

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเทคนิคการควบคุมสนามไฟฟ้า

THE STUDY OF ELECTRIC FIELD STRESS CONTROL



T104057



นายสิทธา เล็กพูนศักดิ์  
นายสุภลภย์ หรุจิตตวิวัฒน์  
นายอภิชัย นิยมพานิช  
นายอรรคพล มโนวีรวัฒน์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 104057  
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การศึกษาเทคนิคการควบคุมสนามไฟฟ้า  
**THE STUDY OF ELECTRIC FIELD STRESS CONTROL**



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.นรเศรษฐ พัฒนเดช

รศ.ศุลี บรรจงจิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเทคนิคการควบคุมสนามไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

นายสิทธิ	เล็กพูนศักดิ์	รหัส	48010961
นายสุภภย์	หุจิตตวิวัฒน์	รหัส	48011006
นายอภิชัย	นิยมพานิช	รหัส	48011058
นายอรรคพล	มโนธีรวัฒน์	รหัส	48011081

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเทคนิคการควบคุมสนามไฟฟ้า

นายสิทธิา เล็กพูนศักดิ์  
 นายสุภลภย์ หรุจิตตวิวัฒน์  
 นายอภิชัย นิยมพานิช  
 นายอรรคพล มโนธีรวัฒน์  
 ผศ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา  
 รศ. ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของวัตถุทดสอบทรงกระบอกที่ส่วนใหญ่ถูกใช้ทางด้านไฟฟ้าแรงสูง โดยวิธีการใส่โคโรนาซีลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ บนวัตถุทดสอบจำลอง และวิธีการแบ่งวัตถุทดสอบเป็นชั้นๆ แล้วใส่อิเล็กโทรดชั้นกลางระหว่างชั้นที่แบ่ง เพื่อช่วยในการกระจายแรงดันไฟฟ้าและลดสนามไฟฟ้าให้ต่ำลง โครงการนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้วัตถุทดสอบเป็นท่ออะคริลิกใสที่มีหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ท่อยาว 30 cm หนา 0.3 cm ใช้อิเล็กโทรด โคโรนาซีลด์ และแท่งรีดปลายแหลมเป็นอะลูมิเนียม โดยได้มีการแบ่งขนาดของท่ออะคริลิก เป็น 3 ขนาดคือ ยาว 30 cm. 1 ชั้น 15 cm. 2 ชั้น และ 10 cm. 3 ชั้นตามลำดับ โดยทุกๆแบบจะมีความสูงโดยรวมเท่ากับ 30 cm. ลักษณะการกระจายของแรงดัน และความเข้มของสนามไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ก่อนทำการทดสอบจริง จากผลการทดลองจะพบว่า กรณีท่อ 1 ชั้นการใส่โคโรนาซีลด์จะทำให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าไม่ใส่ กรณีท่อ 2 ชั้น ขณะที่ไม่ใส่โคโรนาซีลด์ค่าแรงดันเริ่มเกิดจะสูงกว่าท่อ 1 ชั้น และการใส่โคโรนาซีลด์ที่ตำแหน่งบนกับกลางจะทำให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าโมเดลอื่นที่ได้ออกแบบ ส่วนกรณีท่อ 3 ชั้น ค่าแรงดันเริ่มเกิดจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับการแบ่งท่อเป็น 2 ชั้น และการใส่โคโรนาซีลด์ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมจะทำให้มีค่าแรงดันเริ่มเกิดต่ำกว่าท่อ 2 ชั้นได้ กรณีนี้การใส่โคโรนาซีลด์ที่ตำแหน่งบนกับล่างจะทำให้มีค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าโมเดลอื่นที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THE STUDY OF ELECTRIC FIELD STRESS CONTROL

<b>Mr. Sitta</b>	<b>Lekpoonsak</b>
<b>Mr. Supalop</b>	<b>Roojitawiwat</b>
<b>Mr. Apichai</b>	<b>Niyomphanich</b>
<b>Mr. Akkapol</b>	<b>Manoteerawat</b>
<b>Asst. Prof. Norasage</b>	<b>Pattanadech Advisor</b>
<b>Assoc. Prof. Sulee</b>	<b>Bunjongjit Advisor</b>

### ABSTRACT

This thesis represents the methods to reduce the electric field stress of the cylindrical test objects which are mostly used as an important part in high voltage equipment. The proposed methods are to install corona shields with the test models at the specified positions and to divide the test object into one, two or three parts which are fixed by the electrodes in order to control voltage distribution and decrease electric field stress. The acrylic tube that has diameter of 10 cm., length of 30 cm., and thickness of 0.3 cm., was used as the test object which was equipped by sharp rod tips made of Aluminum. The acrylic tube dimensions as follows: one piece of 30 cm in length, two pieces of 15 cm and three pieces of 10 cm were investigated. Furthermore the electric field distribution of the test object was computed employing the finite element program (COMSOL 3.3). The results of the experiment suggested that in the case of one layer tube, the presence of corona shield caused increasing of corona inception voltage values. In the case of two layer tube, the absence of corona shield resulted in higher corona inception voltage values compared with one layer tube. Moreover, when corona shield was being positioned on the top and middle layer, the corona inception voltage value is higher than other models. In the case of three layers tube, the corona inception voltage values were relatively similar to the case of dividing tube into two layers. However in the case of unsuitably equipped positions of corona shield, the corona inception voltage value was lower than the study case of two layer tube. Furthermore, installing corona shield at the top and bottom positions caused the highest corona inception voltage value compared with other models.

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ศุภี บรรจงจิตร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ข้าพเจ้ารู้สึกปลาบปลื้มใจในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณสาวณี หลุดพา ที่ให้ความเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณทุกท่านในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	IX
สารบัญตาราง.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 ตารางแสดงแผนงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สนามไฟฟ้า.....	5
2.2 การเบรกดาวน์.....	8
2.2.1 การเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	8
2.2.2 กลไกการเบรกดาวน์.....	9
2.3 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในก๊าซ.....	11
2.3.1 กรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	12
2.3.2 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	12
2.3.3 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง.....	12
2.4 โครนา.....	14
2.4.1 ปฏิกิริยาการโครนา.....	14
2.4.2 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว.....	14
2.4.3 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น.....	14
2.4.4 การเบรกดาวน์ที่ผิว.....	15
2.5 วิธีลดการเกิดปรากฏการณ์โครนา.....	15
2.6 การวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า	
2.6.1	โคโรนาดีสชาร์จ.....	16
2.6.2	ดีสชาร์จตามผิว.....	16
2.6.3	ดีสชาร์จบางส่วนภายใน.....	16
2.7	หลักการตรวจจับ PD.....	17
2.7.1	วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน.....	17
2.7.2	หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานตรวจจับ PD.....	18
2.7.3	การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน.....	18
2.8	ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น.....	19
2.8.1	ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วย FEM.....	20
2.8.2	เอลิเมนต์.....	20
2.8.3	เงื่อนไขขอบเขต.....	21
2.8.4	การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	22
บทที่ 3	การออกแบบวัตถุทดสอบ.....	23
3.1	การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	23
3.2	การออกแบบโคโรนาซีลด์.....	24
3.3	การออกแบบวัตถุทดสอบ.....	25
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	30
4.1	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์.....	30
4.1.1	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield.....	32
4.1.2	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield.....	33
4.1.3	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - กราวด์.....	34
4.1.4	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield.....	35
4.1.5	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.6	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กราวด์.....	37
4.1.7	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง.....	38
4.1.8	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์.....	39
4.1.9	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	40
4.1.10	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์.....	41
4.1.11	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield.....	42
4.1.12	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน.....	43
4.1.13	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กราวด์.....	44
4.1.14	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง.....	45
4.1.15	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์.....	46
4.1.16	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	47
4.1.17	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์.....	48
4.1.18	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield ล่าง.....	49
4.1.19	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield ล่าง – กราวด์.....	50
4.1.20	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – ล่าง.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.21	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – ล่าง – กราวด์.....	52
4.1.22	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง.....	53
4.1.23	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง – กราวด์.....	54
4.1.24	การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง – ล่าง.....	55
4.2	การทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ ของวัตถุทดสอบแต่ละแบบ.....	56
4.2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	56
4.2.2	ขั้นตอนการทดสอบ.....	57
4.2.3	ผลการทดสอบการเบรกดาวน์.....	58
4.3	การทดสอบการเกิดโคโรนา ด้วยเครื่องทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน.....	64
4.3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	64
4.3.2	ขั้นตอนการทดสอบ.....	65
4.3.3	ผลการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน.....	66
4.3.3.1	ผลการทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	66
4.3.3.2	ผลการทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield.....	67
4.3.3.3	ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	68
4.3.3.4	ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	69
4.3.3.5	ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	70
4.3.3.6	ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	71
4.3.3.7	ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.3.8 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	73
4.3.3.9 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	74
4.3.3.10 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	75
4.3.3.11 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง.....	76
4.3.3.12 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – ล่าง.....	77
4.3.3.13 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง.....	78
4.3.3.14 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง – ล่าง.....	79
4.4 การทดลองการกระจายแรงดันไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบรูปทรงกระบอก.....	82
4.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	83
4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	83
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุป.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก .....	88
ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรม AutoCAD .....	89
ภาคผนวก ข การใช้งานโปรแกรม COMSOL.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	6
2.2	7
2.3	9
2.4	10
2.5	12
2.6	16
2.7	17
2.8	19
2.9	20
2.10	21
2.11	21
2.12	21
3.1	23
3.2	23
3.3	24
3.4	25
3.5	26
3.6	27
3.7	29
4.1	30
4.2	31
4.3	31
4.4	32
4.5	32

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield แบบ Steering ring.....	33
4.7 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	33
4.8 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield แบบ Steering ring บน – กราวด์.....	34
4.9 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	34
4.10 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	35
4.11 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	35
4.12 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	36
4.13 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	36
4.14 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กราวด์.....	37
4.15 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	37
4.16 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	38
4.17 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	38
4.18 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์.....	39
4.19 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	39
4.20 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	40
4.21 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	40
4.22 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์.....	41
4.23 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	41
4.24 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	42
4.25 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	43
4.27 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	43
4.28 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กราวด์.....	44
4.29 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	44
4.30 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	45
4.31 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	45
4.32 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์.....	46
4.33 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	46
4.34 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง.....	47
4.35 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	47
4.36 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์.....	48
4.37 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	48
4.38 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง.....	49
4.39 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	49
4.40 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง – กราวด์.....	50
4.41 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	50
4.42 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – ล่าง.....	51
4.43 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	51
4.44 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน – ล่าง – กราวด์.....	52
4.45 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง.....	53
4.47 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	53
4.48 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง – กรวด์.....	54
4.49 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	54
4.50 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้น ยาว 30cm มี Corona Shield บน - กลาง – ล่าง.....	55
4.51 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ.....	55
4.52 วงจรการทดลอง.....	56
4.53 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อแต่ละชั้น แบบไม่มี Shield.....	58
4.54 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อแต่ละชั้น แบบใส่ Shield.....	58
4.55 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อ 1 ชั้น.....	59
4.56 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อ 2 ชั้น.....	60
4.57 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อ 3 ชั้น.....	61
4.58 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกตาว์นของท่อ 1 ชั้น ขนาดต่างๆกัน.....	63
4.59 วงจรการทดลอง.....	64
4.60 วงจรการทดสอบจริง.....	65
4.61 การทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	66
4.62 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 1 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield .....	66
4.63 การทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield.....	67
4.64 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield .....	67
4.65 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	68
4.66 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	68
4.67 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	69
4.68 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	69
4.69 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	70
4.70 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	70
4.71 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.72 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง.....	71
4.73 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	72
4.74 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield.....	72
4.75 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	73
4.76 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน.....	73
4.77 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	74
4.78 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง.....	74
4.79 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง.....	75
4.80 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง.....	75
4.81 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง.....	76
4.82 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง.....	76
4.83 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-ล่าง.....	77
4.84 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-ล่าง.....	77
4.85 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง-ล่าง.....	78
4.86 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง-ล่าง.....	78
4.87 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง-ล่าง.....	79
4.88 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง-ล่าง.....	79
4.89 วงจรการทดลองการวัดแรงดันกระจาย.....	82
4.90 ระยะเวลาที่วัดแรงดันบนวัตถุ.....	83
4.91 กราฟเปรียบเทียบการกระจายแรงดันที่ผิวท่อที่ระยะต่างๆ.....	85
ผ.ก.1 เลือกรูปเครื่องมือ Draw เพื่อใช้ในการวาดรูปทรงต่างๆ.....	89
ผ.ก.2 วาดเส้นตรงขนาด 500 ในแนวแกน X.....	90
ผ.ก.3 รูปสี่เหลี่ยมขนาด 500*500.....	90
ผ.ก.4 วาดส่วนที่เป็น test object.....	91
ผ.ก.5 ท่ออิเล็กทรอนิกส์.....	91
ผ.ก.6 วาดส่วนที่อยู่ด้านในซึ่งเป็นแท่งรีอดปลายแหลม.....	92
ผ.ก.7 แบบจำลองที่จะนำ Import สู่ โปรแกรม COMSOL.....	93
ผ.ข.1 ส่วนเริ่มโปรแกรม เข้าสู่ mode การวิเคราะห์ของโปรแกรม comsol.....	94
ผ.ข.2 โหมดต่างๆในการจำลองไฟ AC/DC.....	95
ผ.ข.3 เลือกวัสดุในการวิเคราะห์.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.ข.4	หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม comsol.....	97
ผ.ข.5	ขั้นตอนการ Import File จากโปรแกรม AutoCAD.....	97
ผ.ข.6	ปรับแต่งรูปแบบ File ที่ Import.....	98
ผ.ข.7	รูปที่นำจาก AutoCAD มาใช้ในโปรแกรม comsol.....	98
ผ.ข.8	ปรับหน่วยที่ต้องการใช้.....	99
ผ.ข.9	เลือกภาพติดกับเส้นสมมาตร.....	99
ผ.ข.10	กำหนดส่วนที่เป็นวัสดุฉนวน.....	100
ผ.ข.11	ใส่ material PVC.....	100
ผ.ข.12	กำหนดเงื่อนไข Boundary Condition.....	101
ผ.ข.13	กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Continuity.....	101
ผ.ข.14	กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Ground.....	102
ผ.ข.15	กำหนดให้เป็น Axial symmetry.....	102
ผ.ข.16	กำหนดเป็น Zero charge.....	103
ผ.ข.17	แบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์ย่อย.....	103
ผ.ข.18	บริเวณที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง.....	104
ผ.ข.19	ลดขนาดของเอลิเมนต์ลง.....	104
ผ.ข.20	ชิ้นส่วนเอลิเมนต์ของช่องว่างระหว่างรีดปลายแหลม.....	105
ผ.ข.21	ผลเฉลยที่คำนวณได้.....	105
ผ.ข.22	ในส่วนของ Surface.....	106
ผ.ข.23	คลิกเครื่องหมายถูกที่ Contour plot.....	107
ผ.ข.24	แสดงค่า max, min ของสนามไฟฟ้า.....	107
ผ.ข.25	แสดง Surface และค่า max, min.....	108
ผ.ข.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Arc-length กับค่า Electric field, norm [kV/cm].....	108

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 30 cm .....	53
4.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 2 ชั้นยาว 30 cm.....	54
4.3 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 3 ชั้นยาว 30 cm.....	55
4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 30 cm.....	56
4.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 15 cm.....	56
4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 10 cm.....	56
4.7 ค่าการติสซาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท้อ 1 ชั้น.....	74
4.8 ค่าการติสซาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท้อ 2 ชั้น.....	74
4.9 ค่าการติสซาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท้อ 3 ชั้น.....	75
4.10 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท้อ 1 ชั้น ไม่ใส่ Shield.....	78
4.11 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท้อ 2 ชั้น ไม่ใส่ Shield.....	78
4.12 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท้อ 3 ชั้น ไม่ใส่ Shield.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นอย่างมากซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้ก็มีความแตกต่างกัน จึงทำให้มีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นมา บ่อยครั้งใช้เพื่อทดสอบกับวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันสูง ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันสูงจึงจำเป็นต้องมีความคงทนต่อระดับแรงดันที่ใช้งานได้ โดยที่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีผลต่อความคงทนของฉนวนเป็นอย่างมาก ยิ่งบริเวณใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง บริเวณนั้นจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดความสูญเสียโคโรนาหรือเกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้ ฉะนั้นโครงการนี้จึงทำการศึกษาถึงวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งวิธีการลดค่าความเครียดก็มีหลายวิธี เช่น การลดขอบคมปลายแหลม ใส่โคโรนาชิลด์ และวิธีการแบ่งอุปกรณ์เป็นชั้นๆ เป็นต้น

โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงวิธีการลดความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการวางตำแหน่งโคโรนาชิลด์ให้เหมาะสม และวิธีการแบ่งวัสดุทดสอบออกเป็นชั้นๆ เพื่อช่วยในการกระจายสนามไฟฟ้า ลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินขีดจำกัดความคงทนของฉนวน และช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆคือ 1) วิธีทางการทดลอง ( Experimental ) 2) วิธีทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ ( Analytical ) และ 3) วิธีเชิงเลข ( Numerical ) สำหรับวิธีการทดลองจะใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก ส่วนวิธีทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์จะใช้ได้สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างง่ายเท่านั้น ดังนั้นวิธีทางเชิงเลข ( Numerical ) จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และปัจจุบันได้มีการนำเอาโปรแกรม ( Finite Element Method, FEM ) มาใช้แก้ปัญหาด้านสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าคำตอบที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรม ซึ่งทำให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป โครงการวิจัยนี้จึงนำเอาวิธีการเชิงเลขมาทำการวิเคราะห์รูปแบบและค่าการกระจายสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ก่อนที่จะทำการตรวจสอบด้วยวิธีการทดลองจริงซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นต่อพฤติกรรมสนามไฟฟ้างดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และดูการกระจายตัวของแรงดันและสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบรูปทรงระบอบ
2. เพื่อศึกษาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งนำมาสู่การเกิดเบรกดาว์นของวัตถุทดสอบ
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบ ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น ใส่โคโรนาซิลต์ในตำแหน่งที่เหมาะสม หรือ แบ่งวัตถุทดสอบออกเป็นชั้นๆ เป็นต้น

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาว์นจากการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FEM
2. ออกแบบวัตถุทดสอบและชุดอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการศึกษาเรื่องการกระจายของแรงดัน สนามไฟฟ้าและการเกิดเบรกดาว์น
3. ทำการศึกษาการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบด้วยโปรแกรม FEMเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา และวิธีการลดโคโรนา
2. ศึกษาสาเหตุการเกิดเบรกดาว์น
3. ศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า COMSOL(FEM)
4. ศึกษาวิธีการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาว์นจากการกระจายของสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FEM
5. ทำการแก้ไขปัญหาแบบจำลองที่ออกแบบไว้ เพื่อดูการกระจายของสนามไฟฟ้าพร้อมหาค่าแรงดันเบรกดาว์น จากโปรแกรม และจากการคำนวณตามสูตร
6. ทำการวิเคราะห์ผลการจำลอง
7. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์จริง
8. สรุป จัดทำปริญญานิพนธ์



การทำงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551			
	พ.ย.51	ธ.ค.51	ม.ค.52	ก.พ.52
1.ทำการออกแบบและกำหนดแนวทางการทดสอบ	[REDACTED]	[REDACTED]		
2.จำลองผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห่อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม FEM	[REDACTED]	[REDACTED]		
3.ทดสอบอุปกรณ์ที่ออกแบบ			[REDACTED]	
4.นำข้อมูลที่ได้มาสรุปผลงาน				[REDACTED]
5.จัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับสมบูรณ์				[REDACTED]

วางแผน  
ปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สนามไฟฟ้า [1]

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย

สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

- สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field)
- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field)

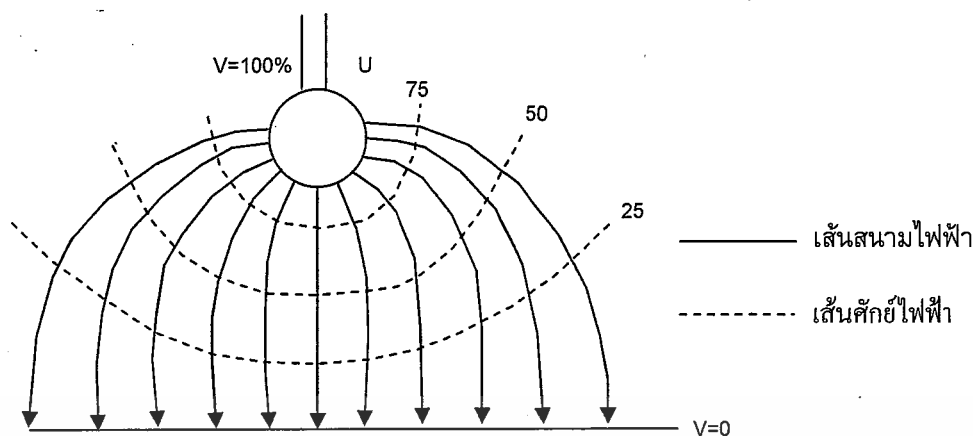
สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่าจะได้ดังภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีคำนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 เส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทรงกลม

ภาพที่ 2.1 อิเล็กโทรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอิเล็กโทรดคือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า “กระแสโคโรนา (corona current) หรือ กระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.1) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.1) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ (2.1) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

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

เมื่อ  $E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด  
 $U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

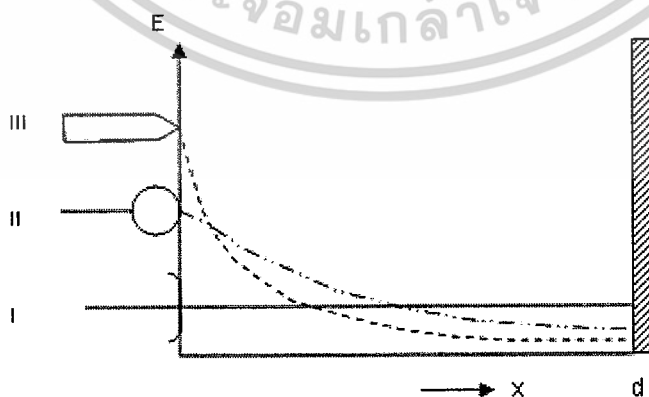
โดยที่  $E_{\max}$  และ  $U_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้น สมการ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ (2.3) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage \*, threshold voltage, inception voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน (ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียง เล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \eta^* \quad (2.4)$$

เมื่อ  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b > U_i$  ค่าแรงดันเบรกดาวนนี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเบรกดาว์ [2]

การเบรกดาว์ หมายถึง การที่เราป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆหนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้นๆได้ จึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้นๆทนไม่ไหว จึงเกิดการเบรกดาว์ไปในที่สุด การเบรกดาว์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นถ้าแบ่งการเบรกดาว์ตามชนิดของฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว จะแบ่งออกได้ 3 แบบคือ

- 1.การเบรกดาว์ ในก๊าซ (Breakdown in gas)
- 2.การเบรกดาว์ ในของเหลว (Breakdown in Liquid)
- 3.การเบรกดาว์ ในของแข็ง (Breakdown in solid)

ในโครงการฉบับนี้จะขออธิบายแค่การเบรกดาว์ในอากาศหรือก๊าซเท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีการเบรกดาว์ในของแข็ง และ ของเหลว ที่ชัดเจน

### 2.2.1 การเบรกดาว์ ในก๊าซ (Breakdown in gas)

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่ง สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีการ ดิสชาร์จเกิดขึ้นซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชัน โดยการไอออไนเซชัน จะเกิดขึ้นได้ต้องมี สนามไฟฟ้ามากกระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ รวมกับอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากผิวอิเล็กโตรด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซ มีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาว์ การดิสชาร์จเบรกดาว์ในช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. เบรกดาว์สมบูรณ์ Complete Breakdown คือการเกิดเบรกดาว์ตลอด แกบเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาว์สมบูรณ์นี้ว่า แรงดันเบรกดาว์  $U_b$  (Breakdown Voltage)

2. เบรกดาว์เพียงบางส่วน (Partial Breakdown) คือ การเกิดเบรกดาว์ไม่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดก่อนเบรกดาว์แบบสมบูรณ์ เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันเริ่มเกิด  $U_i$  (Inception Voltage)

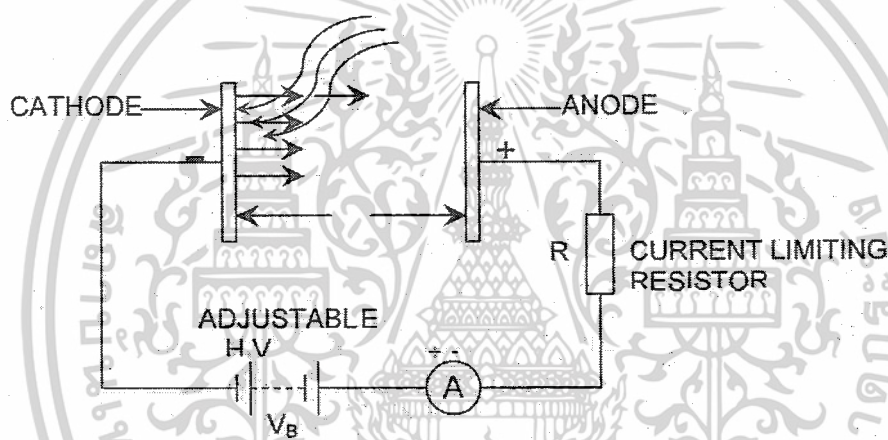
## 2.2.2 กลไกการเบรกดาวน มีอยู่ 2 วิธี คือ

1. กลไกการเบรกดาวนของ Townsend ซึ่งจะใช้ในการอธิบายการพัฒนาของประจุ electron จนกระทั่งเกิดเป็นกลุ่มประจุเคลื่อนที่จาก Electrode หนึ่งไปยัง Electrode หนึ่ง

2. กลไกการเบรกดาวน แบบ Streamer ใช้ในการอธิบายการก่อตัวประจุที่เป็นกลุ่มก้อน และแผ่กระจายขยายไปจนกระทั่งถึง Electrode ทั้งสองขั้ว

### 1. กลไกการเบรกดาวนของ Townsend

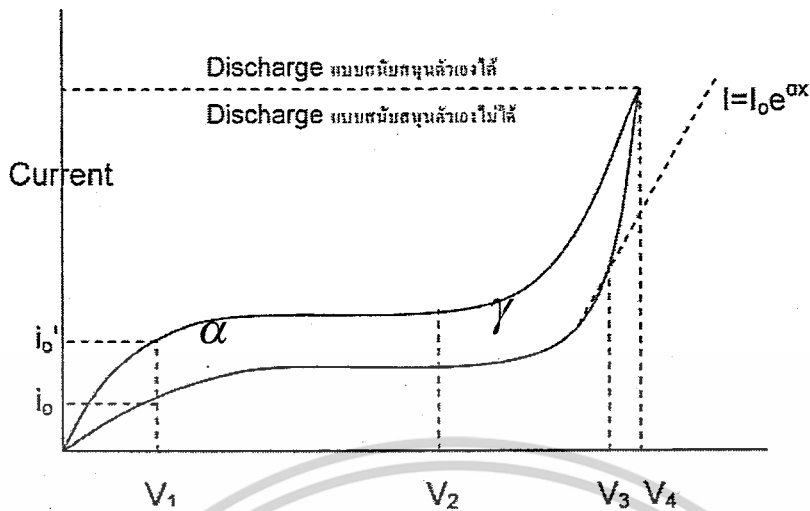
Townsend ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่าง Electrode แบบระนาบวางขนานกัน ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 วงจรศึกษาการทดลองของ Townsend

### จากการทดลองของ Townsend

เมื่อทำการเพิ่มแรงดัน  $V_B$  ซึ่งตกคร่อมอิเล็กโทรดทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ระหว่างอิเล็กโทรดจากนั้นทำการยิงรังสี UV เข้าไปที่ อิเล็กโทรดขั้วลบจนอิเล็กตรอนหลุดออกจากอิเล็กโทรดขั้วลบแล้วเคลื่อนที่ไปหาขั้วบวกจากนั้นเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างมากจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนในที่สุด



ภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า  $V_B$  กับกระแสก่อนเกิดการเบรกดาวน

จากกราฟจะพบว่าในช่วงแรก กระแสจะเพิ่มเป็นสัดส่วนกับแรงดัน  $V_B$  เมื่อทำการเพิ่ม  $V_B$  ขึ้นจาก  $V_1$  ถึง  $V_2$  กระแสจะอิ่มตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งไปอะโนดหมด ถ้าเพิ่มแรงดันจนถึง  $V_3$  กระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential เมื่อเพิ่มแรงดันจนถึง  $V_4$  จะเกิดเบรกดาวนเนื่องจากการไอออไนเซชันของก๊าซชนกัน และเส้นกราฟ 2 เส้นเกิดจากการป้อนรังสี UV ที่มีความเข้มไม่เท่ากัน

จะได้สมการกระแสที่ไหลผ่าน อากาศระหว่างอิเล็กโทรดเป็น

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.5)$$

เงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวนในก๊าซของ Townsend เมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์

คือ 
$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.6)$$

**2. กลไกการเบรกดาวนแบบ Streamer** เนื่องจากกลไกการเบรกดาวนตามทฤษฎีของทาว์นเซนต์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวนได้ทุกกรณี โดยเฉพาะเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (formative time) ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวนในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด  $T_c$  เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงคาโอดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ หรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากคาโอดไปแอนอด โดยไม่ชนกับโมเลกุลใดเลย ก็ยังใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัด

ต่อมา Meek, Loeb และ Rather ได้เสนอ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาวนแบบ Streamer ขึ้น โดย Meek กับ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (positive streamer) ส่วน Rather ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ (negative streamer)

1) Meek, Loeb กล่าวว่า สตรีมเมอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์ มีค่าประมาณเท่าๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่บ่อนจากภายนอก

2) Rather กล่าวว่า สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนไนเซชัน  $e^{ad}$  ประมาณ  $10^8$  โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ หรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

### 2.3 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในก๊าซ [1]

การเกิดเบรกดาวนในก๊าซมี 2 แบบคือ เบรกดาวนโดยตรง กับ เบรกดาวนแบบโคโรนา การเบรกดาวนโดยตรงจะเกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ส่วนการเกิดเบรกดาวนแบบโคโรนา จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน ซึ่งเป็นลักษณะเบรกดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนคำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันเริ่มเกิดได้ การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในก๊าซ จะอาศัยเงื่อนไขเบรกดาวนตามทฤษฎีทาว์นเซนต์ หรือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ ซึ่งกล่าวรวมได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวนในก๊าซได้นั้นจะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกในอะวาลานซ์ถึงค่าวิกฤต อะวาลานซ์อิเล็กตรอนได้จากการอินทิเกรต  $\int \alpha dx$

### 2.3.1 กรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

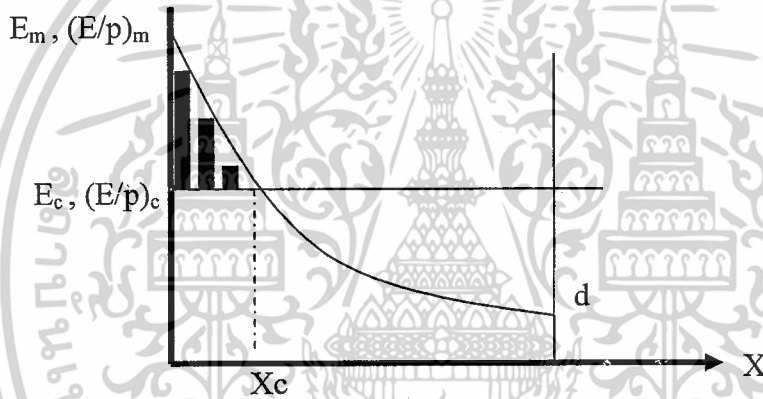
ตามเงื่อนไขของทาวน์เซนต์ คือ  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$  และเงื่อนไขของ Rather คือ จำนวนอิเล็กตรอนในระยะเวลาหนึ่ง วิกฤตเท่ากับ  $Nc$  จะได้ระยะเวลาหนึ่งวิกฤตเป็น

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

### 2.4.2 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เมื่อ  $\alpha$  เป็นฟังก์ชันของ  $E(x)$  และความดัน  $P$  จึงเขียนสมการได้ใหม่เป็น

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



ภาพที่ 2.5 แสดงระยะระยะเวลาวิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

### 2.2.3 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง [2]

ค่า  $\alpha$  มีความสัมพันธ์กับความดันก๊าซ  $p$  และสนามไฟฟ้า  $E$  คือ  $\alpha / p = f(E/p)$  ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีฟังก์ชันต่างกัน กรณี อากาศ คือ

$$\frac{\alpha}{P} = C \left[ \frac{E}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - A \tag{2.5}$$

- โดยที่  $C = 1.6053 \text{ mm.bar/kV}^2$
- $(E/P)_M = 2.165 \text{ kV / mm.bar}$
- $P = 1.013 \text{ bar (ที่สภาวะมาตรฐาน)}$

ค่า  $K$  (streamer constant) = 9.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นแทนค่า  $\bar{\alpha}$  ลงในสมการ  $\int_0^s \alpha dx = K$  (2.6)

จะได้  $\int_0^s \left[ PC \times \left[ \frac{TE_n}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \right] dx = K$  (2.7)

$$PC \sum_{n=1}^{1499} B_n \left[ \frac{TE_n}{P} - \left( \frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \sum_{n=1}^{1499} B_n = K \quad (2.8)$$

$$U_i = U_0 \times T \quad (2.9)$$

โดยที่

$$E_n = \begin{cases} E_n, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n < 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

$$B_n = \begin{cases} \frac{s}{1499}, TE_n \geq 2.588 \times 1.013 \\ 0, TE_n < 2.588 \times 1.013 \end{cases}$$

$E_n$  = ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/mm)

$T$  = ค่าคงที่

$C$  = 1.6053 mm.bar/kV<sup>2</sup> (ค่าคงที่ชูมันน์)

$(E/P)_M$  = 2.165 kV/mm.bar

$A$  = 0.2873 /mm.bar

$P$  = ความดันชั้นบรรยากาศ ( 1.013 mm.bar)

$S$  = ระยะห่าง

$K$  = 9.15

$U_i$  = แรงดันเริ่มเกิด (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 โครนา (CORONA)

โครนา เป็นชื่อปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นบนตัวนำไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การเกิดโครนาเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งของระบบโดยกำลังไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แสง เสียง เคมี และแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการเกิดปรากฏการณ์โครนาจะส่งผลเสียที่เห็นได้ชัดเจน 2 ประการ คือ

1. สูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบไปโดยเปล่าประโยชน์
2. การเกิดคลื่นแทรกและรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุ

