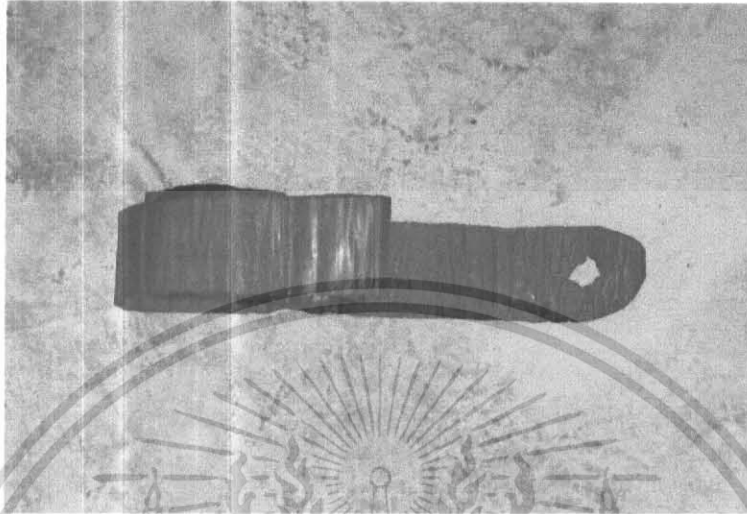
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มหรือลดแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลง และทำหน้าที่ตัดวงจรเมื่อเกิดการสปาร์กหรือการเบรกดาวน



รูปที่ ผ.ง.7 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายนำส่งแรงสูง
สายนำส่งแรงสูง เป็นสายเชื่อมต่อวงจรจะต้องมีขนาดโตพอและไม่บางจนเกินไป สายนำส่งแรงสูงจะมีลักษณะกลมหรือแบนก็ได้



รูปที่ ผ.ง.8 สายนำส่งแรงสูง

- ตะขอกราวณ์

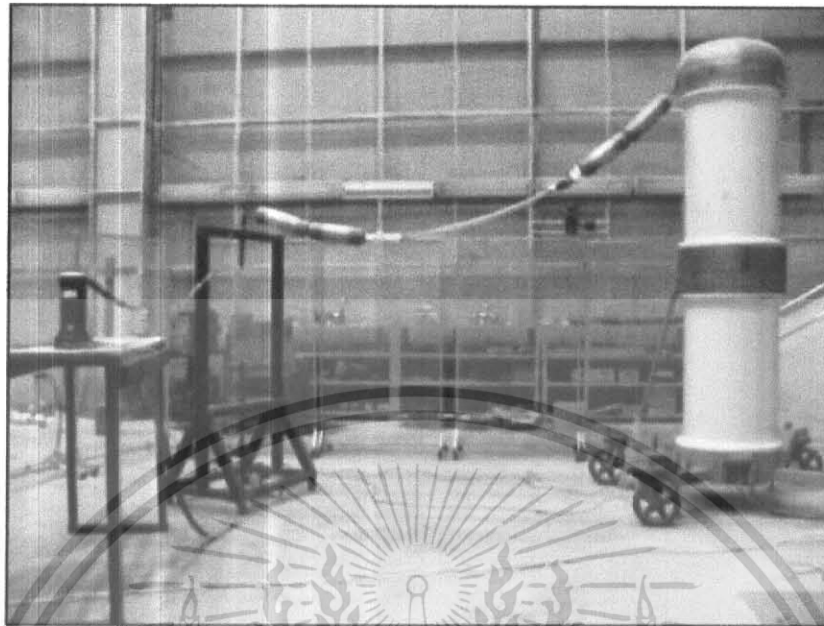
ในระบบแรงดันสูงเมื่อลดระดับแรงดันหมดแล้ว แต่ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ทดลองจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นจึงต้องมีตะขอกราวณ์เอาไว้สัมผัสกับอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์ดีสชาร์จประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ให้หมดก่อนที่จะเข้าไปในบริเวณทดสอบ และตะขอกราวณ์ควรสัมผัสกับอุปกรณ์ตลอดเวลาเมื่อบุคคลกำลังปฏิบัติงานอยู่ในบริเวณที่ทดสอบ



