



การศึกษาวิธีการควบคุมสนามไฟฟ้า

โดย

ภูชิต

ถึงสุข

สนับสนุนงบประมาณโดย

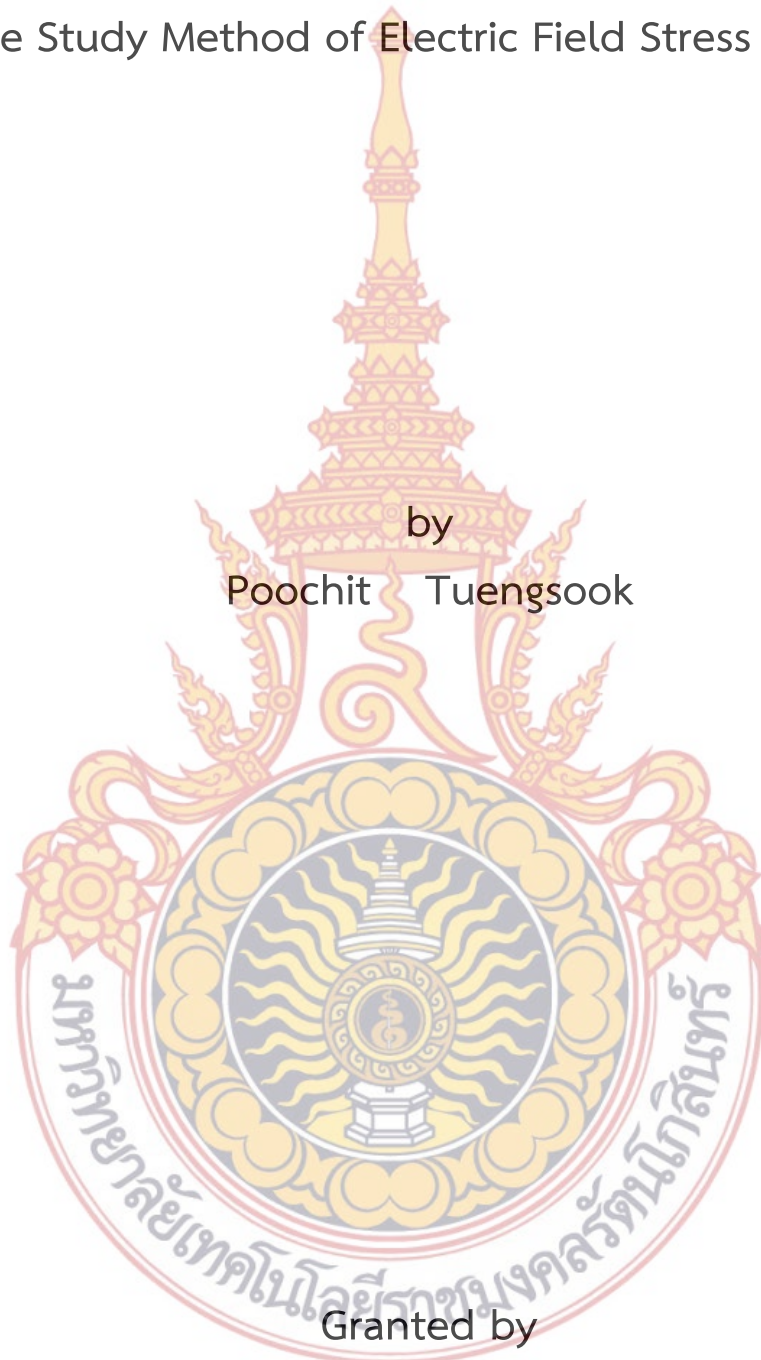
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2556

The Study Method of Electric Field Stress Control

by

Poochit Tuengsook



Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2013

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผ.ศ.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างซึ่งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณนายวิรัตน์ ชูจันทร์ นายธำนิษฐ์ ไม้ขาด ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความสะดวกในการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัตถุทดสอบในงานวิจัยนี้ และสุดท้ายขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย รวมทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



ภูษิต ถึงสุข
ธันวาคม 2556

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : Inno021/2556

ชื่อโครงการ : การศึกษาวิธีการควบคุมสนามไฟฟ้า

ชื่อนักวิจัย : นายภูชิต ถึงสุข

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาวิธีการลดความเครียดสนามไฟฟ้าของวัตถุทดสอบทรงกระบอกที่ถูกใช้งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยวิธีการใส่โครนาซีลด์ที่ตำแหน่งต่างๆ บนวัตถุทดสอบ เพื่อช่วยในการกระจายแรงดันไฟฟ้าและลดความเครียดสนามไฟฟ้าให้ต่ำลงเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้วัตถุทดสอบเป็นท่ออะคริลิกใสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ท่อยาว 30 cm หนา 0.3 cm ใช้ฉนวนเคลือบโครนาซีลด์ และแท่งรีดปลายแหลมเป็นอะลูมิเนียม ลักษณะการกระจายของแรงดัน และความเข้มของสนามไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ก่อนทำการทดสอบจริง จากผลการทดลองจะพบว่ากรณีท่อ 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้นการใส่โครนาซีลด์จะทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่ากรณีไม่ใส่ กรณีท่อ 3 ชั้นใส่โครนาซีลด์ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงกว่าท่อ 1 ชั้นและ 2 ชั้น และการใส่โครนาซีลด์ในตำแหน่งกลางจะทำให้มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าแบบอื่นเมื่อเทียบกับแบบ 3 ชั้นที่ออกแบบ

คำสำคัญ : โครนาซีลด์, ไฟไนต์อีลิเมนต์

E-mail Address : poochit.tue@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2556

Abstract

Code of project : Inno 021/2556

Project name : The Study Method of Electric Field Stress Control

Researcher name : Mr.Poochit Tuengsook

This research present about the study methods to reduce the electric field stress in the cylindrical shape tested object which is mostly used in high voltage. These methods are to put corona shield in each position on the model and to separate the layers and put electrode between the layers in order to distribute voltage and decrease electric field to reduce the risk of the high voltage device breakdown. The study of this research uses acrylic tube that has diameter of 10 cm, length of 30 cm, and thickness of 0.3 cm. It also uses electrode corona shield and sharp rod tip as Aluminum. The way in which the voltage gets distributed and the density of the electric field of the tested object will be analyzed by finite element program before the real test. The result of the experiment suggested that in the case of one – two –and three layer tube, the presence of corona shield increased breakdown voltage value more than the absence of corona shield. In the case of three layers tube, the corona shield resulted in a higher breakdown voltage value than in one and two layer tube. Also, when corona shield was being positioned on the middle layer in the case three layer, the breakdown voltage value is lower than three layer models

Keywords: corona shield, finite element

E-mail Address : poochit.tue@rmutr.ac.th

Peroid of project : October 1st 2012 – September 30th 2013

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์การวิจัย	1
3. ขอบเขตการวิจัย	2
4. วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1. สนามไฟฟ้า	3
2. การเบรกดาวน	5
3. การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในก๊าซ	7
4. โควิด	9
5. วิธีลดการเกิดปรากฏการณ์โควิด	10
6. ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น	11
บทที่ 3 การออกแบบวัตถุทดสอบ	16
1. การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	16
2. การออกแบบโควิดชิลด์	17
3. การออกแบบวัตถุทดสอบ	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	22
1. การทดสอบแรงดันเบรกดาวน ของวัตถุทดสอบแต่ละแบบ	22
2. การทดลองการกระจายแรงดันไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบรูปทรงกระบอก	31
3. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	34
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	43
1. สรุปผลการวิจัย	43
2. การอภิปรายผล	43
3. ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ	43
บรรณานุกรม	44

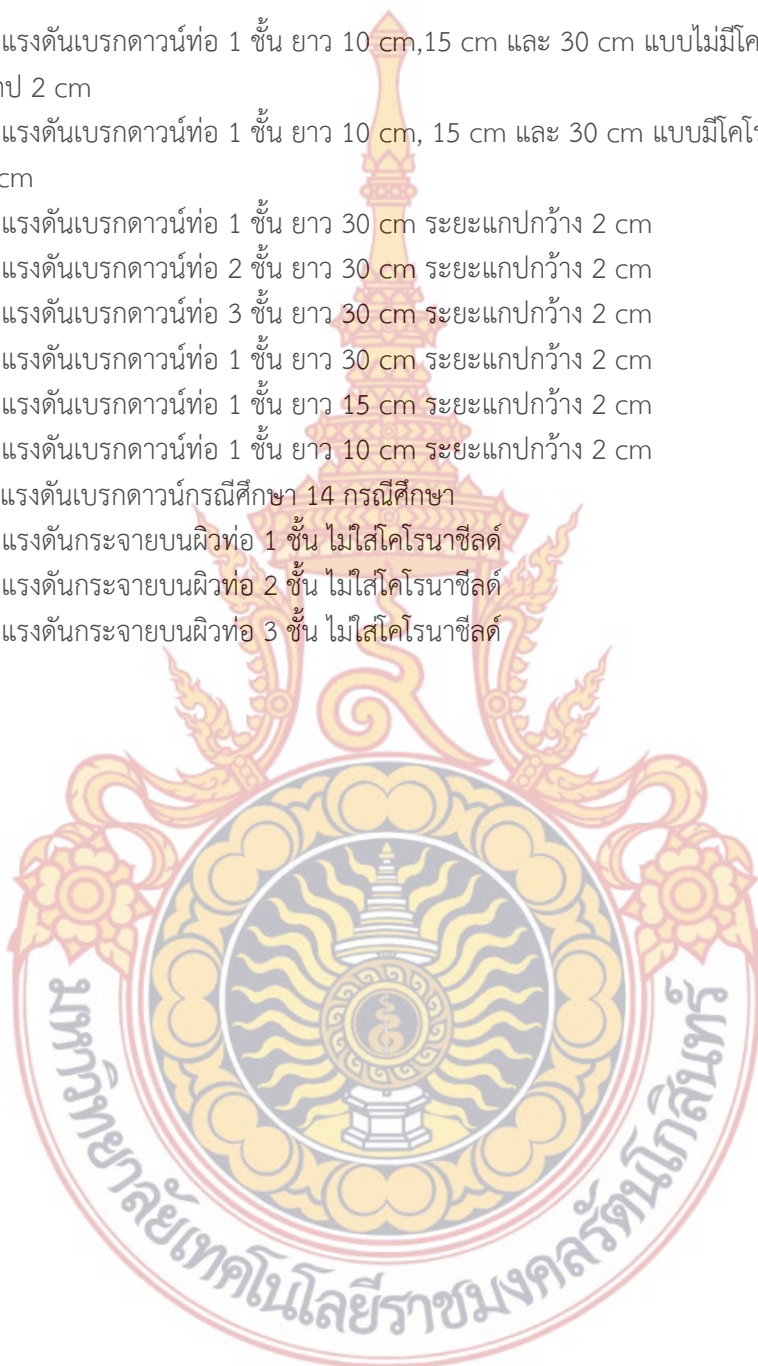
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก โปรแกรม COMSOL ที่ใช้ในการวิเคราะห์	46
ภาคผนวก ข งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	62
ประวัติผู้วิจัย	68



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 10 cm, 15 cm และ 30 cm แบบไม่มีโคโรนาซีลด์ระยะ แกป 2 cm	23
2	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 10 cm, 15 cm และ 30 cm แบบมีโคโรนาซีลด์ระยะแกป 2 cm	24
3	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	25
4	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 2 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	26
5	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 3 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	27
6	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	28
7	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 15 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	29
8	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่อ 1 ชั้น ยาว 10 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm	29
9	ค่าแรงดันเบรกดาวนัท่กรณีศึกษา 14 กรณีศึกษา	30
10	ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 1 ชั้น ไม่ใส่โคโรนาซีลด์	33
11	ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 2 ชั้น ไม่ใส่โคโรนาซีลด์	33
12	ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 3 ชั้น ไม่ใส่โคโรนาซีลด์	33



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	3
2-2	5
2-3	6
2-4	6
2-5	8
2-6	11
2-7	12
2-8	14
2-9	14
3-1	16
3-2	16
3-3	17
3-4	18
3-5	18
3-6	20
3-7	21
4-1	22
4-2	24
4-3	25
4-4	26
4-5	27
4-6	28
4-7	29
4-8	30
4-9	31
4-10	32
4-11	33
4-12	34
4-13	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-14 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก 3 ชั้น	35
4-15 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์	35
4-16 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์	36
4-17 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์	36
4-18 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน	37
4-19 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง	37
4-20 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน-กลาง	38
4-21 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์	38
4-22 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน	39
4-23 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง	39
4-24 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน - กลาง	40
4-25 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์ล่าง	40
4-26 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน - ล่าง	41
4-27 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง - ล่าง	41
4-28 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มีโคโรนาซีลด์บน-กลาง-ล่าง	42



บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์ในปัจจุบัน ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้งานก็มีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้มีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นมา บ่อยครั้งใช้เพื่อในกระบวนการทดสอบกับวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันสูง ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันสูงจึงจำเป็นต้องมีความคงทนต่อระดับแรงดันที่ใช้งานได้ โดยที่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีผลต่อความคงทนต่อการฉนวนเป็นอย่างมาก บริเวณใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง บริเวณนั้นจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า การลดค่าความเครียดก็มีหลายวิธีการด้วยกัน อาทิ เช่น การลดขอบคมปลายแหลมของอุปกรณ์ทดสอบ การใส่โคโรนาซิลด์ที่อุปกรณ์ทดสอบ และการแบ่งอุปกรณ์ทดสอบออกเป็นชั้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการลดความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการวางตำแหน่งโคโรนาซิลด์ในตำแหน่งต่างๆ ให้เหมาะสม และวิธีการแบ่งวัสดุทดสอบออกเป็นชั้น เพื่อช่วยในการกระจายสนามไฟฟ้า และยังสามารถช่วยลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าความคงทนของการฉนวน และยังเป็นการช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีด้วยกัน แบ่งได้ 3 ประเภท คือ วิธีทางการทดลอง วิธีทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ และวิธีเชิงเลข ปัจจุบันได้มีการนำโปรแกรม (Finite Element Method) มาใช้แก้ปัญหาด้านสนามไฟฟ้า เป็นเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าคำตอบที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรม ซึ่งจะทำให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป งานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเอาวิธีการเชิงเลขมาทำการวิเคราะห์รูปแบบและค่าการกระจายสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวน ก่อนที่จะทำการตรวจสอบด้วยวิธีการทดลองจริงซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นต่อพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองและศึกษาทางทฤษฎี

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนวัสดุทดสอบ
2. เพื่อศึกษาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่ซึ่งนำมาสู่การเบรกดาวน์ในวัสดุ
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบนวัสดุทดสอบ
4. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่อาจจะมีการดำรงชีวิตของมนุษย์

3. ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาวิธีการคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวน์จากการกระจายของสนามไฟฟ้า ที่ได้จากการจำลอง ออกแบบวัตถุทดสอบเพื่อใช้ในการศึกษาเรื่องการกระจายสนามไฟฟ้าและการเกิดเบรกดาวน์ ทำการศึกษาการกระจายสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบ เปรียบเทียบกับการทดลองจริง และศึกษาถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่อาจจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ประชุมทีมงานวิจัยเพื่อวางแผนการทำงานวิจัย
2. ทีมงานวิจัยร่วมกันศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า การลดความเครียดสนามไฟฟ้า การกระจายของสนามไฟฟ้าและการควบคุมสนามไฟฟ้า
3. ทีมงานวิจัยร่วมกันออกแบบอุปกรณ์ลดความเครียดสนามไฟฟ้า
4. จัดสร้างและประกอบอุปกรณ์ลดความเครียดสนามไฟฟ้า
5. ทีมงานวิจัยร่วมกันศึกษาออกแบบการทดลอง เพื่อทดสอบอุปกรณ์ลดความเครียดสนามไฟฟ้า
6. ทำการทดลองและประเมินผลการทดลอง
7. สรุปและเขียนรายงานผลการวิจัย

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สามารถประมาณค่าการเกิดเบรกดาวน์ของวัตถุทดสอบได้
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้
3. สามารถใช้ข้อมูลผลการศึกษาดทดลองที่ได้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในอนาคตได้
4. ทราบถึงผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสามารถหาวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าได้
5. สามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ได้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

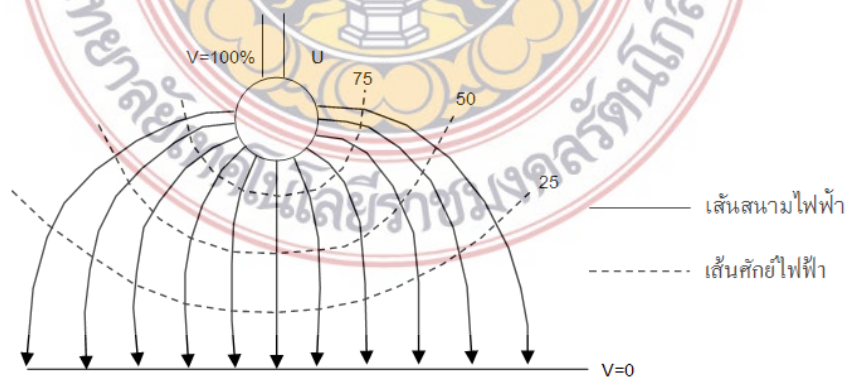
1. สนามไฟฟ้า [1],[2],[3],[4]

สนามไฟฟ้า หมายถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของ Dielectric materials เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly nonuniform field) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นศักย์เท่าจะได้ ดังภาพที่ 2-1 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

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



ภาพที่ 2-1 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม

ภาพที่ 2-1 อิเล็กโตรดแบบนี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า “กระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ(2.10) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการ (2.10) ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการ (2.10) 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)

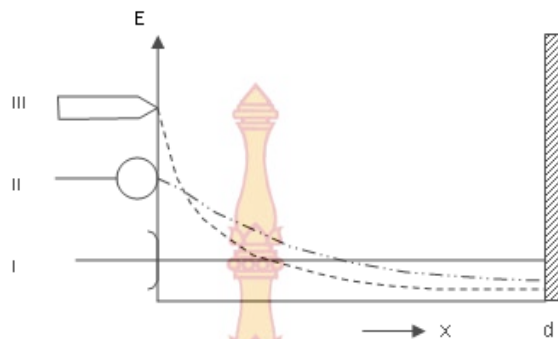
โดยที่ E_{\max} และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.3) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวคือ สมการ (2.3) นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage *, threshold voltage, inception voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นแรงดันเบรกดาวน์ (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียง เล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

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

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



ภาพที่ 2-2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

2. การเบรกดาว์น

การเบรกดาว์น หมายถึง การที่เราป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆหนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่จะทนแรงดันไฟฟ้านั้นๆได้ จึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้นๆไหม้ไหมว จึงเกิดการเบรกดาว์นไปในที่สุด การเบรกดาว์นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นถ้าแบ่งการเบรกดาว์นตามชนิดของฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว จะแบ่งออกได้ 3 แบบคือ

1. การเบรกดาว์นในก๊าซ (Breakdown in gas)
2. การเบรกดาว์นในของเหลว (Breakdown in Liquid)
3. การเบรกดาว์นในของแข็ง (Breakdown in solid)

ในโครงการฉบับนี้จะขออธิบายแค่การเบรกดาว์นในอากาศหรือก๊าซเท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีการเบรกดาว์นในของแข็ง และ ของเหลว ที่ชัดเจน

2.1. การเบรกดาว์น ในก๊าซ (Breakdown in gas)

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่ง สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีการดิซชาร์จเกิดขึ้นซึ่งก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชัน โดยการไอออไนเซชัน จะเกิดขึ้นได้ต้องมีสนามไฟฟ้ามากระตุ้นให้อนุภาคประจุมีพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เป็นประจุอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนกับโมเลกุลจนเกิดกระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ รวมทั้งอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากผิวอเล็กโตรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนมากพอที่จะทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาว์น การดิซชาร์จเบรกดาว์นในช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. เบรกดาว์นสมบูรณ์ Complete Breakdown คือการเกิดเบรกดาว์นตลอดแถบเชื่อมโยงระหว่างอเล็กโตรด เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาว์นสมบูรณ์นี้ว่า แรงดันเบรกดาว์น U_b (Breakdown Voltage)

2. เบรกดาว์นเพียงบางส่วน (Partial Breakdown) คือ การเกิดเบรกดาว์นไม่สมบูรณ์ จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะเกิดก่อนเบรกดาว์นแบบสมบูรณ์เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันเริ่มเกิด U_i (Inception Voltage)

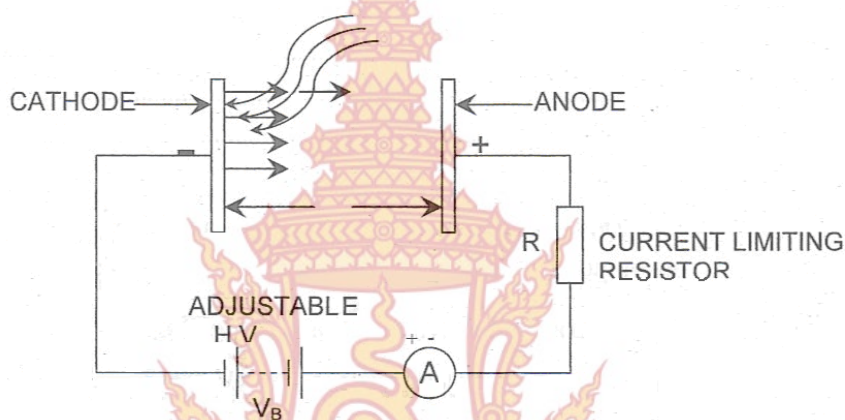
2.2. กลไกการเบรกดาวน มีอยู่ 2 วิธี คือ

1. กลไกการเบรกดาวนของ Townsend ซึ่งจะใช้ในการอธิบายการพัฒนาของประจุ electron จนกระทั่งเกิดเป็นกลุ่มประจุ เคลื่อนที่จาก Electrode หนึ่งไปยัง Electrode หนึ่ง

2. กลไกการเบรกดาวน แบบ **Streamer** ใช้ในการอธิบายการก่อตัวประจุที่เป็นกลุ่มก้อน และแผ่กระจายขยายไปจนกระทั่งถึง Electrode ทั้งสองขั้ว

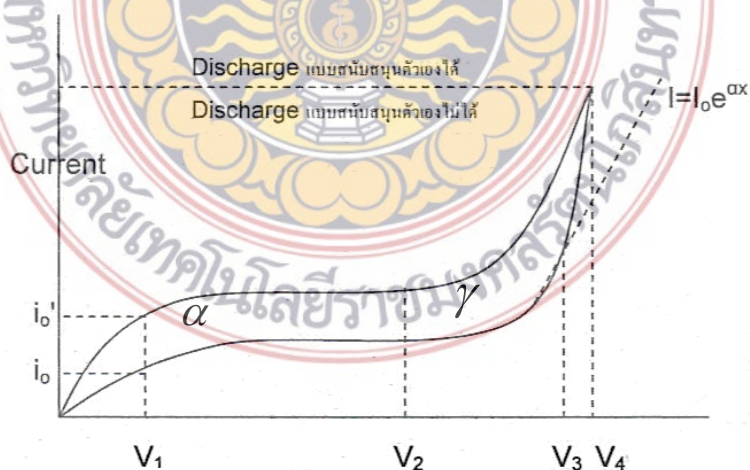
1. กลไกการเบรกดาวนของ Townsend

Townsend ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่าง Electrode แบบระนาบ วางขนานกัน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2-3 วงจรศึกษาการทดลองของ Townsend

จากการทดลองของ Townsend เมื่อทำการเพิ่มแรงดัน V_B ซึ่งตกคร่อมอิเล็กโทรดทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ระหว่างอิเล็กโทรดจากนั้นทำการยิงรังสี UV เข้าไปที่ อิเล็กโทรดขั้วลบจนอิเล็กตรอน หลุดออกจากอิเล็กโทรดขั้วลบแล้วเคลื่อนที่ไปหาขั้วบวกจากนั้นเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างมากจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวนในที่สุด



ภาพที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า V_B กับกระแสก่อนเกิดการเบรกดาวน