### 2.4.1 ปรากฏการณ์โครนา

เมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรด มีค่ามากเพิ่มขึ้นกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่งจะได้ยินเสียงความถี่สูงปรากฏออกมา ซึ่งเป็นการแตกตัวของอากาศที่เรียกว่า ขบวนการแตกตัวของก๊าซ (ionization of gases) ซึ่งจะมีไอออนและกรดไนตริกเกิดออกมา เมื่อความต่างศักย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นไปอีก เราจะเห็นปรากฏการณ์ แสงสีม่วงเรืองแสงรอบๆ ตัวนำเป็นจุดๆ ตลอดความยาว แสงเรืองนี้จะปรากฏให้เห็นชัดเจนบริเวณที่มีความขรุขระหรือสกปรกมากพร้อมกันนั้นจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุด้วย และถ้าแรงดันนั้นมีขนาดมากขึ้นไปอีก จะเกิดการสปาร์ค (spark) หรือเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) ขึ้น ทั้งหมดนี้ เรียกว่า "ปรากฏการณ์โครนา"

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โครนา มีอยู่ 2 อย่าง คือ

1. แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (disruptive critical voltage)
2. แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage)

### 2.4.2 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว (disruptive critical voltage)

เป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เริ่มเกิดขบวนการแตกตัวของอากาศ อันเนื่องมาจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในอากาศได้รับผลจากความเข้มข้นไฟฟ้า ทำให้เกิดพลังงานจลน์วิ่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระและไอออนขึ้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางเสียงโดยยังไม่มีแสงให้เห็น

### 2.4.3 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage)

เป็นค่าระดับหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวิกฤติที่สูงกว่าค่าแรก และทำให้อากาศชั้นรอบนอกออกไปแตกตัวต่อไป ด้วยผลจากการที่โมเลกุลได้รับพลังงานจลน์จากการชนของอิเล็กตรอนอิสระ จะทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลแตกตัวหลุดออกไป และวิ่งไปชนโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าอิเล็กตรอนบางตัวของโมเลกุลไม่สามารถแตกตัวออกไปได้ โมเลกุลนั้นก็จะมีอยู่ในสภาวะไม่เสถียร (unstable state) และเมื่ออิเล็กตรอนคืนกลับสู่สภาวะเดิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลก็จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับคืนกลับมาในรูปพลังงานโฟตอน (photon) ที่เป็นพลังงานแสง ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาในสภาวะที่อำนาจ ดังนั้นเราจะมองเห็นแสงเรืองรอบสายตัวนำ

ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็นนี้ขึ้นไปอีก อาจทำให้อากาศรอบตัวนำแตกตัวได้หมดต่อเนื่อง เป็นผลให้อากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวน กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านข้ามอากาศได้ ซึ่งอาจจะเป็นลำแสงสว่างมากเรียกว่า การวาบไฟตามผิว นั่นเอง

#### 2.4.4 การเบรกดาวน์ที่ผิว

เบรกดาวน์ที่ผิวเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า จากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโทรดหนึ่งไปตามผิวของฉนวนไฟฟ้าที่กั้นระหว่างอิเล็กโทรด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่ผิวฉนวนไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความยาวและ ลักษณะของผิว เช่น ความสกปรก การเกาะตัวของเกลือ และความชื้นของผิว ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ลดลง

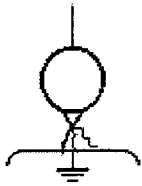
#### 2.5 วิธีลดการเกิดปรากฏการณ์ โครโนนา [5]

1. ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างโคโรนาซีลด์ ต้องศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อหาชนิดที่เหมาะสม นำมาสร้างเป็นโคโรนาซีลด์โดยคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา เช่น ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าความเป็นฉนวน เป็นต้น
2. รูปทรงต่าง ๆ ของโคโรนาซีลด์ ที่สามารถกระจายความเข้มสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้ไปเกิดที่จุดๆเดียว
3. ลักษณะของพื้นที่ผิวของโคโรนาซีลด์ พื้นที่ผิวที่ขรุขระจะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าผิวเรียบ
4. ตำแหน่งการวางของโคโรนาซีลด์ การวางตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิด โครโนนาได้อย่างมาก ควรวางไว้ใกล้กับจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เช่น บริเวณขอบคม หรือปลายแหลม เป็นต้น

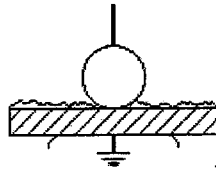
#### 2.6 การวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge, PD) [3]

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge , PD) คือการเกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรกดาวน์หรือดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่าง อิเล็กโทรด ไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ต่อเนื่องกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

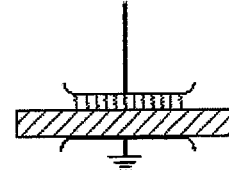
บางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ 1) โคโรนาดีสชาร์จ 2) ดิสชาร์จตามผิวและ 3) ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงในภาพที่ 2.6



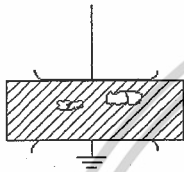
ก) โคโรนาดีสชาร์จ



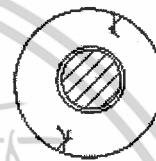
ข) ดิสชาร์จตามผิว



ค) ดิสชาร์จภายในรอยต่อ



ง) ดิสชาร์จภายในโพรงอากาศ



จ) ดิสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

## ภาพที่ 2.6 การดิสชาร์จบางส่วน

### 2.6.1 โคโรนาดีสชาร์จ

โคโรนาดีสชาร์จ(Corona discharge) จะเกิดตรงบริเวณรอบๆอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆบริเวณนั้นเกิดไอออนในเซชัน

### 2.6.2 ดิสชาร์จตามผิว

ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลายฉนวนนำสาย

### 2.6.3 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ดิสชาร์จบางส่วนภายใน หมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่ซึ่งมีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก อันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด

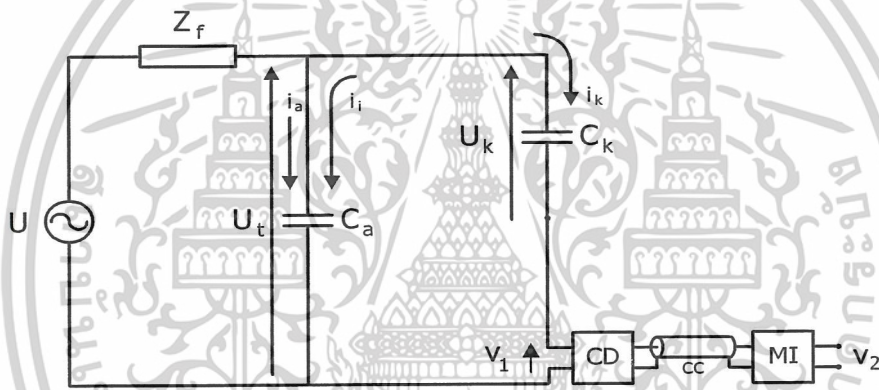
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 หลักการตรวจจับ PD (Partial Discharge) [5]

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

### 2.7.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 602270:1998 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ  $U$  ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  วัสดุทดสอบ (Test object)  $C_a$  ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor)  $C_k$  อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบ เป็นดังนี้

- 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง  $U$  ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD
- 2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์โมนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบ และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย
- 3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบ วงจรระหว่าง  $C_a$ ,  $C_k$  และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์  $i_i$  ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือเป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณ รบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

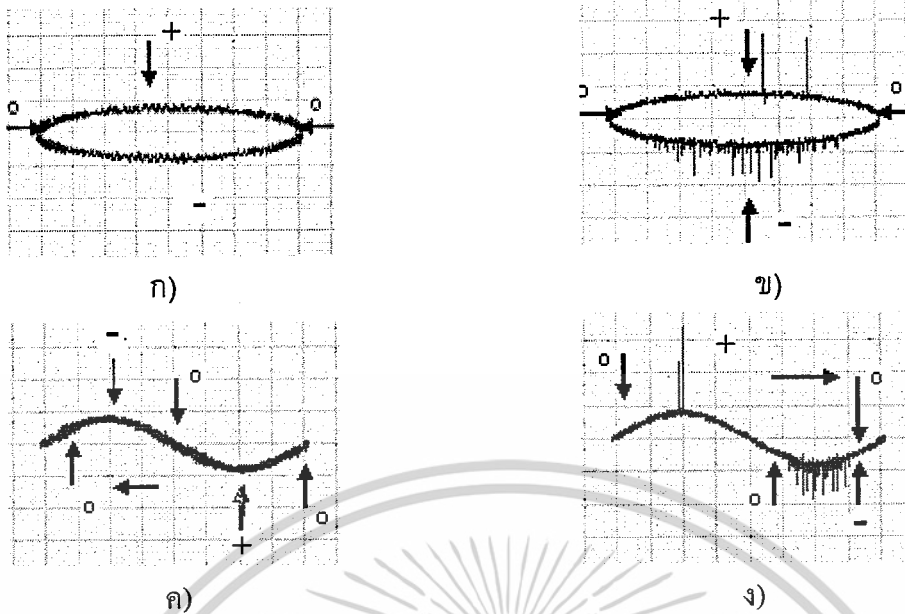
### 2.7.2 หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานตรวจจับ PD

หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจาก ค่อย ๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย  $U$  ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ  $C_a$  ทำให้  $C_k$  จะดิสชาร์จประจุไปที่  $C_a$  เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i_i$  ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย  $C_k, C_a$  และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_a$  กับ  $C_k$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

### 2.7.3 การแสดงผลดิสชาร์จบางส่วน

การวัด PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงได้ออกมาเป็น micro-volt ( $\mu V$ ), picocolomb (pC) แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่ง ยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่ง ศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังภาพที่ 2.8 ก), และ 2.8 ข) หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังภาพที่ 2.8 ค), และ 2.8 ง)

การแสดงผล PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปอิลิปส์ มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร



ภาพที่ 2.8 การแสดงผลของ PD

ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์

ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์

ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

## 2.8 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น

FEM หรือ Finite Element Method เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบที่ได้สามารถนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ และออกแบบได้หลายแขนงสาขา เช่น

1. วิศวกรรมโยธา: truss, beam, frame, plate, dam, vibration, earthquake
2. วิศวกรรมเครื่องกล: heat transfer, machine, vehicle
3. CFD: การไหลของของเหลว และก๊าซ, อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ และเครื่องบิน
4. วิศวกรรมไฟฟ้า: electromagnetic, piezoelectric
5. โลหะการ: metal forming
6. การแพทย์: biomechanics

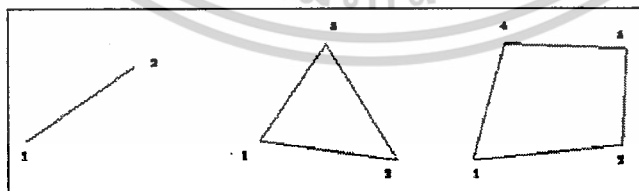
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วย FEM

1. ระบุ และทำความเข้าใจกับปัญหาให้ชัดเจน ปัญหามีกี่มิติ , เกี่ยวกับเวลาหรือไม่ , เงื่อนไขขอบเป็นอย่างไร ฯลฯ
2. เลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว เพราะสมการเชิงอนุพันธ์จะเป็นตัวกำหนดชนิดของ solver FEM ที่เลือกใช้
3. ทำความเข้าใจกับหน่วยของปริมาณ และ material property ที่เกี่ยวข้องในสมการ
4. สร้างรูปเรขาคณิต ปกติจะใช้โปรแกรมตระกูล CAD
5. สร้างเอลิเมนต์ย่อย หรือ mesh แบบ {1, 2, 3} มิติให้สอดคล้องกับปัญหา
6. กำหนดค่า material property โดยต้องรัดกุมเกี่ยวกับหน่วยของปริมาณ
7. กำหนด boundary condition
8. หาคำตอบโดยใช้โปรแกรม FEM
9. ทำการแปลความหมายผลลัพธ์ ตรวจสอบความถูกต้อง visualization ก่อนนำข้อมูลไปใช้งาน Analysis/design

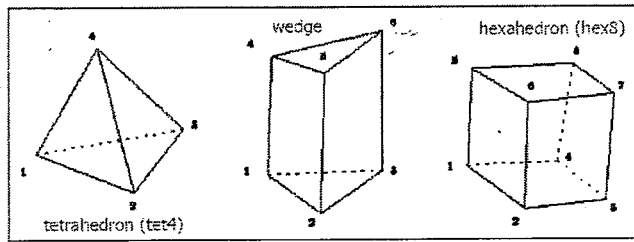
### 2.8.2 เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ หมายถึง หน่วยย่อยของรูปเรขาคณิตที่เป็นโดเมนของปัญหา บางครั้งอาจเรียกว่า Mesh หรือ Grid ซึ่งในวิธี FEM จะแยกคิดทีละเอลิเมนต์ย่อยก่อน จากนั้นจึงนำแต่ละ เอลิเมนต์ย่อยกลับไปประกอบเป็นรูปเรขาคณิตที่ต้องการ การแยกรูปเรขาคณิต ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเป็นเทคนิคทำให้การหาคำตอบทำได้ง่ายขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มงานในการสร้าง Mesh

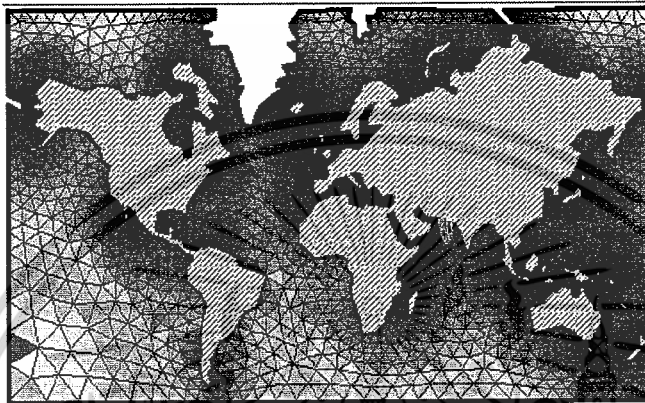


ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 1 และ 2 มิติ

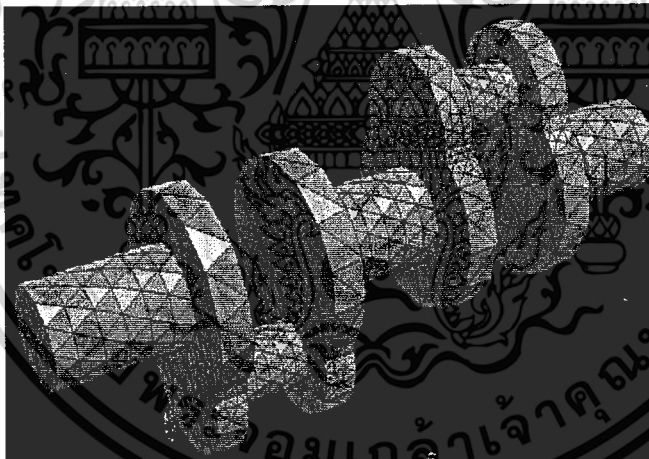
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่าง Mesh 2 มิติ



ภาพที่ 2.12 ตัวอย่าง Mesh 3 มิติ

### 2.8.3 เงื่อนไขขอบ (boundary condition)

Boundary condition หรือเงื่อนไขขอบ เป็นการกำหนดให้ unknown บางตัว ต้องทราบค่า (unknown) ตั้งแต่การระบุปัญหา ถ้าไม่กำหนด boundary condition มาให้ จะไม่สามารถหาคำตอบเฉพาะของปัญหานั้นได้ ปัญหาแต่ละอย่าง จะมี characteristic ของ unknown ที่สามารถเป็น boundary condition ได้แตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้โดย สมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$y(0,t) = 0, \quad t > 0 \quad \text{Boundary condition \#1}$$

$$y(L,t) = 0, \quad t > 0 \quad \text{Boundary condition \#2}$$

$$y(x,0) = x(L-x), \quad 0 < x < L \quad \text{Initial condition \#1}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t}(x,0) = 0, \quad 0 < x < L \quad \text{Initial condition \#2}$$

### 2.8.4 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

#### เงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า

$$n \cdot (\epsilon \nabla \phi) = 0$$

$$n_1 \cdot (\epsilon_1 \nabla \phi_1) = n_2 \cdot (\epsilon_2 \nabla \phi_2)$$

$$V = V_0$$

$$V = 0$$

zero charge / no electric field, / symmetry surface

continuity surface

input voltage

ground

#### สำหรับระบบ 3 แกน

$$n \cdot J = 0 \quad \text{Electric insulation}$$

$$n \cdot (J_1 - J_2) = 0 \quad \text{Continuity surface}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

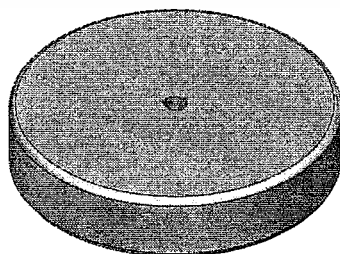
#### การออกแบบวัตถุทดสอบ (Test object)

##### 3.1 การออกแบบอิเล็กโทรด

ในการออกแบบวัตถุทดสอบที่จะนำมาทดสอบโคโรนานั้นจำเป็นต้องมีอิเล็กโทรดเพื่อนำมาทดสอบว่าโคโรนาซีลด์ที่ออกแบบมานั้นสามารถลดการเกิดโคโรนาได้หรือไม่ ดังนั้นจึงได้ออกแบบอิเล็กโทรดเป็นลักษณะทรงกระบอกขอบมนใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมและรองรับด้วยท่ออะคริลิก ที่ทนพิกัดแรงดัน 100kV/50 cm. และภายในท่อบรรจุแท่งปลายแหลม (rod) มีช่องว่าง (Spacing Gap) 2 cm. มุม 60 องศา โดยจะใช้ทำการทดลองกับเครื่องตรวจจับ PD



รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดกับแท่งปลายแหลมในฉนวนท่ออะคริลิก  
(Electrode with rod in acrylic tube insulation)



รูปที่ 3.2 ฝาอิเล็กโทรด (Electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบโคโรนาซีลด์

เนื่องจากในปัจจุบันการออกแบบโคโรนาซีลด์ยังไม่มีสมการรองรับที่แน่นอน ดังนั้นจึงเลือกใช้โคโรนาซีลด์แบบ Steering ring โดยทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม COMSOL (FEM)

จากนั้นจึงทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ PD โดยนำมาเปรียบเทียบกับวัตถุทดสอบที่ไม่มีโคโรนาซีลด์ว่าโคโรนาซีลด์ที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถลดโคโรนาที่เกิดขึ้นได้หรือไม่อย่างไรรวมทั้งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้น



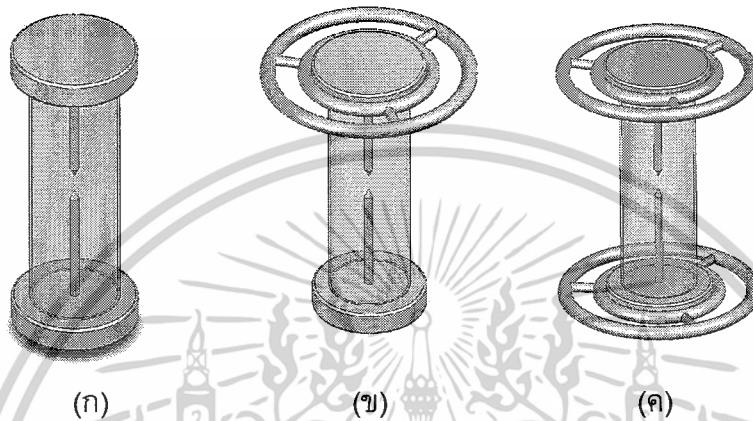
รูปที่ 3.3 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบ Steering ring

(ก) โคโรนาซีลด์ Steering ring

(ข) โคโรนาซีลด์ Steering ring ติดตั้งประกอบกับอิลีกโทรด

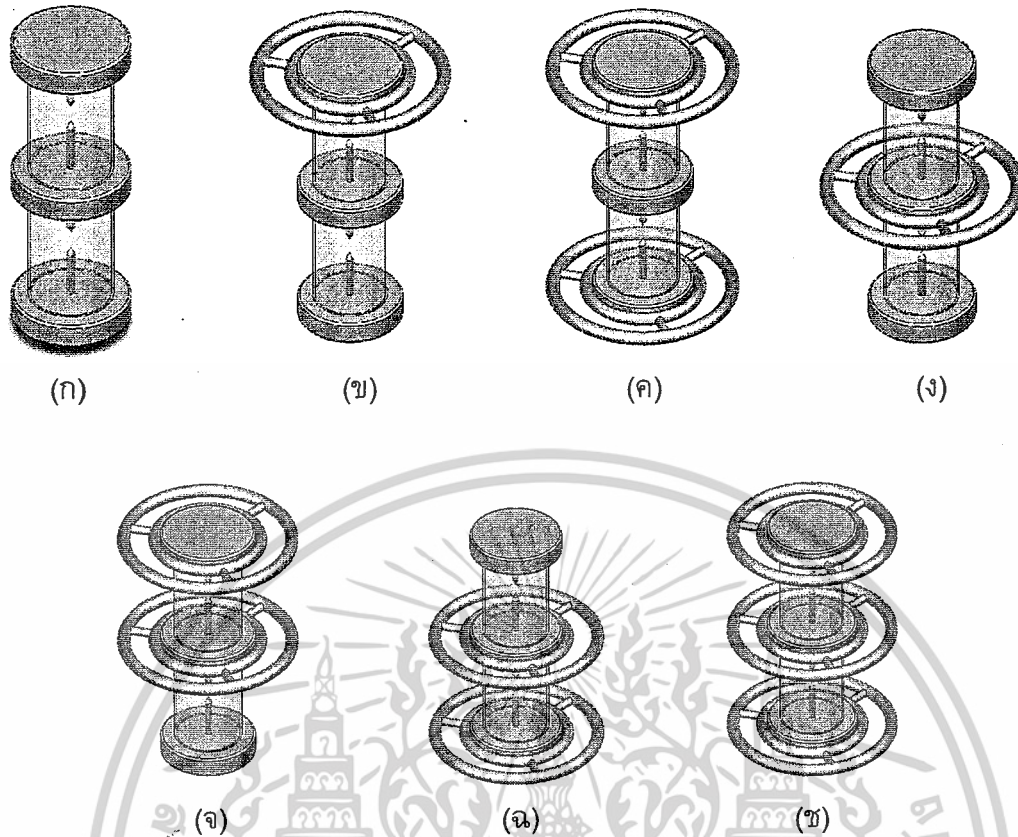
### 3.3 การออกแบบวัดทดสอบ

เนื่องจากต้องการทราบผลการทดลองของวัดทดสอบในหลายกรณี เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าวัดทดสอบแบบใด จะช่วยลดโคโรนาได้ดีกว่ากัน จึงได้ออกแบบรูปแบบของวัดทดสอบเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้



**รูปที่ 3.4** การออกแบบวัดทดสอบใช้ท่ออะคริลิกยาว 30 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm.

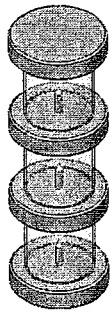
- (ก) แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)
- (ค) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสองชั้น (All Electrodes with Corona Shield)



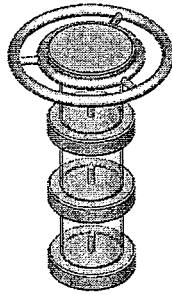
**รูปที่ 3.5** การออกแบบวัตถุทดสอบใช้ท่ออะคริลิก 2 ชั้น ยาวชั้นละ 15 cm.

เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm. ใช้อิเล็กโทรด 2 ชั้น กราวด์อิเล็กโทรด 1 ชั้น

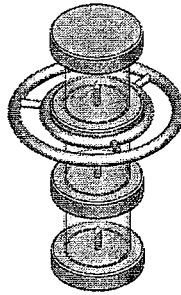
- (ก) แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน (Top Electrode with Corona Shield)
- (ค) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบนและกราวด์อิเล็กโทรด (Top and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ง) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง (Middle Electrode with Corona Shield)
- (จ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลางและกราวด์อิเล็กโทรด (Middle and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ฉ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นแรกและชั้นที่สอง (All Electrodes with Corona Shield)
- (ช) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสามชั้น (All Electrodes with Corona Shield)



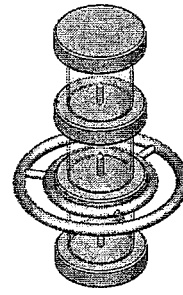
(ก)



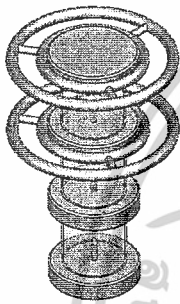
(ข)



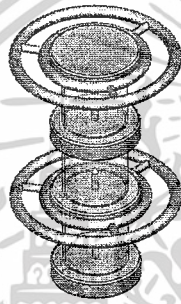
(ค)



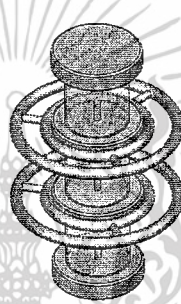
(ง)



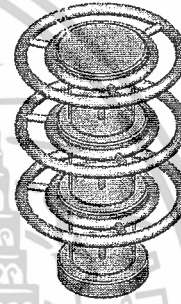
(จ)



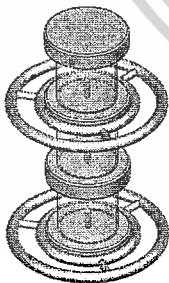
(ฉ)



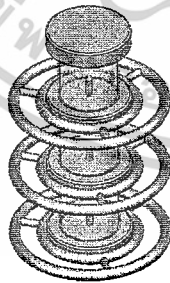
(ช)



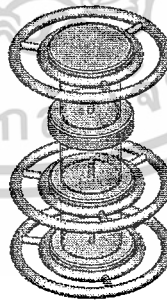
(ซ)



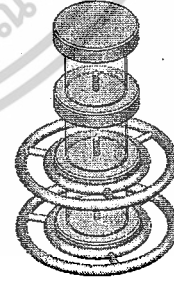
(ฌ)



(ญ)

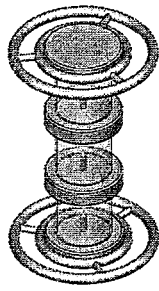


(ฎ)

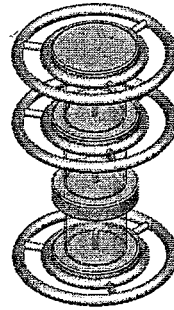


(ฏ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)



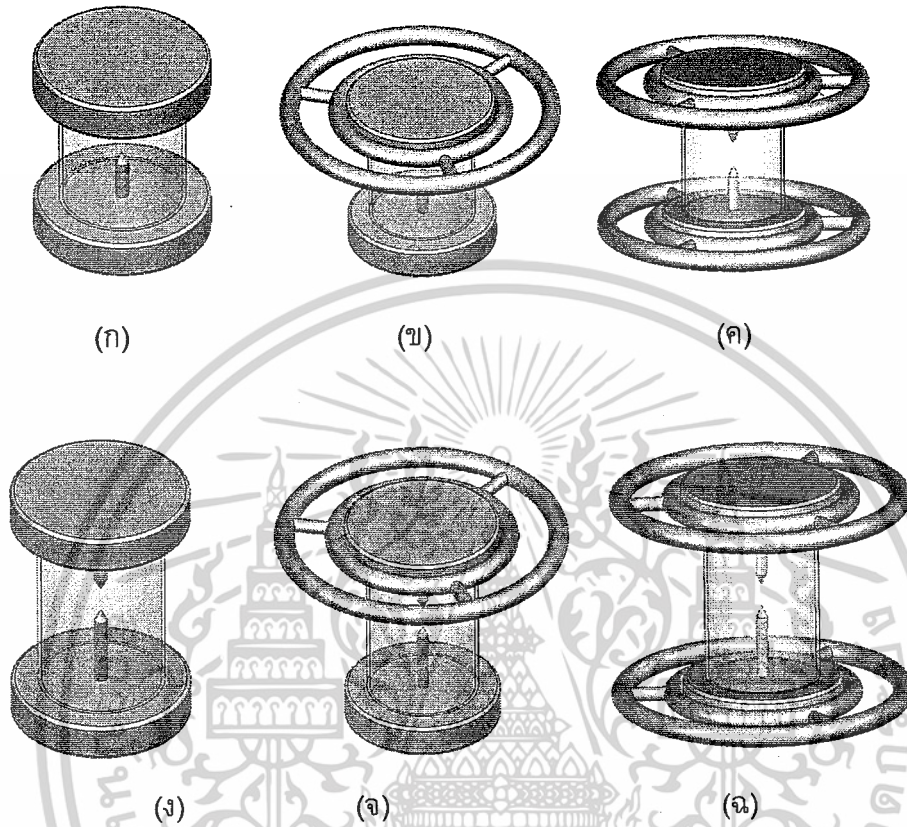
(จ)

**รูปที่ 3.6** การออกแบบวัตถุทดสอบใช้ท่ออะคริลิก 3 ชั้น ยาวชั้นละ 10 cm.

เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm. ใช้อิเล็กโทรด 3 ชั้น กราวด์อิเล็กโทรด 1 ชั้น

- (ก) แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน (Top Electrode with Corona Shield)
- (ค) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง  
(Middle Electrode with Corona Shield)
- (ง) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นล่าง  
(Lower Electrode with Corona Shield)
- (จ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบนและชั้นกลาง  
(Top and Middle Electrodes with Corona Shield)
- (ฉ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบนและชั้นล่าง  
(Top and Lower Electrodes with Corona Shield)
- (ช) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลางและชั้นล่าง  
(Middle and Lower Electrodes with Corona Shield)
- (ซ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสามชั้น (All Electrodes with Corona Shield)
- (ฌ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลางและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Middle and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ญ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลางชั้นล่างและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Middle, Lower and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ฎ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบนชั้นล่างและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Top, Lower and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ฏ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นล่างและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Lower and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ฐ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบนและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Top and Ground Electrodes with Corona Shield)
- (ฑ) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลางและกราวด์อิเล็กโทรด  
(Top, Middle and Ground Electrodes with Corona Shield)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.7** การออกแบบขั้วทดสอบใช้ท่ออะคริลิกที่มีความสูงของท่อต่างกันโดยมีช่องว่างระหว่างแท่งปลายแหลม 2 cm. เท่ากัน

- (ก) ท่อขนาด 10 cm. แบบไม่มีโคโรนาชิลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) ท่อขนาด 10 cm. แบบมีโคโรนาชิลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)
- (ค) ท่อขนาด 10 cm. แบบมีโคโรนาชิลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสองชั้น (All Electrodes with Corona Shield)
- (ง) ท่อขนาด 15 cm. แบบไม่มีโคโรนาชิลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (จ) ท่อขนาด 15 cm. แบบมีโคโรนาชิลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)
- (ฉ) ท่อขนาด 15 cm. แบบมีโคโรนาชิลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสองชั้น (All Electrodes with Corona Shield)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

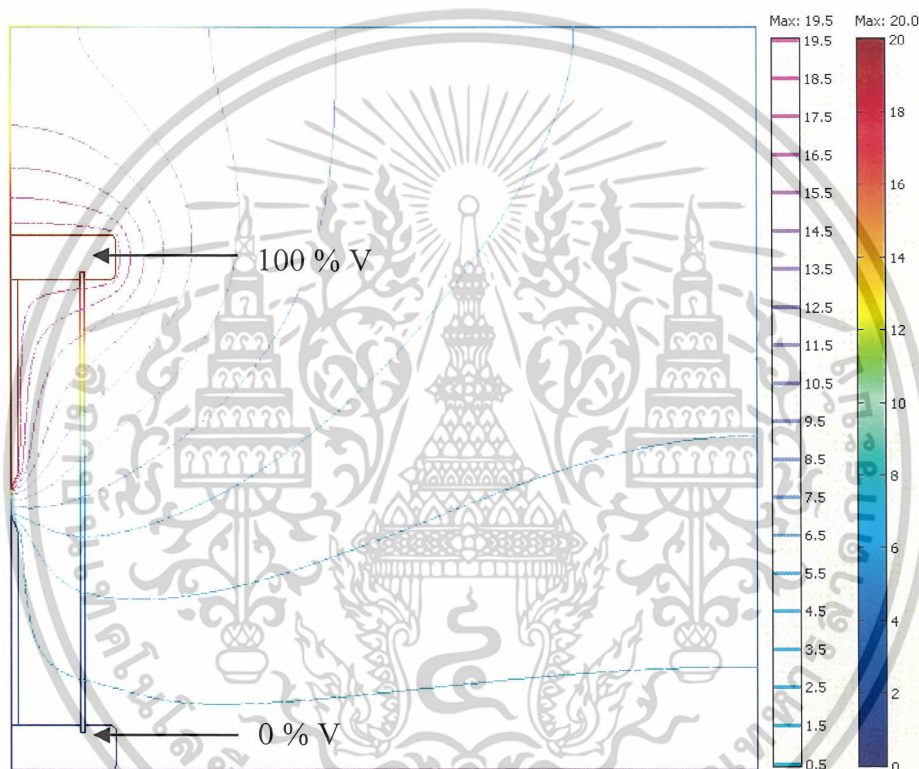
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์

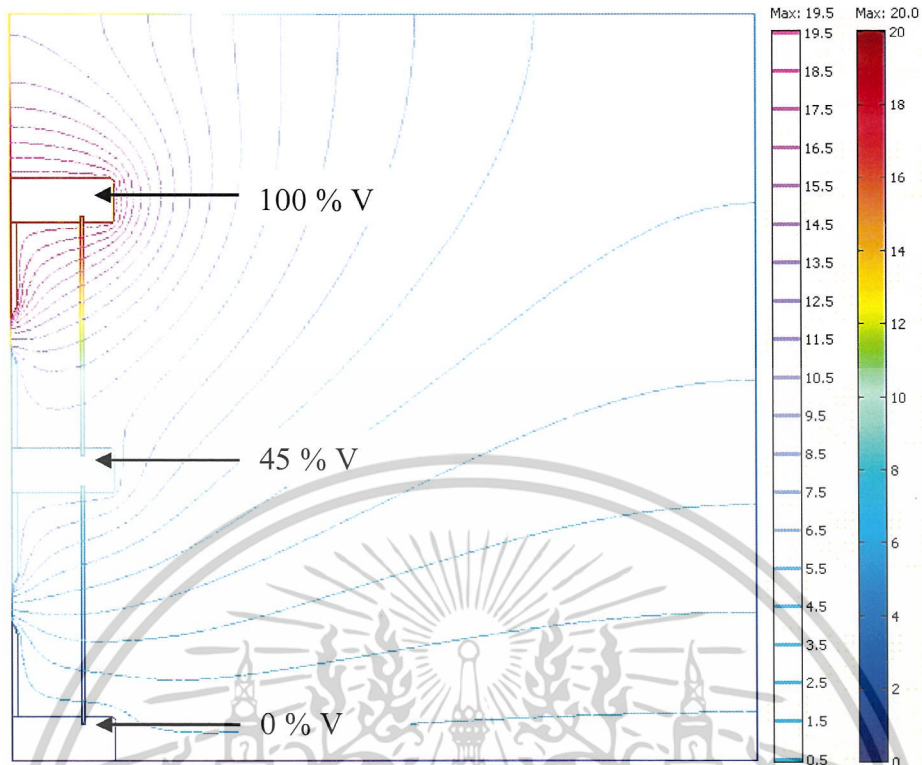
##### การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก

การจำลองการกระจายของเส้นสมศักย์บนวัตถุทดสอบทรงกระบอก ซึ่งประกอบด้วย ท่อ 1 ชั้น , ท่อ 2 ชั้น , ท่อ 3 ชั้น ตามลำดับ