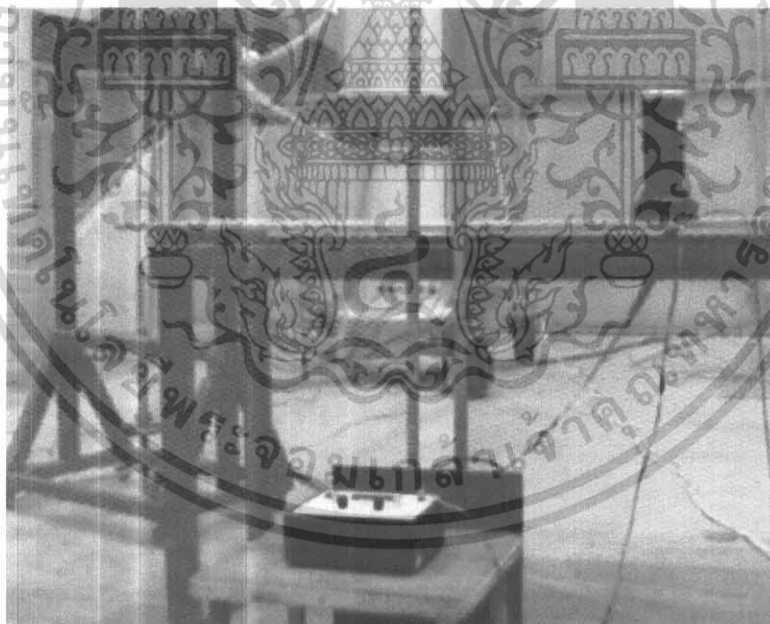
รูปที่ ผ.ง.9 ตะขอกราวณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการต่ออุปกรณ์ดังเช่นที่แสดงในรูปข้างล่าง



รูปที่ ผ.ง.10 วงจรเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำ ไฟฟ้ากระแสตรง



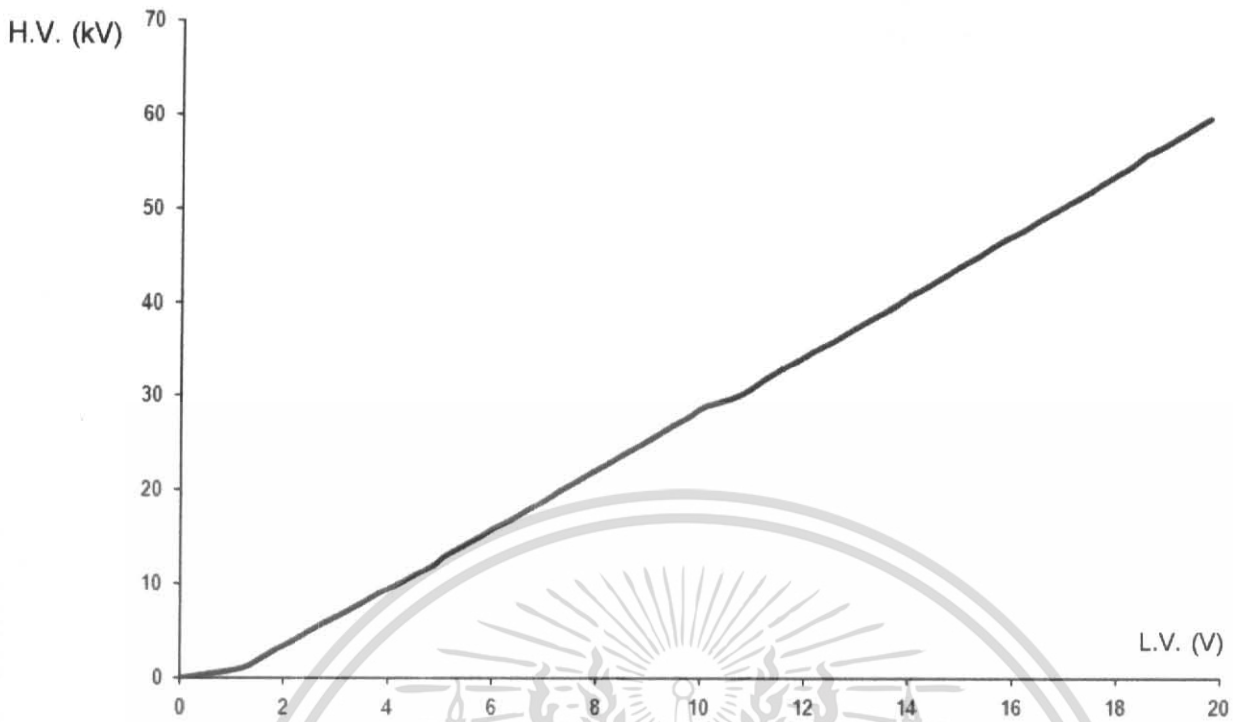
รูปที่ ผ.ง.11 การต่อวงจรในส่วนของกรวัดแรงดันสูง