จากกราฟจะพบว่าในช่วงแรก กระแสจะเพิ่มเป็นสัดส่วนกับแรงดัน V_B เมื่อทำการเพิ่ม V_B ขึ้น จาก V_1 ถึง V_2 กระแสจะอิ่มตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งไปอะโนดหมด ถ้าเพิ่มแรงดันจนถึง V_3 กระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential เมื่อเพิ่มแรงดันจนถึง V_4 จะเกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากการไอออไนเซชันของก๊าซชนกัน และเส้นกราฟ 2 เส้นเกิดจากการป้อนรังสี UV ที่มีความเข้มไม่เท่ากัน

จะได้สมการกระแสที่ไหลผ่าน อากาศระหว่างอิเล็กโทรดเป็น

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

เงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซของ Townsend เมื่อมีกระแสเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์

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

2. กลไกการเบรกดาวน์แบบ Streamer

เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานซ์ (formative time) ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าฟ้าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด T_c เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ หรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแคโทดไปอะโนด โดยไม่ชนกับโมเลกุลใดเลย ก็ยังใช้เวลานานกว่าเวลาคลื่นตัดต่อมา Meek, Loeb และ Rather ได้เสนอ ทฤษฎีกลไกการเบรกดาวน์แบบ Streamer ขึ้น โดย Meek กับ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (positive streamer) ส่วน Rather ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ (negative streamer)

1) Meek, Loeb กล่าวว่า สตรีมเมอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง ไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์ มีค่าประมาณเท่าๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2) Rather กล่าวว่า สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออไนเซชัน e^{cd} ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ หรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

3 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในก๊าซ

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมี 2 แบบคือ เบรกดาวน์โดยตรง กับ เบรกดาวน์แบบโคโรนา การเบรกดาวน์โดยตรงจะเกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ส่วนการเกิดเบรกดาวน์แบบโคโรนา จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งเป็นลักษณะเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์คำนวณไม่ได้ แต่คำนวณค่าแรงดันเริ่มเกิดได้ การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ในก๊าซ จะอาศัยเงื่อนไขเบรกดาวน์ตามทฤษฎีทาวน์เซนด์ หรือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ ซึ่งกล่าวรวมได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้นั้นจะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกในอะวาลานซ์ถึงค่าวิกฤต อะวาลานซ์อิเล็กตรอนได้จากการอินทิเกรต $\int adx$

3.1 กรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

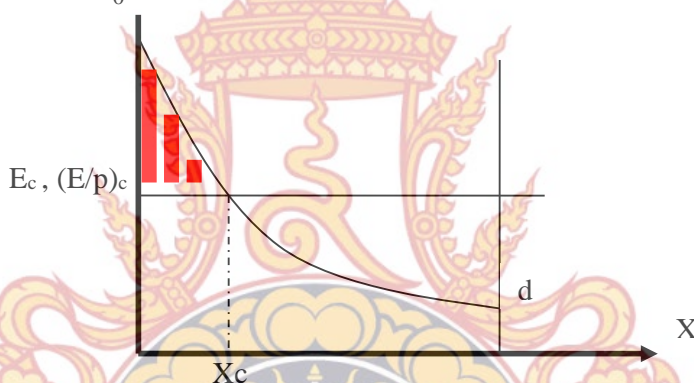
ตามเงื่อนไขของทาว์นเซนต์ คือ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขของ Rother คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c จะได้อะวาลานซ์วิกฤตเป็น

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

3.2 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เมื่อ α เป็นฟังก์ชันของ $E(x)$ และความดัน P จึงเขียนสมการได้ใหม่เป็น

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



ภาพที่ 2-5 แสดงระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

3.3 กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (α)

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

$$\frac{\alpha}{P} = C \left[\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - A \quad (2.9)$$

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

จากนั้นแทนค่า $\bar{\alpha}$ ลงในสมการ $\int_0^s \alpha dx = K \quad (2.10)$

จะได้
$$\int_0^s \left[PC \times \left[\frac{TE_n}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \right] dx = K \quad (2.11)$$

$$PC \sum_{n=1}^{1499} B_n \left[\frac{TE_n}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_M \right]^2 - AP \sum_{n=1}^{1499} B_n = K \quad (2.12)$$

$$U_i = U_0 \times T \quad (2.12)$$

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/kV² (ค่าคงที่ที่ชุ่มมันน์)

$(E/P)_M$ = 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)

4 โครนา (CORONA)

โคโรนา เป็นชื่อปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นบนตัวนำไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การเกิดโคโรนาเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอย่างหนึ่งของระบบโดยกำลังไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แสง เสียง เคมี และแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะส่งผลเสียที่เห็นได้ชัดเจน 2 ประการ คือ สูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบไปโดยเปล่าประโยชน์ การเกิดคลื่นแทรกและรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุ

4.1 ปรากฏการณ์โคโรนา

เมื่อความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรด มีค่ามากเพิ่มขึ้นกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่งจะได้ยินเสียงความถี่สูงปรากฏออกมา ซึ่งเป็นการแตกตัวของอากาศที่เรียกว่า ขบวนการแตกตัวของก๊าซ (ionization of gases) ซึ่งจะมีไอออนและกรดไนโตรัสเกิดออกมา เมื่อความต่างศักย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นไปอีก เราจะเห็นปรากฏการณ์ แสงสีม่วงเรืองแสงรอบๆตัวนำเป็นจุดๆตลอดความยาว แสงเรืองนี้

จะปรากฏให้เห็นชัดเจนบริเวณที่มีความขรุขระหรือสกปรกมาก พร้อมกันนั้นจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปบริเวณสัญญาณคลื่นวิทยุด้วย และถ้าแรงดันนั้นมีขนาดมากขึ้นไปอีกจะเกิดการสปาร์ค (spark) หรือเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) ขึ้นทั้งหมดนี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์โคโรนา" ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา มีอยู่ 2 อย่างคือ

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

เป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้เริ่มเกิดขบวนการแตกตัวของอากาศ อันเนื่องมาจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในอากาศได้รับผลจากความเข้มนานไฟฟ้า ทำให้เกิดพลังงานจลน์วิ่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระและไอออนขึ้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางเสียงโดยยังไม่มีแสงให้เห็น

- 4.3 แรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็น (visual critical voltage)

เป็นค่าระดับหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าวิกฤติที่สูงกว่าค่าแรก และทำให้อากาศชั้นรอบนอกออกไปแตกตัวต่อไป ด้วยผลจากการที่โมเลกุลได้รับพลังงานจลน์จากการชนของอิเล็กตรอนอิสระ จะทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลแตกตัวหลุดออกไป และวิ่งไปชนโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าอิเล็กตรอนบางตัวของโมเลกุลไม่สามารถแตกตัวออกไปได้ โมเลกุลนั้นก็จะมีอยู่ในสภาวะไม่เสถียร (meta stable state) และเมื่ออิเล็กตรอนคืนกลับสู่วงโคจรในสภาวะเดิม โมเลกุลก็จะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับคืนกลับมาในรูปพลังงานโฟตอน (photon) ที่เป็นพลังงานแสง ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาในสภาวะที่อำนาจ ดังนั้นเราจะมองเห็นแสงเรืองรอบสายตัวนำ

ถ้าระดับแรงดันไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าวิกฤติมองเห็นนี้ขึ้นไปอีก อาจทำให้อากาศรอบตัวนำแตกตัวได้หมดต่อเนื่อง เป็นผลให้อากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านข้ามอากาศได้ ซึ่งอาจจะเป็นลำแสงสว่างมาก เรียกว่า การวาบไฟตามผิว นั่นเอง

- 4.4 การเบรกดาวนที่ผิว

เบรกดาวนที่ผิวเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า จากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโทรดหนึ่งไปตามผิวของฉนวนไฟฟ้าที่กั้นระหว่างอิเล็กโทรด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนที่ผิวฉนวนไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความยาวและ ลักษณะของผิว เช่น ความสกปรก การเกาะตัวของเกลือ และความชื้นของผิว ซึ่งจะส่งผลให้ค่าแรงดันเบรกดาวนลดลง

5 วิธีลดการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา

1. ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างโคโรนาซิลด์ ต้องศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อหาชนิดที่เหมาะสม นำมาสร้างเป็นโคโรนาซิลด์โดยคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา เช่น ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าความเป็นฉนวน เป็นต้น

2. รูปทรงต่างๆ ของโคโรนาซิลด์ ที่สามารถกระจายความเข้มนานไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ให้ไปเกิดที่จุดๆเดียว

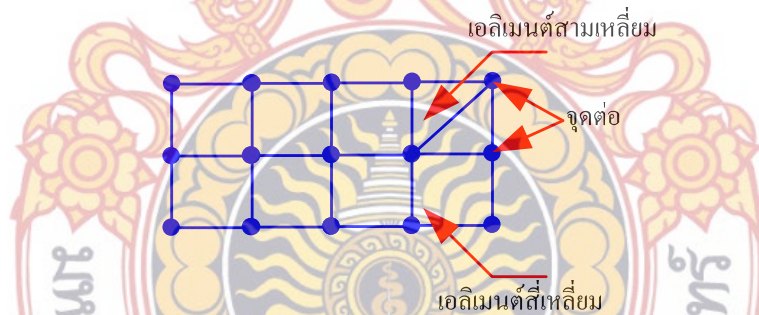
3. ลักษณะของพื้นที่ผิวของโคโรนาซิลด์ พื้นที่ผิวที่ขรุขระจะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าผิวเรียบ

4. ตำแหน่งการวางของโคโรนาซิลด์ การวางตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิด โคโรนาได้อย่างมาก ควรวางไว้ใกล้กับจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เช่นบริเวณขอบคม หรือปลายแหลม เป็นต้น

6 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น [6]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์ ทางด้านพลศาสตร์ และสนามไฟฟ้า รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ที่จุดตัดของเส้นกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า “จุดต่อ” (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ (อุณหภูมิ ความเค้น ความเร็ว ฯลฯ) ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กัน โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ แทนที่จะแก้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าจะหาคำตอบได้ครบทุกจุด



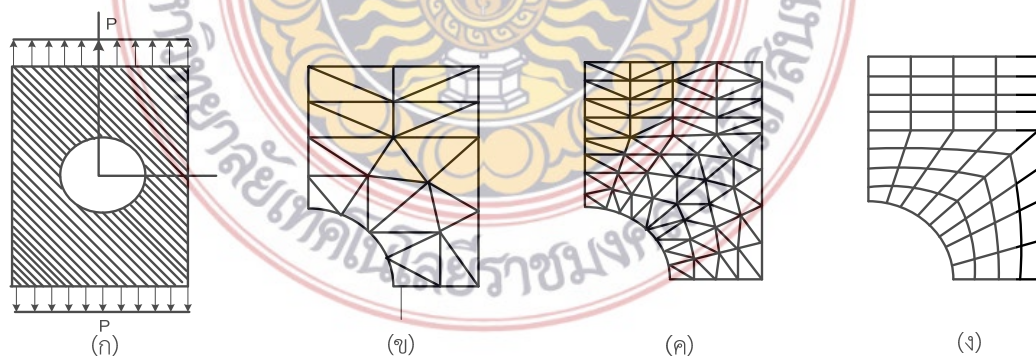
ภาพที่ 2-6 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และ โครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิธีวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลันหรือ ใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น ภาพที่ 2-6 เราเรียกชิ้นส่วนย่อยๆ นี้ว่า เอลิเมนต์ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบ เช่นวิธีทั่วๆ ไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบเช่น ในระบบโครงสร้าง เราจะหาการกระจัด และความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ

6.1 หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างกันตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กันดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นวัสดุในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 การแบ่งเอลิเมนต์แบบต่างๆ ภายในวัสดุ

วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขของขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด และ จำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น นอกจากนั้นความแม่นยำของผลเฉลยก็ยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานั้น มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง เป็นต้น ส่วนขนาดของฟังก์ชันการประมาณภายในจะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่นหากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และหากเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้ว อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

FEM หรือ Finite Element Method เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หาค่าตอบสมการเชิงอนุพันธ์ 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
- 6.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาคด้วย FEM

1. ระบุ และทำความเข้าใจกับปัญหาให้ชัดเจน ปัญหาที่มีมิติ , 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