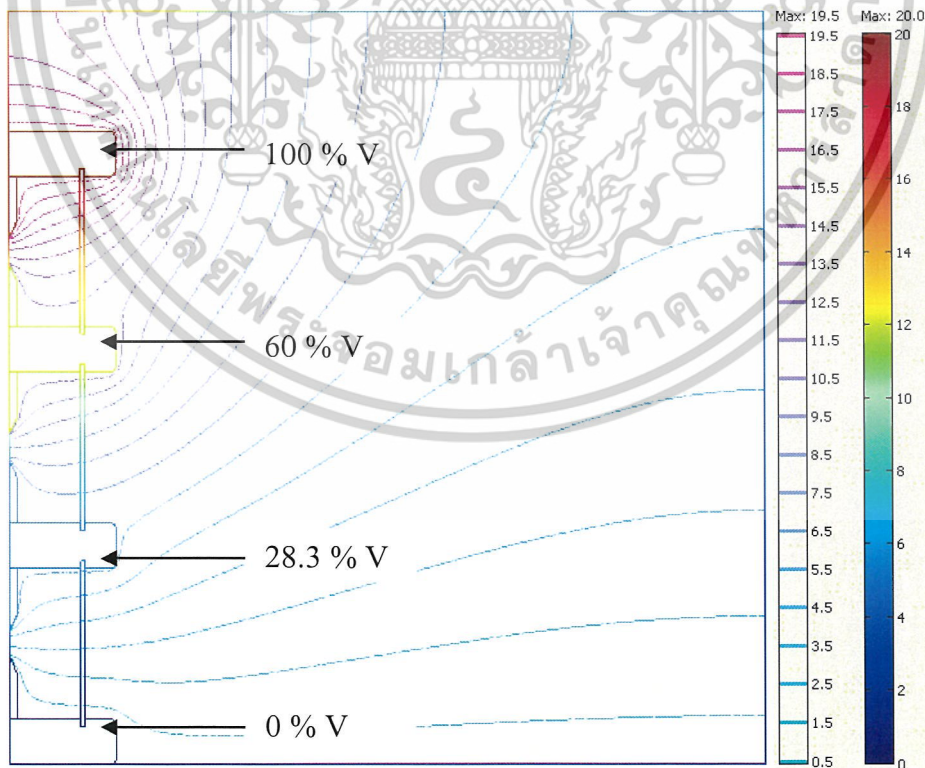


รูปที่ 4.1 ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์บนวัตถุทรงกระบอก 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์บนวัตถุทรงกระบอก 2 ชั้น

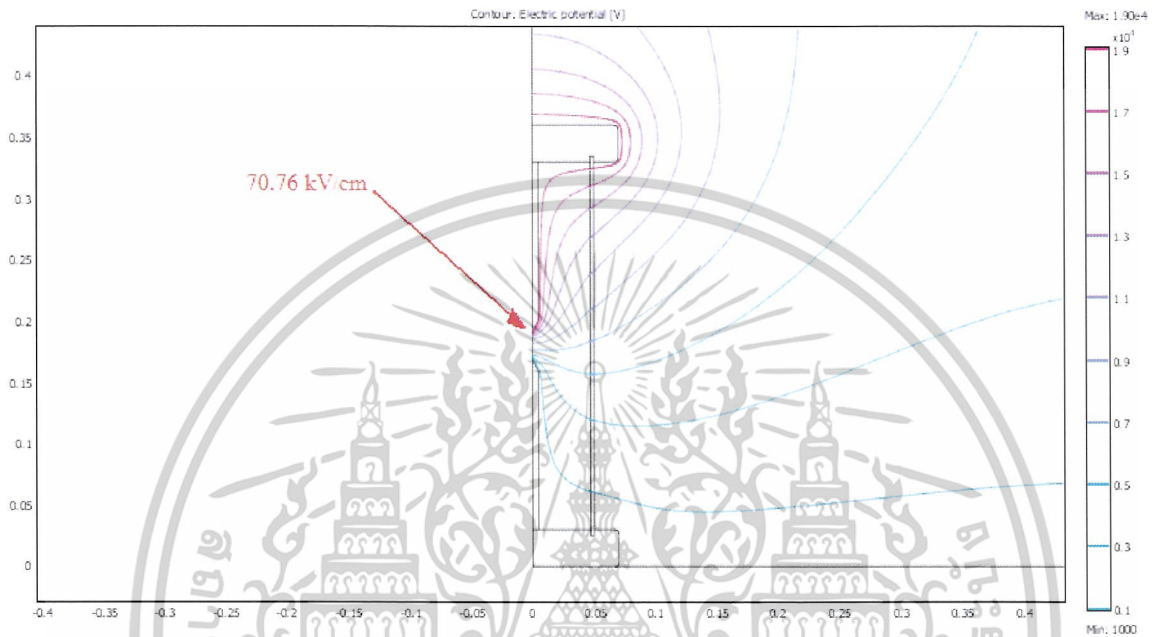


รูปที่ 4.3 ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์บนวัตถุทรงกระบอก 3 ชั้น

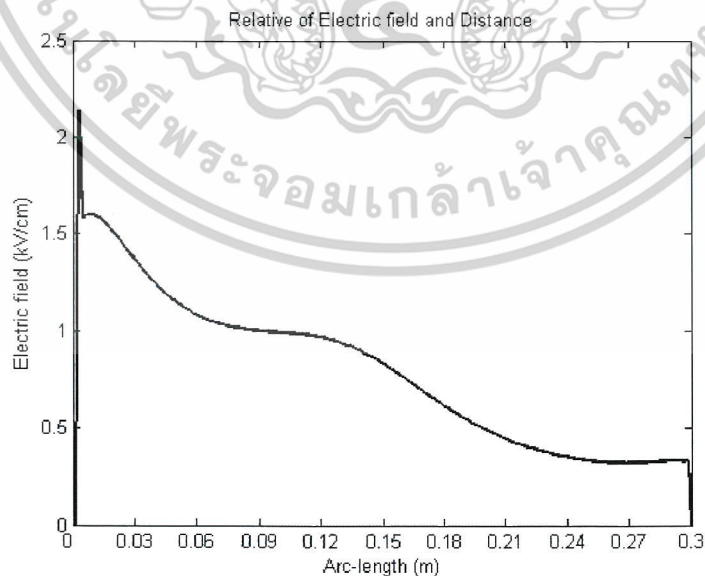
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 70.76 kV/cm     |
| 3. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield



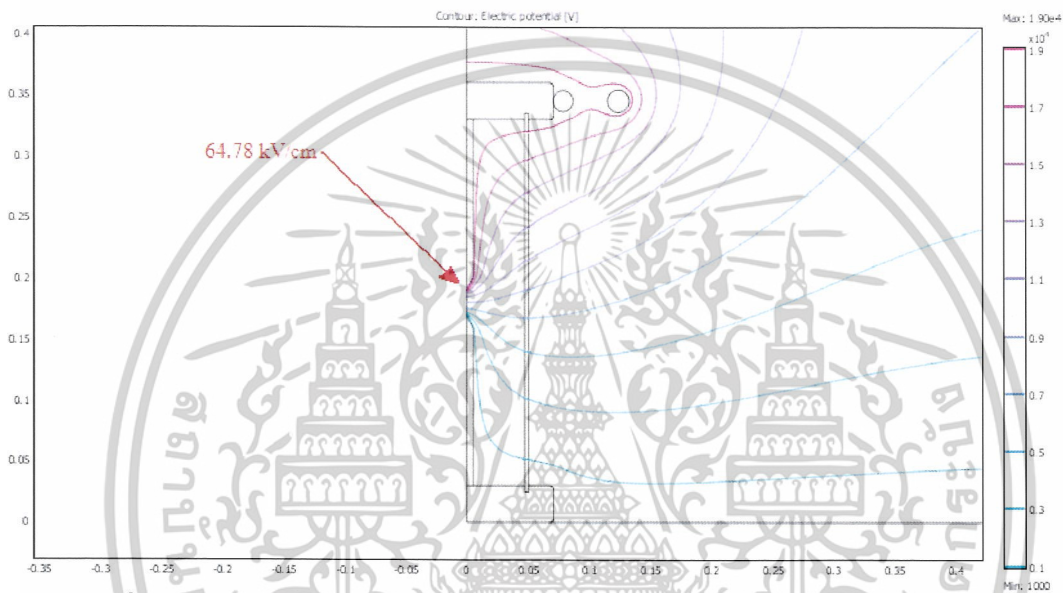
รูปที่ 4.5 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี

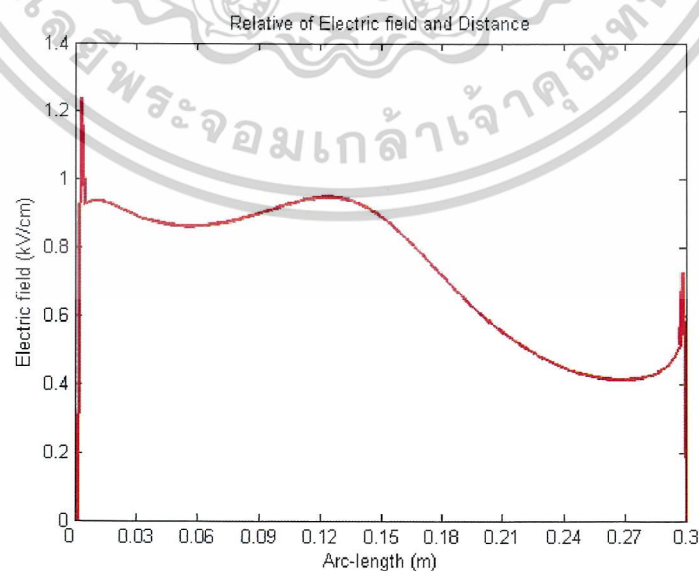
##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 64.78 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี

##### Corona Shield แบบ Steering ring



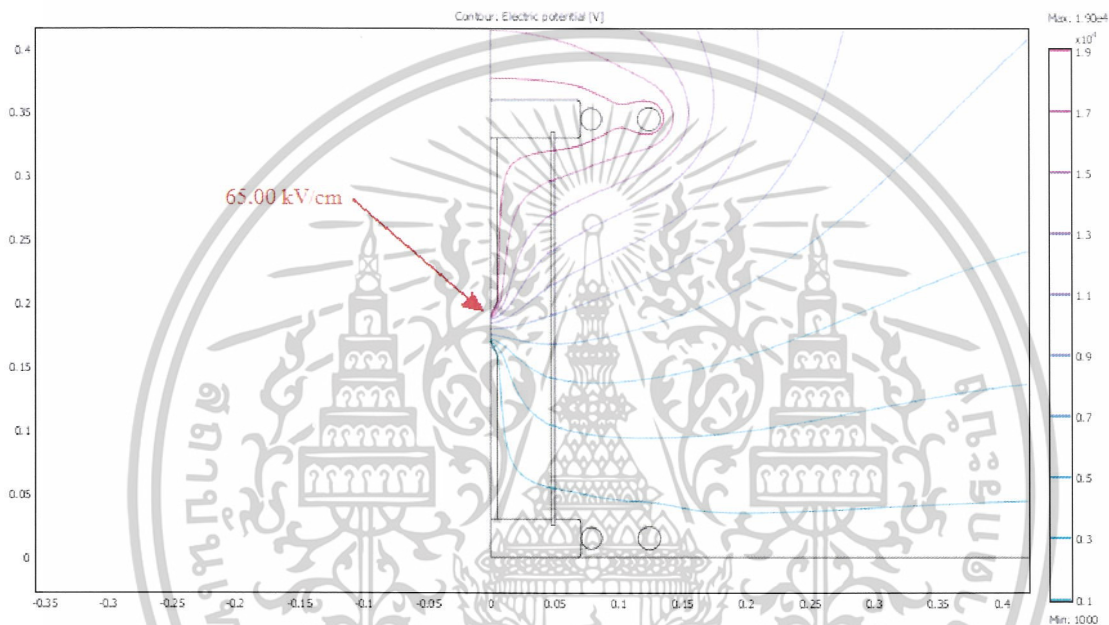
รูปที่ 4.7 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

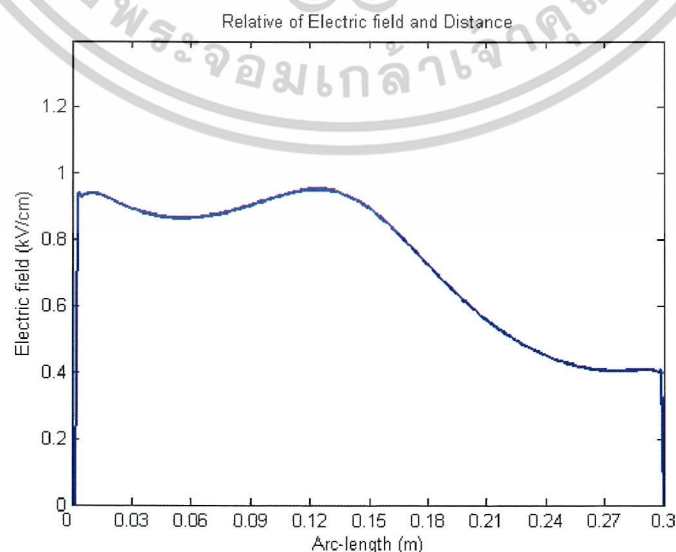
### 4.1.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 65.00 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 1 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน – กราวด์

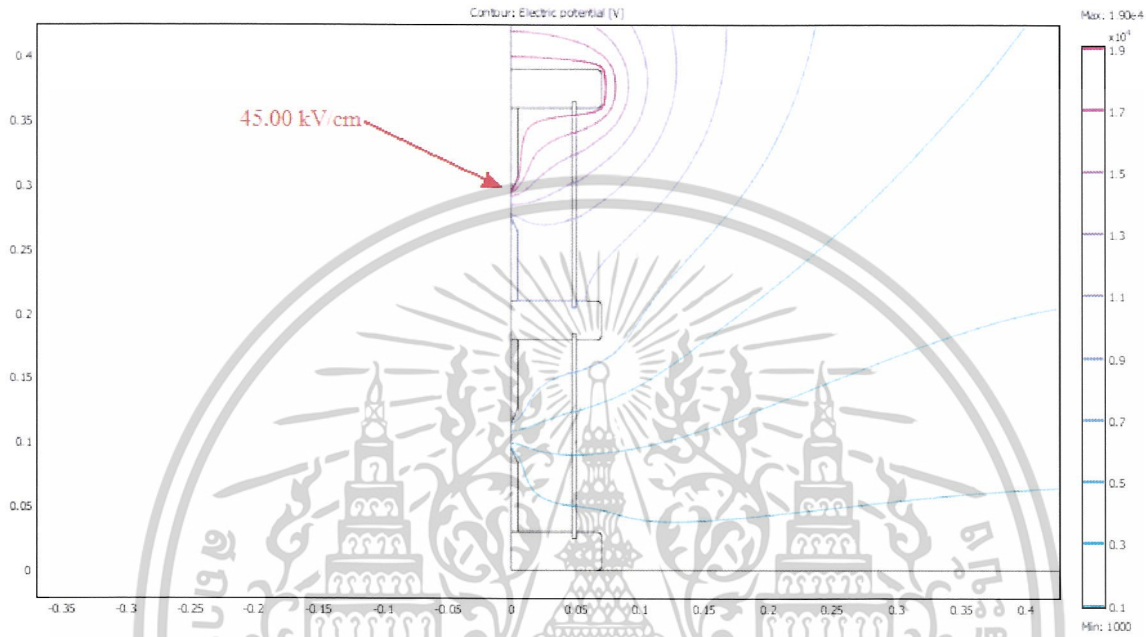


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.9 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ เพื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

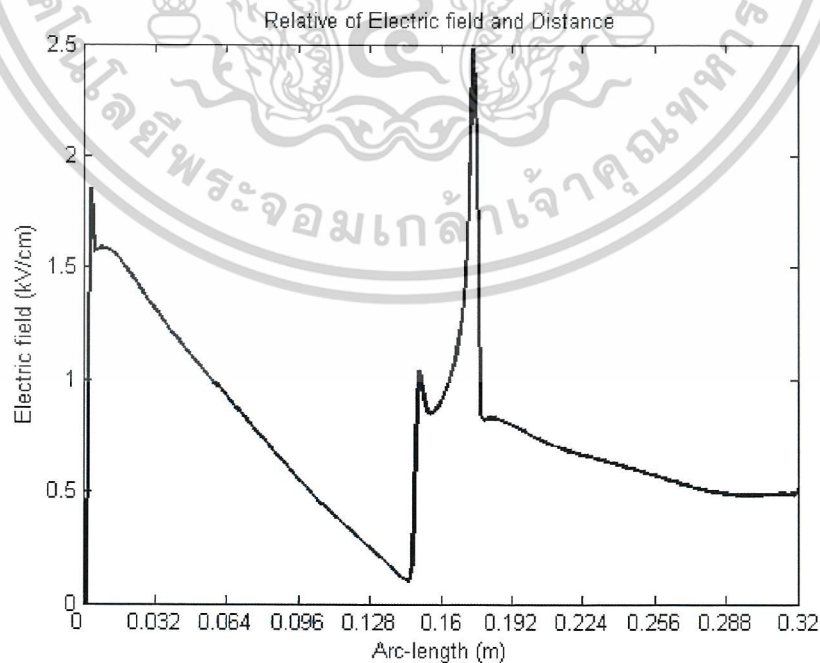
#### 4.1.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 45.00 kV/cm     |
| 3. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield



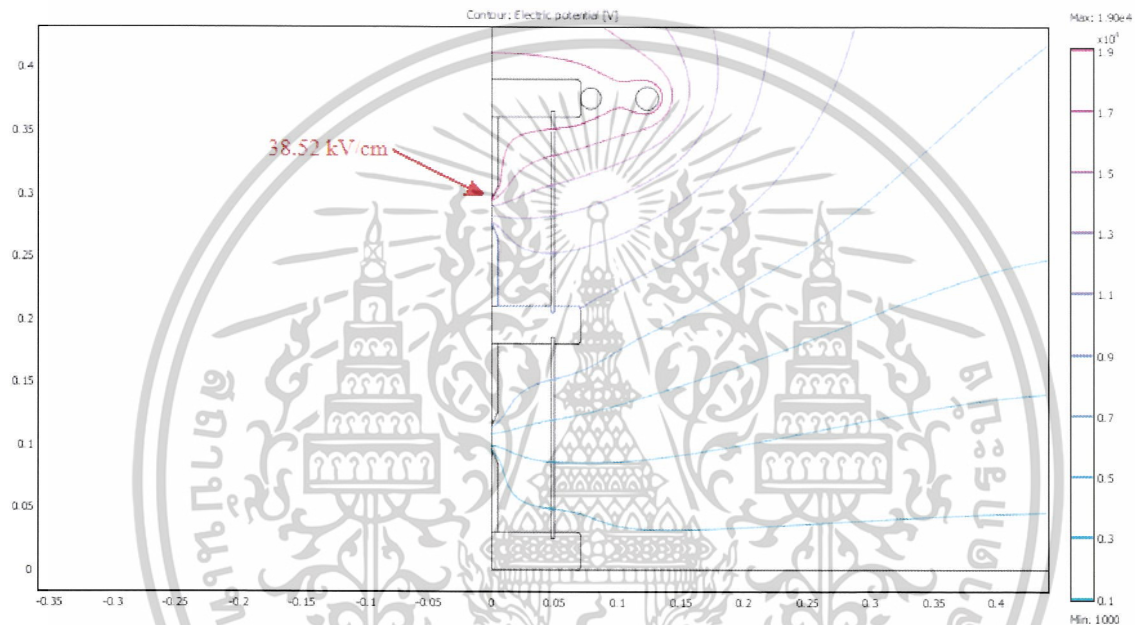
รูปที่ 4.11 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

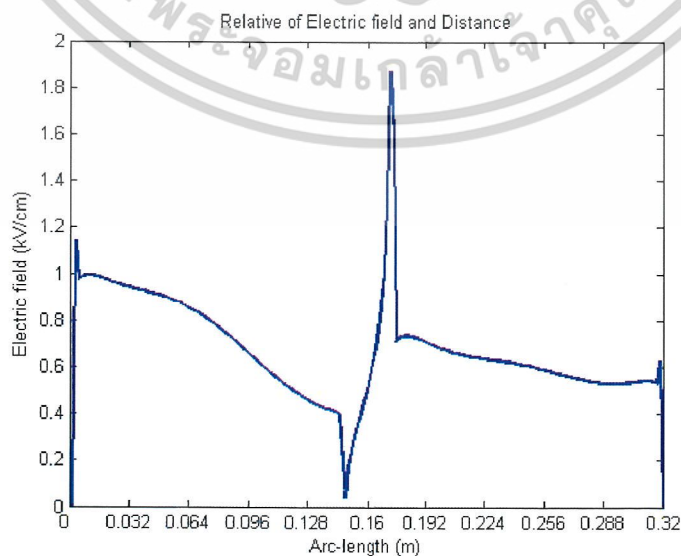
#### 4.1.5 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 38.52 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

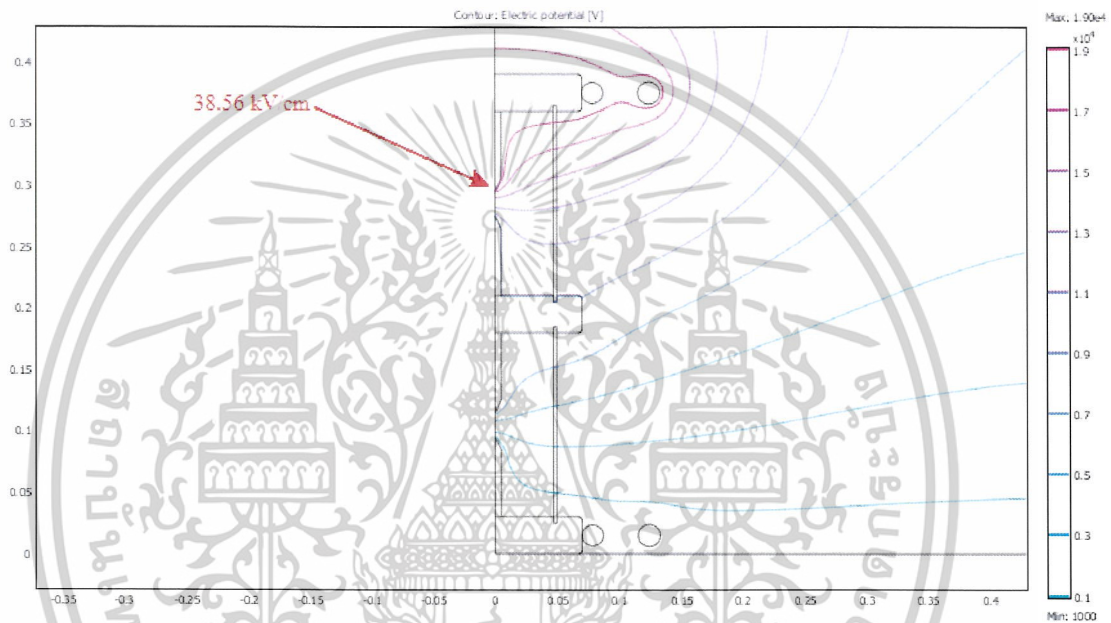


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.13 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

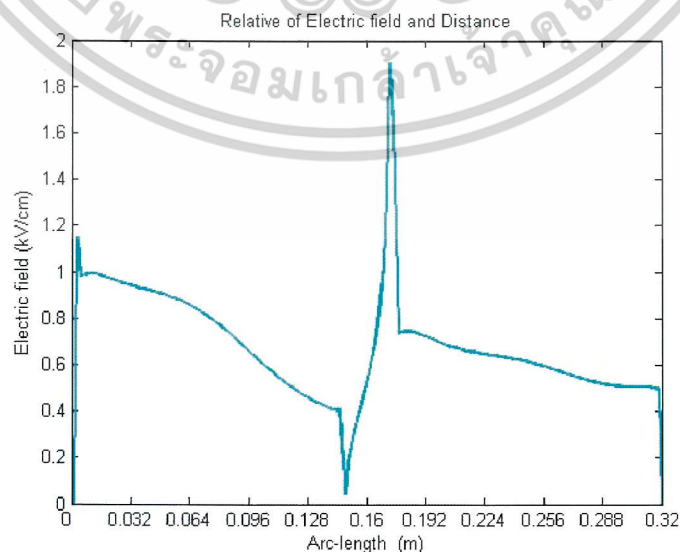
#### 4.1.6 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 38.56 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน – กราวด์



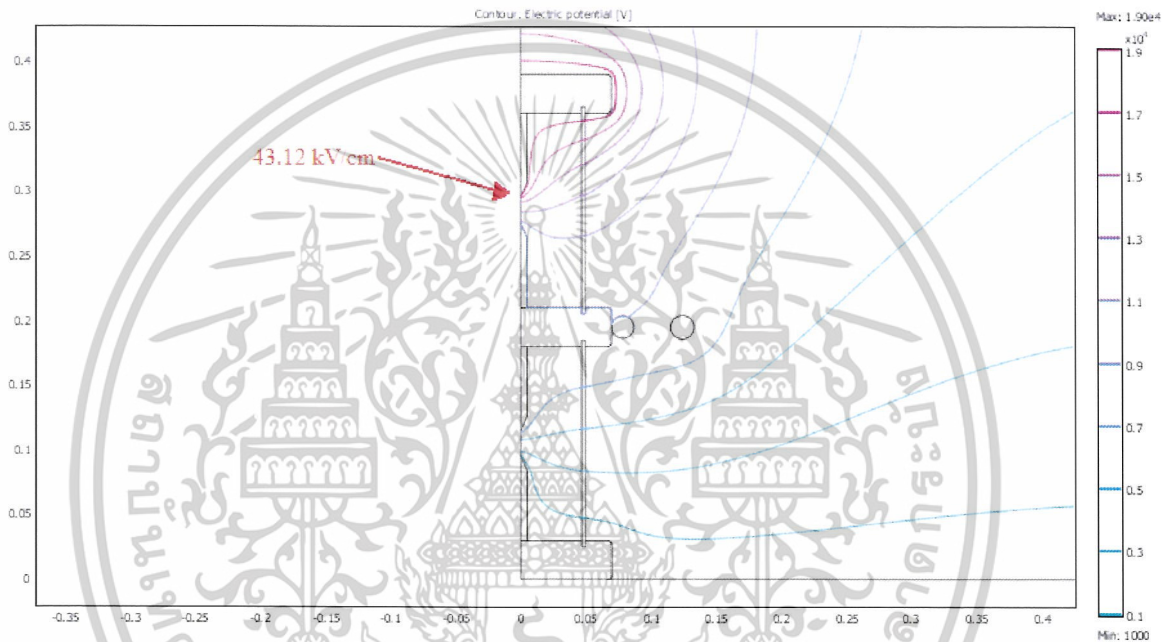
รูปที่ 4.15 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

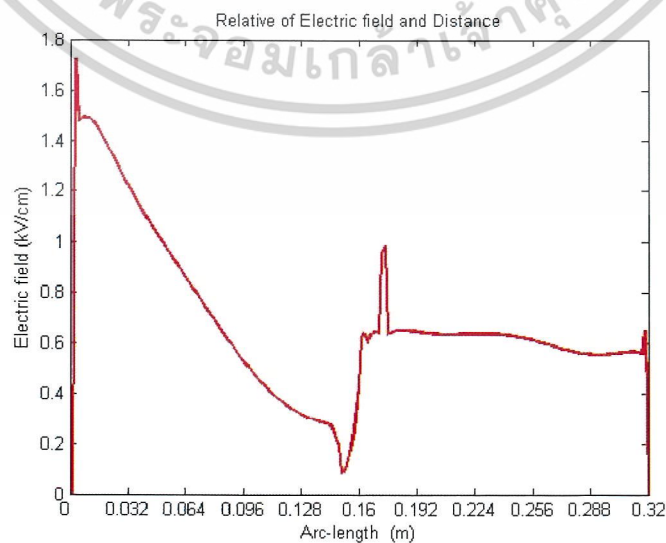
#### 4.1.7 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 43.12 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง

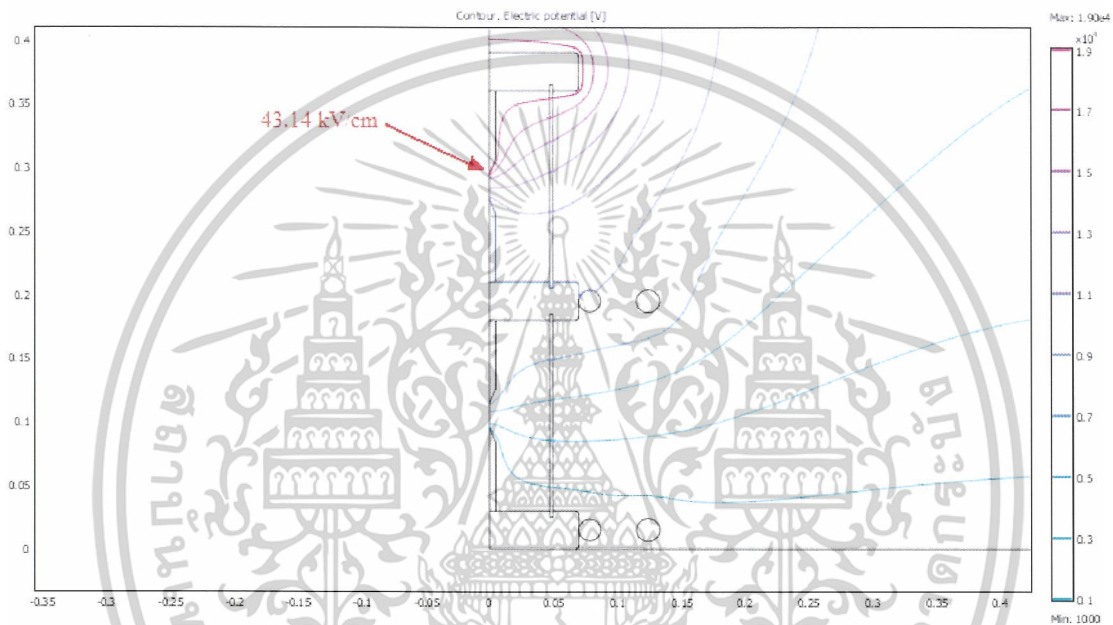


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.17 กรอฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

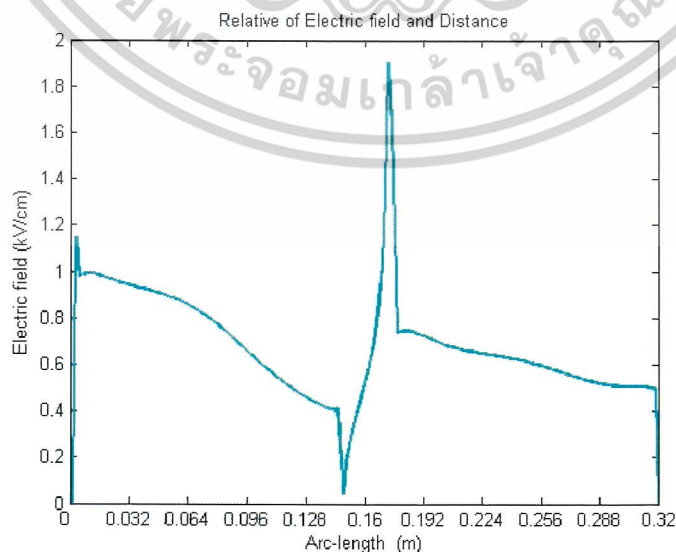
#### 4.1.8 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 43.14 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์



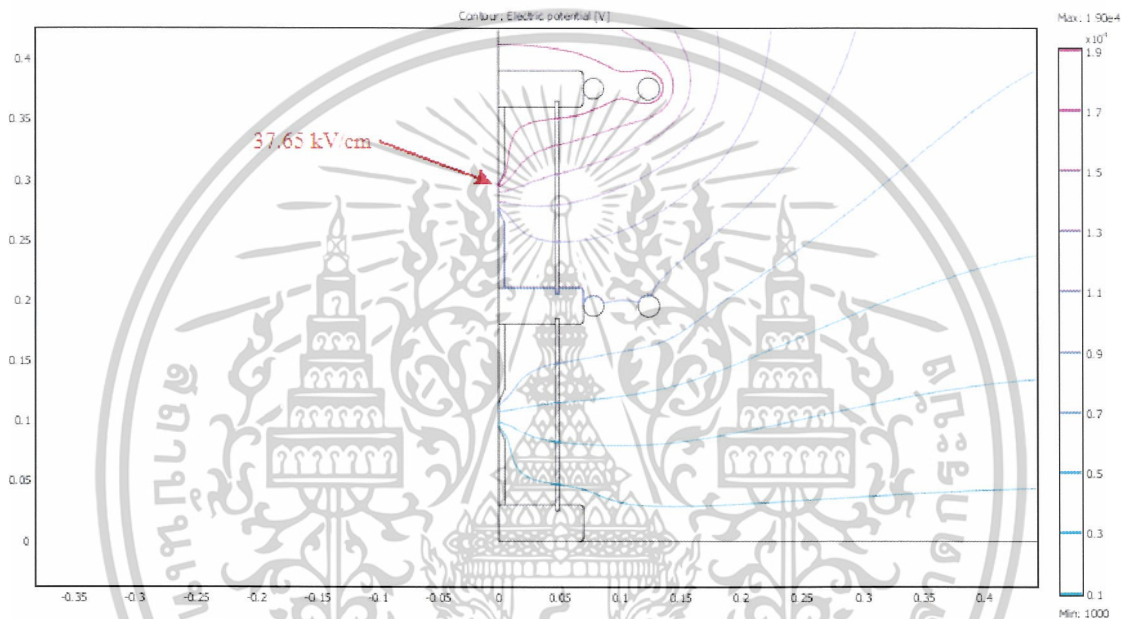
รูปที่ 4.19 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

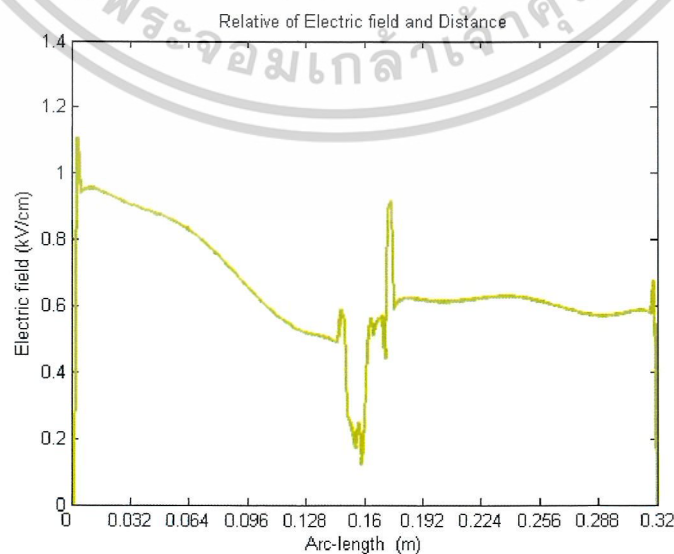
#### 4.1.9 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - กลาง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 37.65 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