เมื่อได้ทำการต่ออุปกรณ์ดังที่แสดงในรูปแล้วก็จะสามารถทำการปรับเทียบได้ โดยการเพิ่มแรงดันทางด้านแรงดันต่ำโดยใช้ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า จากนั้นอ่านแรงดันที่วัดได้จากทางด้านแรงดันสูง แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้จากทั้งด้านแรงดันต่ำและแรงดันสูงนำค่าแรงดันที่ได้มาบันทึก และนำค่าแรงดันไปพล็อตกราฟ เพื่อนำไปใช้อ้างอิงในการทดลองต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ง.1 ผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แรงดันต่ำ (V)	แรงดันสูง (KV)	แรงดันต่ำ (V)	แรงดันสูง (KV)
1.147	1	10.95	31
1.517	2	11.26	32
1.82	3	11.56	33
2.16	4	11.86	34
2.474	5	12.18	35
2.798	6	12.51	36
3.14	7	12.8	37
3.475	8	13.1	38
3.811	9	13.43	39
4.21	10	13.74	40
4.53	11	14.03	41
4.88	12	14.35	42
5.09	13	14.64	43
5.39	14	14.95	44
5.72	15	15.27	45
6.03	16	15.55	46
6.37	17	15.85	47
6.67	18	16.19	48
7	19	16.46	49
7.31	20	16.77	50
7.63	21	17.08	51
7.94	22	17.4	52
8.25	23	17.65	53
8.55	24	17.97	54
8.86	25	18.26	55
9.17	26	18.53	56
9.46	27	18.86	57
9.77	28	19.17	58
10.04	29	19.46	59
10.62	30	19.75	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ง.12 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำกระแสตรง โดยให้แรงดันต่ำอยู่ที่แกน x และแรงดันสูงอยู่ที่แกน y

2. การเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ

มีหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดทดสอบโดยมีพิกัดแรงดัน

100 kV พิกัดกำลังไฟฟ้า 5 kVA

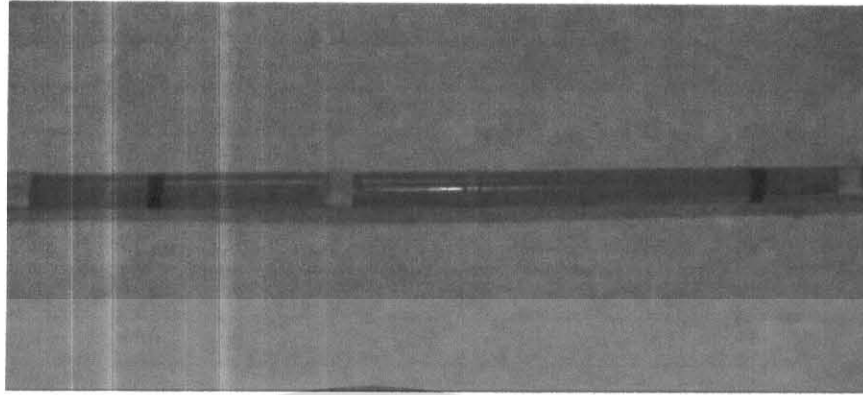


รูปที่ ผ.ง.13 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV 50 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวต้านทานน้ำ



รูปที่ ผ.ง.14 ตัวต้านทานน้ำ

- โวลเตจดีไวเดอร์
เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันโดยการแบ่งทอนแรงดันสูงๆออกเป็นส่วนให้แรงดันต่ำ
พอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ วัดได้



รูปที่ ผ.ง.15 RC โวลเตจดีไวเดอร์ AC 100 KV , DC 100 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กิโลโวลต์มิเตอร์

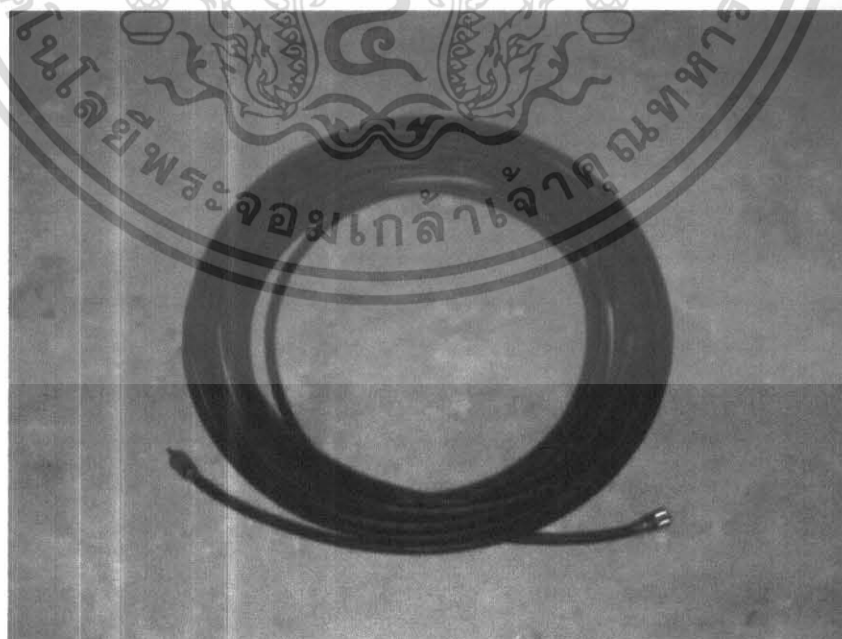
ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันสูงทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เพื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันต่ำทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ ผ.ง.16 กิโลโวลต์มิเตอร์