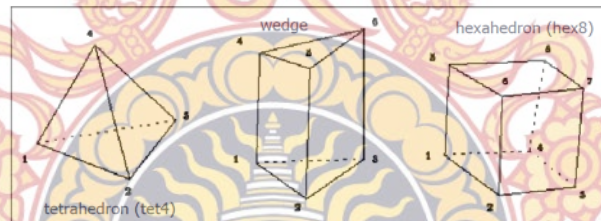
6. กำหนดค่า material property โดยต้องรัดกุมเกี่ยวกับหน่วยของปริมาณ
7. กำหนด boundary condition
8. หาคำตอบโดยใช้โปรแกรม FEM
9. ทำการแปลความหมายผลลัพธ์ ตรวจสอบความถูกต้อง visualization ก่อนนำข้อมูลไปใช้งาน Analysis/design

6.3 เอลิเมนต์

เอลิเมนต์ หมายถึง หน่วยย่อยของรูปเรขาคณิตที่เป็นโดเมนของปัญหา บางครั้งอาจเรียกว่า Mesh หรือ Grid ซึ่งในวิธี FEM จะแยกคืดทีละเอลิเมนต์ย่อยก่อน จากนั้น จึงนำแต่ละ เอลิเมนต์ย่อยกลับไปประกอบเป็นรูปเรขาคณิตที่ต้องการ การแยกรูปเรขาคณิตออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเป็นเทคนิคทำให้การหาคำตอบทำได้ง่ายขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มงานในการสร้าง Mesh



ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 1 และ 2 มิติ



ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

6.4 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 สามารถแสดงได้โดนสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

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

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

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

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

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

6.5 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า
เงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า

$$n \cdot (\epsilon \nabla \phi) = 0 \quad \text{zero charge / no electric field / symmetry}$$

surface

$$n_1 \cdot (\epsilon_1 \nabla \phi_1) = n_2 \cdot (\epsilon_2 \nabla \phi_2) \quad \text{continuity surface}$$

$$V = V_0 \quad \text{input voltage}$$

$$V = 0 \quad \text{ground}$$

สำหรับระบบ 3 แกน

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

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



บทที่ 3

การออกแบบวัตถุทดสอบ (Test object)

1. การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นลักษณะทรงกระบอกขอบมนใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หน้า 3 cm. และรองรับด้วยท่ออะคริลิกความยาว 30 cm และภายในท่อบรรจุแท่งปลายแหลม (rod) มุม 60 องศา เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลมจะเป็นสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ตามที่ทฤษฎีข้างต้นได้กล่าวไว้ มีช่องว่าง 2 cm โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 3-1 ต่อไปนี้

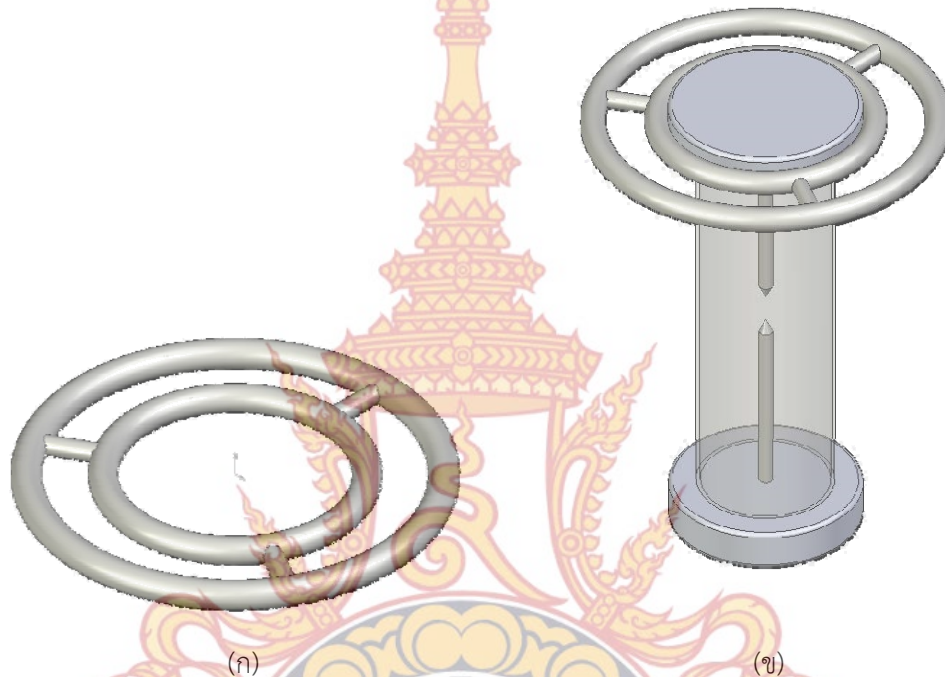


ภาพที่ 3-1 อิเล็กทรอนิกส์กับแท่งปลายแหลมในฉนวนท่ออะคริลิก

ภาพที่ 3-2 ฝาอิเล็กทรอนิกส์

2. การออกแบบโคโรนาซีลด์ [5]

เนื่องจากในปัจจุบันการออกแบบโคโรนาซีลด์ยังไม่มีสมการรองรับที่แน่นอน ดังนั้นจึงเลือกใช้โคโรนาซีลด์แบบสตีริงริง วงในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.3 cm ขนาดความกว้างของท่อสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 cm วงนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.4 cm โลหะที่ใช้เป็นสแตนเลส



ภาพที่ 3-3 การออกแบบโคโรนาซีลด์แบบสตีริงริง

(ก) โคโรนาซีลด์สตีริงริง

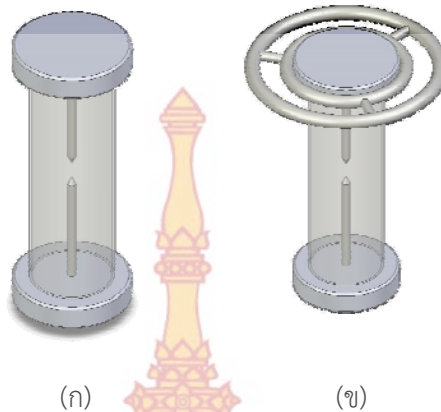
(ข) โคโรนาซีลด์สตีริงริง ติดตั้งประกอบกับอเล็กโทรด

3.การออกแบบวัตถุทดสอบ

เนื่องจากต้องการทราบผลการทดลองของวัตถุทดสอบในหลายกรณี เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าวัตถุทดสอบแบบใด จะช่วยลดโคโรนาได้ดีกว่ากัน จึงได้ออกแบบรูปแบบของวัตถุทดสอบเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้

3.1 ท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบไม่มีโคโรนาซีลด์ (Electrode without Corona Shield)

3.2 ท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาซีลด์ที่อเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)



ภาพที่ 3-4 การออกแบบวัตถุทดสอบใช้ท่ออะคริลิก 1 ชั้น ยาว 30 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm.

(ก) แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)

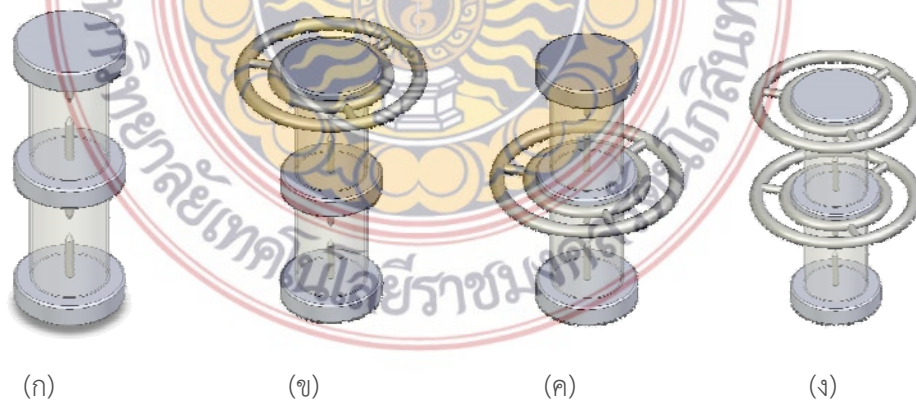
(ข) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)

3.3 ท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)

3.4 ท่อ 2 ชั้นยาว 30cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน (Top Electrode with Corona Shield)

3.5 ท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง (Middle Electrode with Corona Shield)

3.6 ท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน - กลาง (Top and Middle Electrode with Corona Shield)



ภาพที่ 3-5 การออกแบบวัตถุทดสอบใช้ท่ออะคริลิก 2 ชั้น ยาวชั้นละ 15 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm.

- (ก) แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน (Top Electrode with Corona Shield)
- (ค) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง (Middle Electrode with Corona Shield)
- (ง) แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นแรกและชั้นที่สอง (Top and Middle Electrode with Corona Shield)

3.7 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)

3.8 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน (Top Electrode with Corona Shield)

3.9 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง (Middle Electrode with Corona Shield)

3.10 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นล่าง (Lower Electrode with Corona Shield)

3.11 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน – กลาง (Top and Middle Electrode with Corona Shield)

3.12 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นบน – ล่าง (Top and Lower Electrode with Corona Shield)

3.13 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดชั้นกลาง – ล่าง (Middle and Lower Electrode with Corona Shield)

3.14 ท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มี Rod ระยะ gap 2 cm แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสามชั้น (All Electrodes with Corona Shield)

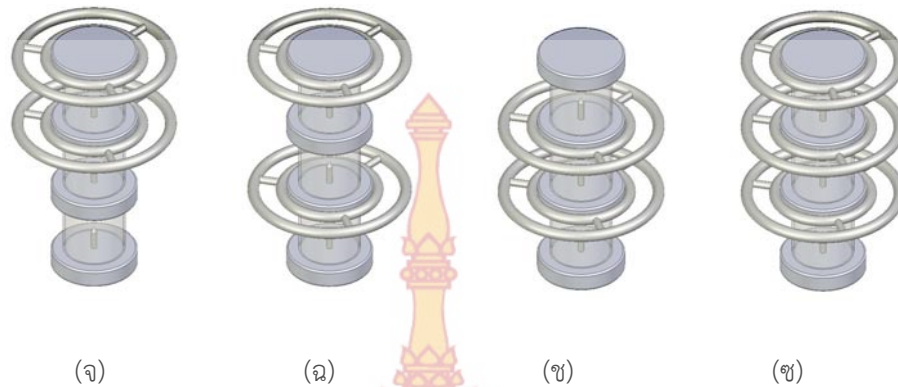


(ก)

(ข)

(ค)

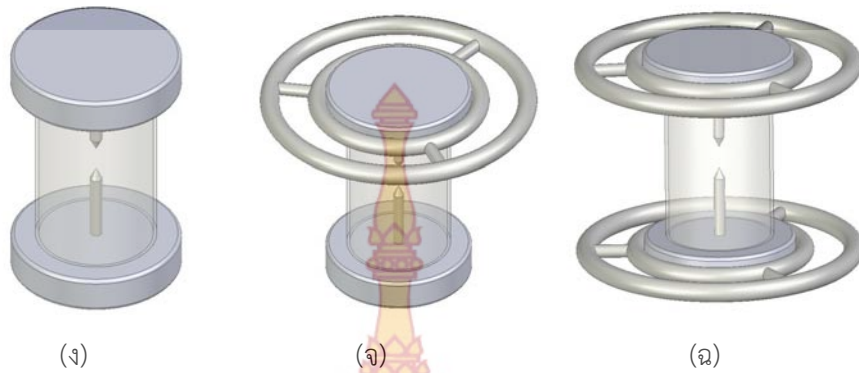
(ง)



ภาพที่ 3-6 การออกแบบวัตถุทดสอบใช้ท่ออะคริลิก 3 ชั้น ยาวชั้นละ 10 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 0.3 cm.