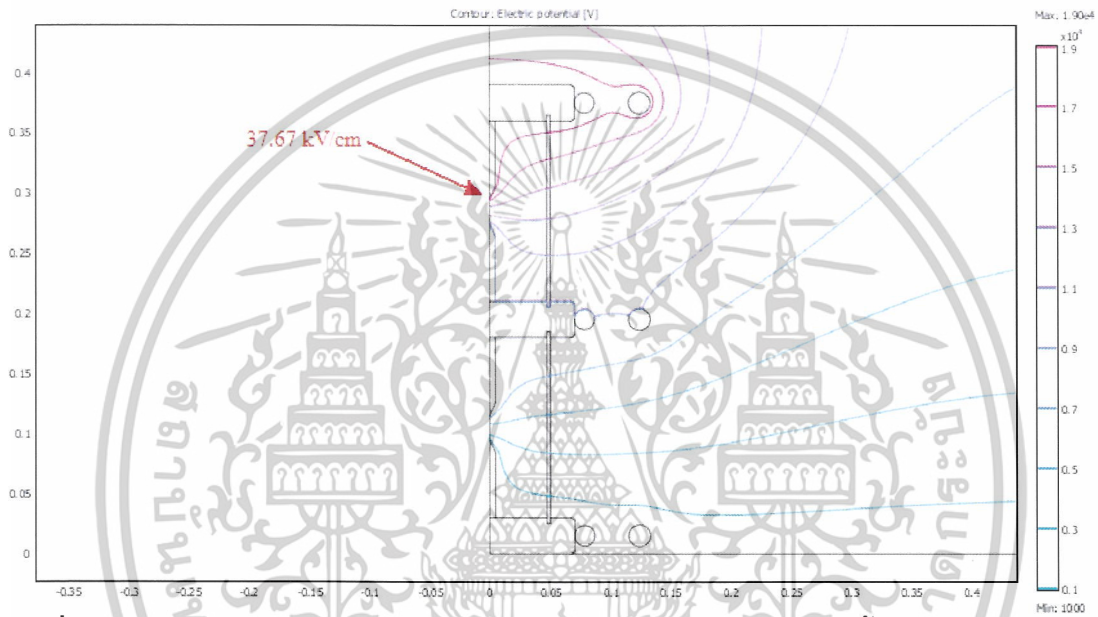
รูปที่ 4.20 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน - กลาง



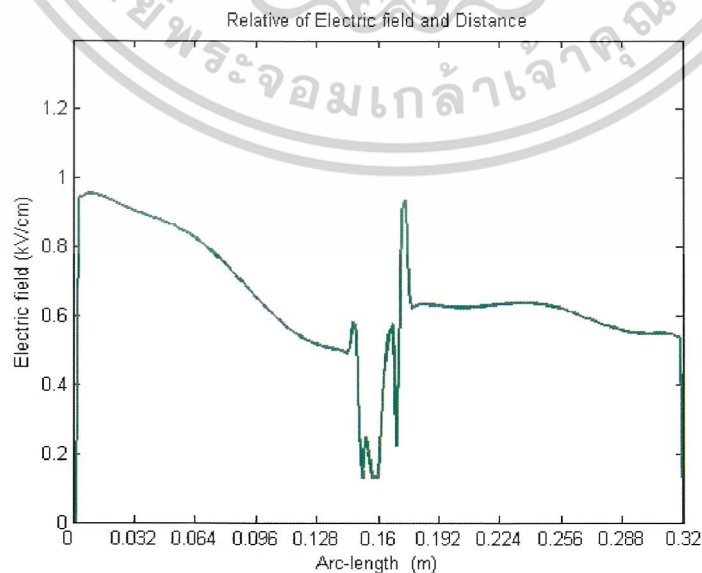
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.21 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.10 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 37.67 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน – กลาง – กราวด์

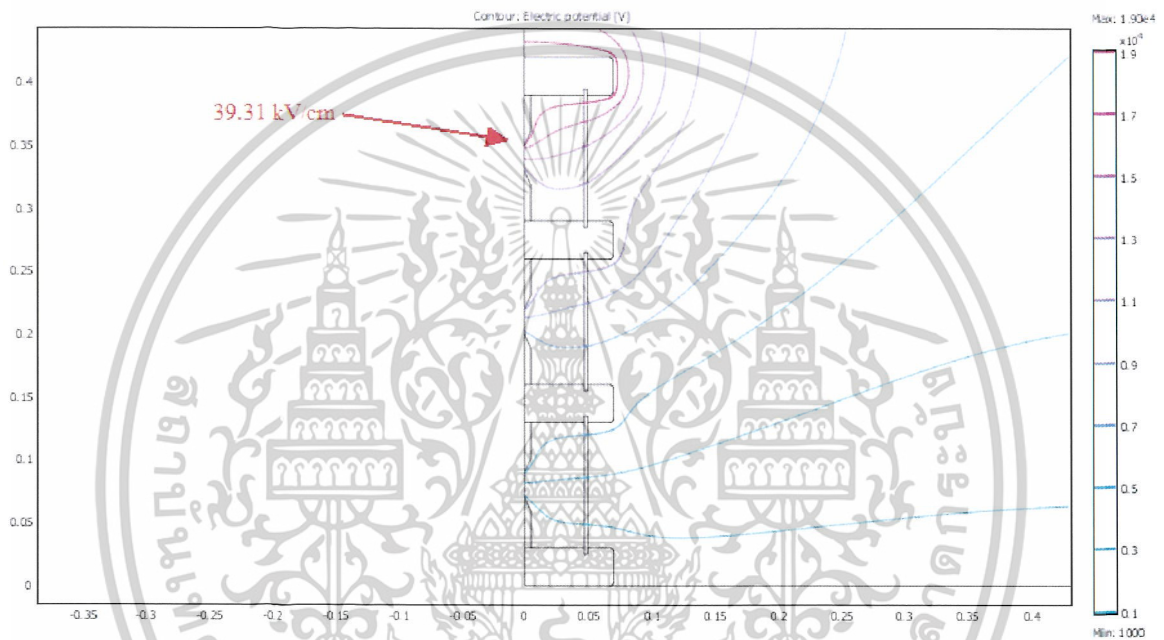


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.23 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

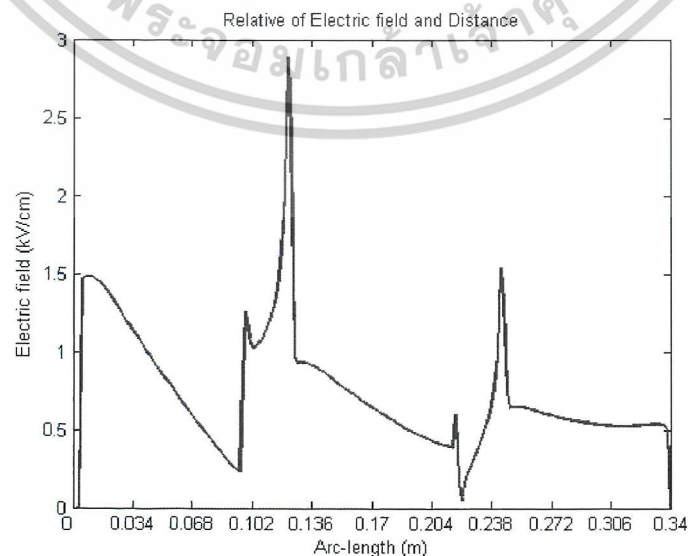
#### 4.1.11 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm ไม่มี Corona Shield

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาซีลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาซีลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาซีลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 29.31 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

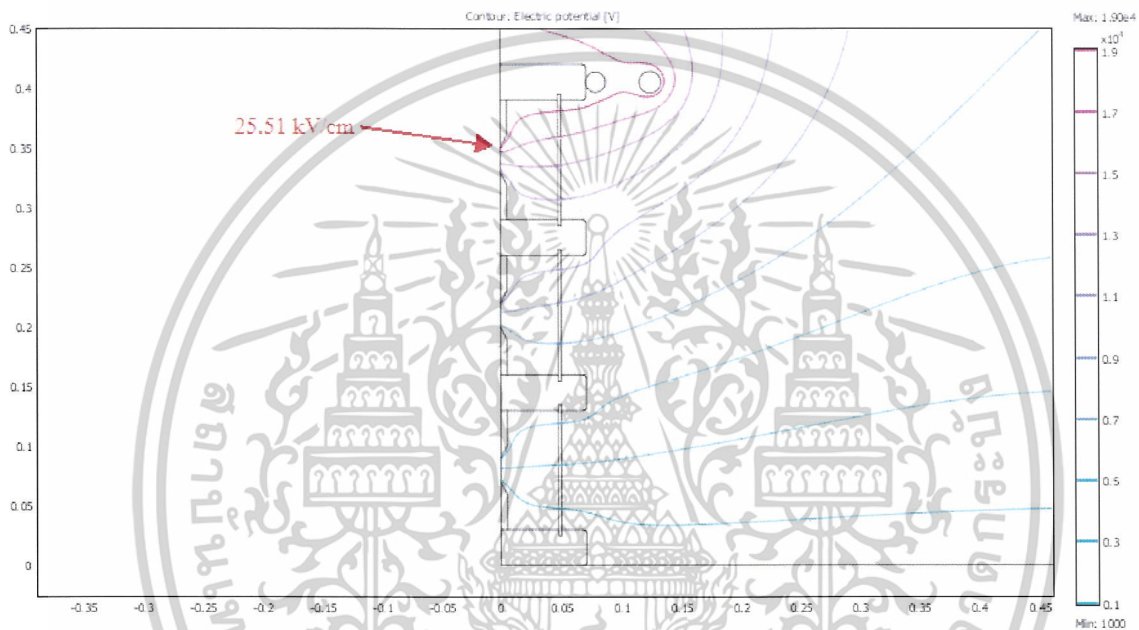


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.25 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ ไม่ควรนำภาพไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

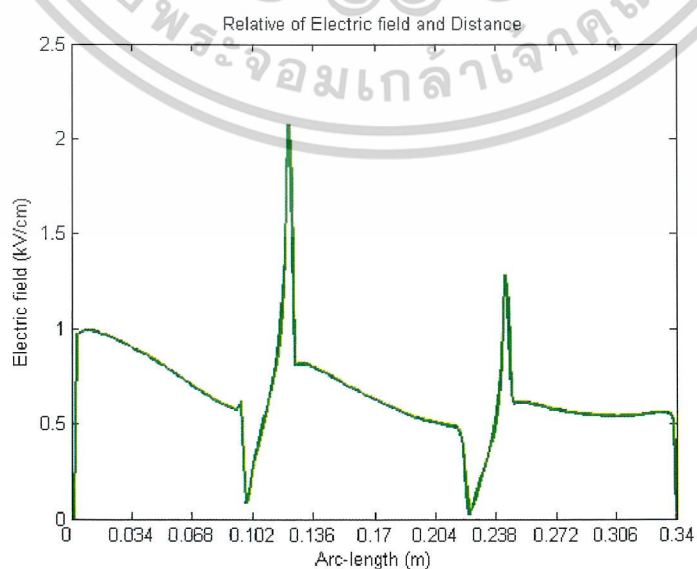
#### 4.1.12 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 25.51 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

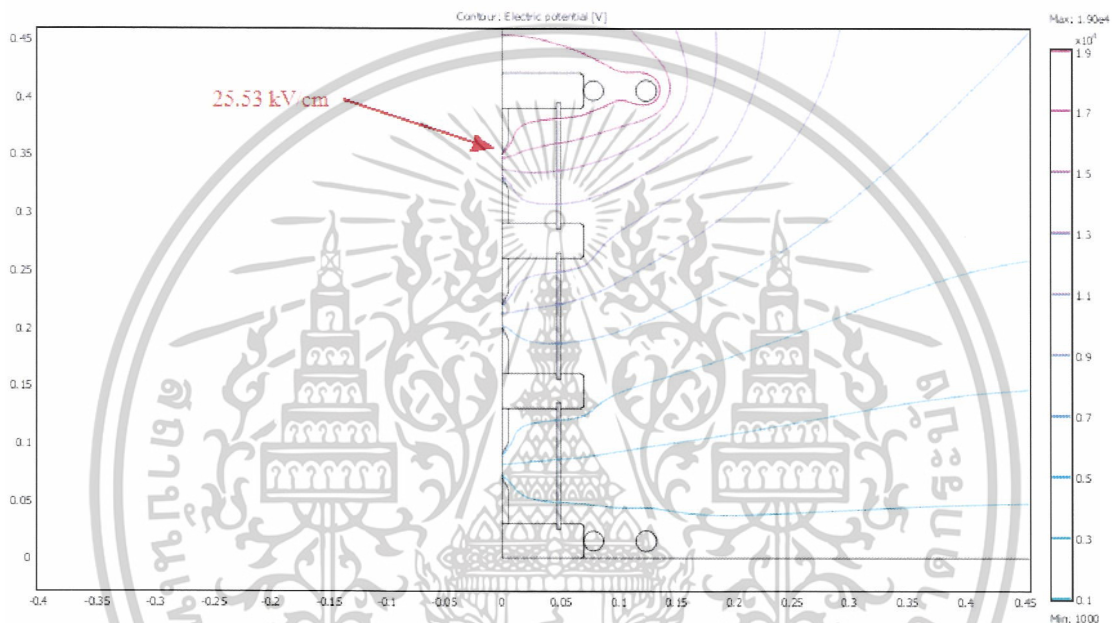


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.27 กราฟพลสนามไฟฟ้าตามผิวท่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

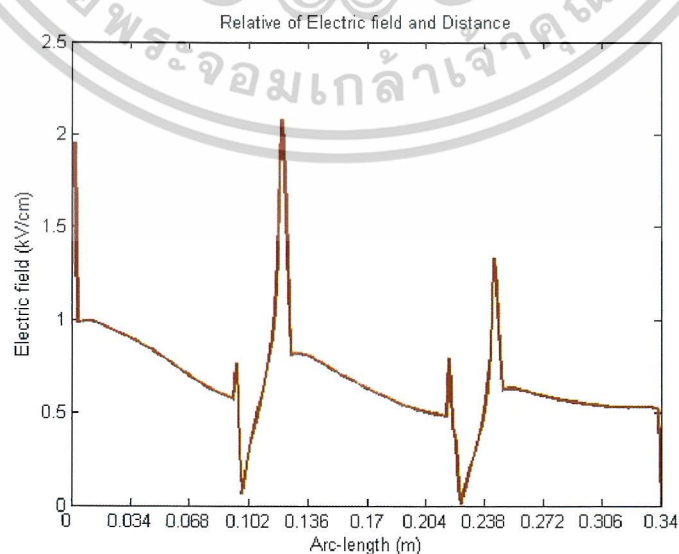
#### 4.1.13 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 25.53 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.28 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน – กราวด์



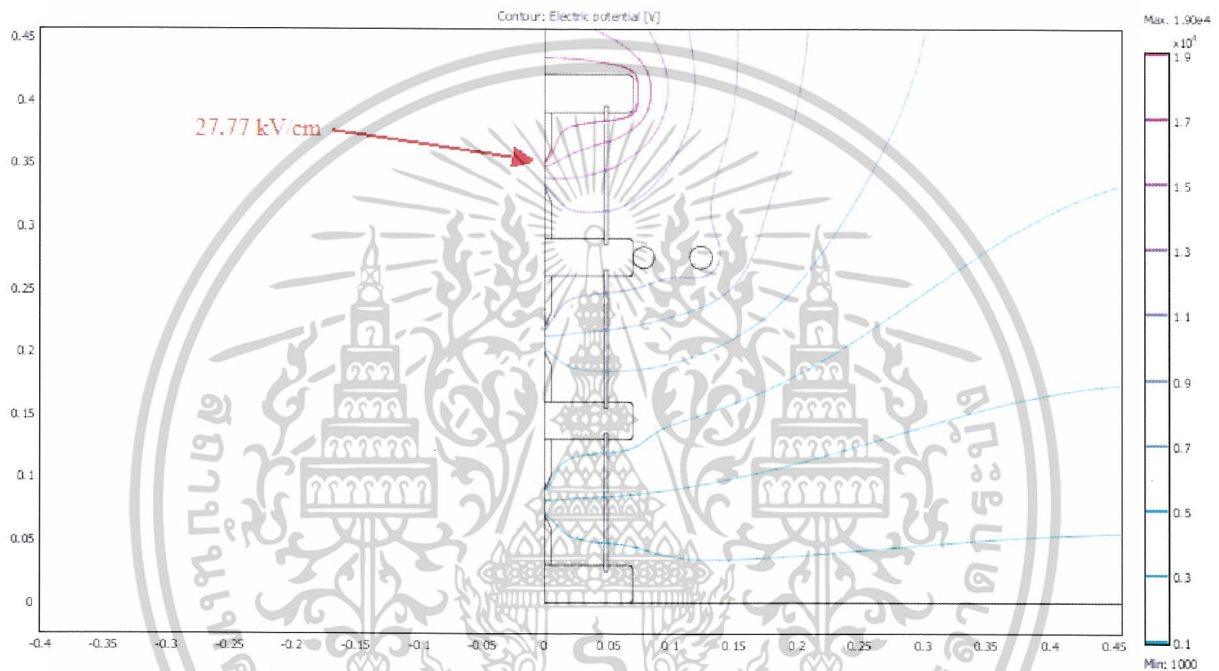
รูปที่ 4.29 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

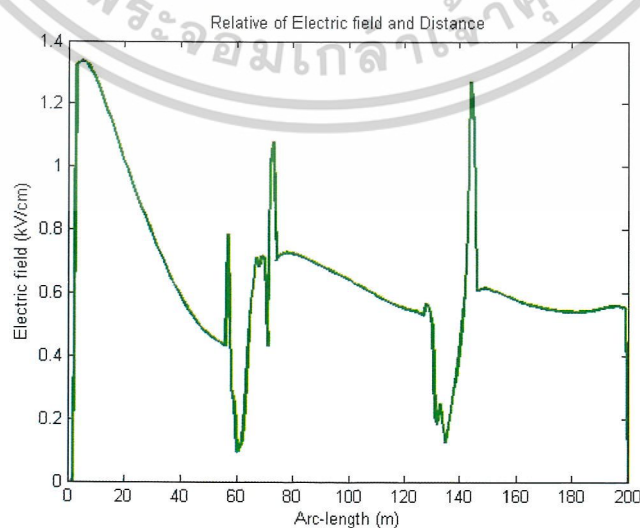
#### 4.1.14 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 27.77 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.30 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง



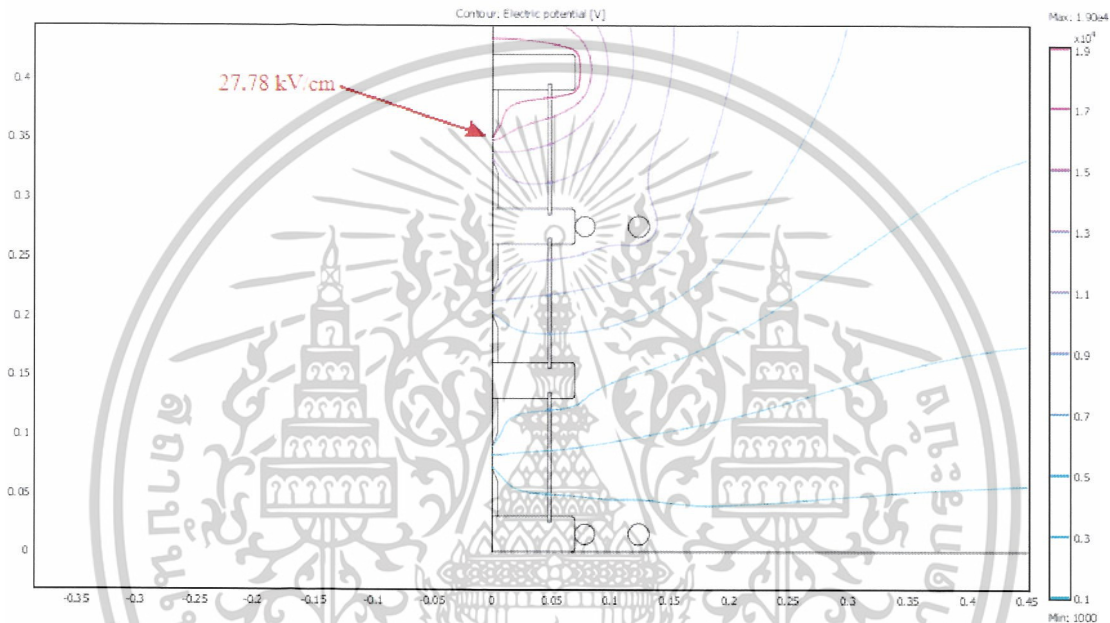
รูปที่ 4.31 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

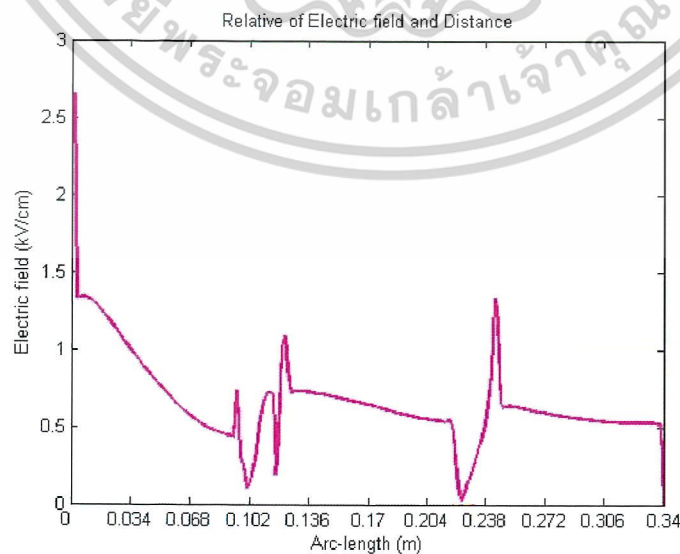
#### 4.1.15 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 27.78 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.32 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – กราวด์



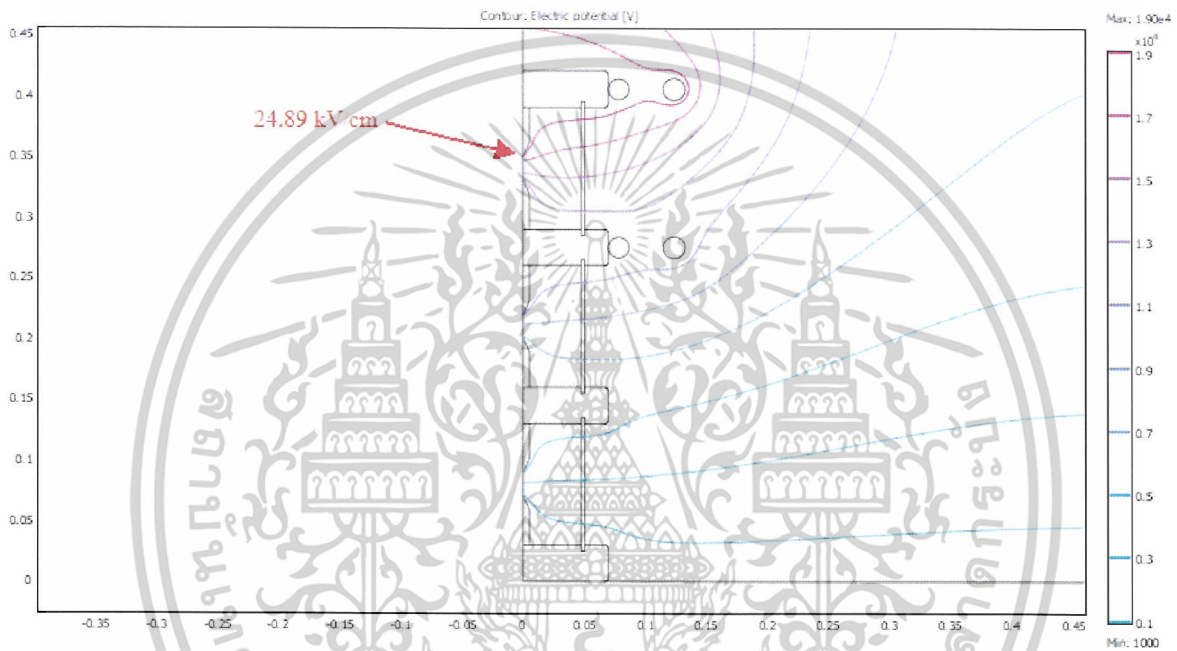
รูปที่ 4.33 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

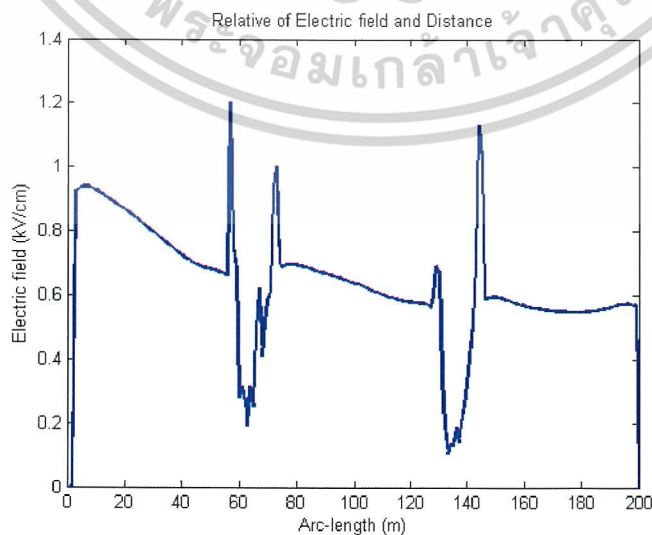
#### 4.1.16 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - กลาง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 24.89 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



รูปที่ 4.34 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน - กลาง



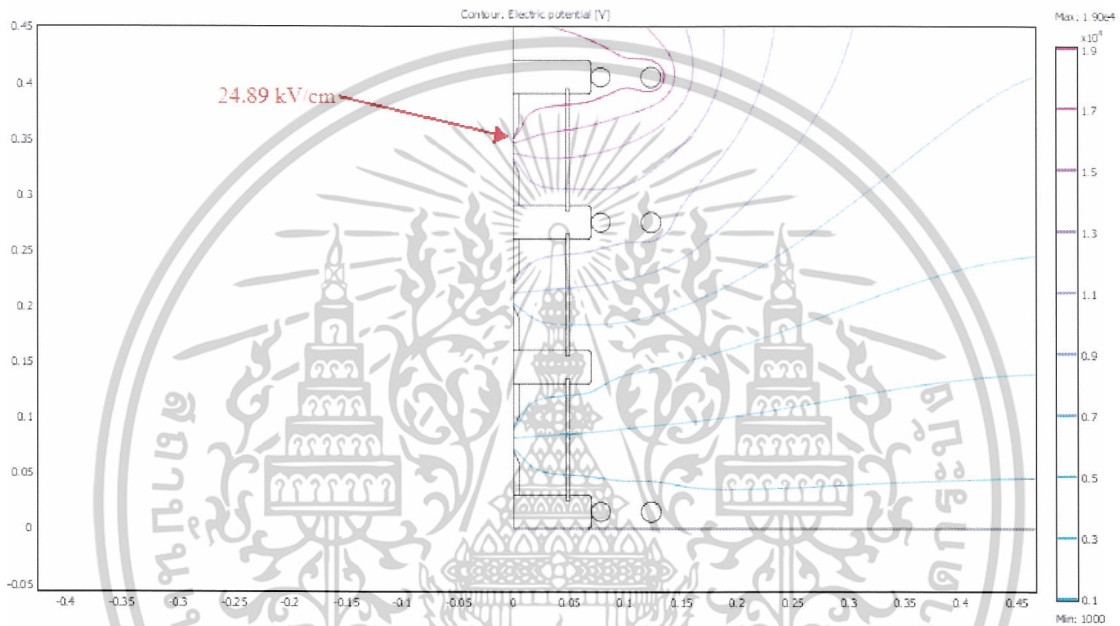
รูปที่ 4.35 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

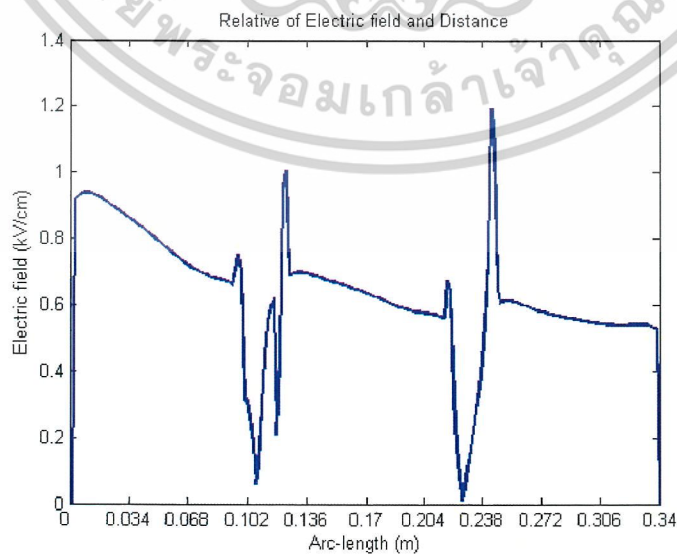
#### 4.1.17 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - กลาง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 24.89 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.36 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน - กลาง - กราวด์



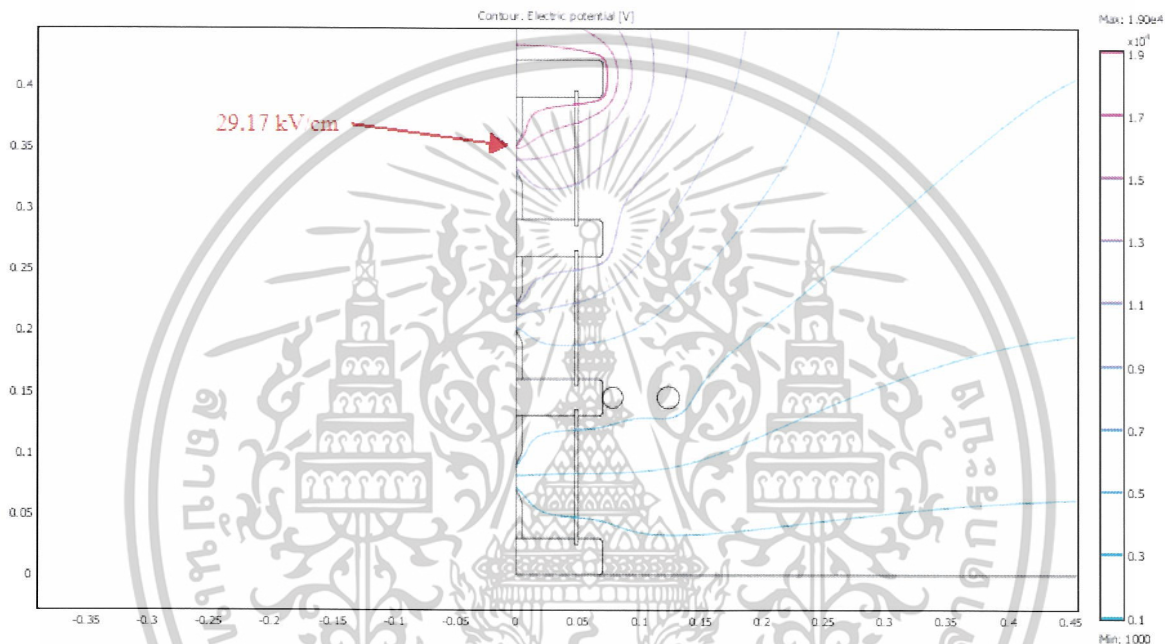
รูปที่ 4.37 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

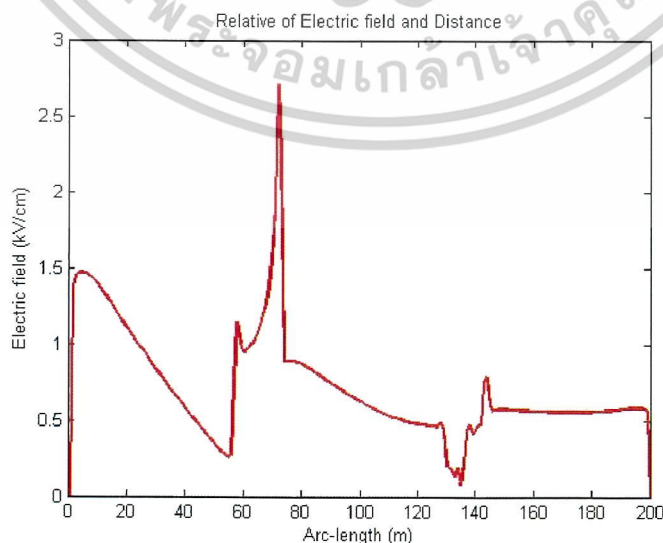
#### 4.1.18 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield ล่าง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 29.17 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.38 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง



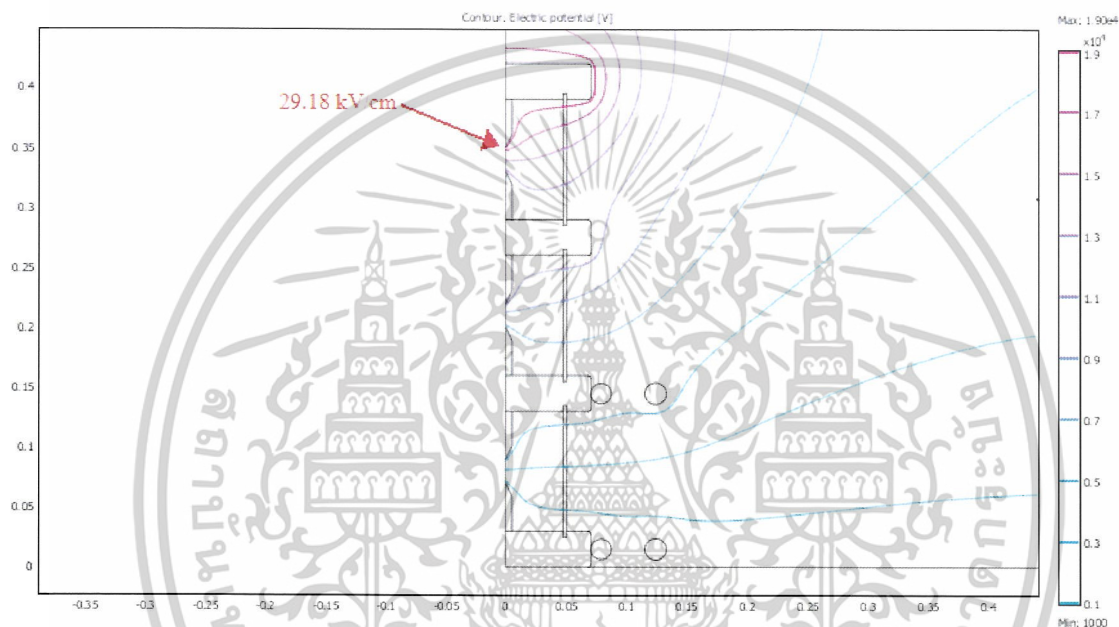
รูปที่ 4.39 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