- สายเคเบิลวัด

สายเคเบิลวัด ใช้สำหรับนำสัญญาณแรงดันที่วัดจากโวลต์เจดิไวเซอร์มายังเครื่องมือวัดแรงต่ำ

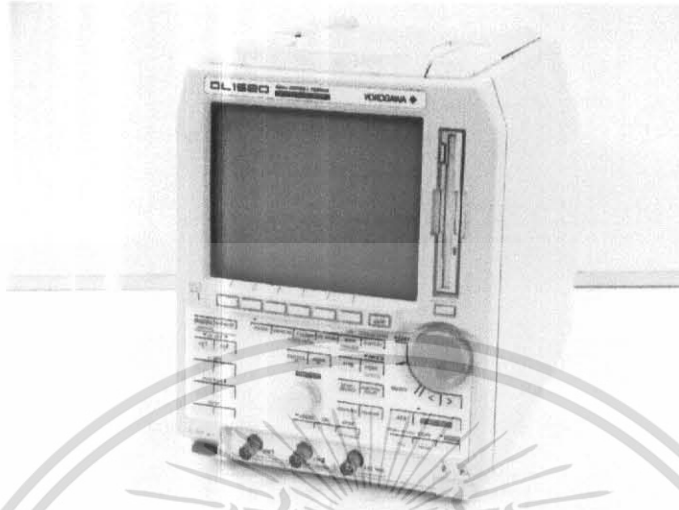


รูปที่ ผ.ง.17 สายเคเบิล

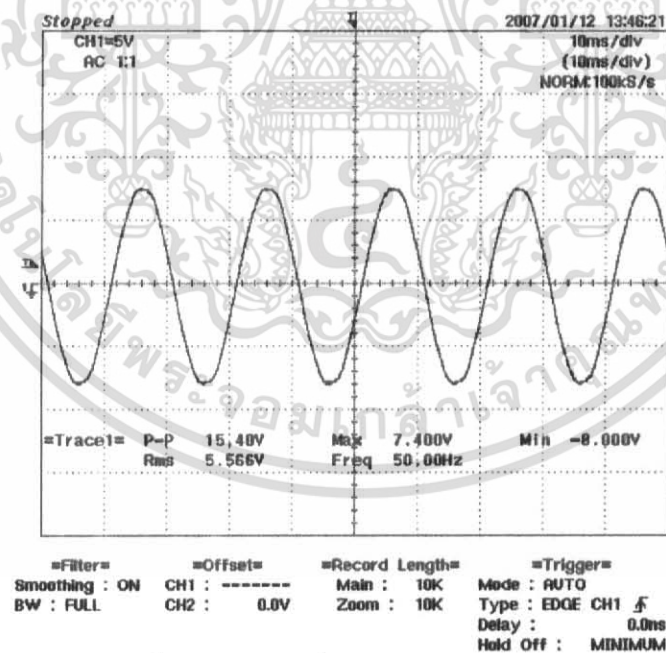
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออสซิลโลสโคป

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสดงลักษณะของรูปคลื่นแรงดันทางด้านแรงดันสูง เพื่อดูค่ายอดของแรงดัน