- (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)





ภาพที่ 3-7 การออกแบบวัสดุทดสอบใช้ท่ออะคริลิกที่มีความสูงของท่อต่างกันโดยมีช่องว่างระหว่างแท่งปลายแหลม 2 cm. เท่ากัน

- (ก) ท่อขนาด 10 cm. แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (ข) ท่อขนาด 10 cm. แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)
- (ค) ท่อขนาด 10 cm. แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสองชั้น (All Electrodes with Corona Shield)
- (ง) ท่อขนาด 15 cm. แบบไม่มีโคโรนาชีลด์ (Electrode without Corona Shield)
- (จ) ท่อขนาด 15 cm. แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรด (Electrode with Corona Shield)
- (ฉ) ท่อขนาด 15 cm. แบบมีโคโรนาชีลด์ที่อิเล็กโทรดทั้งสองชั้น (All Electrodes with Corona Shield)



บทที่ 4

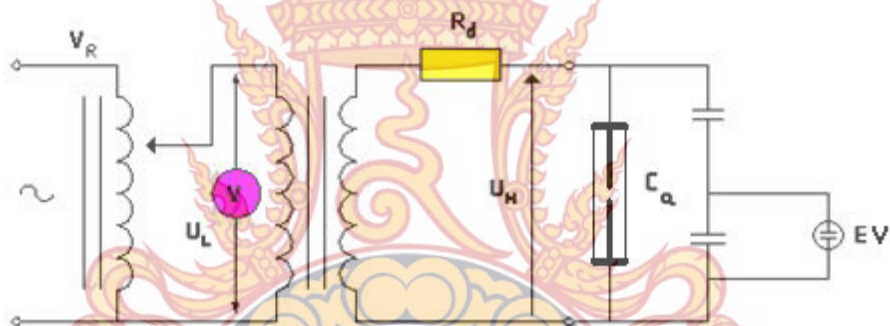
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. การทดสอบแรงดันเบรกดาวน ของวัตถุทดสอบแต่ละแบบ

กระบวนการทดสอบจะเป็นการทดสอบการเกิดเบรกดาวนภายในท่อระหว่างแท่งรีดปลายแหลมที่ระยะห่างกัน 2 cm เพื่อดูระดับแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน ก่อนที่จะนำไปทดสอบ ผลของสนามไฟฟ้าต่อไป

1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ผู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า, หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV , โวลต์เตจดีไวเดอร์, มิเตอร์วัด, วัตถุทดสอบ



ก)

หม้อแปลงทดสอบ 100 kV



โวลต์เตจดีไวเดอร์

วัตถุทดสอบ

ข)

ภาพที่ 4-1 วงจรการทดลอง

ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ

โดยที่ V_R คือ ตัวปรับแรงดัน

TT คือ หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง

U_L คือ แรงดันด้านแรงต่ำ

U_H คือ แรงดันด้านแรงสูง

R_d คือ ความต้านทานหลวง

EV คือ มิเตอร์วัด

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

1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1.2.1 ทำการต่อวงจร ดังภาพที่ 4-1 โดยอุปกรณ์ทดสอบที่ใช้ทดสอบ เป็นท่อที่มี
อิเล็กทรอนิกส์ปิดหัวท้ายยาว 30 cm แบบ 1 ชั้น มี รีดปลายแหลม

1.2.2 จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบเบรกดาวน์ (BD) โดยค่อยๆ
เพิ่มแรงดันขึ้นครั้งละ 1 kV จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์

1.2.3 อ่านค่าแรงดันไฟฟ้า จากมิเตอร์ และบันทึกผลการทดลอง

1.2.4 เปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบในวงจร โดยใส่โคโรนาซีลด์เข้าไป แล้วทำการทดสอบตาม
ข้อ 1.2.2 และข้อ 1.2.3 ตามลำดับ

1.2.5 ทำการทดสอบซ้ำเหมือนข้อ 1.2.4 โดยเปลี่ยนท่อเป็นขนาด 2 ชั้น, 3 ชั้น และใส่
โคโรนาซีลด์ ไม่ใส่โคโรนาซีลด์ ตามลำดับ

1.2.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบ, บันทึกผล และสรุปผลการทดสอบ

1.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สถานะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

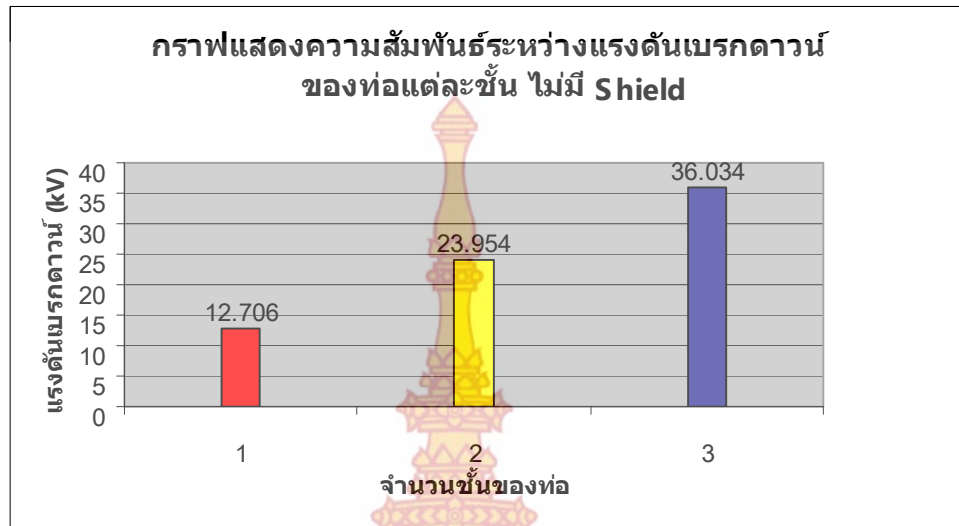
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 1 ชั้น ยาว 10 cm, 15 cm และ 30 cm แบบไม่มีโคโรนาซีลด์
ระยะแกป 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)		
	ยาว 10 cm	ยาว 15 cm	ยาว 30 cm
1	11.62	25.32	40.10
2	14.42	24.14	35.12
3	12.31	23.56	34.52
4	12.54	23.57	35.53
5	12.64	23.18	34.90
ค่าเฉลี่ย	12.706	23.954	36.034



ภาพที่ 4-2 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของท่อแต่ละชั้น แบบไม่มีโคโรนาชีลด์

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

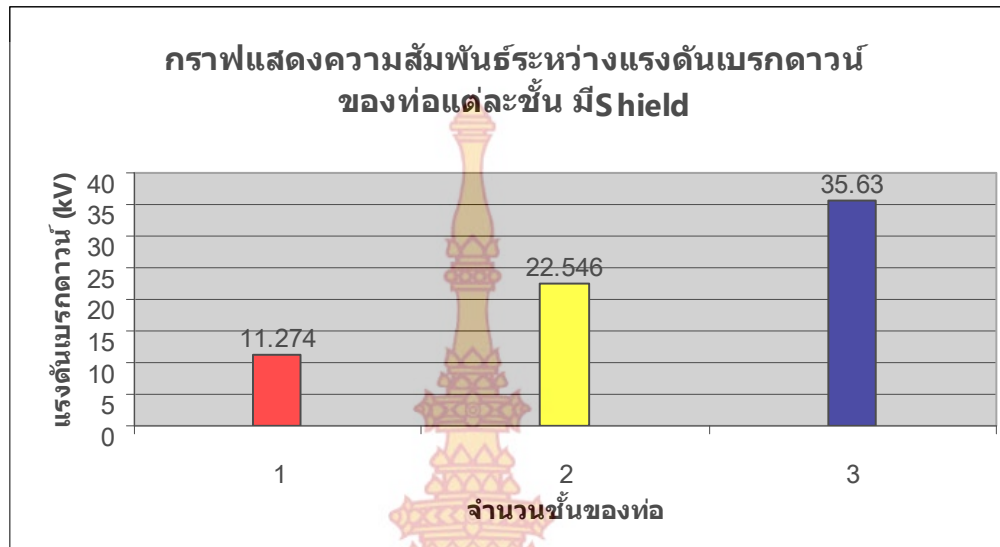
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 1 ชั้น ยาว 10 cm, 15 cm และ 30 cm แบบมีโคโรนาชีลด์
ระยะแก๊ป 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)		
	ยาว 10 cm	ยาว 15 cm	ยาว 30 cm
1	11.03	22.52	35.13
2	11.27	22.17	34.74
3	11.25	22.21	36.75
4	10.95	22.91	35.76
5	11.87	22.92	35.77
ค่าเฉลี่ย	11.274	22.546	35.63



ภาพที่ 4-3 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของท่อแต่ละชั้น แบบใส่โคโรนาซิลด์

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

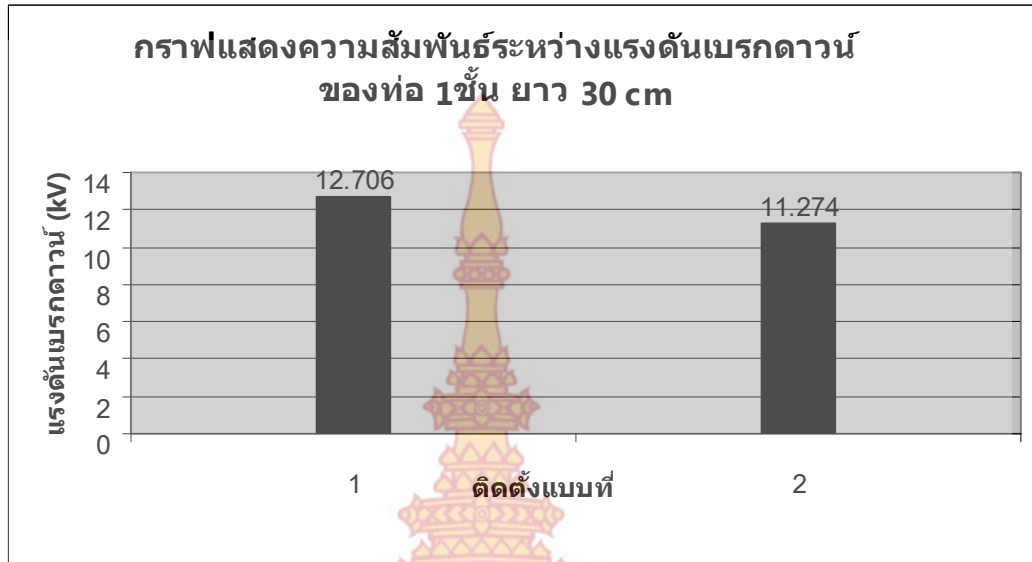
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 1 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)	
	ไม่ใส่โคโรนาซิลด์	ใส่โคโรนาซิลด์
1	11.62	11.03
2	14.42	11.27
3	12.31	11.25
4	12.54	10.95
5	12.64	11.87
ค่าเฉลี่ย	12.706	11.274



ภาพที่ 4-4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของท่อ 1 ชั้น

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

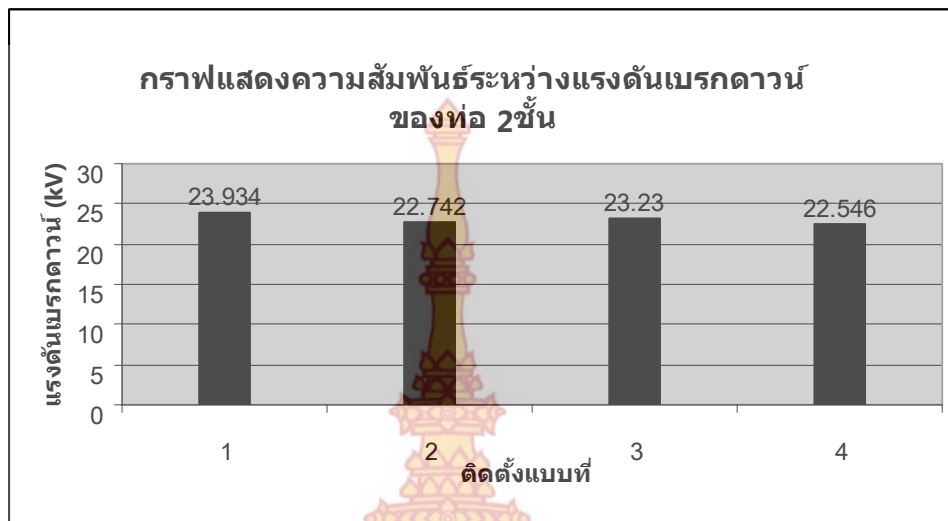
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 4 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 2 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)			
	ไม่ใส่ซิลต์	ใส่ซิลต์บน	ใส่ซิลต์กลาง	ใส่ซิลต์บนและกลาง
1	25.32	23.02	24.22	22.52
2	24.14	22.85	25.26	22.17
3	23.56	22.82	23.12	22.21
4	23.57	22.53	21.75	22.91
5	23.18	22.49	21.80	22.92
ค่าเฉลี่ย	23.934	22.742	23.23	22.546