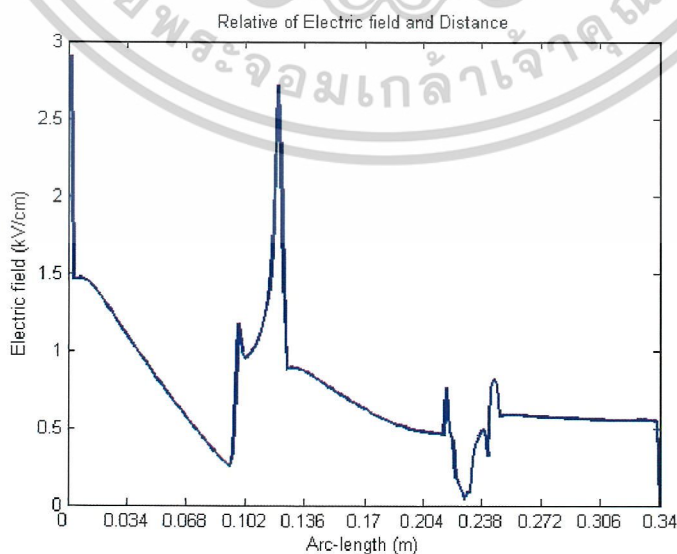
#### 4.1.19 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield ล่าง – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โคโรนาชิลด์                              | Steering ring   |
| 2. รัศมี โคโรนาชิลด์                        | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโคโรนาชิลด์                 | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 29.18 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



รูปที่ 4.40 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง – กราวด์



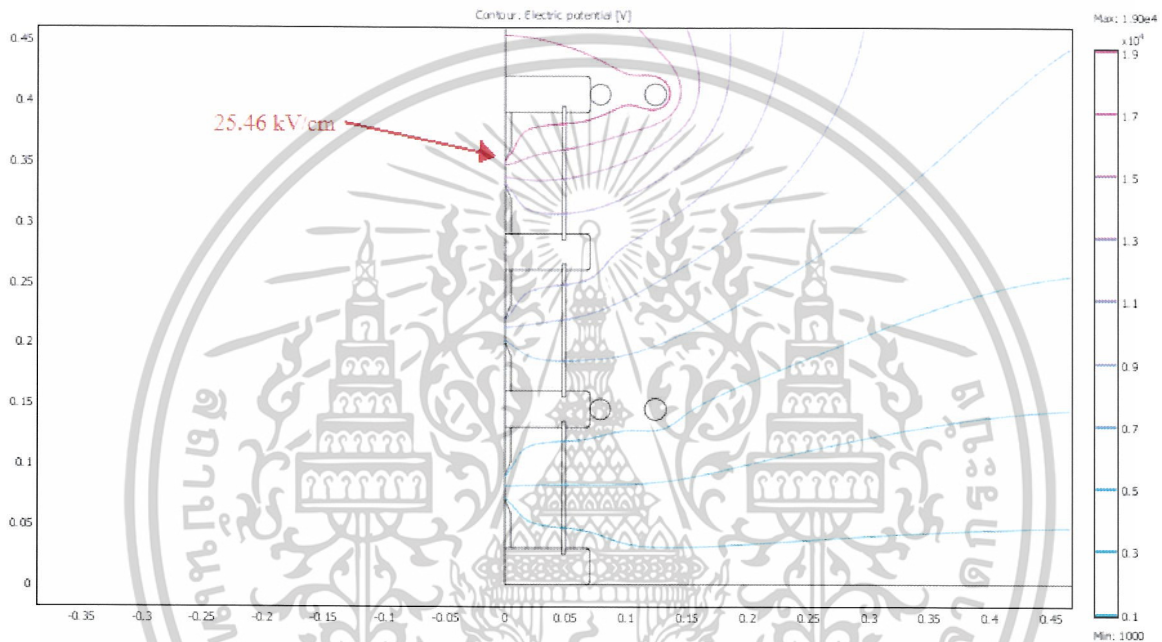
รูปที่ 4.41 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

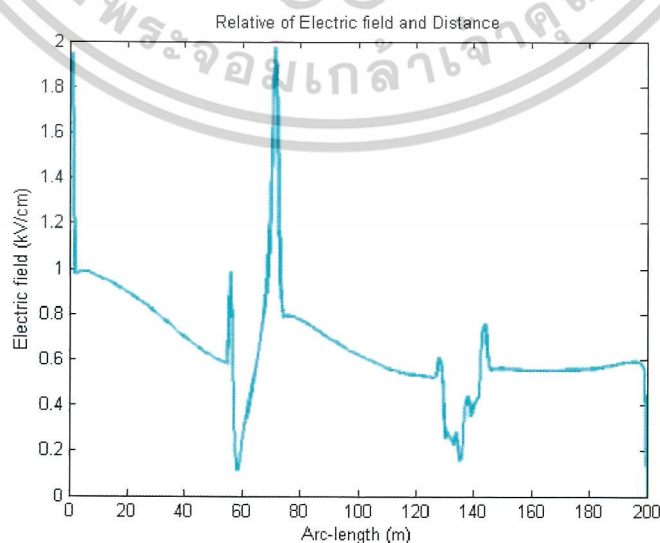
#### 4.1.20 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

##### Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - ล่าง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชีลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชีลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชีลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 25.46 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.42 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน - ล่าง

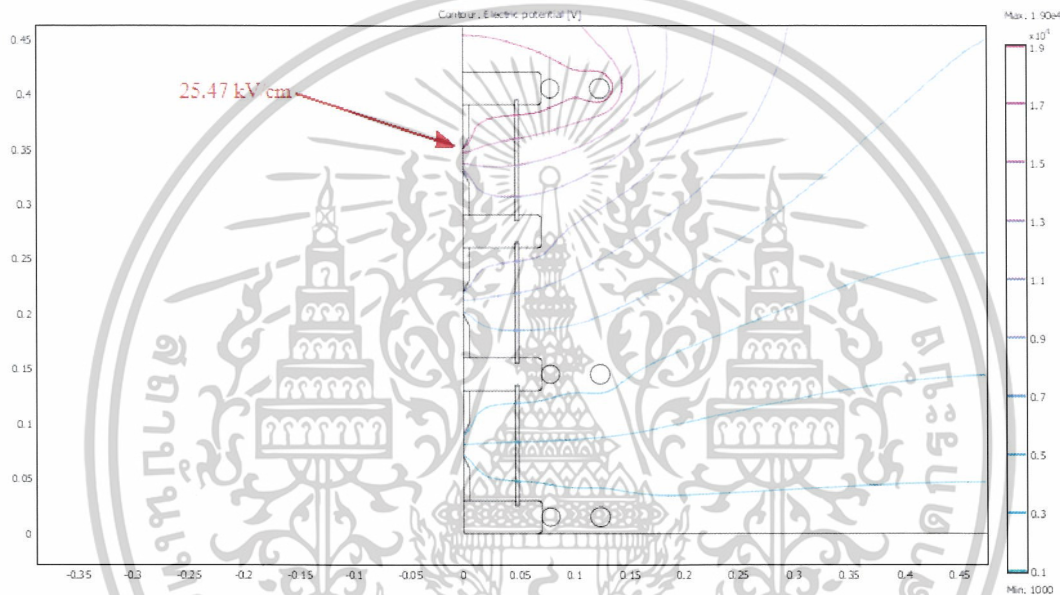


รูปที่ 4.43 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

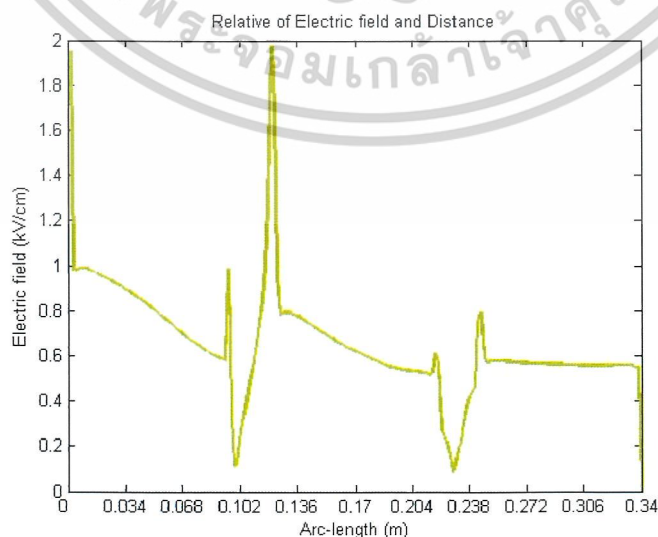
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1. 21 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน – ล่าง – กราวด์**

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาซีลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาซีลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาซีลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 25.47 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



**รูปที่ 4.44** ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน – ล่าง – กราวด์



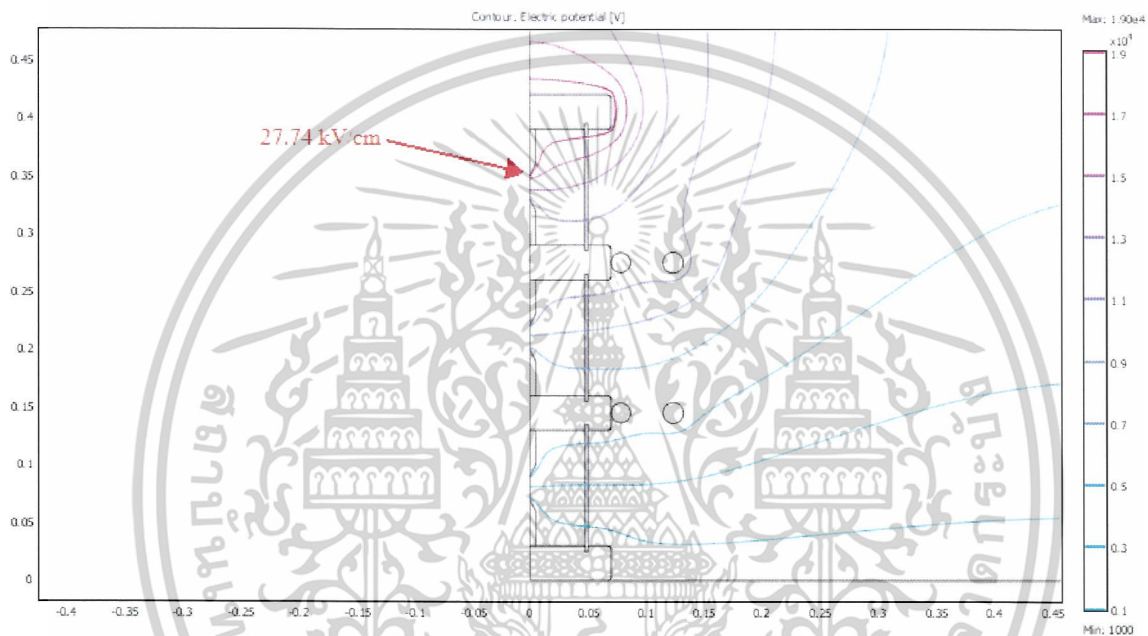
**รูปที่ 4.45** กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีกรรมาธิการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

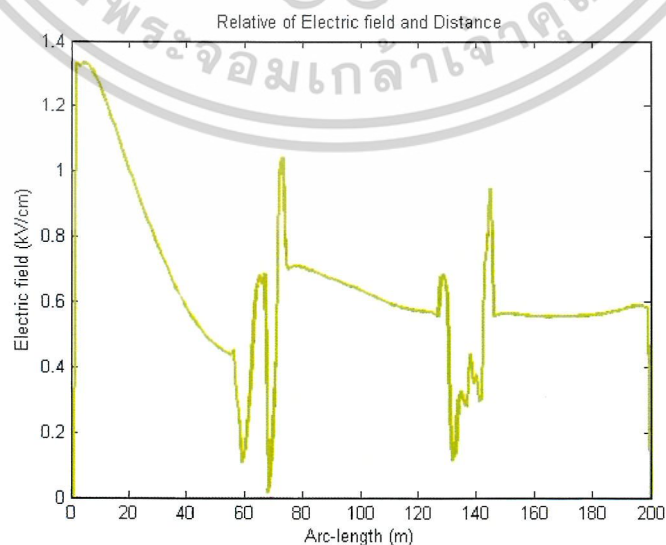
#### 4.1.22 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง - ล่าง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 27.74 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



รูปที่ 4.46 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง - ล่าง



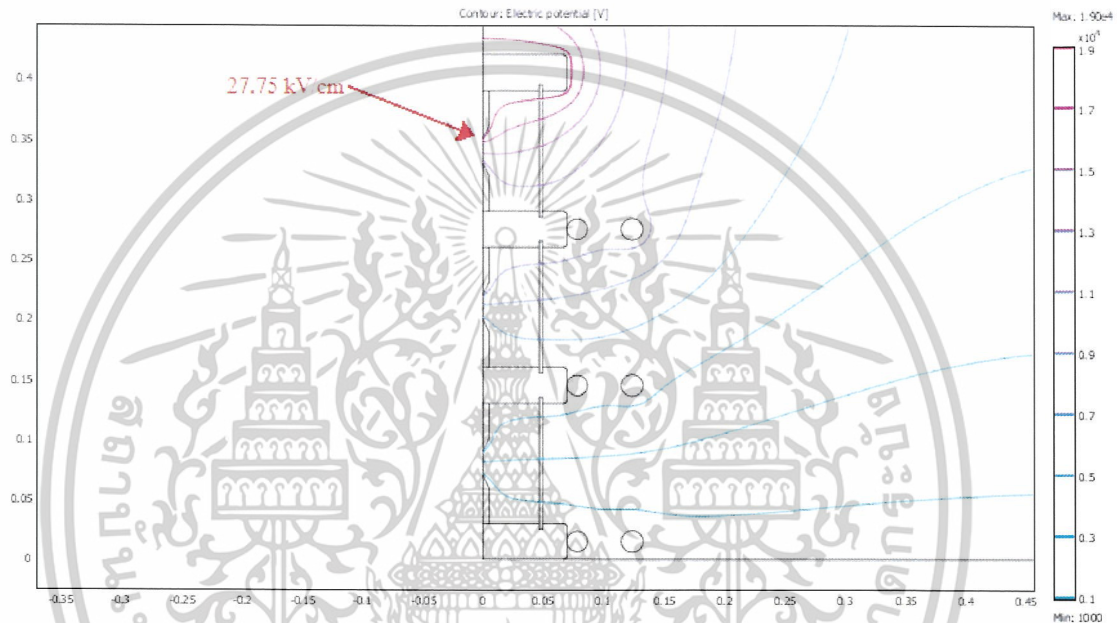
รูปที่ 4.47 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

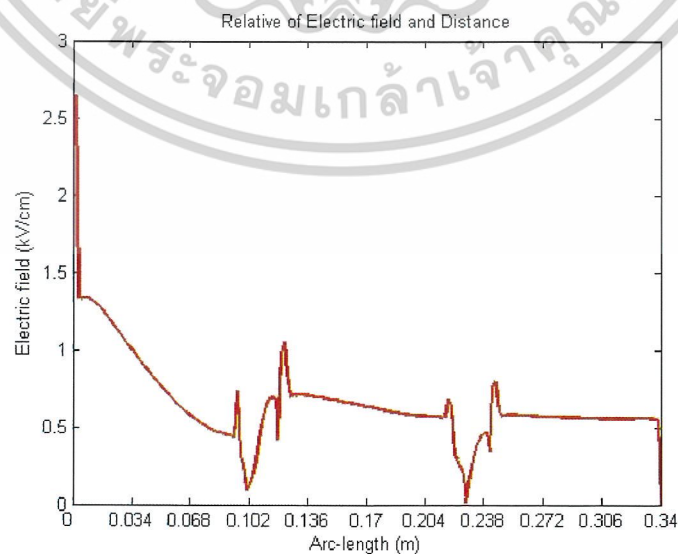
#### 4.1.23 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง – กราวด์

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาซีลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาซีลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาซีลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 27.75 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อิลิเมนต์ |



รูปที่ 4.48 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง – ล่าง – กราวด์



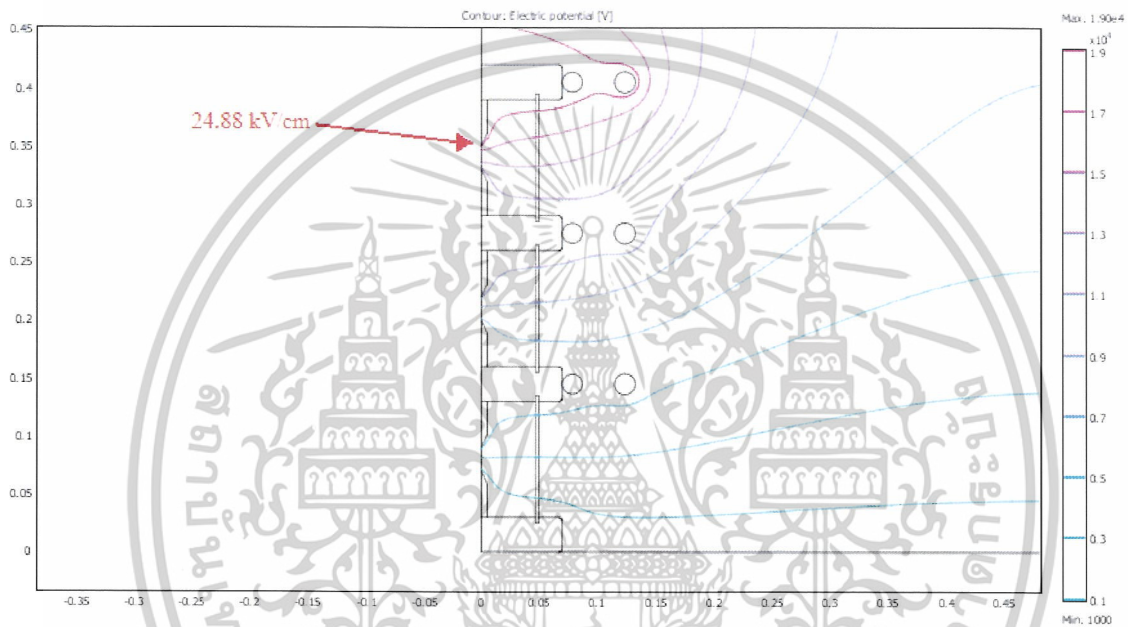
รูปที่ 4.49 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

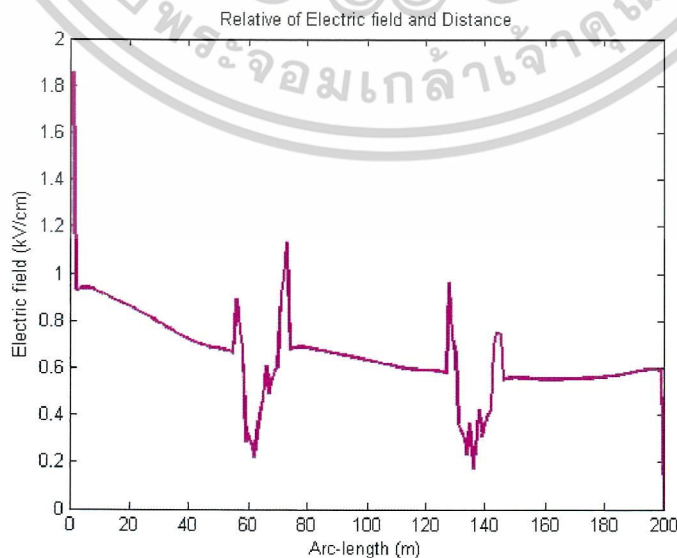
#### 4.1.24 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี

Rod ระยะ gap 2 cm มี Corona Shield บน - กลาง - ล่าง

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. โครนาชิลด์                               | Steering ring   |
| 2. รัศมี โครนาชิลด์                         | 12.4 cm         |
| 3. วัสดุที่ใช้ทำโครนาชิลด์                  | Stainless Steel |
| 4. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ                   | 20 kV           |
| 5. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) | 24.88 kV/cm     |
| 6. โปรแกรมที่ใช้จำลองและวิเคราะห์           | ไฟไนต์อีลิเมนต์ |



รูปที่ 4.50 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมของท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน - กลาง - ล่าง



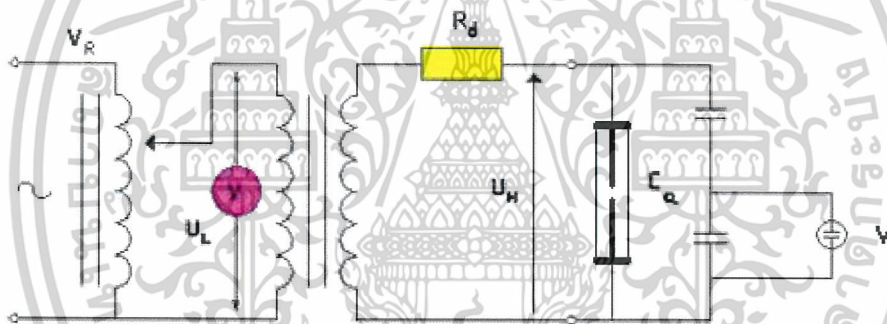
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.51 กราฟสนามไฟฟ้าตามผิวท่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบแรงดันเบรกดาว์น ของวัตถุทดสอบแต่ละแบบ

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิดเบรกดาว์นภายในท่อระหว่างแท่งรีดปลายแหลมที่ระยะห่างกัน 2cm เพื่อดูระดับแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาว์น ก่อนที่จะนำไปทดสอบ ดิสซาร์จบางส่วนต่อไป ทั้งนี้เพื่อป้องกันเครื่องมือวัด PD เสียหายจากการเบรกดาว์นของวัตถุทดสอบ โดยที่เราจะไม่ป้อนแรงดันถึงค่านั้นให้แก่วัตถุทดสอบ

### 4.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า
2. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง
3. แผ่นทองแดงด้านกราวด์
4. โวลต์เตจดีไวเดอร์แรงดัน
5. มิเตอร์วัด
6. วัตถุทดสอบ



ก)



ข)

รูปที่ 4.52 วงจรการทดลอง

ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $V_R$  คือ ตัวปรับแรงดัน

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง

$U_L$  คือ แรงดันด้านแรงต่ำ

$U_H$  คือ แรงดันด้านแรงสูง

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วง

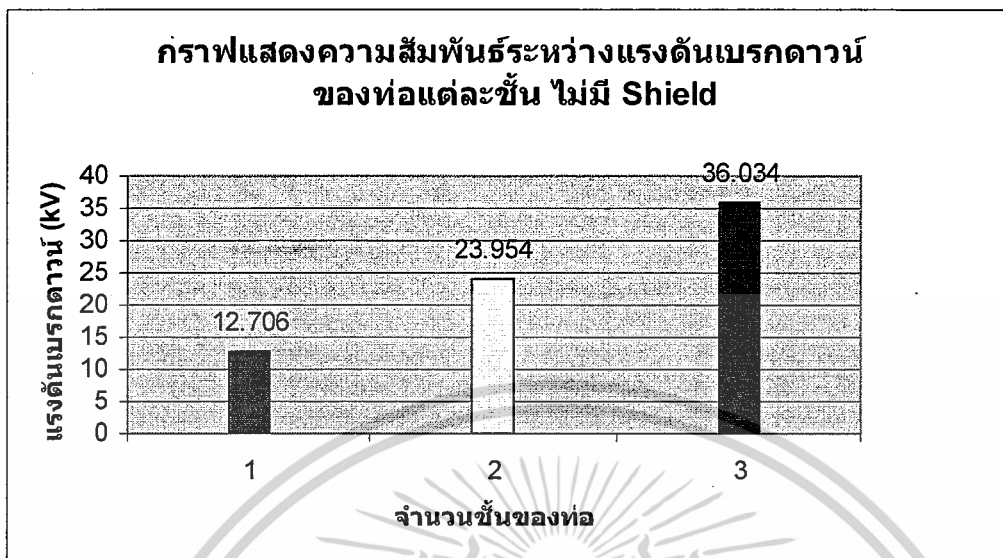
V คือ มิเตอร์วัด

$C_a$  คือ Test Object ได้แก่ อุปกรณ์ทดลอง เช่น ท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัวท้าย ยาว 30cm แบบ 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น ทั้งแบบใส่ Corona Shield และไม่ใส่ Corona Shield

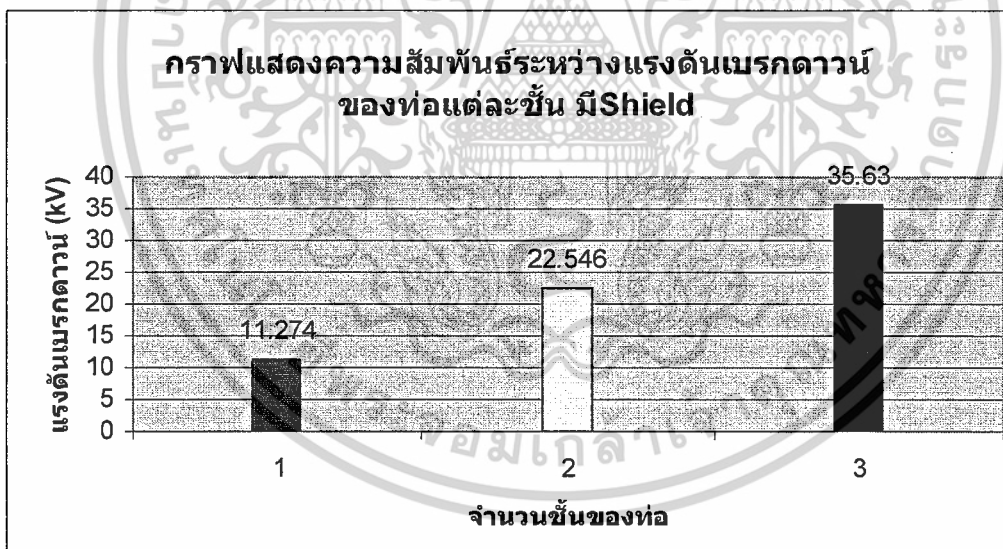
#### 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจร ดังรูปที่ 4.32 โดยอุปกรณ์ทดสอบที่ใช้ทดสอบ เป็นท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัวท้ายยาว 30cm ขนาด 1ชั้น มีรีดคปลายแหลม
2. ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบเบรกดาวน (BD) โดยค่อยๆเพิ่มแรงดันขึ้นครั้งละ 1kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน
3. ทำการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า จากมิเตอร์วัด และบันทึกค่า
4. เปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบในวงจร โดยใส่โคโรนาชิลด์ เพิ่มเข้าไป แล้วทำการทดสอบตามข้อ 2 และข้อ 3 ตามลำดับ
5. ทำการทดสอบซ้ำเหมือนข้อ 4 โดยเปลี่ยนท่อเป็นขนาด 2 ชั้น, 3ชั้น และใส่โคโรนาชิลด์กับไม่ใส่ ตามลำดับ
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบ, บันทึกผล และสรุปผลการทดสอบ

### 4.2.3 ผลการทดสอบการเบรกดาวน



รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนของท่อแต่ละชั้น แบบไม่มีใส่ Shield  
(ตั้งรูป 3.4ก, 3.5ก และ 3.6ก ตามลำดับ)



รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนของท่อแต่ละชั้น แบบใส่ Shield  
(ตั้งรูปที่ 3.4ข, 3.5ข และ 3.6ข ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางบันทึกผลการทดลองหาแรงดัน BD

### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 2 / 2 / 2552

เวลา : 09.00 น. – 09.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเบรกดาวนท้อ 1 ชั้นยาว 30 cm

แบบที่	Corona Shield	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
		1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	11.62	14.42	12.31	12.54	12.64	12.706
2	มี	11.03	11.27	11.25	10.95	11.87	11.274



รูปที่ 4.55 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนของท้อ 1 ชั้น (ตั้งรูปที่ 3.4ก และ 3.4ข ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางบันทึกผลการทดลองหาแรงดัน BD

### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ต/ป : 2 / 2 / 2552

เวลา : 09.30 น. – 10.30 น.

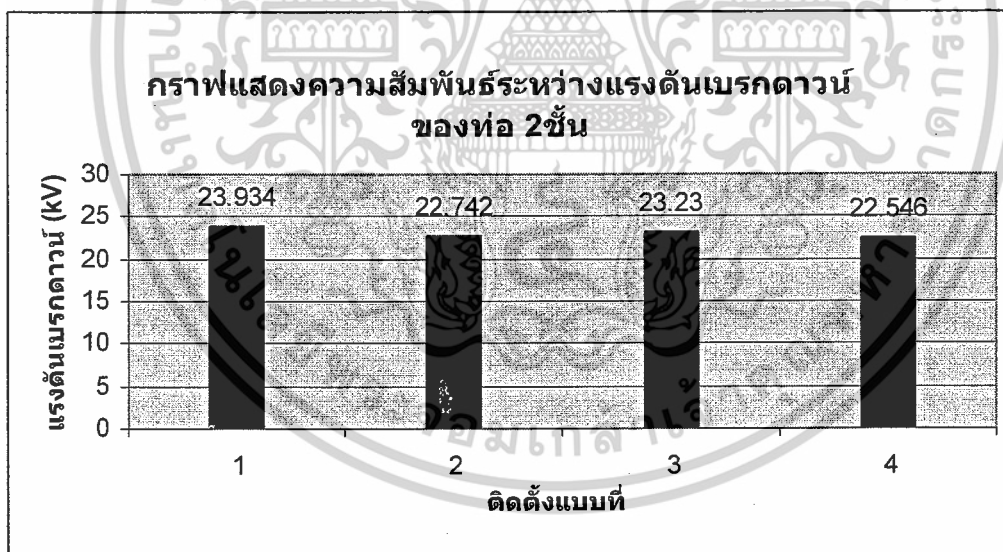
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 2 ชั้นยาว 30 cm

แบบที่	Corona Shield		การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
	บน	กลาง	1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	ไม่มี	25.32	24.14	23.56	23.57	23.18	23.934
2	มี	ไม่มี	23.02	22.85	22.82	22.53	22.49	22.742
3	ไม่มี	มี	24.22	25.26	23.12	21.75	21.80	23.23
4	มี	มี	22.52	22.17	22.21	22.91	22.92	22.546



รูปที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของท้อ 2 ชั้น  
(ตั้งรูปที่ 3.5ก, 3.5ข, 3.5ง และ 3.5จ ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางบันทึกผลการทดลองหาแรงดัน BD

### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 2 / 2 / 2552

เวลา : 10.30 น. – 12.00 น.

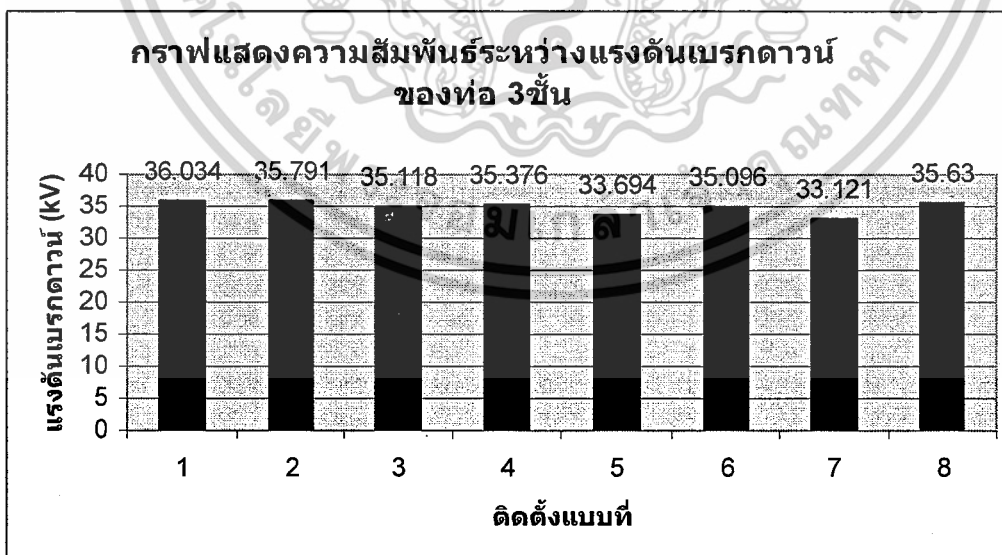
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 74 %

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 3 ชั้นยาว 30 cm

แบบที่	Corona Shield			การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
	บน	กลาง	ล่าง	1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	49.10	35.12	34.52	35.53	34.90	36.034
2	มี	ไม่มี	ไม่มี	35.93	35.91	35.85	35.81	35.48	35.791
3	ไม่มี	มี	ไม่มี	34.89	34.49	35.23	35.16	35.82	35.118
4	มี	มี	ไม่มี	35.33	34.24	35.33	35.40	36.59	35.376
5	ไม่มี	ไม่มี	มี	35.91	32.15	34.84	33.12	32.45	33.694
6	มี	ไม่มี	มี	32.81	34.85	35.85	36.25	35.72	35.096
7	ไม่มี	มี	มี	33.81	32.87	31.87	33.04	34.04	33.121
8	มี	มี	มี	35.13	34.74	36.75	35.76	35.77	35.63



รูปที่ 4.57 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของท้อ 3 ชั้น  
(ตั้งรูปที่ 3.6ก, 3.6ข, 3.6ค, 3.6จ, 3.6ง, 3.6ฉ, 3.6ช และ 3.6ซ ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางบันทึกผลการทดลองหาแรงดัน BD

### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 5 / 2 / 2552

เวลา : 16.00 น. – 18.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 30 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 71 %

### ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 30 cm

แบบที่	Corona Shield	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
		1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	12.85	11.12	10.44	10.29	10.43	11.026
2	มี	12.02	11.38	11.05	11.05	11.06	11.312

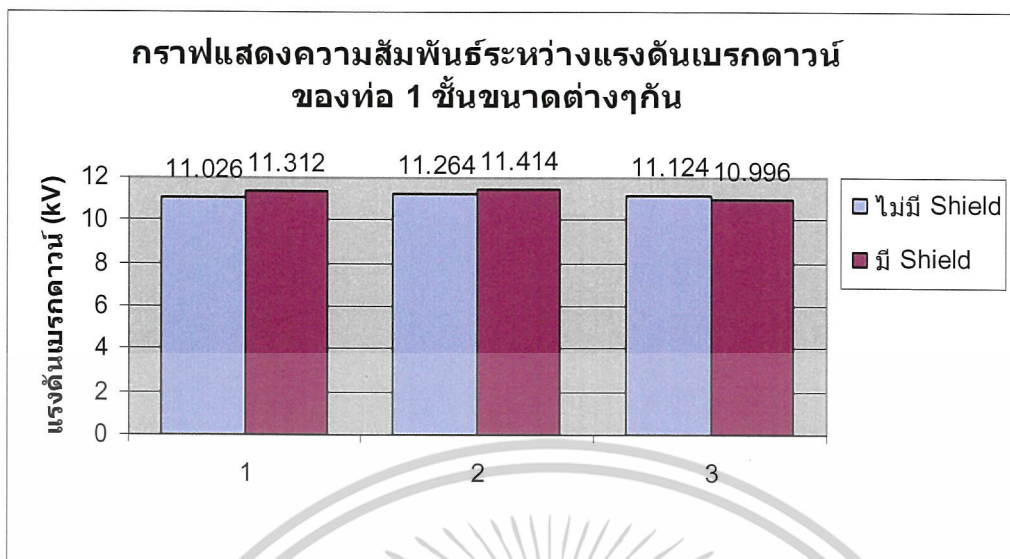
### ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 15 cm

แบบที่	Corona Shield	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
		1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	11.78	11.43	11.05	11.19	10.87	11.264
2	มี	13.45	10.75	11.08	10.75	11.04	11.414

### ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้นยาว 10 cm

แบบที่	Corona Shield	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ( kV )
		1	2	3	4	5	
1	ไม่มี	10.71	11.08	11.14	11.19	11.50	11.124
2	มี	11.91	10.93	11.00	11.06	11.08	10.996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวนของท่อ 1 ชั้น ขนาดต่างๆกัน 30, 15 และ 10 cm