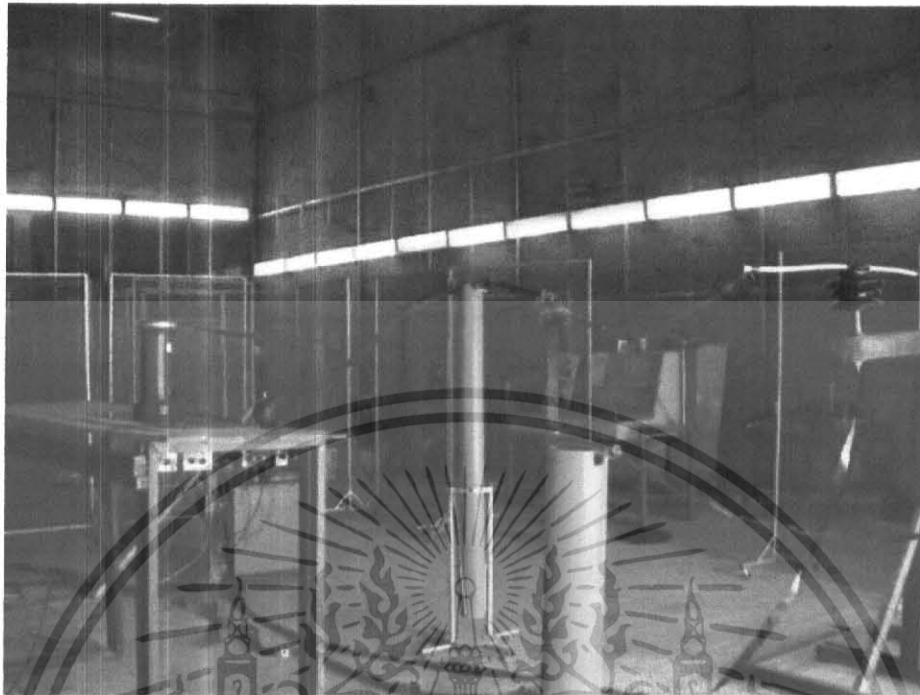
รูปที่ ผ.ง.18 ออสซิลโลสโคป



รูปที่ ผ.ง.19 รูปคลื่นแรงดันทางด้านแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการต่อวงจรเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำ ดังรูป



รูปที่ ผ.ง.20 วงจรเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำ ไฟฟ้ากระแสสลับ

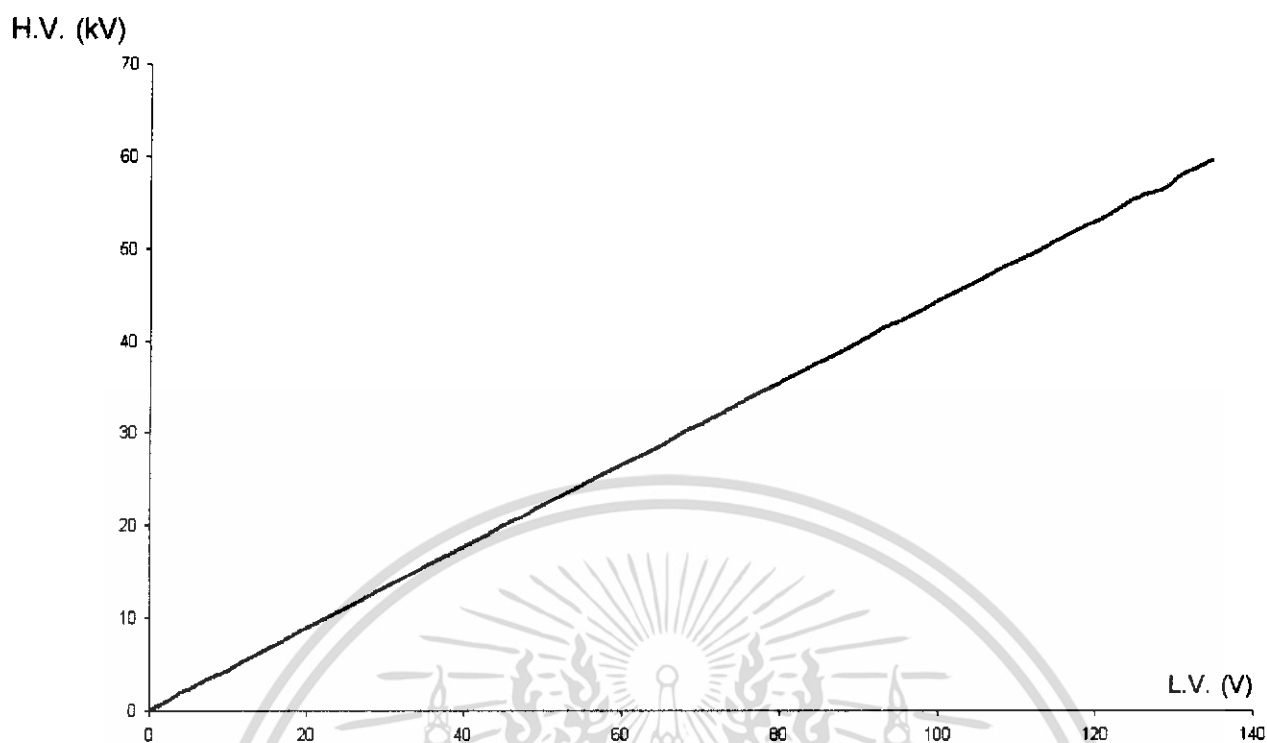
หลังจากทำการต่อวงจรเปรียบเทียบแล้ว จะทำการขึ้นแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำและดูค่าทางด้านแรงสูง โดยในการเปรียบเทียบนี้จะดูแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงเป็นหลัก โดยเพิ่มแรงดันสูงขึ้นทีละ 1 กิโลโวลต์ แล้วจดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำ จะได้อ่านตามตารางที่ ผ.ง.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.ง.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