ภาพที่ 4-5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของท่อ 2 ชั้น

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

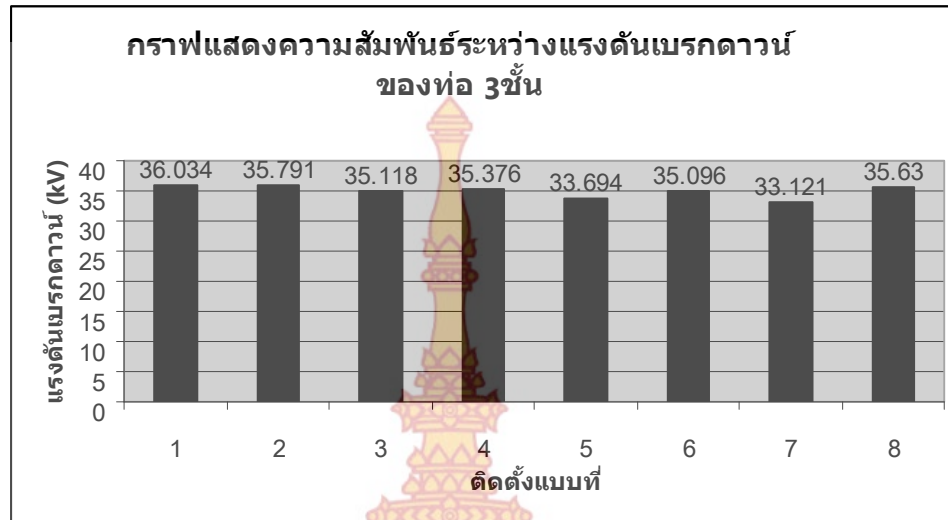
อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 3 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)							
	ไม่ใส่ซีลด์	ใส่ซีลด์บน	ใส่ซีลด์กลาง	ใส่ซีลด์ล่าง	ใส่ซีลด์บนและกลาง	ใส่ซีลด์บนและล่าง	ใส่ซีลด์กลางและล่าง	ใส่ซีลด์บนกลางและล่าง
1	40.10	35.93	34.89	35.91	35.33	32.81	33.81	35.13
2	35.12	35.91	34.49	32.15	34.24	34.85	32.87	34.74
3	34.52	35.85	35.23	34.84	35.33	35.85	31.87	36.75
4	35.53	35.81	35.16	33.12	35.40	36.25	33.04	35.76
5	34.90	35.48	35.82	32.45	36.59	35.72	34.04	35.77
ค่าเฉลี่ย	36.034	35.791	35.118	33.694	35.376	35.096	33.121	35.63



ภาพที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์ของท่อ 3 ชั้น

ตารางบันทึกผลการทดลองหาค่าแรงดันเบรกดาวน์

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา: 09.00 น. – 17.30 น.

อุณหภูมิห้อง : 29 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ: 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 78 %

ตารางที่ 6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท่อ 1 ชั้น ยาว 30 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

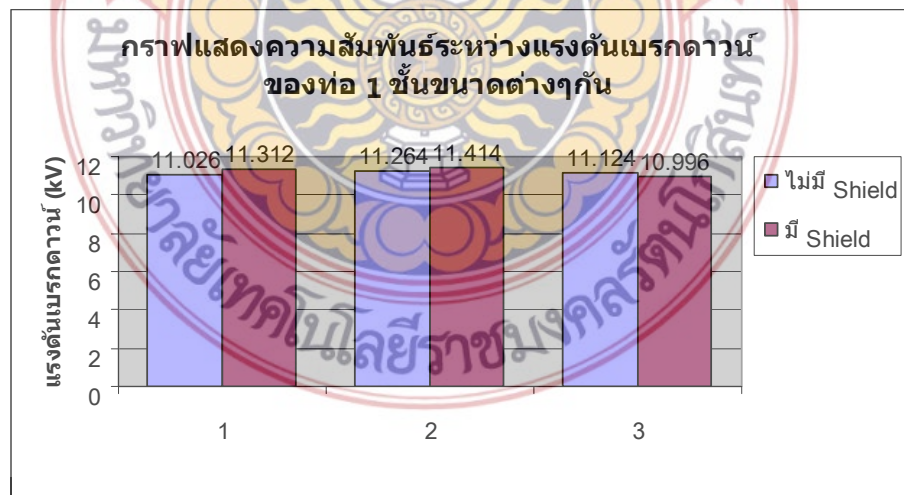
การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)	
	ไม่ใส่โคโรนาซีลด์	ใส่โคโรนาซีลด์
1	12.85	12.02
2	11.12	11.38
3	10.44	11.05
4	10.29	11.05
5	10.43	11.06
ค่าเฉลี่ย	11.026	11.312

ตารางที่ 7 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้น ยาว 15 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)	
	ไม่มีโลโครนาซีลด์	โลโครนาซีลด์
1	11.78	13.45
2	11.43	10.75
3	11.05	11.08
4	11.19	10.75
5	10.87	11.04
ค่าเฉลี่ย	11.264	11.414

ตารางที่ 8 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ท้อ 1 ชั้น ยาว 10 cm ระยะแกปกว้าง 2 cm

การทดลองครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ตามรูปแบบการจำลอง (kV)	
	ไม่มีโลโครนาซีลด์	โลโครนาซีลด์
1	10.71	11.91
2	11.08	10.93
3	11.14	11.00
4	11.19	11.06
5	11.50	11.08
ค่าเฉลี่ย	11.124	10.996



ภาพที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของท้อ 1 ชั้น ขนาดต่างๆกัน
หมายเหตุ: 1 หมายถึง ท้อ 1 ชั้นยาว 30 cm

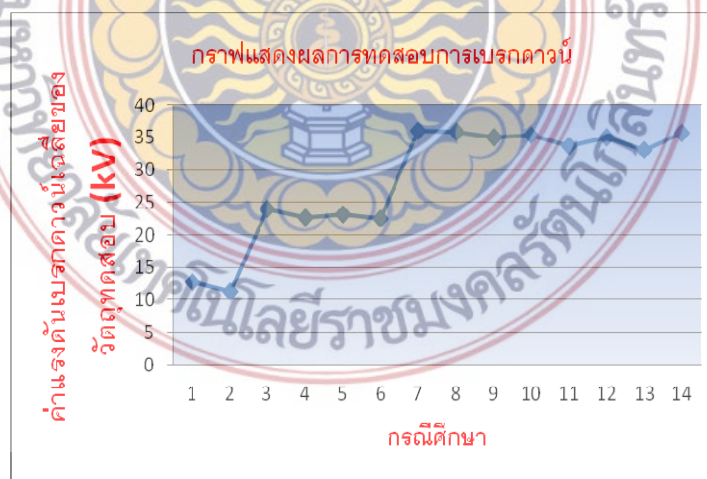
2 หมายถึง ท่อ 1 ชั้นยาว 15 cm

3 หมายถึง ท่อ 1 ชั้นยาว 10 cm

จากกรณีศึกษาทั้งหมด 14 กรณีศึกษาด้วยกัน สามารถนำมารวมค่าแรงดันเบรกดาวานี้ได้ตั้ง
ตารางที่ 9 และภาพที่ 4-8

ตารางที่ 9 ค่าแรงดันเบรกดาวานกรณีศึกษา 14 กรณีศึกษา

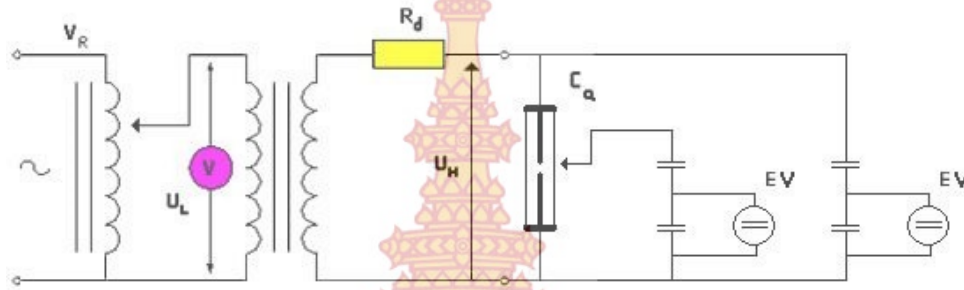
กรณี	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย (kV)
	1	2	3	4	5	
1	11.62	14.42	12.31	12.54	12.64	12.706
2	11.03	11.27	11.25	10.95	11.87	11.274
3	25.32	24.14	23.56	23.57	23.18	23.934
4	23.02	22.85	22.82	22.53	22.49	22.742
5	24.22	25.26	23.12	21.75	21.80	23.230
6	22.52	22.17	22.21	22.91	22.92	22.546
7	40.10	35.12	34.52	35.53	34.90	36.034
8	35.93	35.91	35.85	35.81	35.48	35.791
9	34.89	34.49	35.23	35.16	35.82	35.118
10	35.33	34.24	35.33	35.40	36.59	35.376
11	35.91	32.15	34.84	33.12	32.45	33.694
12	32.81	34.85	35.85	36.25	35.72	35.096
13	33.81	32.87	31.87	33.04	34.04	33.121
14	35.13	34.74	36.75	35.76	35.77	35.63



ภาพที่ 4-8 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวานกรณีศึกษา 14 กรณี

2. การทดลองการกระจายแรงดันไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบรูปทรงกระบอก

กระบวนการทดสอบ จะเป็นการทดสอบโดยการป้อนแรงดันให้กับวัตถุทดสอบแต่ละแบบ ได้แก่ ท่อแบบ 1 ชั้น, 2 ชั้น, และ 3 ชั้น ตามลำดับ แล้ววัดแรงดันที่ผิวท่อเทียบกับกราวด์ที่ระยะ 10 cm, 15 cm, 20 cm และ 30 cm จากอิเล็กโทรดด้านแรงสูงตามลำดับ ดังภาพที่ 4-9 เพื่อดูการกระจายของแรงดันไฟฟ้า



ก)

โวลต์เตจดีไวเดอร์

หม้อแปลงทดสอบ 100 KV

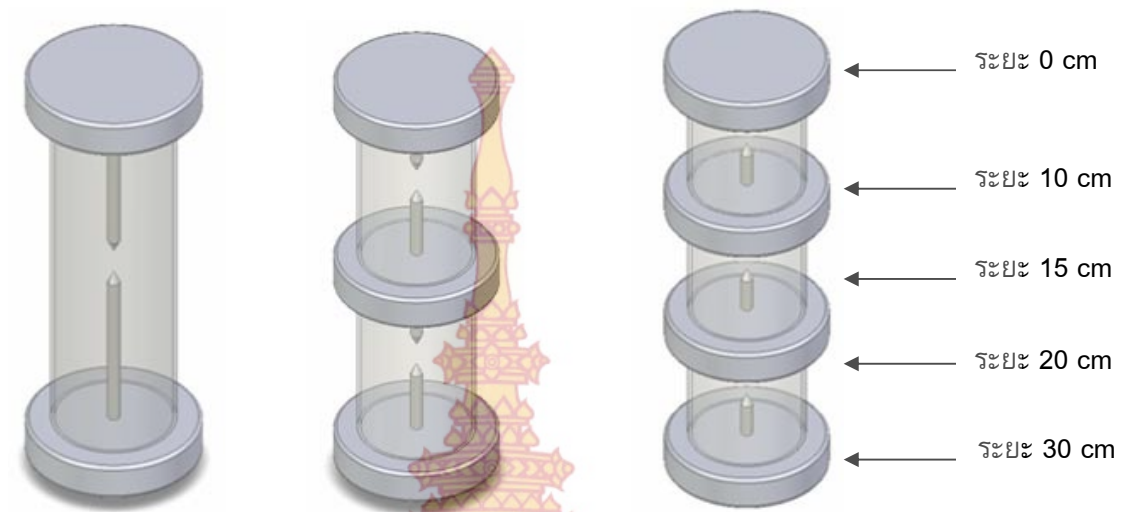


วัตถุทดสอบ

ข)

ภาพที่ 4-9 วงจรการทดลองการวัดแรงดันกระจายบนผิวท่อ

ก) วงจรสมมูล ข) วงจรในการทดสอบ



ภาพที่ 4-10 ระยะที่วัดแรงดันบนวัตถุ

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ตู้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้า, หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง, แผ่นทองแดงด้านกราวด์, ความต้านทานน้ำ, โวลต์เตจดีไวเดอร์แรงดัน 2 ตัว, มิเตอร์วัด, วัตถุทดสอบ

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

2.2.1 ทำการต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 4-9 อุปกรณ์ทดสอบคือท่อที่มีอิเล็กโทรดปิดหัว ท้ายยาว 30 cm 1 ชั้น ระยะแก๊บ 2 cm

2.2.2 ต่อวงจรการวัดแรงดันที่ผิวท่อที่ระยะ 10 cm จากอิเล็กโทรดด้านแรงสูง

2.2.3 ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดสอบ

2.2.4 อ่านค่าแรงดันไฟฟ้า จากมิเตอร์ และบันทึกผลการทดสอบ

2.2.5 เปลี่ยนระยะการวัดแรงดันที่ผิวท่อจาก 10 cm เป็น 15 cm 20 cm และ 30 cm แล้วทำการทดลองตามข้อ 2.2.3 และ 2.2.4 ตามลำดับ

2.2.6 เปลี่ยนอุปกรณ์ทดสอบ เป็นท่อแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้นตามลำดับ แล้วทำการทดสอบตามข้อ 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4 และข้อ 2.2.5 ตามลำดับ

7. เปรียบเทียบผลการทดสอบ บันทึกผล และสรุปผลการทดสอบ

2.3 ผลการทดสอบการวัดแรงดันกระจายบนผิวท่อ

ข้อมูลที่สภาวะห้องทดสอบ

ว/ด/ป : 29 / 11 / 2556

เวลา : 18.00 น. – 21.00 น.