หมายเหตุ:

- 1 หมายถึง ท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm (รูปที่ 3.4ก และ 3.4ข)
- 2 หมายถึง ท่อ 1 ชั้นยาว 15 cm (รูปที่ 3.7ง และ 3.7จ)
- 3 หมายถึง ท่อ 1 ชั้นยาว 10 cm (รูปที่ 3.7ก และ 3.7ข)

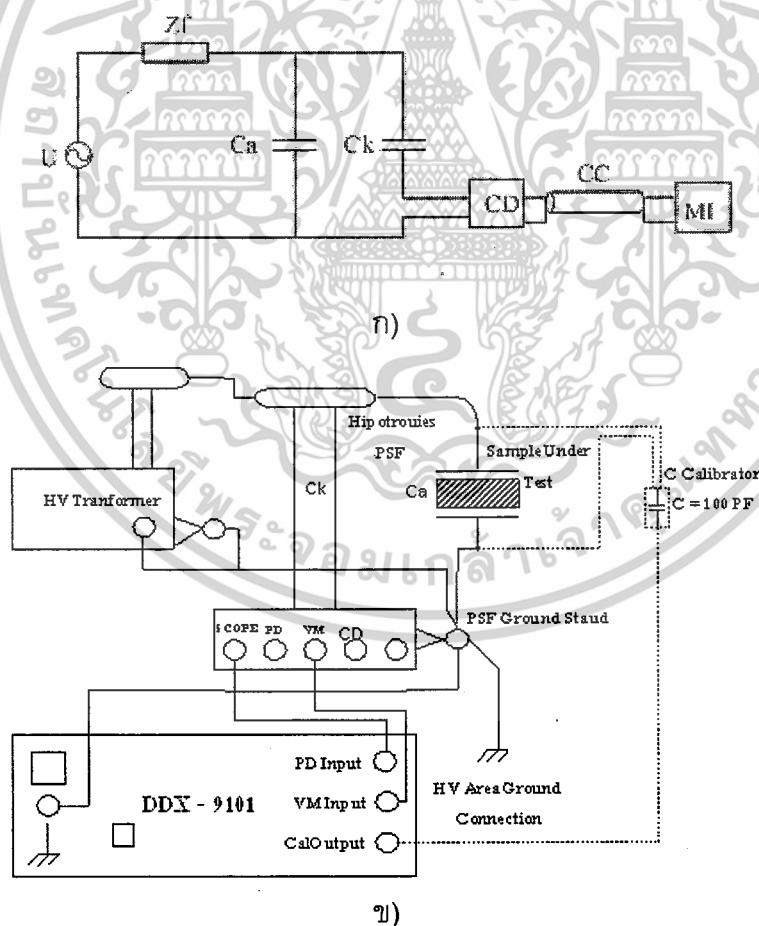
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบการเกิดโคโรนา ด้วยเครื่องทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิดโคโรนาที่สภาวะเริ่มเกิด ที่ระดับแรงดันต่างๆ โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.39 และ 4.40 หลังจากนั้นค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งสามารถตรวจจับโคโรนาเริ่มเกิดได้ แล้วทำการบันทึกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ค่าของดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด และค่าแรงดันเริ่มเกิดด้วยเครื่องตรวจจับ PD

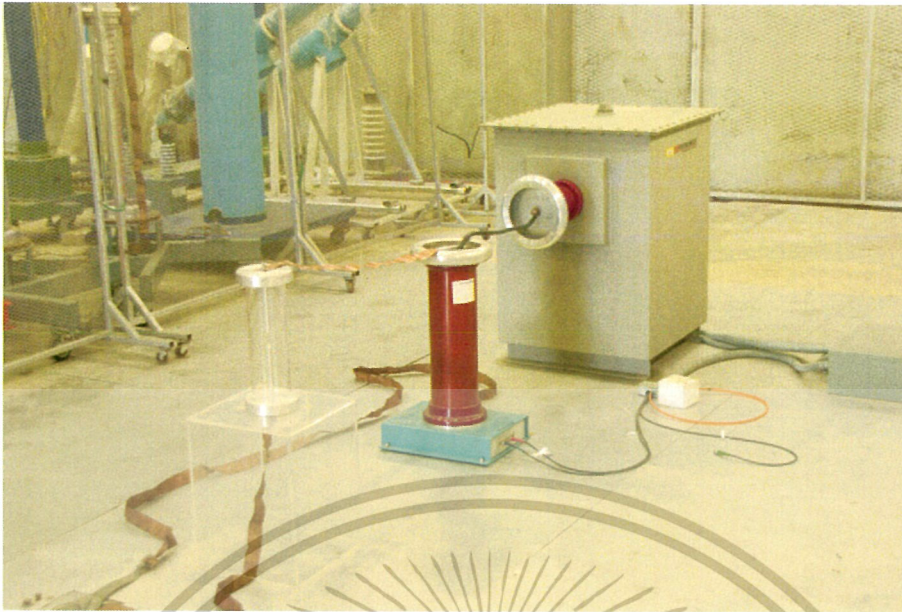
#### 4.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า
3. ตัวเก็บประจุปรับเทียบ
4. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40 kVA, PD < 2 pC
5. แผ่นทองแดงด้านกราวด์
6. วัตถุทดสอบ



รูปที่ 4.39 วงจรการทดลอง ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 วงจรการทดสอบจริง

โดยที่  $U$  คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง 75 kV, 40 kVA,  $PD < 2$  pC

$C_k$  คือ Coupling Capacitor

PD คือ ตัวตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

$C_a$  คือ Test Object ได้แก่ อุปกรณ์ทดลอง PD เช่น ท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัวท้าย ยาว 30cm แบบ 1ชั้น, 2ชั้น และ 3ชั้น ทั้งแบบใส่ Corona Shield และไม่ใส่ Corona Shield

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

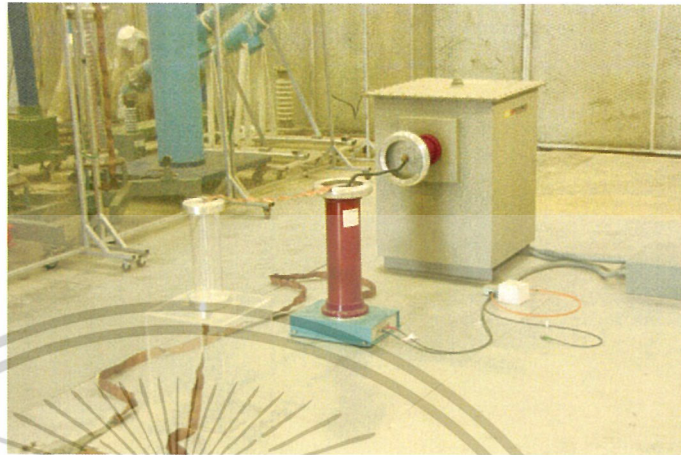
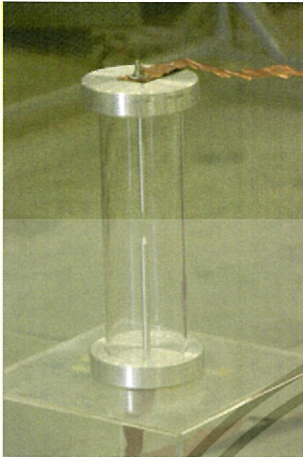
1. ทำการต่อวงจรวัด PD ดังรูปที่ 4.40 โดยอุปกรณ์ทดสอบที่ใช้ทดสอบ ( $C_a$ ) เป็นท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัวท้ายยาว 30cm ขนาด 1ชั้น มีรีดปลายแหลม และยังไม่ได้ต่อโคโรนาชิลด์
2. ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (PD) โดยค่อยๆ เพิ่มแรงดันขึ้นครั้งละ 1kV จนกระทั่งถึงค่าแรงดันเริ่มเกิด (โดยห้ามป้อนแรงดันจนถึงระดับแรงดันเบรกดาวน เพราะจะทำให้อุปกรณ์การวัดเสียหายได้)
3. ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนขณะเกิดโคโรนาเริ่มเกิด จากเครื่องตรวจจับ PD และบันทึกค่าขนาดของ PD (pC)
4. เปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบในวงจรโดยใส่โคโรนาชิลด์เพิ่มเข้าไป แล้วทำการทดสอบตามข้อ 2 และข้อ 3 ตามลำดับ
5. ทำการทดสอบซ้ำเหมือนข้อ 4 โดยเปลี่ยนท่อเป็นแบบ 2 ชั้น, 3ชั้น และใส่โคโรนาชิลด์กับไม่ใส่ ตามลำดับ
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ทำให้เกิดโคโรนาเริ่มเกิด, บันทึกผล

และสรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ผลการทดสอบการตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน

#### 4.3.3.1 ผลการทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield



ก)

ข)

รูปที่ 4.61 การทดสอบ PD ท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ก) ท่อ 1 ชั้น ยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

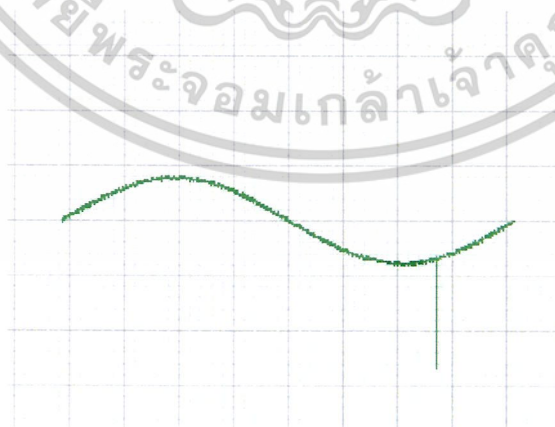
เวลา : 15.00 น. – 15.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 69 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

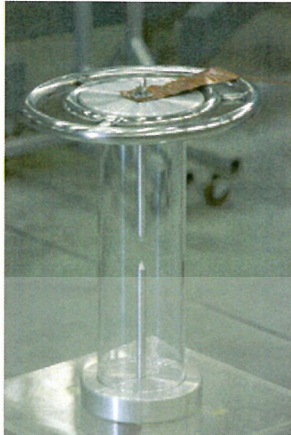


รูปที่ 4.62 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 32.17 pC, Inception Voltage = 8.93 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.2 ผลการทดสอบ PD ท่อ1ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield



ก)



ข)

รูปที่ 4.63 การทดสอบ PD ท่อ1ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield

ก) ท่อ1ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

#### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

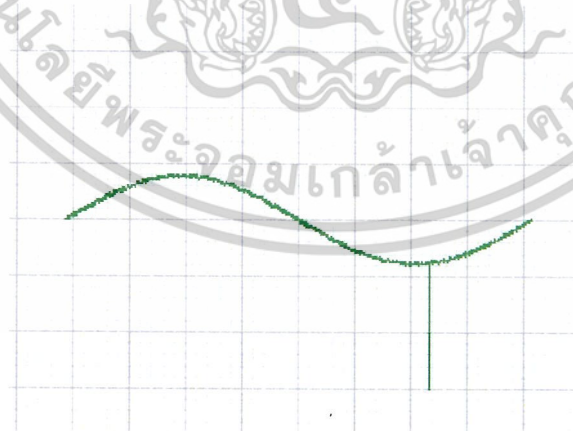
เวลา : 15.00 น. – 15.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 69 %

#### การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.64 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 38.47 pC, Inception Voltage = 9.43 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3.3 ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield



ก)

ข)

รูปที่ 4.65 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ก) ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

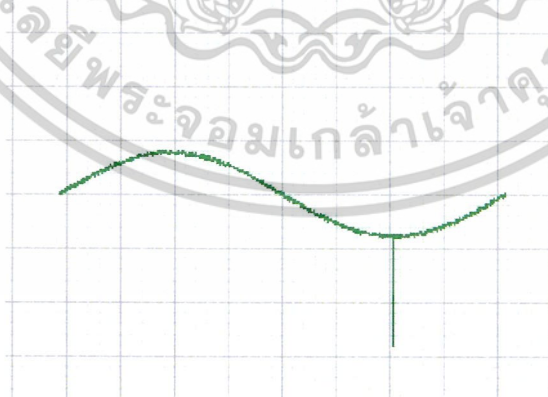
เวลา : 15.30 น. – 16.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 68 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

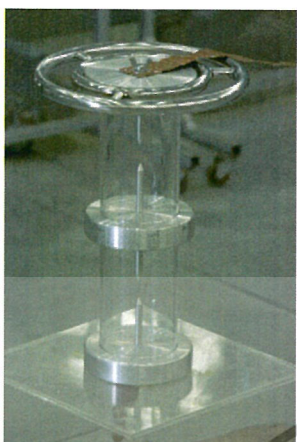


รูปที่ 4.66 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 33.34 pC, Inception Voltage = 14.65 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.4 ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน



ก)

ข)

รูปที่ 4.67 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

ก) ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

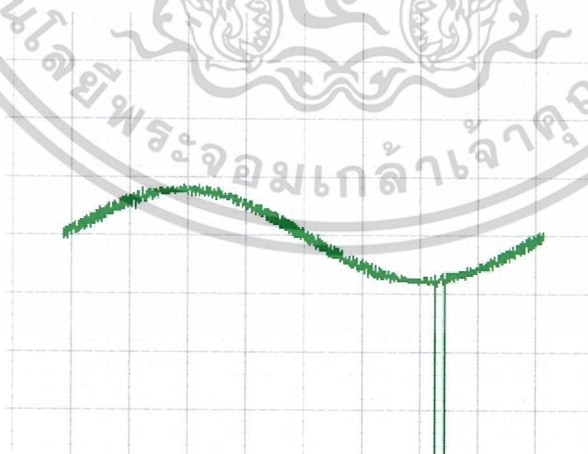
เวลา : 15.30 น. – 16.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 68 %

การแสดงผลของการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

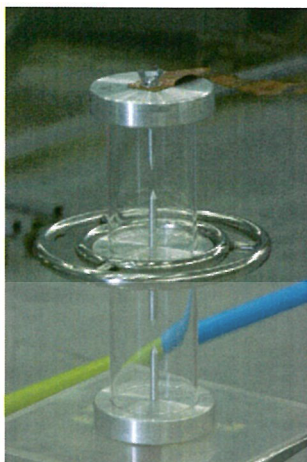


รูปที่ 4.68 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 22.28 pC, Inception Voltage = 16.92 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.5 ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง



ก)



ข)

รูปที่ 4.69 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง

ก) ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

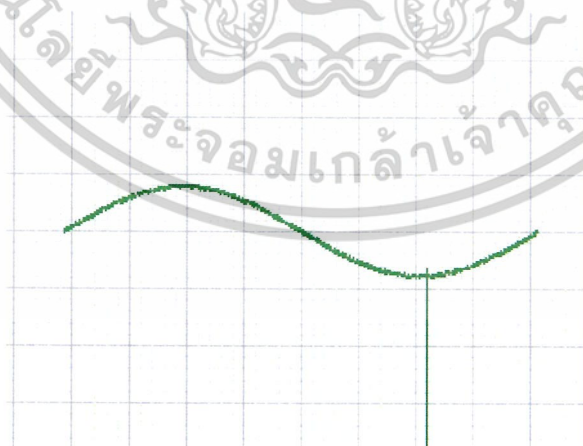
เวลา : 15.30 น. – 16.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 68 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

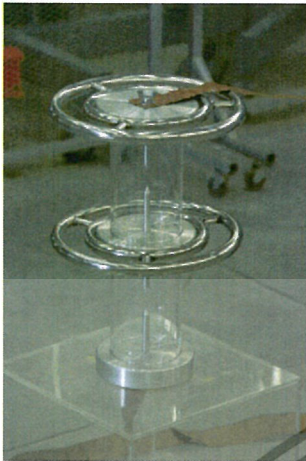


รูปที่ 4.70 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 22.32 pC, Inception Voltage = 14.72 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.6 ผลการทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง



ก)

ข)

รูปที่ 4.71 การทดสอบ PD ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง

ก) ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

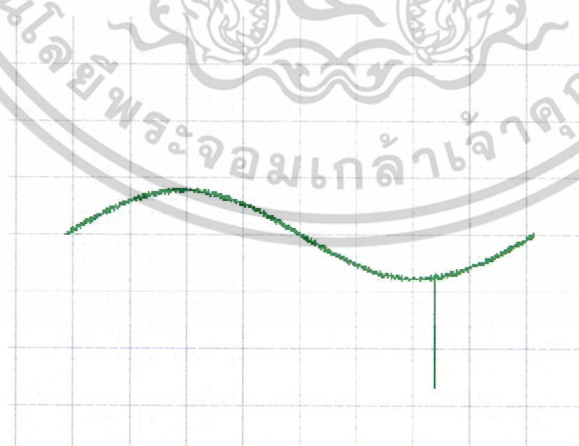
เวลา : 15.30 น. – 16.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 68 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

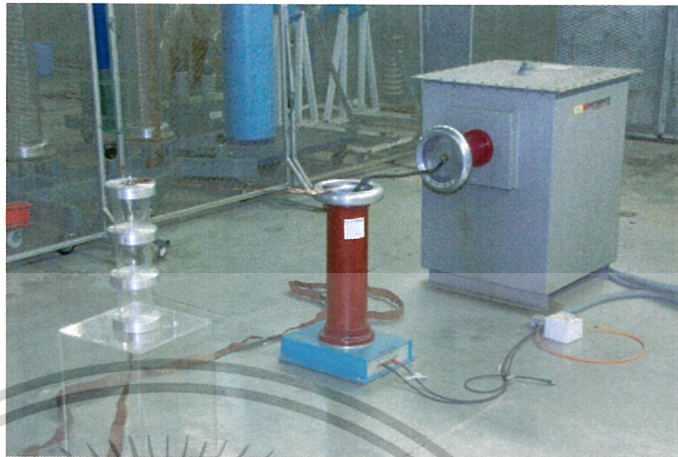
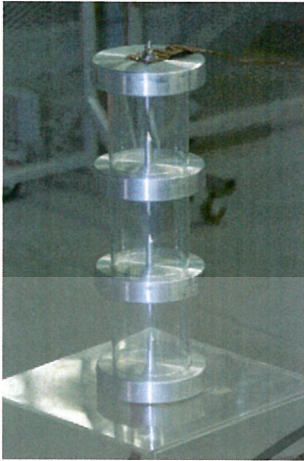


รูปที่ 4.72 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 32.47 pC, Inception Voltage = 17.42 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.7 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield



ก)

ข)

รูปที่ 4.73 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm ไม่มี Corona Shield

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

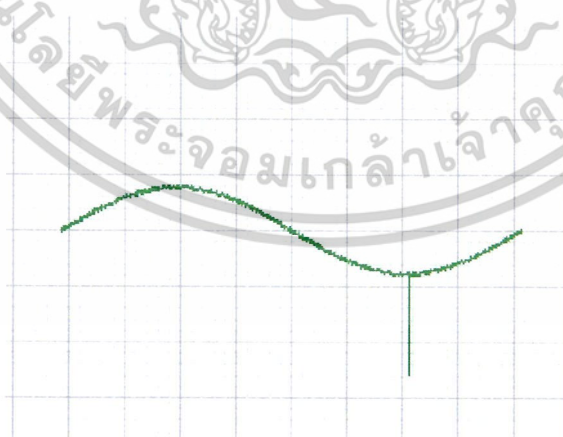
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.74 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 23.53 pC, Inception Voltage = 16.86 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.8 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน



ก)



ข)

รูปที่ 4.75 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

#### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

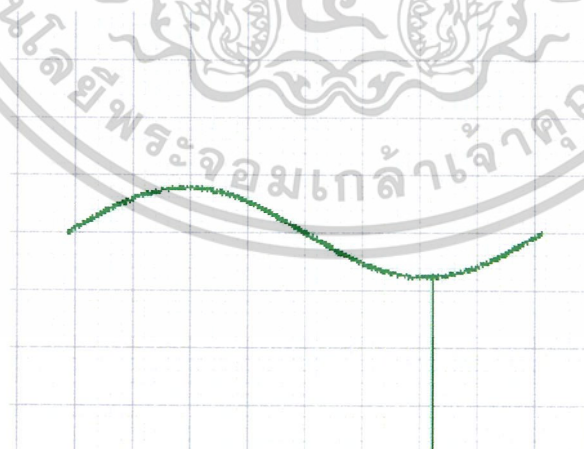
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

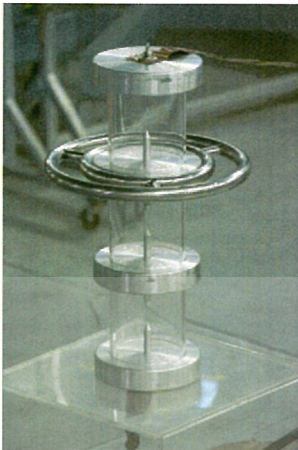


รูปที่ 4.76 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 20.26 pC, Inception Voltage = 20.57 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.9 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง



ก)

ข)

รูปที่ 4.77 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

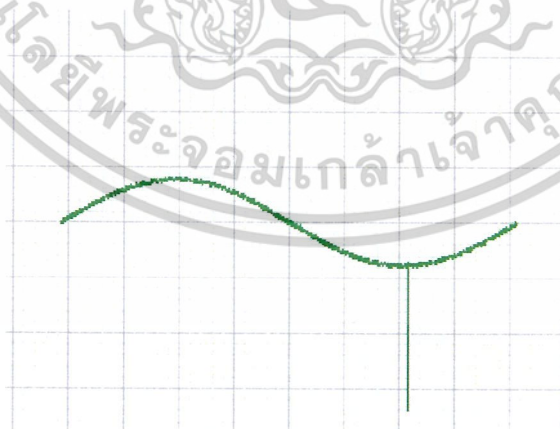
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.78 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 23.20 pC, Inception Voltage = 15.41 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.10 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง



ก)

ข)

รูปที่ 4.79 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

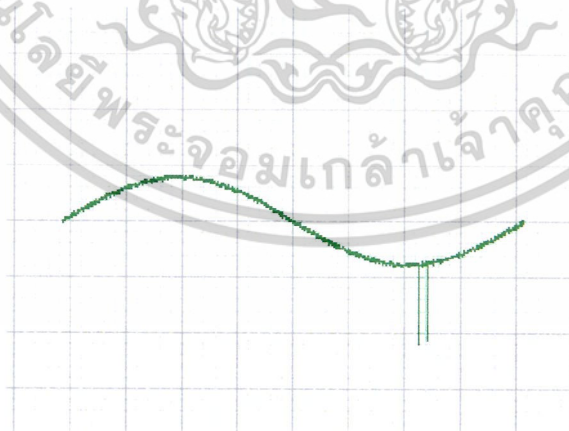
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.80 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 24.33 pC, Inception Voltage = 19.43 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.11 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง



ก)

ข)

รูปที่ 4.81 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield ล่าง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

#### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

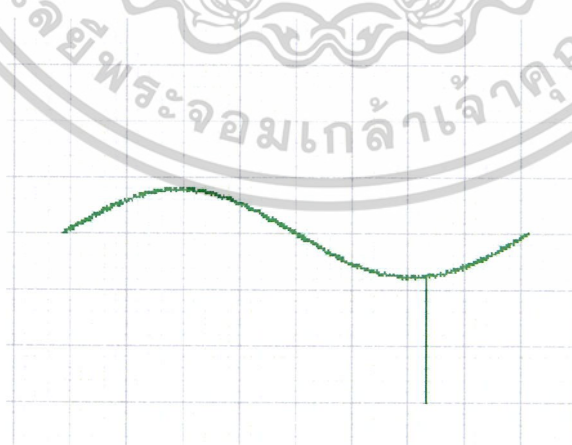
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

#### การแสดงผลของการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.82 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 38.30 pC, Inception Voltage = 16.92 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.12 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-ล่าง



ก)



ข)

รูปที่ 4.83 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-ล่าง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-ล่าง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

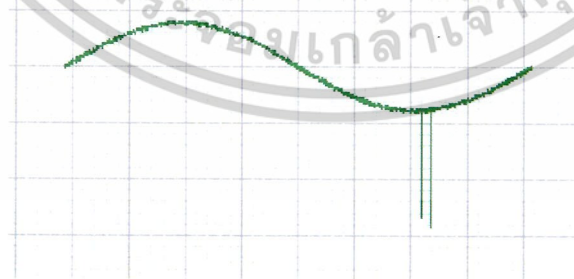
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

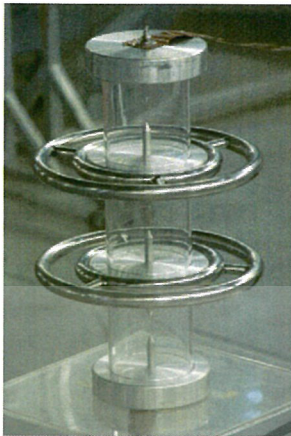


รูปที่ 4.84 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 31.89 pC, Inception Voltage = 20.63 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3.13 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง-ล่าง



ก)

ข)

รูปที่ 4.85 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง-ล่าง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield กลาง-ล่าง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

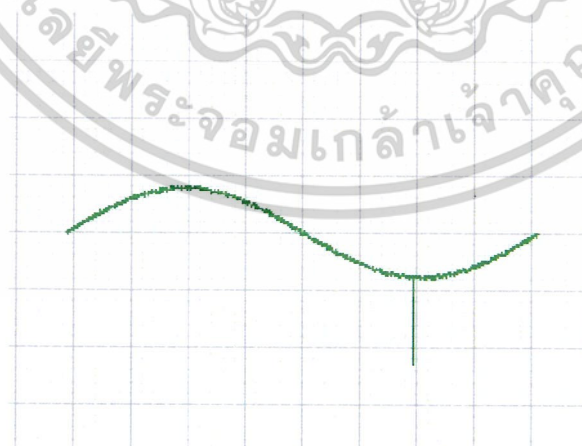
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

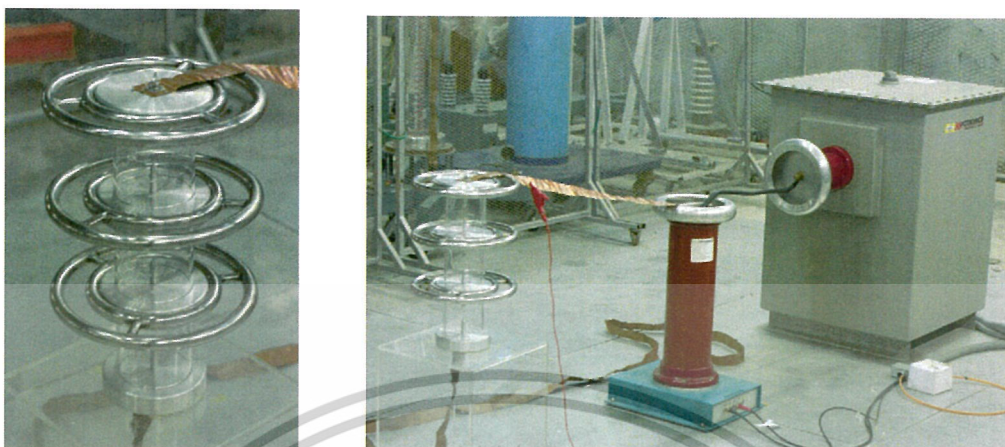


รูปที่ 4.86 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 33.94 pC, Inception Voltage = 15.79 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3.14 ผลการทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง-ล่าง



ก)

ข)

รูปที่ 4.87 การทดสอบ PD ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง-ล่าง

ก) ท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มี Corona Shield บน-กลาง-ล่าง

ข) วงจรที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

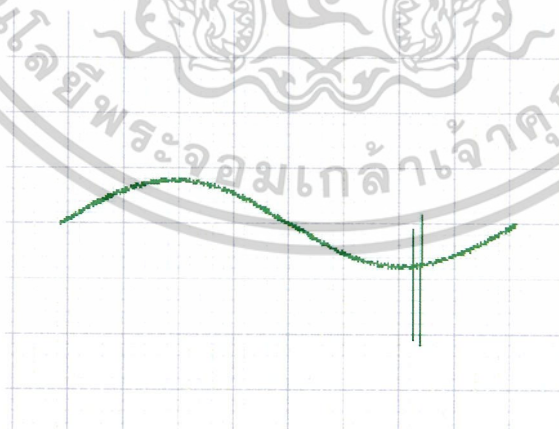
เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

การแสดงผลของการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 4.88 PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

Discharge = 29.51 pC, Inception Voltage = 19.43 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางบันทึกผลการทดลอง ค่า PD  
ของท่อ 1 ชั้น มี rod**

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

เวลา : 15.00 น. – 15.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 69 %

**ตารางที่ 4.7** ค่าการดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท่อ 1 ชั้น

แรงดันเริ่มเกิด (kV)	แบบที่	Corona Shield	ค่า PD
8.93	1	ไม่มี	32.17 pC
9.43	2	มี	38.47 pC

**ตารางบันทึกผลการทดลอง ค่า PD  
ของท่อ 2 ชั้น มี rod**

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

เวลา : 15.30 น. – 16.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 68 %

**ตารางที่ 4.8** ค่าการดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท่อ 2 ชั้น

แรงดัน เริ่มเกิด (kV)	แบบที่	Corona Shield		ค่า PD
		บน	กลาง	
14.65	1	ไม่มี	ไม่มี	33.34 pC
16.92	2	มี	ไม่มี	22.28 pC
14.72	3	ไม่มี	มี	22.32 pC
17.42	4	มี	มี	32.47 pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางบันทึกผลการทดลอง ค่า PD  
ของท่อ 3 ชั้น มี rod**

ว/ด/ป : 21 / 2 / 2552

เวลา : 18.00 น. – 20.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 761 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

**ตารางที่ 4.9** ค่าการดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันเริ่มเกิดของท่อ 3 ชั้น

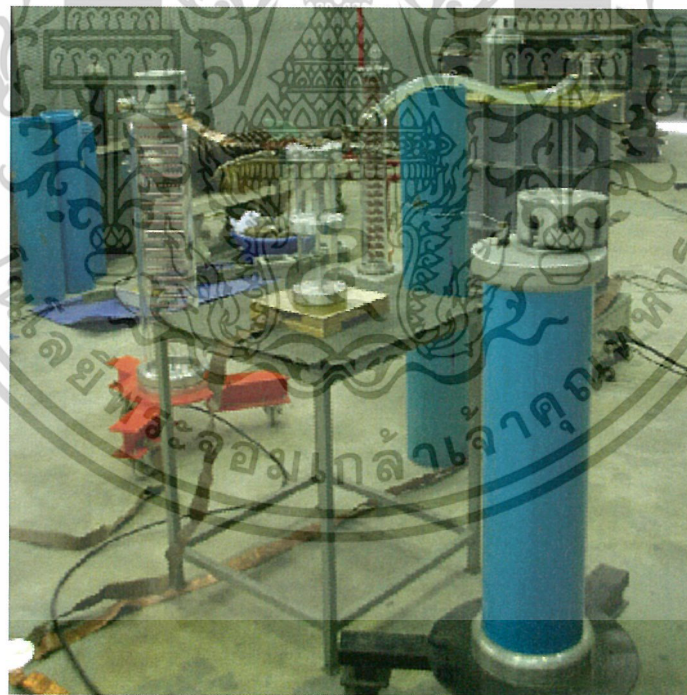
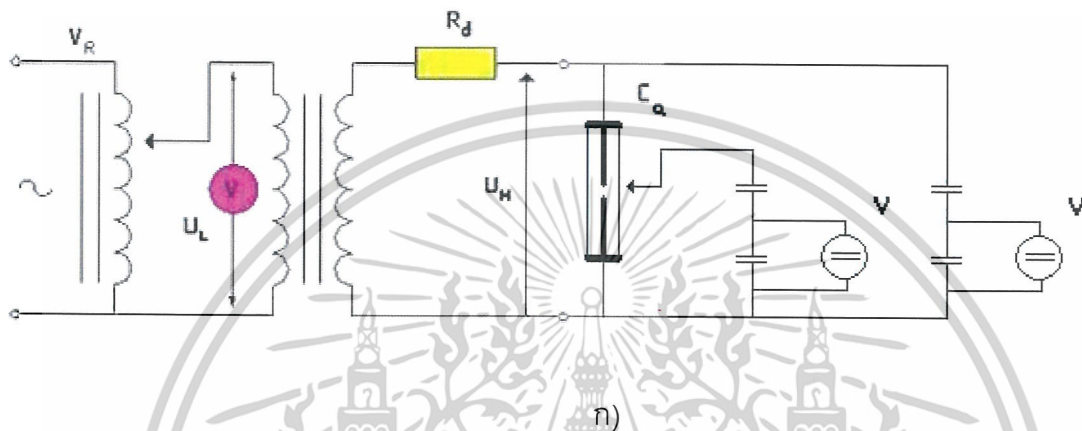
แรงดัน เริ่มเกิด (kV)	แบบที่	Corona Shield			ค่า PD
		บน	กลาง	ล่าง	
16.86	1	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	23.53 pC
20.57	2	มี	ไม่มี	ไม่มี	20.26 pC
15.41	3	ไม่มี	มี	ไม่มี	23.20 pC
19.43	4	มี	มี	ไม่มี	24.33 pC
16.92	5	ไม่มี	ไม่มี	มี	38.30 pC
20.63	6	มี	ไม่มี	มี	31.89 pC
15.79	7	ไม่มี	มี	มี	33.94 pC
19.43	8	มี	มี	มี	29.51 pC

**หมายเหตุ**

ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ ไม่ได้เป็นค่าโคโรนาดิสชาร์จที่แท้จริงเนื่องจากขณะ  
ป้อนแรงดันอินพุตแต่ละครั้ง ค่าแรงดันเอาพุทจะเพิ่มขึ้นเป็นสเต็ป โดยมีค่าระหว่างสเต็ป  
ค่อนข้างกว้างจึงส่งผลให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าจริง

#### 4.4 การทดลองการกระจายแรงดันไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบรูปทรงกระบอก

กระบวนการทดสอบ จะเป็นการทดสอบโดยการป้อนแรงดันให้กับวัตถุทดสอบแต่ละแบบ เช่น ท่อแบบ 1 ชั้น, 2 ชั้น, และ 3 ชั้น ตามลำดับ แล้ววัดแรงดันที่ผิวท่อเทียบกับกราวด์ที่ระยะ 10 cm, 15 cm และ 20 cm จากอิเล็กโทรดด้านแรงสูง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.69 เพื่อดูการกระจายแรงดัน