แรงดันต่ำ (V)	แรงดันสูง (kV)	แรงดันต่ำ (V)	แรงดันสูง (kV)
2.66	1	69.80	31
4.36	2	71.90	32
6.60	3	74.00	33
9.01	4	76.20	34
11.18	5	78.60	35
13.57	6	80.70	36
15.72	7	83.20	37
17.88	8	85.50	38
20.17	9	87.60	39
22.42	10	89.80	40
24.72	11	92.00	41
26.94	12	94.10	42
29.11	13	96.50	43
31.36	14	99.00	44
33.63	15	101.10	45
35.97	16	103.20	46
38.34	17	105.50	47
40.40	18	107.70	48
42.57	19	110.10	49
44.91	20	112.50	50
47.30	21	114.70	51
49.21	22	116.70	52
51.70	23	119.00	53
53.90	24	121.40	54
56.06	25	123.50	55
58.30	26	125.60	56
60.85	27	128.70	57
63.20	28	130.10	58
65.34	29	132.30	59
67.50	30	134.60	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ง.21 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันสูง-ต่ำกระแสสลับ โดยให้แรงดันต่ำอยู่ที่แกน x และแรงดันสูงอยู่ที่แกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลม[10]

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวนีย์ของช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมนั้นอาศัยการเกิดเบรกดาวนีย์ของฉนวนอากาศที่อยู่ระหว่างแกปทรงกลม โดยที่การเกิดเบรกดาวนีย์จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางมิติของอิเล็กโตรดอันได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม (D) และระยะห่างของแกปทรงกลม (d) โดยที่ในการวัดค่าแรงดันเบรกดาวนีย์นั้นระยะ d จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ D/2 และนอกจากนี้แล้ว ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นของอากาศ ดังนั้น มาตรฐานฉบับปัจจุบัน IEC 60052 ได้มีการคำนึงถึงผลของความชื้นในอากาศ พบว่าทำให้แรงดันเบรกดาวนีย์ของช่องว่างทรงกลม จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมบูรณ์ 0.2% ต่อ gm^{-3}

2. แฟกเตอร์ปรับเทียบค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ของแกปทรงกลม

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์ก หรือเบรกดาวนีย์ของแกปทรงกลมนั้น ขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศหรือก๊าซ ระยะแกปของทรงกลม d ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม D และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ คือ

$$U_b = f(d, D, \delta)$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กที่แกปทรงกลม

ตามมาตรฐาน IEC 60052 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ของแกปทรงกลมในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

สภาวะบรรยากาศมาตรฐานของ IEC คือ

- อุณหภูมิ $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- ความดันบรรยากาศ $b_0 = 101.3 \text{ kPa} (=1.013 \text{ bar} = 760 \text{ มม.ปรอท})$
- ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) $h_n = 11 \text{ g/m}^3$

ฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ของแกปทรงกลมที่สภาวะห้อง U_b จะหาได้จากค่า (U_{bn}) คูณด้วยแฟกเตอร์ k_d คือ

$$U_b = U_{bn} \cdot k_d \quad (2.1)$$

เมื่อ U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่สภาวะมาตรฐาน

k_d คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ และมีค่า = δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 - 1.05 โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ คำนวณได้จากสมการ

$$\delta = \frac{b}{b_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ b คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์ เป็น kPa หรือ bar

t คือ อุณหภูมิของห้องขณะวัด $^{\circ}\text{C}$

การวัดแรงดันด้วยแก๊ปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC 60052-2002 ให้คำนึงถึงผลของความชื้นในบรรยากาศด้วย คือค่าแรงดันเบรกดาว์นของแก๊ปทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมบูรณ์ด้วยอัตรา 0.2% ต่อ g/m^3 โดยที่ค่าแรงดันเบรกดาว์นหาจากค่าความชื้นสัมบูรณ์เฉลี่ย $8.5 \text{ g}/\text{m}^3$ เพราะฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สภาวะห้อง U_0 จึงต้องแก้ด้วยตัวประกอบแปลงผันความชื้น k_h คือ

$$U_h = U_{hm} \cdot k_h$$

ค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น คำนวณได้จากความสัมพันธ์ [IEC 60052-2002]

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 8.5)]$$

โดยที่ h คือ ความชื้นสัมบูรณ์เป็น g/m^3 สามารถอ่านได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในเทอมอุณหภูมิตอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของ Psychrometer