อุณหภูมิห้อง : 28 องศาเซลเซียส

ความดันบรรยากาศ : 758 มม.ปรอท

ความชื้นสัมพัทธ์ : 75 %

ตารางที่ 10 ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 1 ชั้น ไมสไคโรนาซีลด์

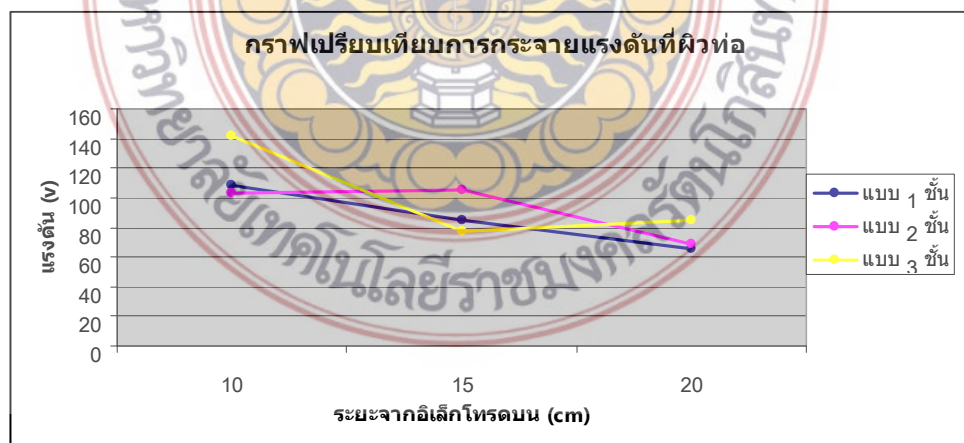
ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	4.99 kV	-
10	106 V	4889 V
15	84 V	22 V
20	68 V	17 V
30	0 V	63 V

ตารางที่ 11 ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 2 ชั้น ไมสไคโรนาซีลด์

ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	4.99 kV	-
10	104 V	4895 V
15	106 V	3 V
20	70 V	37 V
30	0 V	68 V

ตารางที่ 12 ค่าแรงดันกระจายบนผิวท่อ 3 ชั้น ไมสไคโรนาซีลด์

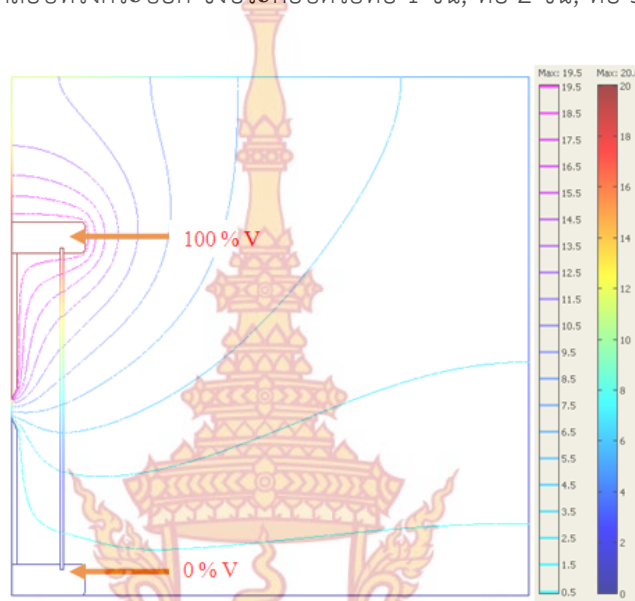
ระยะจากอิเล็กโทรดบน (cm)	แรงดันกระจาย	แรงดันตกคร่อม
0	4.99 kV	-
10	144 V	4859 V
15	79 V	66 V
20	87 V	9 V
30	0 V	84 V



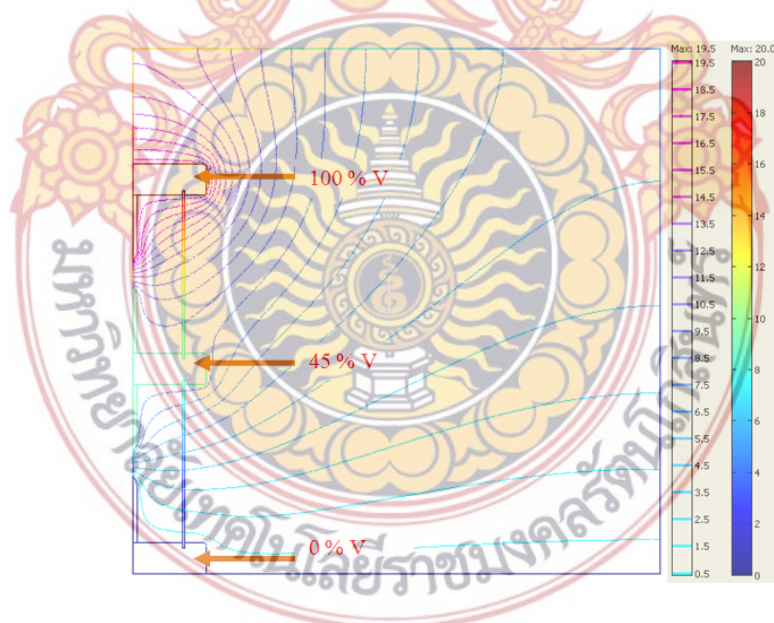
ภาพที่ 4-11 กราฟเปรียบเทียบการกระจายแรงดันที่ผิวท่อที่ระยะต่างๆ

3. การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

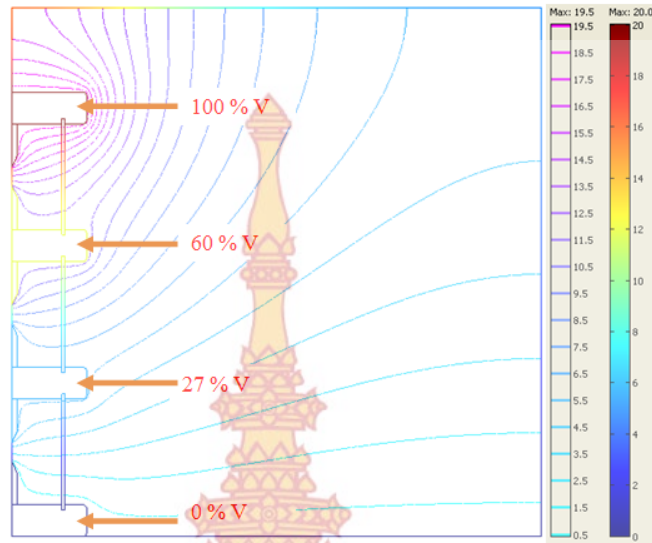
การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก การจำลองการกระจายของเส้นสมศักย์บนวัตถุทดสอบทรงกระบอก ซึ่งประกอบด้วยท่อ 1 ชั้น, ท่อ 2 ชั้น, ท่อ 3 ชั้น ตามลำดับ



ภาพที่ 4-12 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก 1 ชั้น



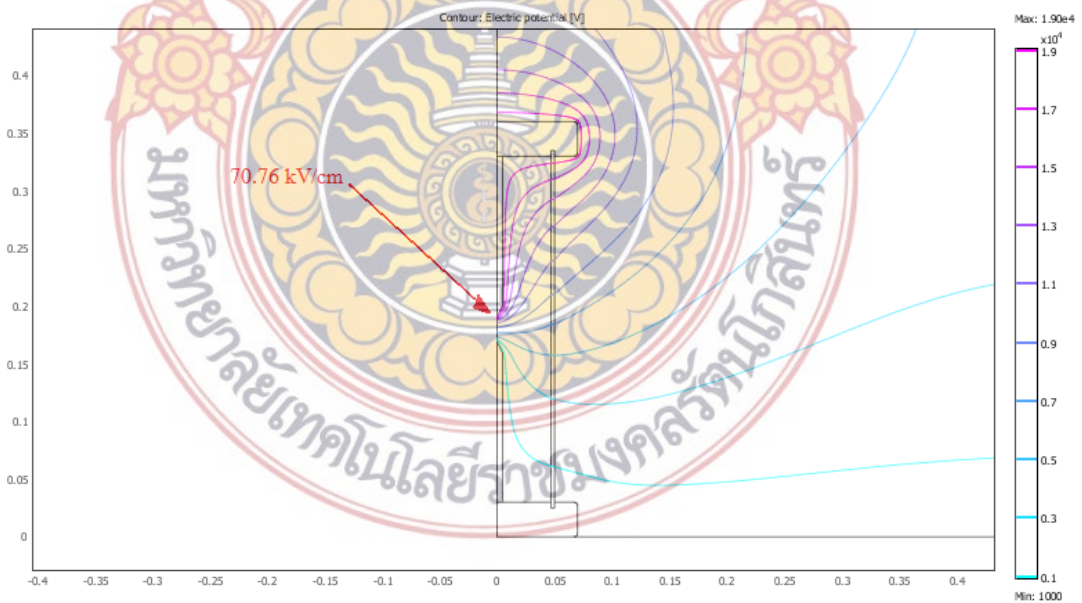
ภาพที่ 4-13 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก 2 ชั้น



ภาพที่ 4-14 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก 3 ชั้น

3.1 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

- 3.1.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
- 3.1.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด) 70.76 kV/cm



ภาพที่ 4-15 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

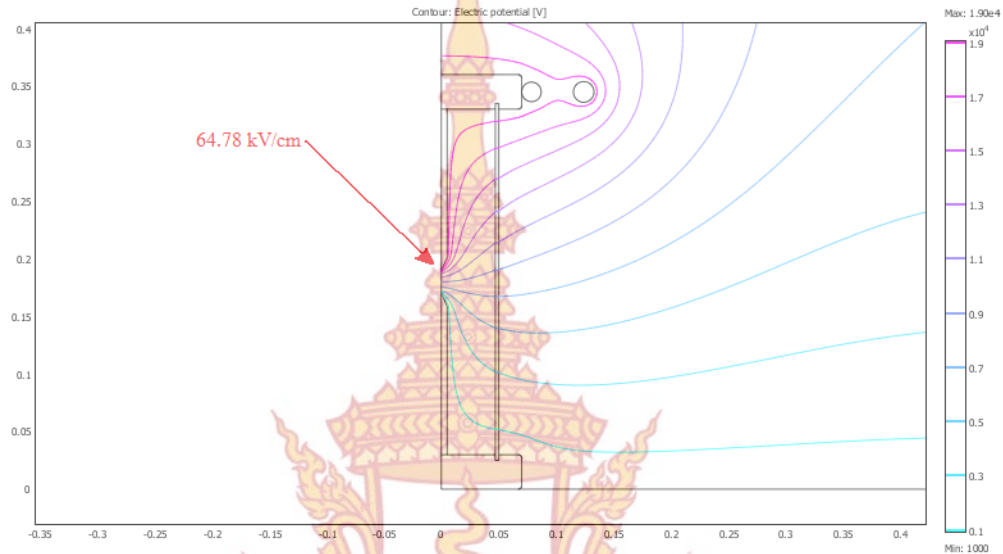
3.2 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์

3.2.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.2.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

64.78 kV/cm



ภาพที่ 4-16 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 1 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์