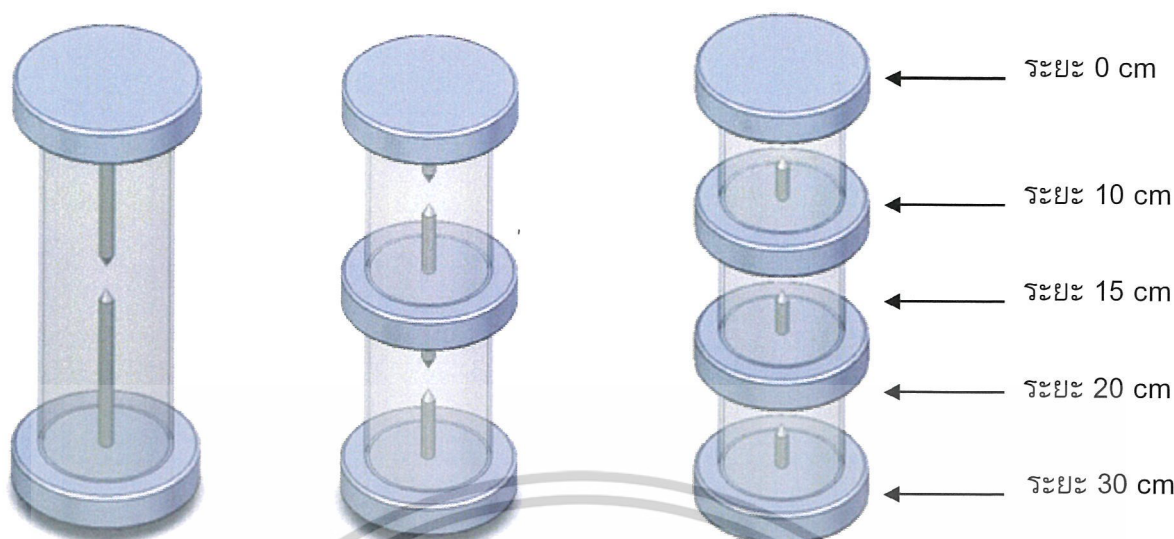


ข)

รูปที่ 4.89 วงจรการทดลองการวัดแรงดันกระจาย

ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.90 ระยะที่วัดแรงดันบนนิวตฤ

#### 4.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า
2. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง
3. แผ่นทองแดงด้านกราวด์
4. ความต้านทานน้ำ
5. โวลต์เตจดีไวเตอร์แรงดัน 2 ตัว
6. มิเตอร์วัด
7. วัตถุทดสอบ

#### 4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 4.69 โดยอุปกรณ์ทดสอบ เป็นท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัวท้าย ยาว 30cm ขนาด 1 นิ้ว มีรีดปลายแหลมระยะแก็บ 2 cm
2. ต่อวงจรการวัดแรงดันที่ผิวท่อที่ระยะ 10 cm จากอิเล็กโทรดด้านแรงสูง
3. ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบ จนถึงค่าที่ต้องการ
4. อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์วัด และบันทึกค่า
5. เปลี่ยนระยะการวัดแรงดันที่ผิวท่อจาก 10cm เป็น 15cm และ 20cm แล้วทำการทดลองตาม ข้อ 3 และ 4 ตามลำดับ
6. เปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบในวงจร เป็นท่อแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบ ตามข้อ 2, 3, 4 และข้อ 5 ตามลำดับ
7. เปรียบเทียบผลการทดสอบ, บันทึกผล และสรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ต/ป : 3 / 3 / 2552

เวลา : 13.00 น. – 16.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 31 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

#### ตารางที่ 4.10 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท่อ 1 ชั้น ไม่ใส่ Shield

ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	5 kV	-
10	108 V	4892 V
15	85 V	23 V
20	66 V	19 V
30	0 V	66 V

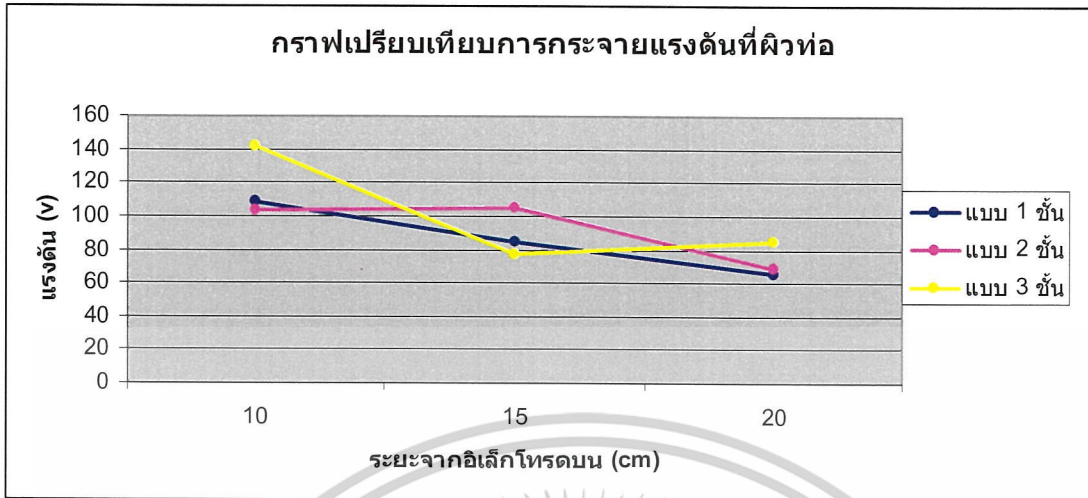
#### ตารางที่ 4.11 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท่อ 2 ชั้น ไม่ใส่ Shield

ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	5 kV	-
10	103 V	4897 V
15	105 V	2 V
20	69 V	36 V
30	0 V	69 V

#### ตารางที่ 4.12 ค่าการกระจายแรงดันบนผิวท่อ 3 ชั้น ไม่ใส่ Shield

ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	5 kV	-
10	142 V	4858 V
15	77 V	65 V
20	85 V	8 V
30	0 V	85 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.91 กราฟเปรียบเทียบการกระจายแรงดันที่ผิวท่อที่ระยะต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

การกระจายตัวของแรงดันและสนามไฟฟ้าต่างก็มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะนำมาสู่การเกิดโคโรนา Loss และเบรกดาวน์บนวัตถุทดสอบ เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงวิธีลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการใส่โคโรนาซีลด์ ชนิด steering ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวัตถุทดสอบทรงกระบอก และวิธีการแบ่งวัตถุทดสอบทรงกระบอกออกเป็นชั้นๆ เช่น 2 ชั้น และ 3 ชั้น แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบก่อนทำการทดสอบจริง สำหรับการทดลองจริงจะทำโดยวิธีการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องมือตรวจจับ PD จากนั้นดูค่าแรงดันเริ่มเกิดพบว่า กรณีท่อ 1 ชั้นการใส่โคโรนาซีลด์จะทำให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าไม่ใส่ กรณีท่อ 2 ชั้น ขณะไม่ใส่โคโรนาซีลด์ค่าแรงดันเริ่มเกิดจะสูงกว่าท่อ 1 ชั้น และการใส่โคโรนาซีลด์ที่ตำแหน่งบนกับกลางดังรูปที่ 3.5(จ) จะทำให้ค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าโมเดลอื่น ส่วนกรณีท่อ 3 ชั้น ค่าแรงดันเริ่มเกิดจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับการแบ่งท่อเป็น 2 ชั้น และการใส่โคโรนาซีลด์ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมจะทำให้มีค่าแรงดันเริ่มเกิดต่ำกว่าท่อ 2 ชั้นได้ กรณีนี้การใส่โคโรนาซีลด์ที่ตำแหน่งบนกับล่างดังรูปที่ 3.6(จ) จะทำให้มีค่าแรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าโมเดลอื่น ดังนั้นการใส่โคโรนาซีลด์และการแบ่งวัตถุทรงกระบอก ออกเป็นชั้นๆ สามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าได้จริง ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองด้วยโปรแกรม

#### 5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ

การใช้ท่ออะคริลิกเป็นวัตถุทดสอบเพราะท่ออะคริลิกส่วนใหญ่ได้ถูกนำไปใช้ในทางด้านไฟฟ้าแรงสูง เช่น โวลต์เดจดีไวเดอร์ สำหรับการทดลองจำเป็นต้องทำซ้ำหลายๆครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ส่วนผลของอุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ก็มีผลต่อค่าความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้น เราจึงไม่ควรทำการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์เกิน 80%

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ส้ารวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2549
- [2] คงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์, “ การศึกษาและการจำลองสนามไฟฟ้าเพื่อหามิติช่องว่างทรงกลมมาตรฐานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [3] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช. **High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis**, เอกสารประกอบการเรียนการสอนรายวิชา *Selected Topics in High Voltage Engineering*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [4] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1”, 2550
- [5] กษณะ แก้ววิจิตร, สาวินี หลุดพา, อภิวดี ศรีมีเทียน และอัศรพล วิทยุตระกูล “การศึกษาและการออกแบบโคโรนาซิลด์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [6] เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์. “การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [7] ปราโมทย์ เตชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

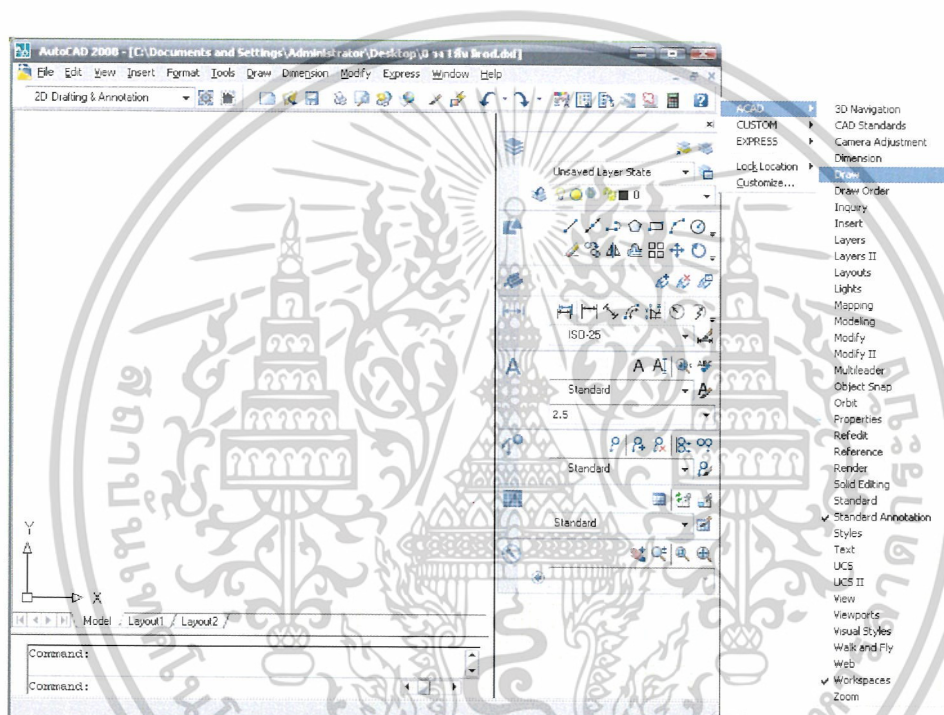


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. การใช้งานโปรแกรม AutoCAD 2007

ในที่นี้จะเป็นการนำเสนอตัวอย่างการวาดแบบจำลองสนามไฟฟ้า 2 มิติ โดย AutoCAD

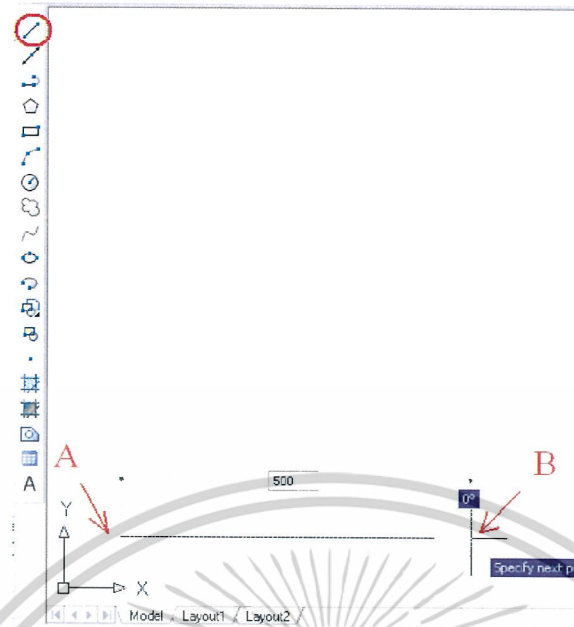
**ขั้นที่ 1** ทำการเปิดไอคอนที่เราจะใช้งานต่าง ๆ  
โดย คลิกขวา>ACAD>Draw ดังรูป



**รูปที่ ผ.ก. 1** เลือกกลุ่มเครื่องมือ Draw เพื่อใช้ในการวาดรูปทรงต่าง ๆ

ต่อไปจะทำการวาดเส้นตรง โดยคลิกที่คำสั่ง line จากนั้นให้คลิกจุดเริ่มต้นที่จุด A ใส่ความยาวของเส้นตรง และคลิกจุดสิ้นสุดที่จุด B ตามลำดับ

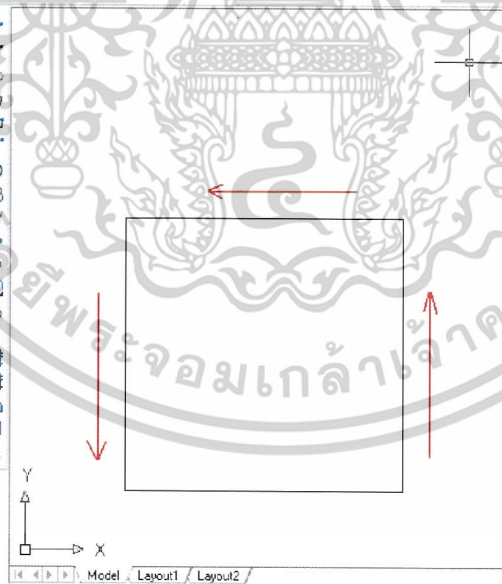
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก. 2 วาดเส้นตรงขนาด 500 ในแนวแกน X

จากนั้นให้ลากเส้นต่อมาจากลำดับดังนี้ ซึ่งจะได้ส่วนที่เป็นทางเดินของกระแสน้ำ

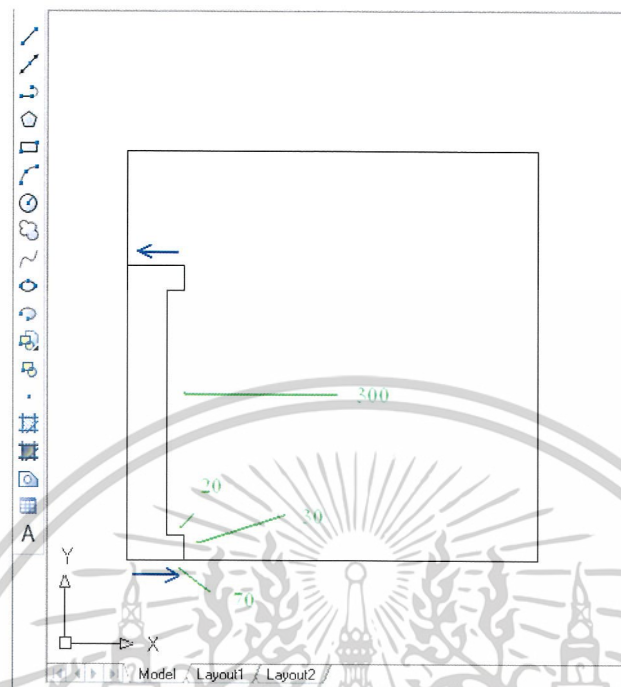
และแรงดัน



รูปที่ ผ.ก. 3 รูปสี่เหลี่ยมขนาด 500\*500

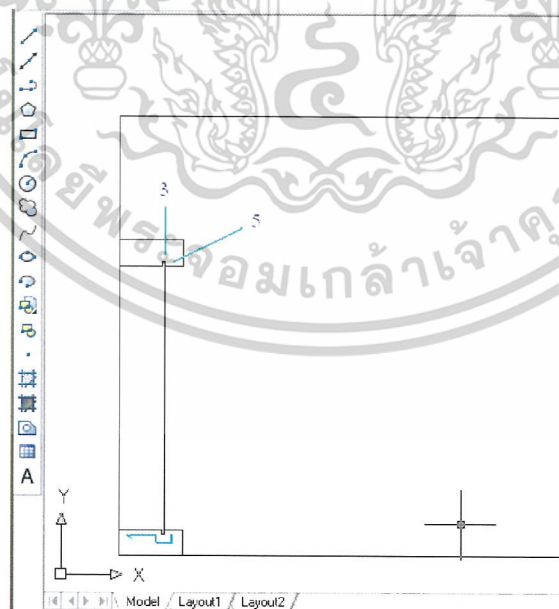
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเริ่มวาดส่วนที่เป็นวัสดุ test object วาดกรอบนอกของวัสดุก่อน



รูปที่ ผ.ก. 4 วาดส่วนที่เป็น test object

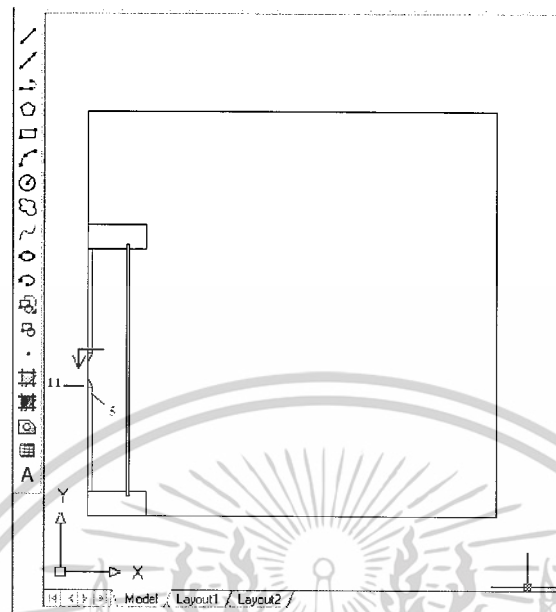
วาดท่อที่ใช้ในการทดสอบให้สมบูรณ์



รูปที่ ผ.ก. 5 ท่ออิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวาดปลายแหลมของแท่ง ROD ดังรูป



รูปที่ ผ.ก. 6 วาดส่วนที่อยู่ด้านในซึ่งเป็นแท่งรีดปลายแหลม  
การทำเหลี่ยมของโลหะให้โค้งมน รัศมี 3 ให้พิมพ์ดังนี้

Command : **FILLET**

Current settings : Mode = TRIM, Radius = 0.0000

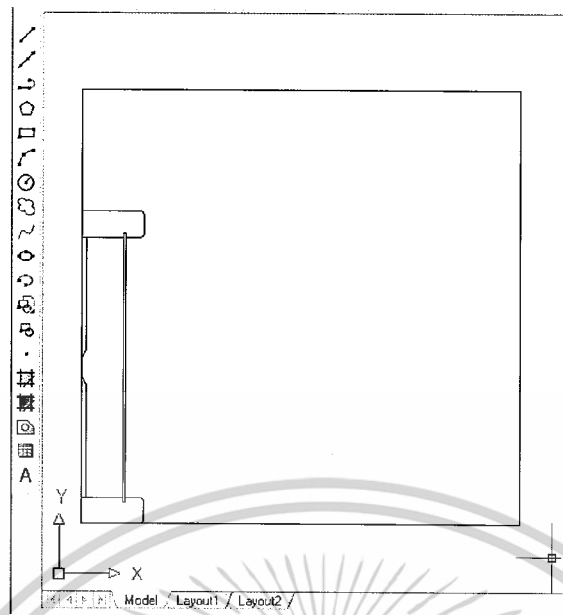
Select first object or [Undo/Polyline/Radius/Trim/Multiple] : **Radius**

Specify fillet radius <0.0000> : **3**

Select first object or [Undo/Polyline/Radius/Trim/Multiple] : **คลิกด้านที่ทำมุมกัน 90 องศา**

Select second object or shift-select to apply corner : **คลิกด้านที่ทำมุมกัน 90 องศา**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก. 7 แบบจำลองที่จะนำ Import สู โปรแกรม COMSOL

Save เป็นไฟล์ \*.dxf เพื่อนำไป Import ใน โปรแกรม Comsol ต่อไป

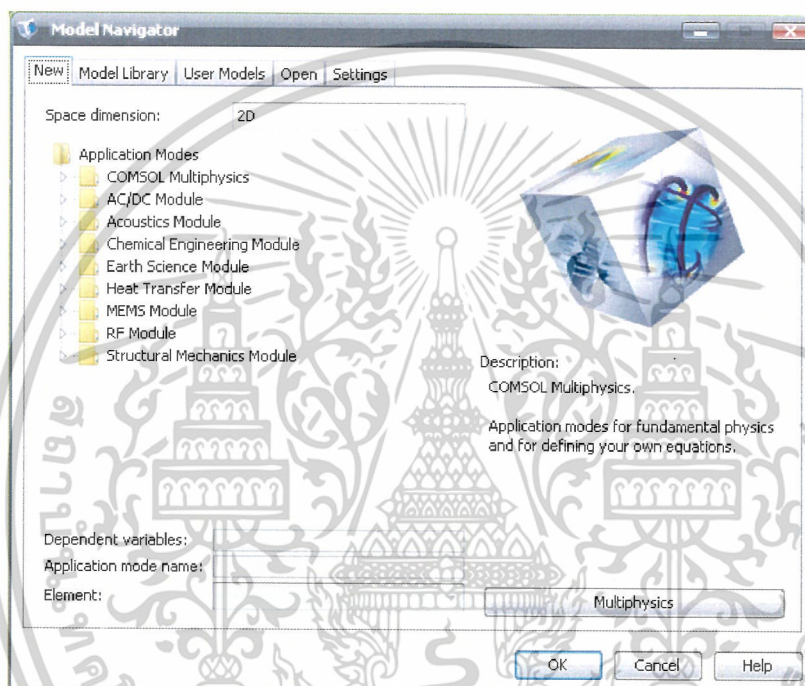
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### การใช้งานโปรแกรม COMSOL

ในที่นี้จะเป็นการนำเสนอตัวอย่างการจำลองสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติ โดยโปรแกรม COMSOL

โปรแกรม Comsol เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านความแข็งแรง ด้านสนามไฟฟ้า ด้านความร้อน และอื่นๆ ซึ่งในโครงการนี้จะใช้ทางด้านสนามไฟฟ้า



รูปที่ ข.1 ส่วนเริ่มโปรแกรม เข้าสู่ mode การวิเคราะห์ของโปรแกรม comsol

Space dimension คือ จำลองแบบ 2 มิติ ใน project นี้จะเปลี่ยนเป็น Axial symmetry (2D) ซิมครึ่งวงจระ เพื่อเป็นการประหยัด memory

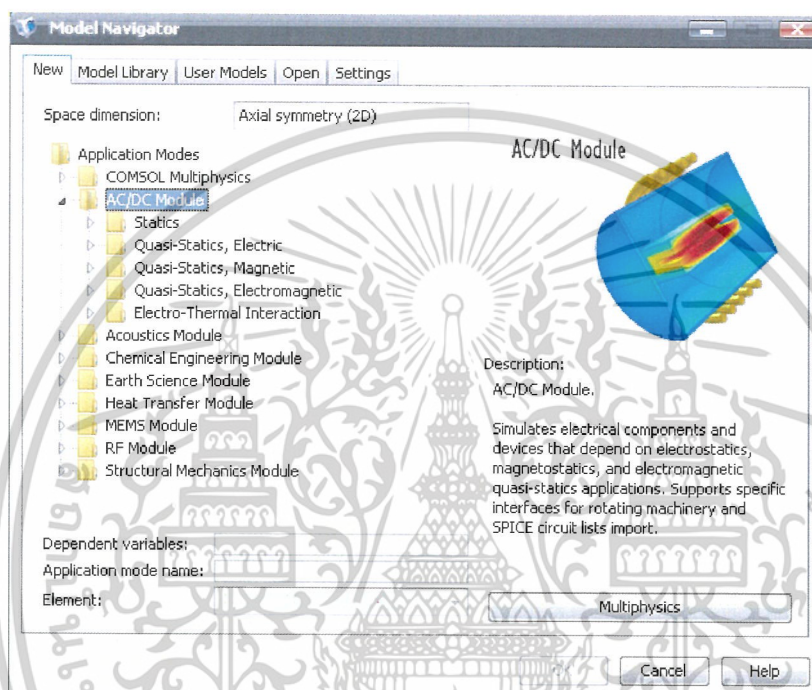
การจำลองของโปรแกรม Comsol มีทั้งหมด 8 อย่างคือ

- 1.COMSOL Multiphysics คือ การวิเคราะห์โดยพื้นฐานทางฟิสิกส์
- 2.AC/DC Module คือ จำลองไฟ AC/DC
- 3.Acoustics Module คือ การจำลองที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียง
- 4.Chemical Engineering Module คือ การจำลองทางวิศวกรรมเคมี
- 5.Earth Science Module คือ การจำลองทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.Heat Transfer Module คือ จำลองการถ่ายเทความร้อน
- 7.MEMS Module คือ ใช้วิเคราะห์อุปกรณ์ที่มีขนาดไมโครเมตร
- 8.RF Module คือ การจำลองทางคลื่น RF
- 9.Structural Mechanics Module คือ โครงสร้างทางกล

### เลือกการจำลองไฟ AC/DC

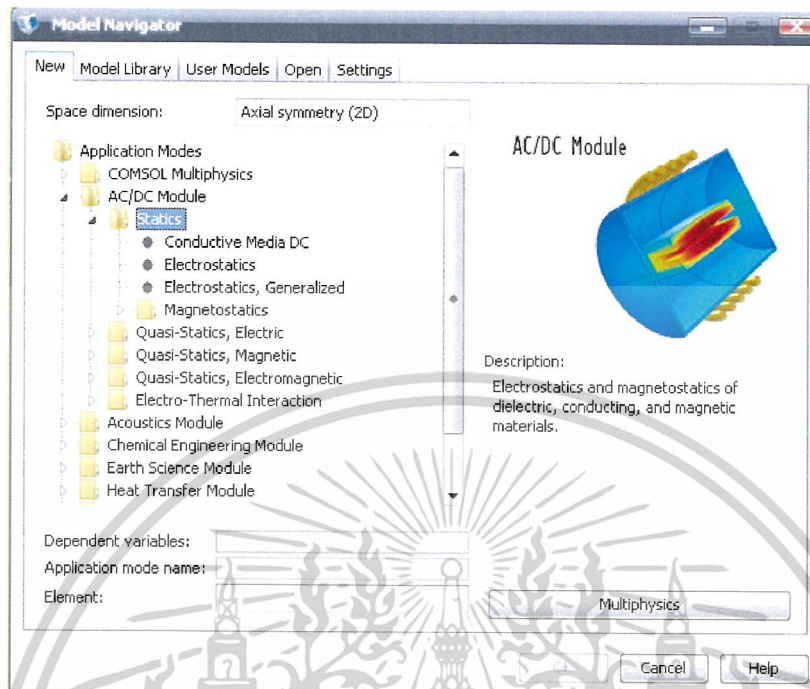


### รูปที่ ผ.ข. 2 โหมดต่างๆในการจำลองไฟ AC/DC

1. Statics คือ ไฟฟ้าสถิตและแม่เหล็กสถิต ของวัสดุฉนวน, ตัวนำ, สารแม่เหล็ก
2. Quasi-Statics, Electric คือ ฮาร์โมนิก ของวัสดุฉนวน, ตัวนำ ในระบบสนามไฟฟ้า
3. Quasi-Statics, Magnetic คือ ฮาร์โมนิก ของวัสดุฉนวน, ตัวนำ, สารแม่เหล็ก ในระบบสนามแม่เหล็ก
4. Quasi-Statics, Electromagnetic คือ ฮาร์โมนิก ของวัสดุฉนวน, ตัวนำ, สารแม่เหล็ก ในระบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
5. Rotating Machinery คือ เครื่องจักรกลแบบหมุน
6. Electro-Thermal Interaction คือ รวมกับโหมดความร้อนทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะจำลองหาค่าไฟฟ้าสถิตของวัสดุฉนวน จึงเลือกโหมด Statics

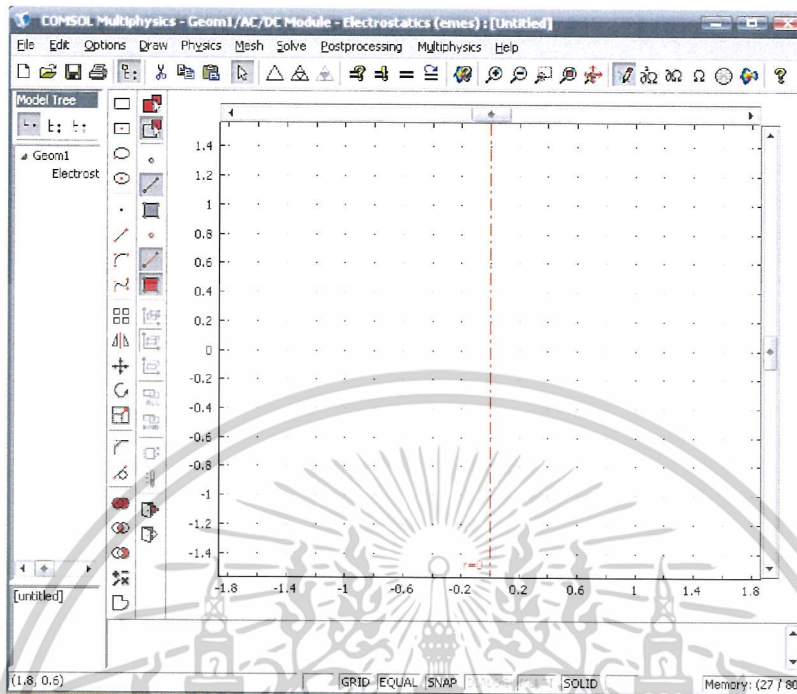


รูปที่ ผ.ข. 3 เลือกวัสดุในการวิเคราะห์

1. Conductive Media DC คือ วัสดุตัวนำ
2. Electrostatics คือ วัสดุฉนวน
3. Electrostatics, Generalized คือ การประมาณวัสดุตัวนำและฉนวน
4. Magneto statics คือ วัสดุแม่เหล็กและตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

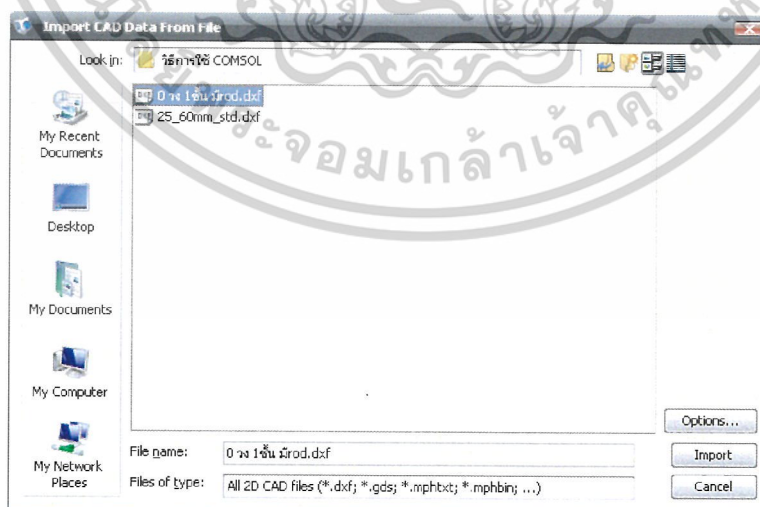
ซึ่งในโครงงานนี้จะเลือกใช้ Electrostatics จะเห็นว่าจะเข้ามายังหน้าต่างดังรูป



รูปที่ ผ.ข. 4 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม comsol

ขั้นที่ 1 คือ วาดภาพหรือเปิดจากโปรแกรมวาดภาพอื่นที่รองรับ

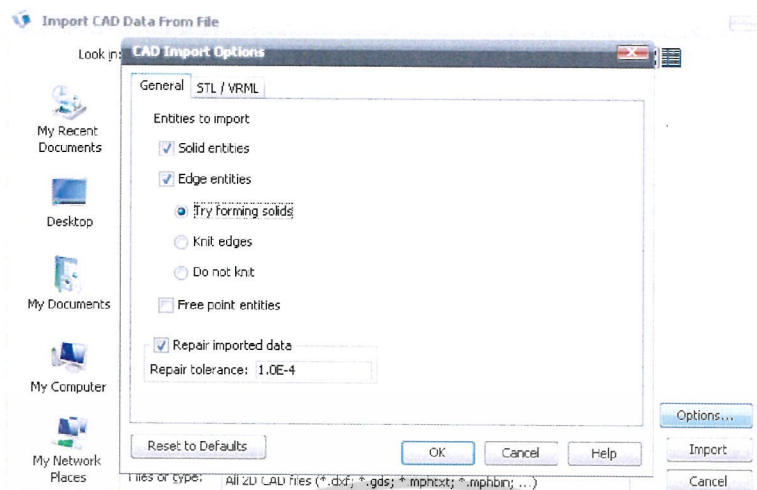
ในโครงงานนี้จะเปิดจากไฟล์โปรแกรม AutoCAD โดยใช้นามสกุล \*.dxf ไปที่  
File>Import>CAD Data Form File แล้วเลือกไฟล์ที่ต้องการใช้งาน



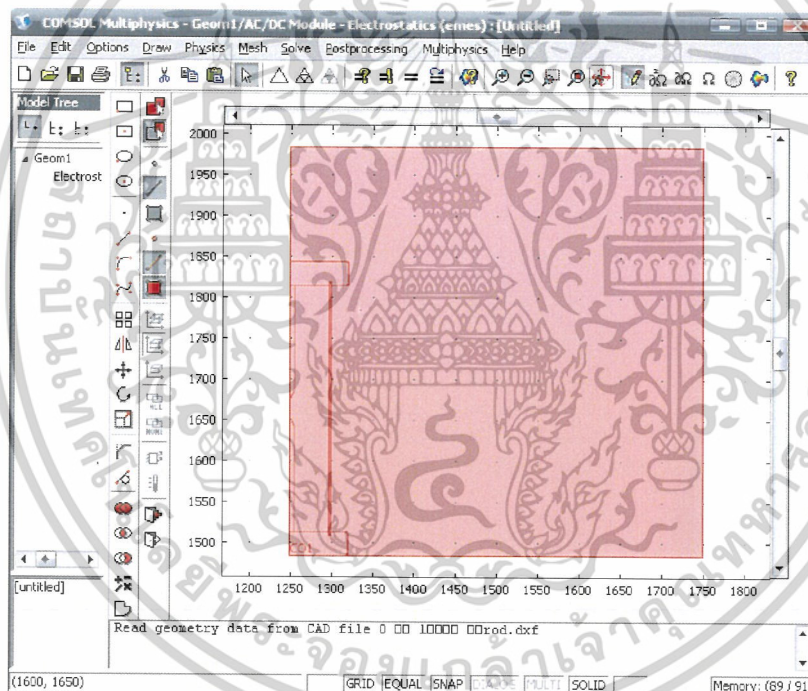
รูปที่ ผ.ข. 5 ขั้นตอนการ Import File จากโปรแกรม AutoCAD

เมื่อเลือกเสร็จแล้วให้กด options แล้วเลือก Try forming solids กด OK และ Import

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



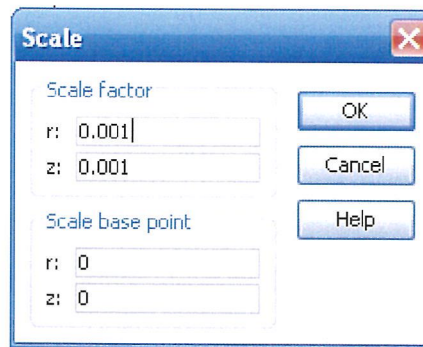
รูปที่ ผ.ข. 6 ปรับแต่งรูปแบบ File ที่ Import