แต่ทั้งนี้เนื่องจากสภาพอากาศในประเทศไทยไม่เหมือนกับที่มีอยู่ในมาตรฐาน และจากข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา [<http://www.weather.go.th>] โดยความชื้นสัมบูรณ์มีค่า 17 gm^{-3} ผู้จัดทำปริญญาโทจึงเสนอให้ใช้สมการหาค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้นได้เป็น

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 17)]$$

โดยที่ตัวแปรอื่นก็จะมีค่าเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในสมการมาตรฐานข้างต้น

3. แพกเตอร์ปรับเทียบค่าแรงดันเบรกดาว์นของรีดแก๊ป

ค่าแรงดันดีสชาร์จ U_0 สำหรับทั้งแรงดันไฟฟ้าชั่วคราว และแรงดันไฟฟ้าชั่วพลในสภาวะมาตรฐานตาม IEC 60052 ที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะเท่ากับ

$$U_0 = 2 + 0.534 \times d \quad (3.1)$$

เมื่อ U_0 มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ และ d มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ค่าที่ได้จากสมการที่ (2.1) จะถูกต้องก็ต่อเมื่อระยะห่างแก๊ปมีค่าระหว่าง 250 มม. ถึง 2500 มม. และมีค่า h/δ อยู่ระหว่าง 1 gm^{-3} และ 13 gm^{-3} ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวแรงดันดีสชาร์จ U_0 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 3%

สำหรับแรงดันเบรกดาว์น U ที่วัดได้ภายใต้อุณหภูมิ t , ความดันของอากาศ b และความชื้นสัมบูรณ์ h เมื่ออ้างอิงตามสภาวะมาตรฐานจะได้เท่ากับ

$$U_0 = U / (\delta \times k) \quad (3.2)$$

ค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น คำนวณได้จากความสัมพันธ์ [IEC 60052-2002]

$$k = 1 + [0.014 \times (h/\delta - 11)] \quad (3.3)$$

เมื่อ δ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1.2) และ h/δ มีค่าอยู่ระหว่าง 1 gm^{-3} และ 13 gm^{-3}

แต่ทั้งนี้เนื่องจากสภาพอากาศในประเทศไทยไม่เหมือนกับที่มีอยู่ในมาตรฐาน และจากข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา[<http://www.weather.go.th>] โดยความชื้นสัมบูรณ์มีค่า 17 gm^{-3} ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์จึงเสนอให้ใช้สมการหาค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้นได้เป็น

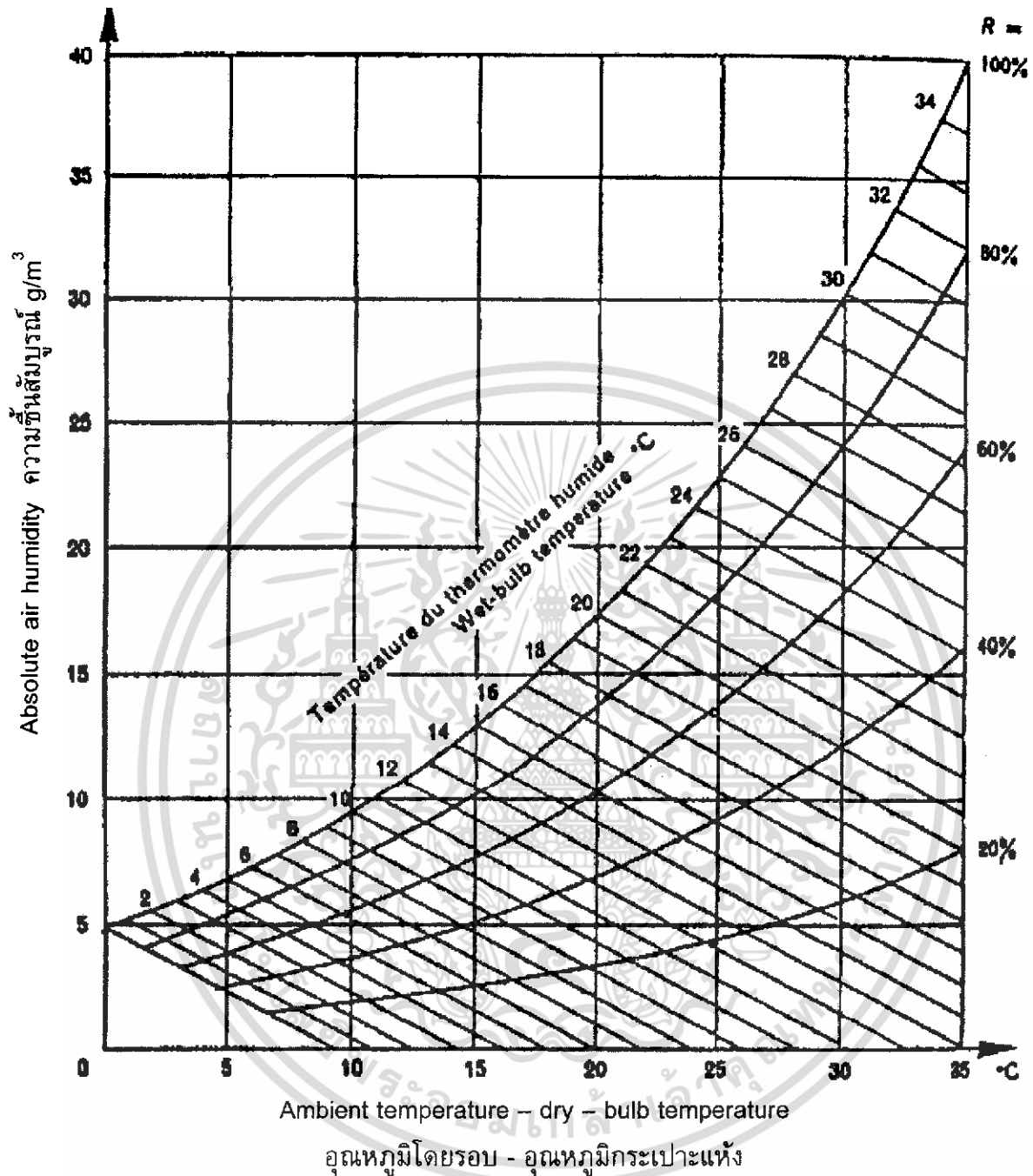
$$k = 1 + [0.014 \times (h/\delta - 17)]$$

โดยที่ตัวแปรอื่นก็จะมีค่าเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในสมการมาตรฐานข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความชื้นสัมบูรณ์อากาศ



รูปที่ ผ.จ.1 กราฟความชื้นสัมบูรณ์อากาศ

ตัวอย่างการหาค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากกราฟ

ที่อุณหภูมิห้อง 27°C ความชื้นสัมพัทธ์ (อ่านจากไฮโกรมิเตอร์) $h = 70\%$
 จะได้ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ 18 g/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณค่าปรับแก้แรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองให้เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์มาตรฐาน

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นแบบระนาบ-ระนาบ

ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 24 °C

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความชื้นสัมพัทธ์ 68 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 15 gm⁻³

ที่ระยะแกป 2 เซนติเมตร

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางด้านแรงต่ำมีค่า 16.03 V

จะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ทางด้านแรงสูง 47.53 kV

จากสูตร

$$\delta = \frac{b}{b_0} \frac{273+t_0}{273+t}$$

แทนค่า

$$\delta = \frac{760}{760} \times \frac{273+20}{273+24}$$

$$\delta = 0.987$$

นำค่า δ ไปหาค่า k_h จากสูตร

$$k_h = 1 + [0.002(h/\delta - 17)]$$

$$k_h = 1 + [0.002(\frac{15}{0.987} - 17)]$$

$$k_h = 0.996$$

จะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

จากสูตร

$$U_b = U_{bn} \cdot k_h$$

$$U_{bn} = \frac{47.53}{0.996}$$

$$U_{bn} = 47.72 \text{ kV}$$

(กรณีรีดแกป)

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นแบบรีด-ระนาบ

ระนาบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.6 เซนติเมตร

ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 24.5 °C

ความดันบรรยากาศ 760 mmHg

ความชื้นสัมพัทธ์ 64 %

ความชื้นสัมบูรณ์ 14 gm⁻³

ที่ระยะแกป 2 เซนติเมตร

ค่าแรงดันเบรกตาว์ทางด้านแรงต่ำมีค่า 11.35 V

จะได้ค่าแรงดันเบรกตาว์ทางด้านแรงสูง 32.30 kV

จากสูตร
$$\delta = \frac{b}{b_0} \frac{273+t_0}{273+t}$$

แทนค่า
$$\delta = \frac{760}{760} \times \frac{273+20}{273+24.5}$$

$$\delta = 0.985$$

นำค่า δ ไปหาค่า k จากสูตร $k = 1 + [0.014(h/\delta - 17)]$

$$k = 1 + [0.014(\frac{14}{0.985} - 17)]$$

$$k = 0.961$$

จะได้ค่าแรงดันเบรกตาว์ที่สภาวะมาตรฐาน

จากสูตร
$$U_0 = \frac{U}{\delta \times k}$$

$$U_0 = \frac{32.30}{0.961}$$

$$U_0 = 33.61 \text{ kV}$$