รูปที่ ผ.ข. 7 รูปที่นำจาก AutoCAD มาใช้ในโปรแกรม comsol

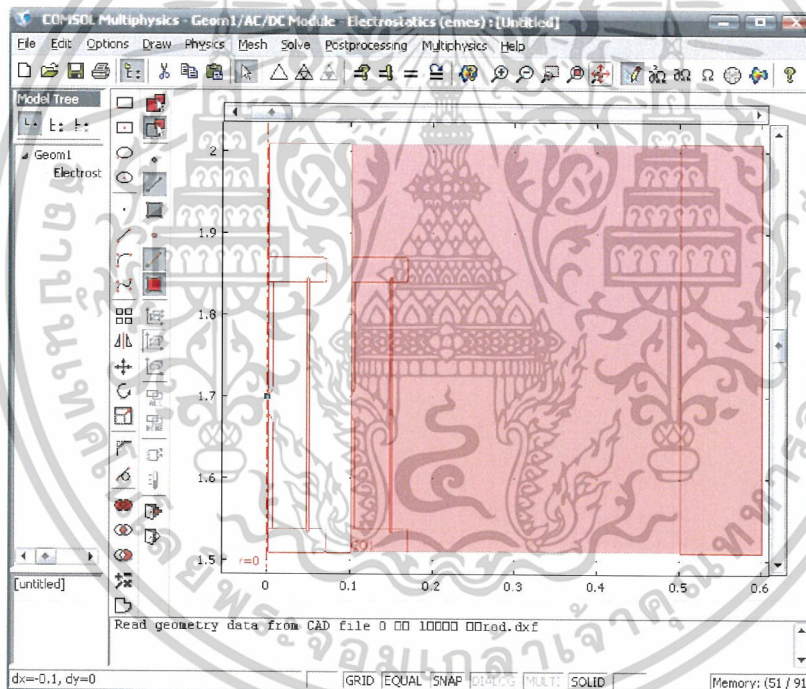
เนื่องจากหน่วยของโมเดลถูกเปลี่ยน เพราะว่าตอนใน AutoCAD เป็นหน่วย mm. แต่พอ Import เข้ามาใน COMSOL 1mm. เท่ากับ 1m. ดังนั้นต้องทำการสเกลเพื่อให้โมเดลมีขนาดเท่ากับตอนที่เราวาดใน AutoCAD ไปที่ Draw > Modify > Scale คลิกแล้วปรับค่าดังรูปแล้วคลิก OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข. 8 ปรับหน่วยที่ต้องการใช้

เนื่องจากภาพจะเล็กลงมากจนมองไม่เห็น ให้คลิกที่ Zoom Extents เสร็จแล้ว เลื่อนให้มาติดกับเส้นสมมาตร ดังรูป

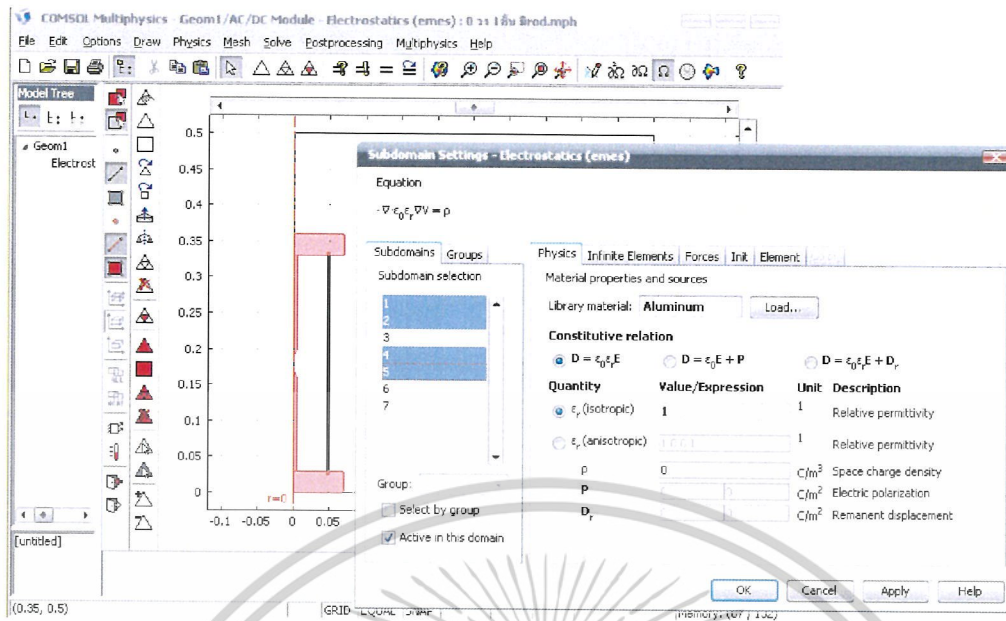


รูปที่ ผ.ข. 9 เลื่อนภาพติดกับเส้นสมมาตร

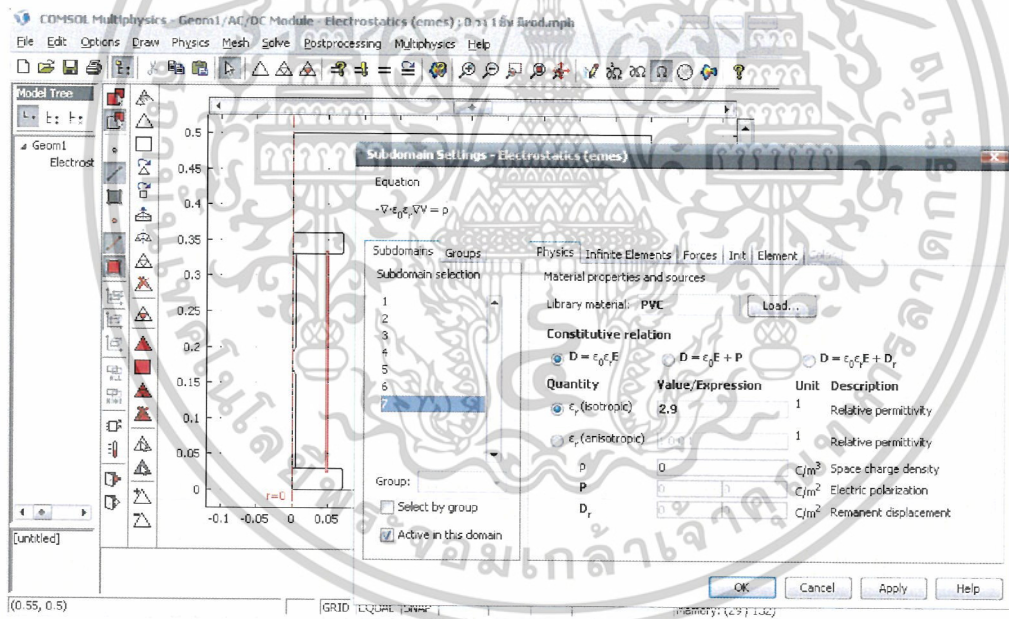
## ขั้นที่ 2 ใส่เงื่อนไขขอบเขตให้กับโมเดล

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไปว่าแต่ละชั้นส่วนคืออะไร โดยการกำหนด material ไปที่ **Physics** > Subdomain Settings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



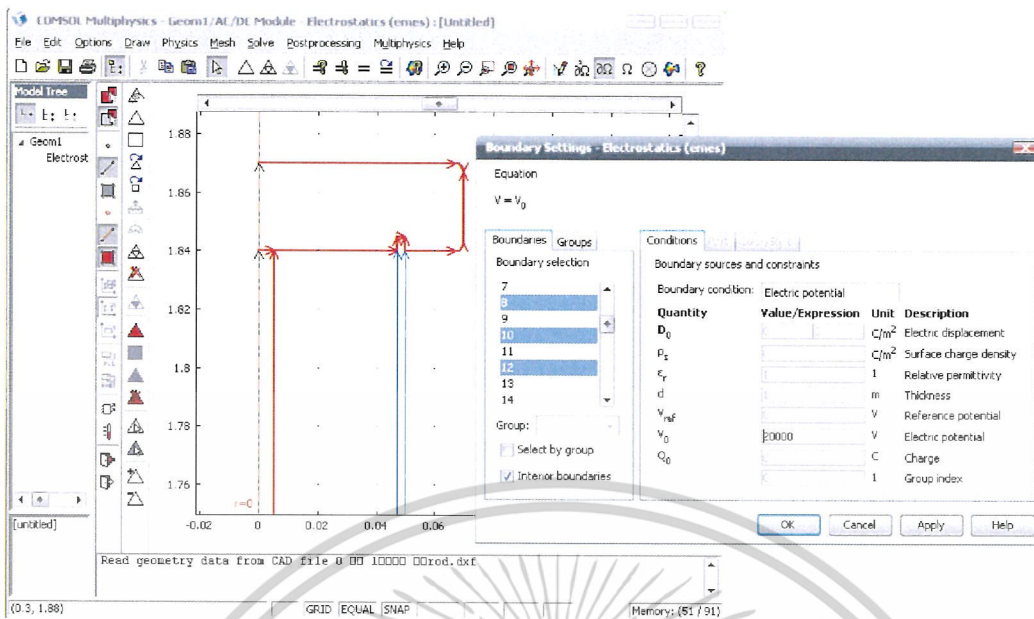
รูปที่ ผ.ข. 10 กำหนดส่วนที่เป็นวัสดุอลูมิเนียม



รูปที่ ผ.ข. 11 ใส่ material PVC

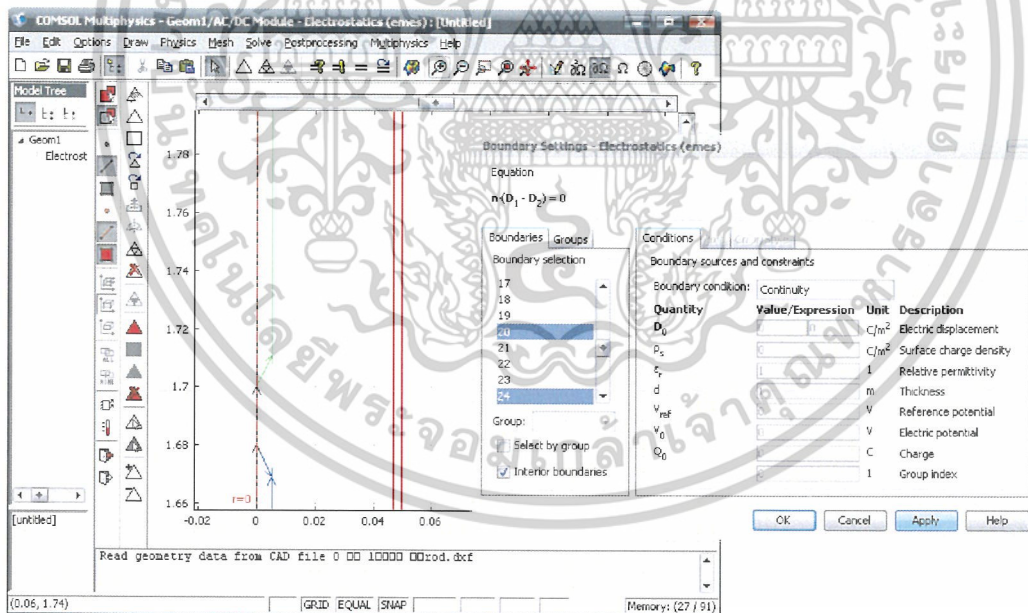
ไปที่ **Physics** > **Boundary settings** และเลือก **Interior boundary** เพราะต้องการกำหนดเงื่อนไขขอบข้างใน แสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



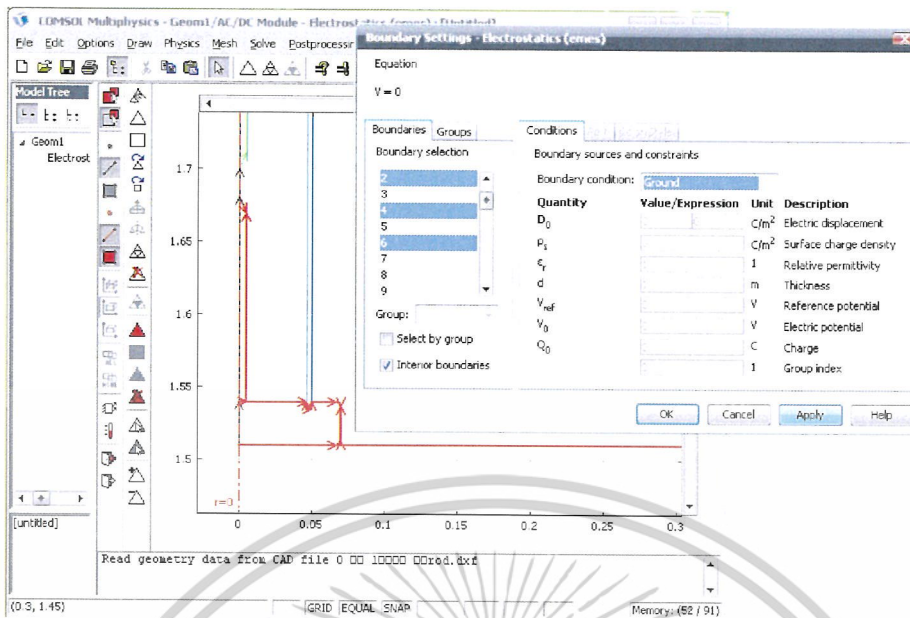
รูปที่ ผ.ข. 12 กำหนดเงื่อนไข Boundary Condition

เลือกส่วนที่เป็น Electric Potential และใส่ค่าแรงดัน 20 kV เสร็จแล้วคลิก Apply

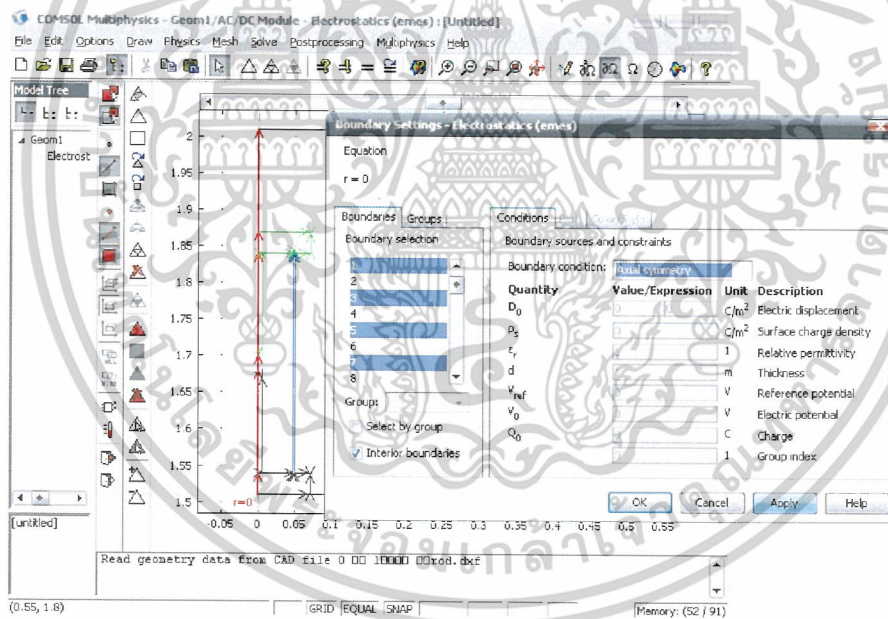


รูปที่ ผ.ข. 13 กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Continuity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

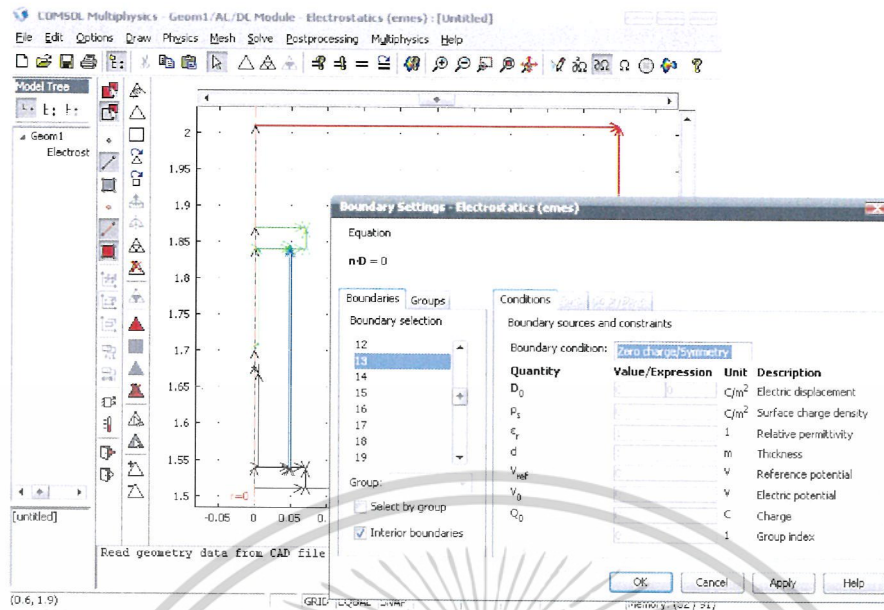


รูปที่ ผ.ข. 14 กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Ground



รูปที่ ผ.ข. 15 กำหนดให้เป็น Axial symmetry

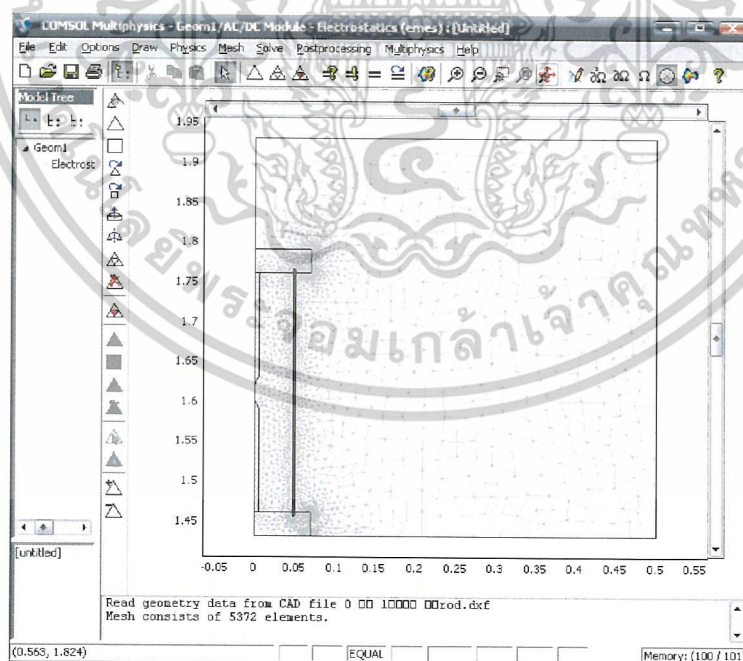
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข. 16 กำหนดเป็น Zero charge

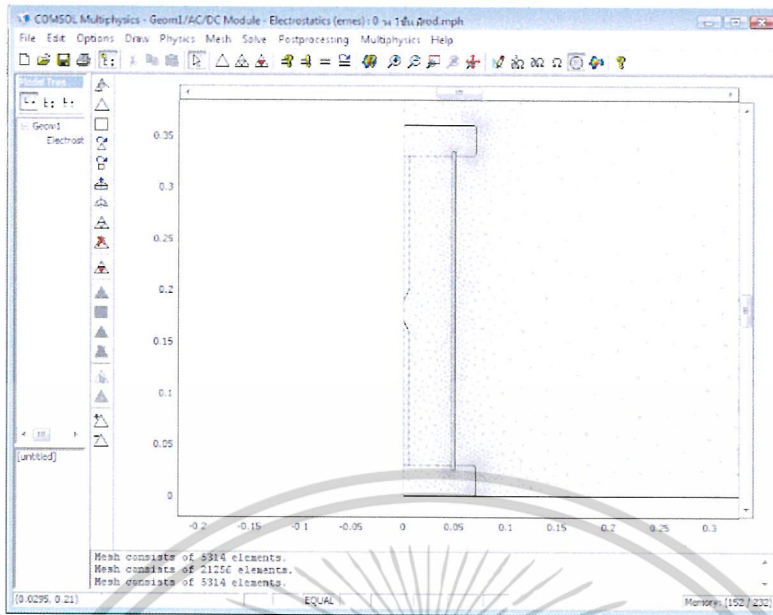
ขั้นที่ 3 กลั่นกรองโดยตาข่าย

ทำการตี Mesh ออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ไปที่ Mesh > Intialize Mesh ถ้าต้องการให้ Mesh เล็กลงอีกให้คลิกที่ Refine Mesh จะแสดงดังรูป



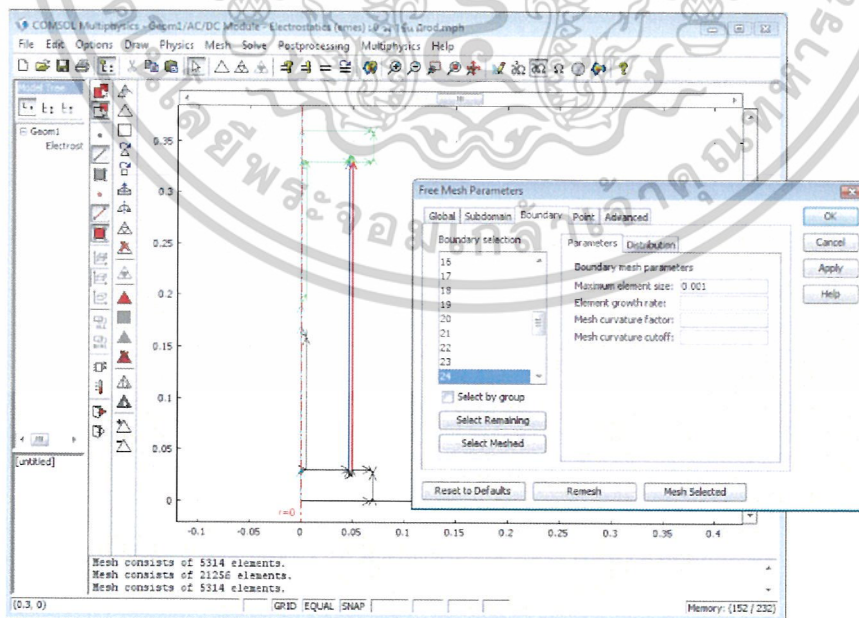
รูปที่ ผ.ข. 17 แบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์ย่อย

คู่มือที่เรานำมาใช้ในที่โครงการนี้จะดูการกระจายแรงดันต้องปรับผิวท่อ PVC ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



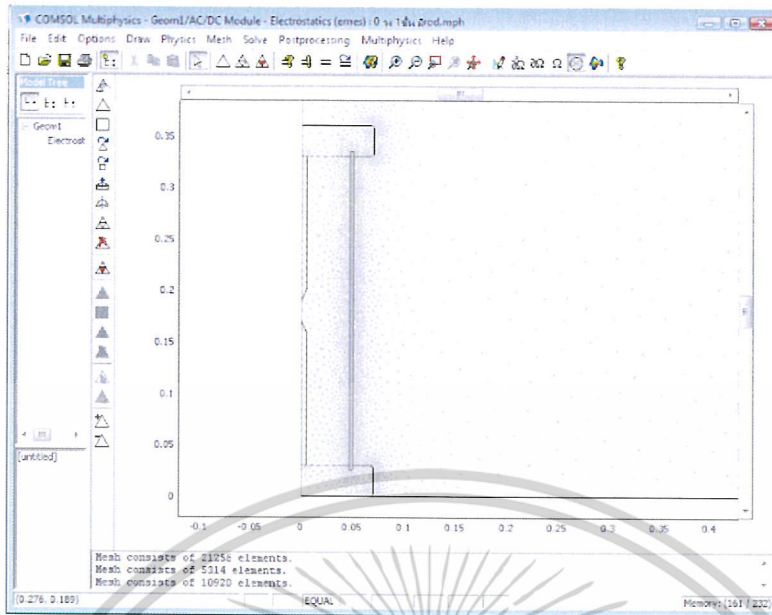
รูปที่ ผ.ข. 18 บริเวณที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

จากรูป Mesh ยังไม่ละเอียด ซึ่งทำให้มีผลต่อคำตอบของการจำลองคือคำตอบจะมี error อยู่ ดังนั้นเพื่อให้คำตอบมีความถูกต้องมากขึ้น ต้องทำการปรับ Mesh บริเวณที่เราสนใจให้ละเอียด ทำการปรับ Mesh บริเวณที่เราสนใจ ไปที่ Mesh > Free Mesh Parameters เลือก Boundary > Parameters กำหนดขนาด Maximum element size ของ Boundary ที่ต้องการ และคลิก Remech ดังรูป



รูปที่ ผ.ข. 19 ลดขนาดของเอลิเมนต์ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

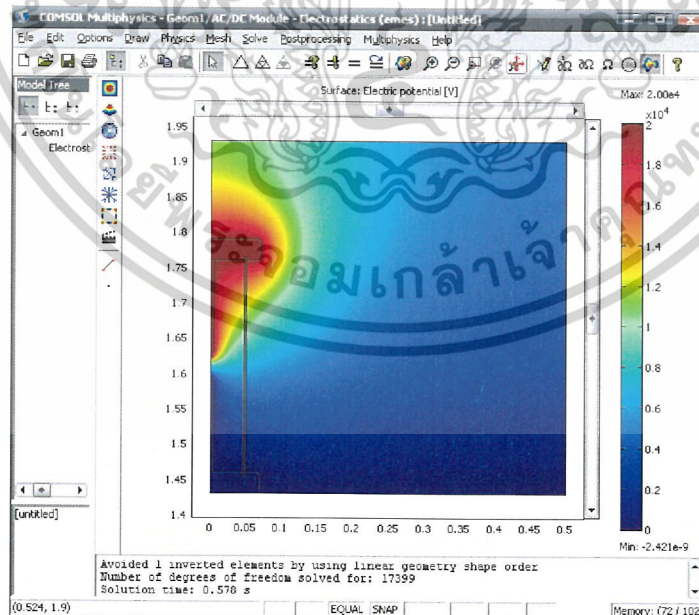


รูปที่ ผ.ข. 20 ชิ้นส่วนเอลิเมนต์ของช่องว่างระหว่างรีดปลายแหลม

จะเห็นว่าบริเวณที่เราสนใจแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างละเอียด

ขั้นที่ 4 การหาคำตอบจากการกำหนดค่า

ไปที่ **Solve > Solve Problem** โปรแกรมจะทำการหาผลเฉลยของโมเดล



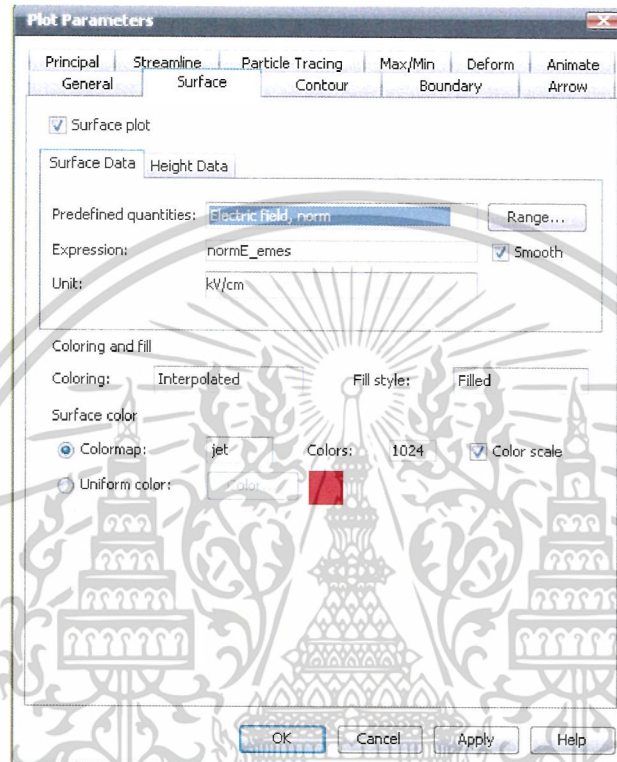
รูปที่ ผ.ข. 21 ผลเฉลยที่คำนวณได้

แถบข้างขวาบ่งบอกสีส้ม คือ ค่า max และสีน้ำเงิน คือ ค่า min (ของ Electric potential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นที่ 5 การเลือกสิ่งที่จะดู

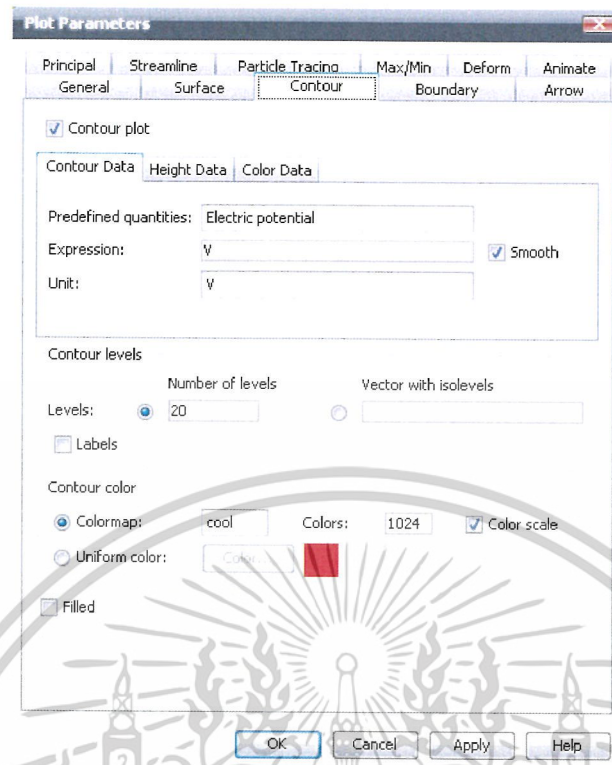
ปรับการแสดงผลให้ Surface แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าและให้ Contour แสดงการกระจายแรงดันไฟฟ้า ไปที่ **Post processing** > Plot Parameters จะแสดงการปรับตั้งรูป



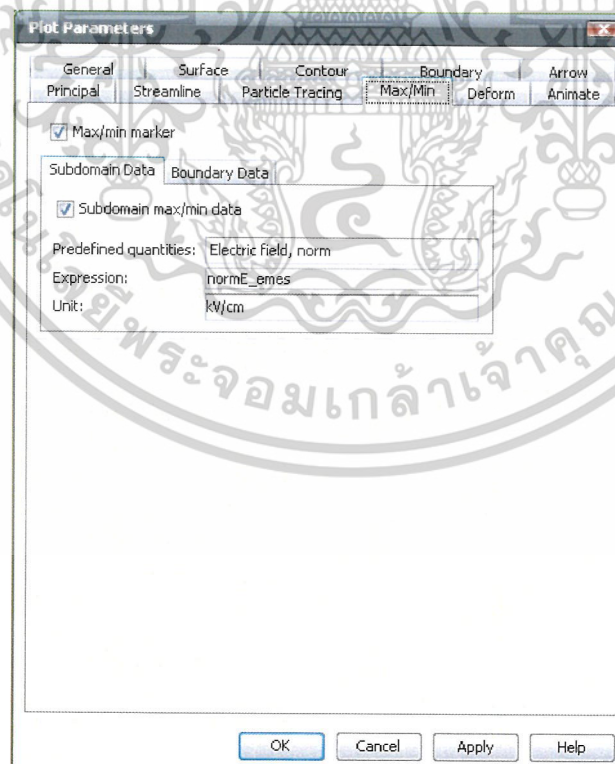
รูปที่ ผ.ข. 22 ในส่วนของ Surface

ปรับการแสดงผลให้ Surface แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าและให้ Contour แสดงการกระจายแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

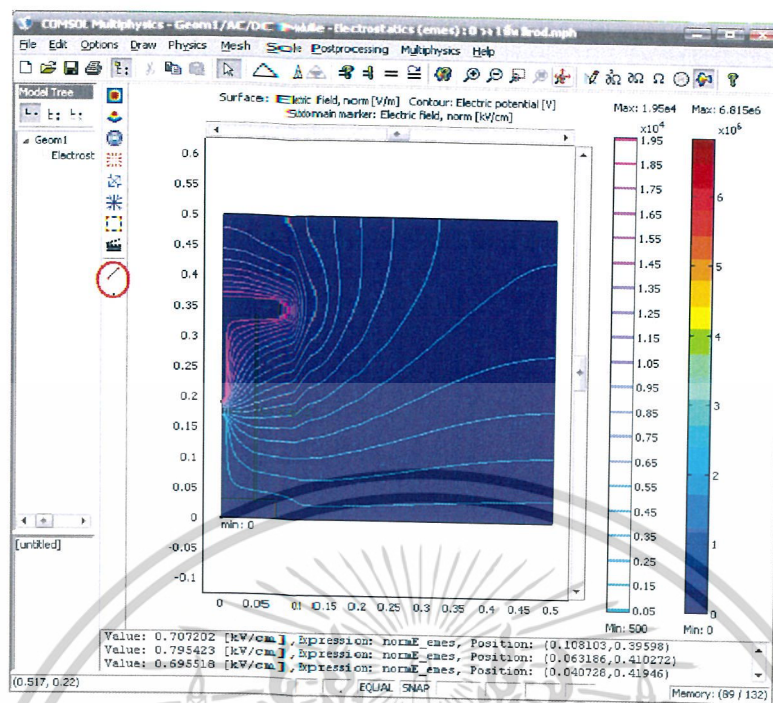


รูปที่ ผ.ข. 23 ตี๊กเครื่องหมายลูกที่ Contour plot



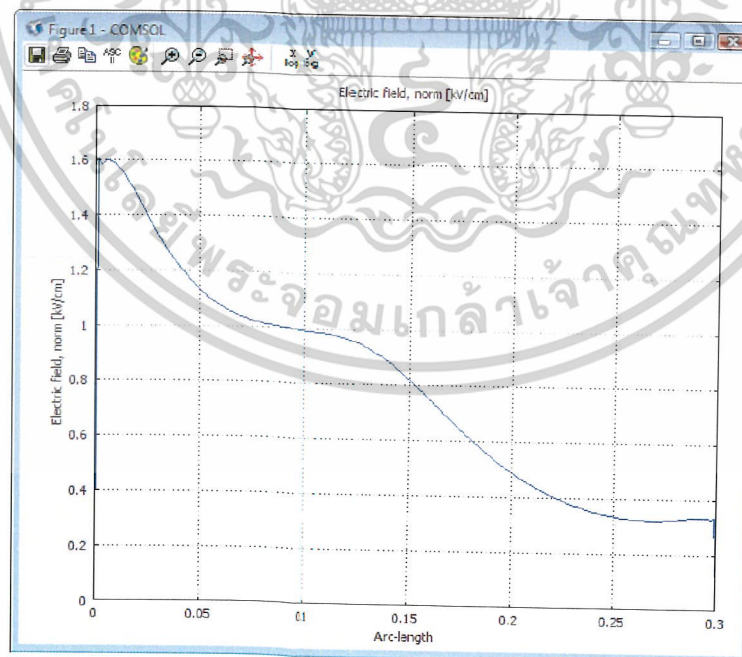
รูปที่ ผ.ข. 24 แสดงค่า max, min ของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข. 25 แสดง Surface และค่า max, min

คลิก Draw Line for Cross-Section LinePlot แล้วคลิกที่กราฟ เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความยาวกับค่า Electric field, norm [kV/cm]



รูปที่ ผ.ข. 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Arc-length กับค่า Electric field, norm [kV/cm]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้