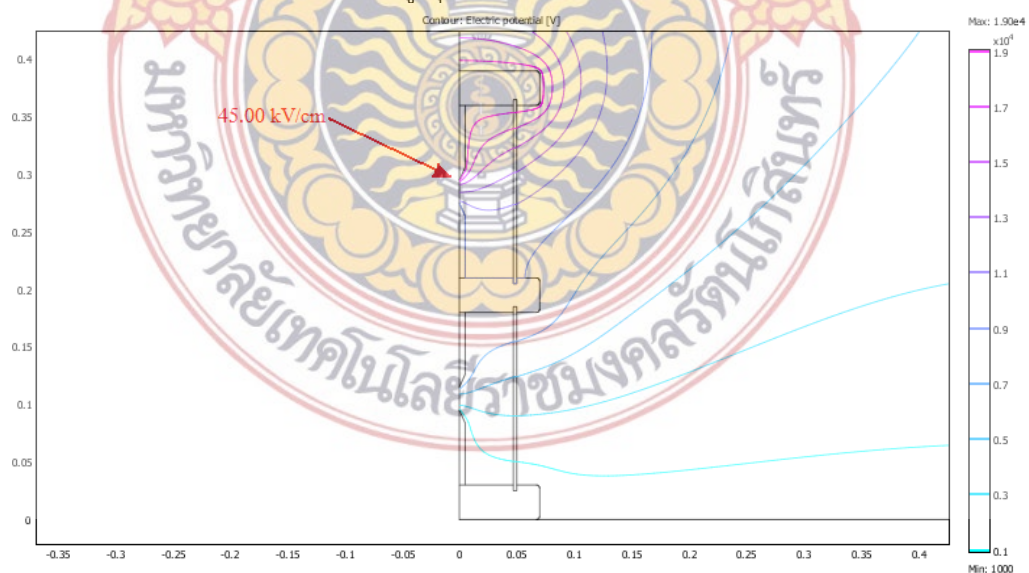
3.3 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

3.3.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.3.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

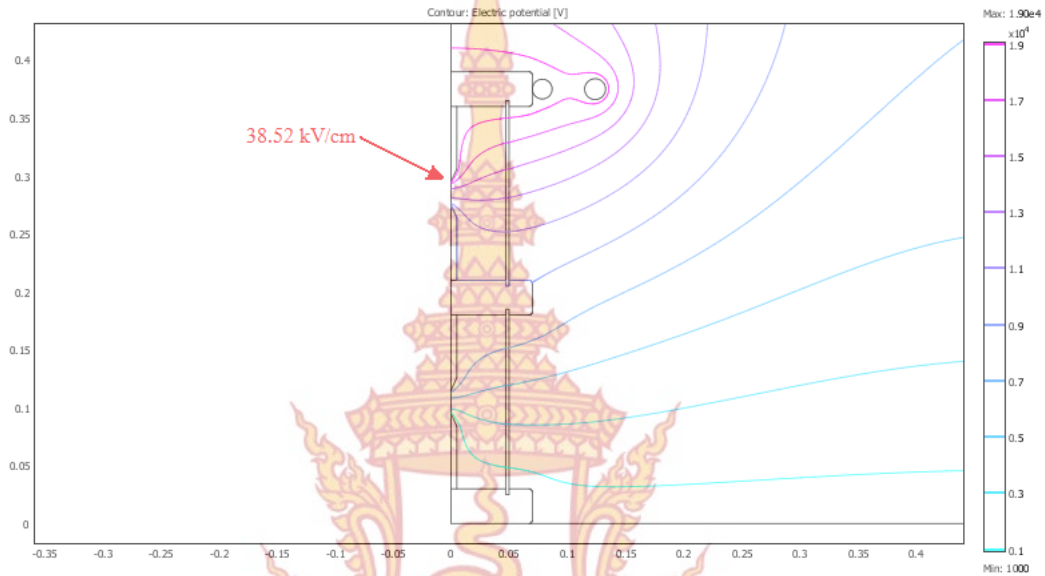
45.00 kV/cm



ภาพที่ 4-17 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

3.4 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน

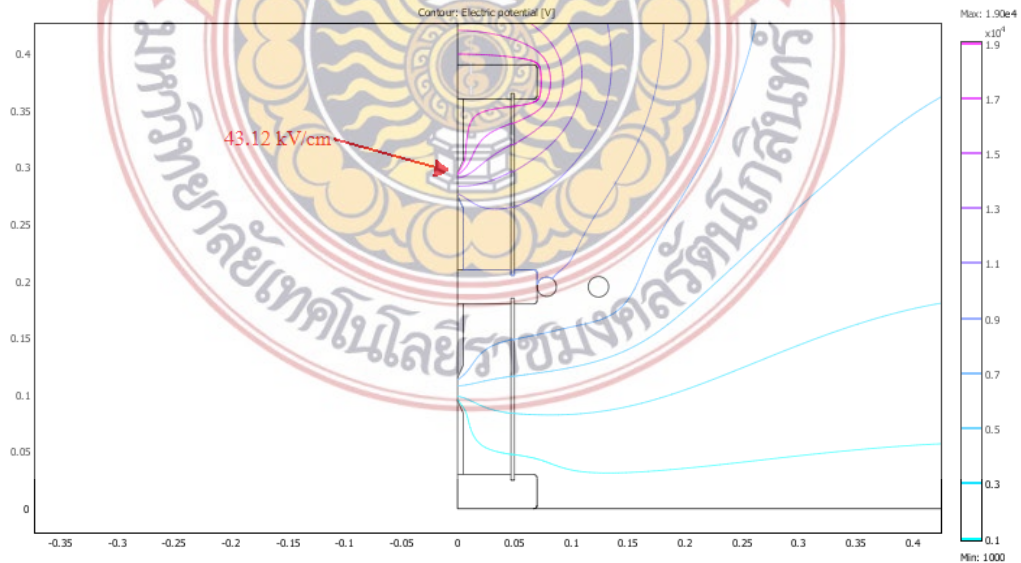
- 3.4.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.4.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 38.52 kV/cm



ภาพที่ 4-18 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน

3.5 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง

- 3.5.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.5.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 43.12 kV/cm



ภาพที่ 4-19 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง

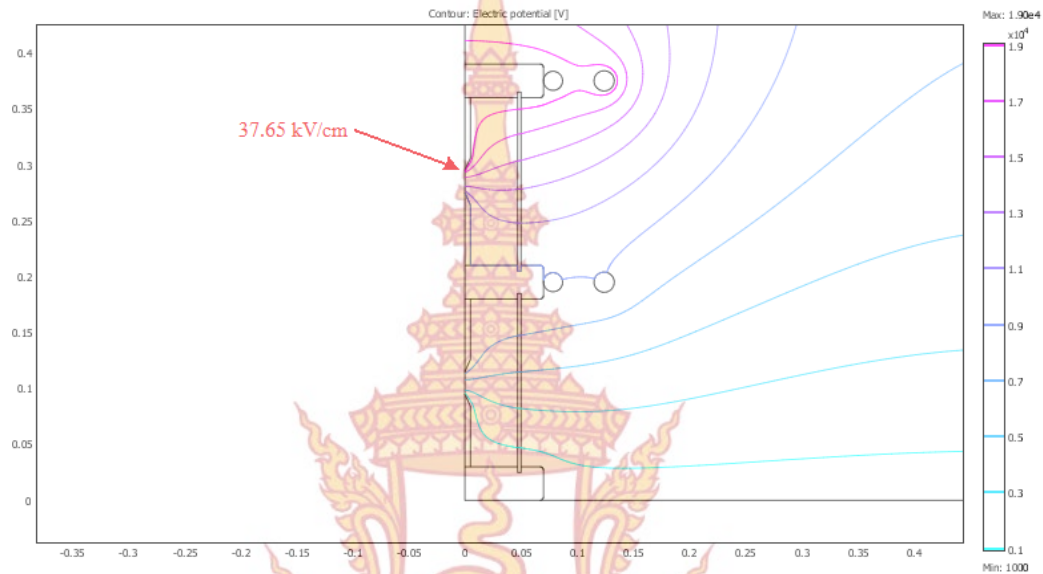
3.6 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก้ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน - กลาง

3.6.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.6.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

37.65 kV/cm



ภาพที่ 4-20 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 2 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน-กลาง

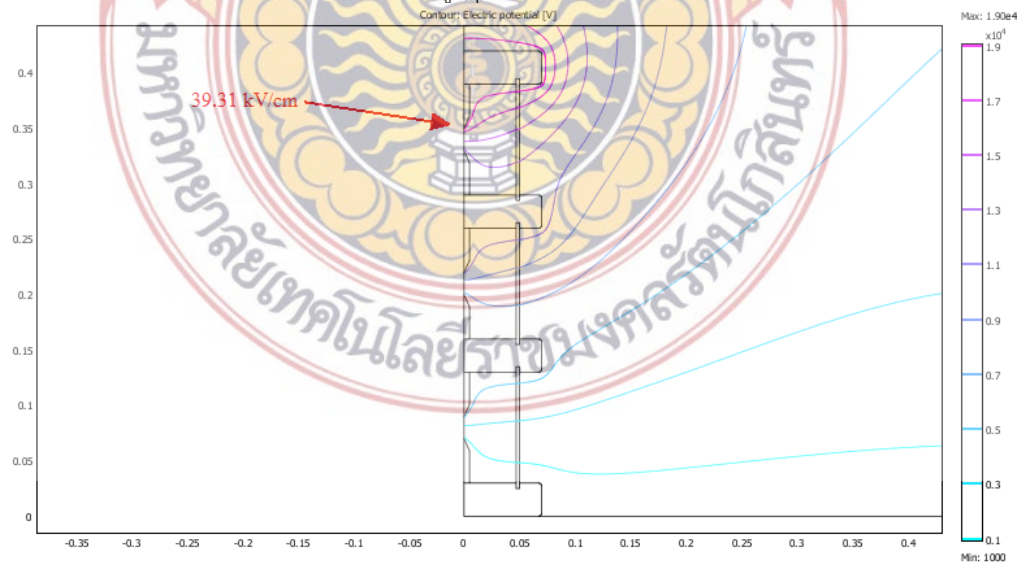
3.7 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก้ป 2 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

3.7.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.7.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

39.31 kV/cm



ภาพที่ 4-21 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ไม่มีโคโรนาซีลด์

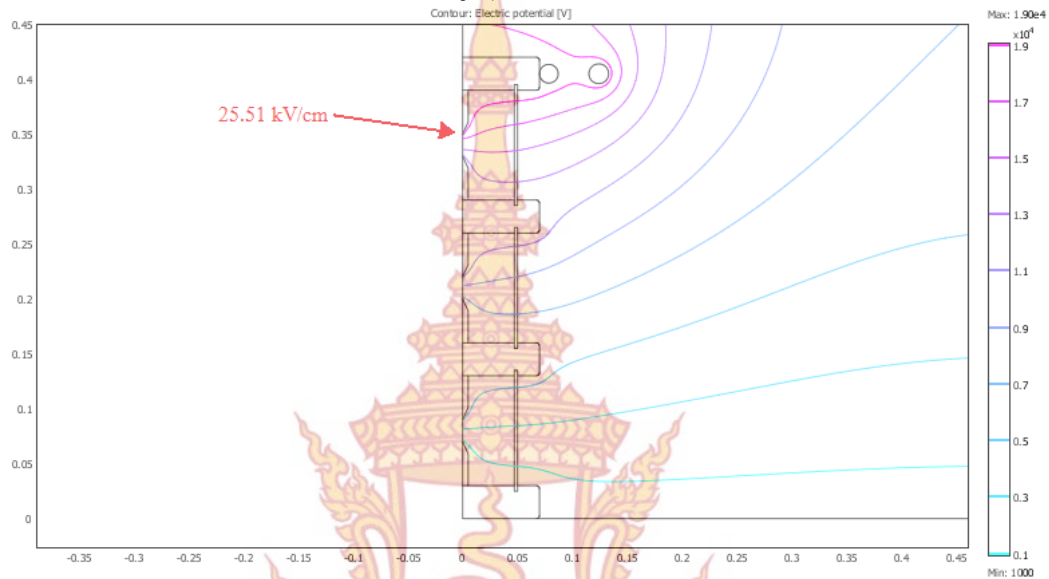
3.8 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก้ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน

3.8.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.8.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

25.51 kV/cm



ภาพที่ 4-22 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน

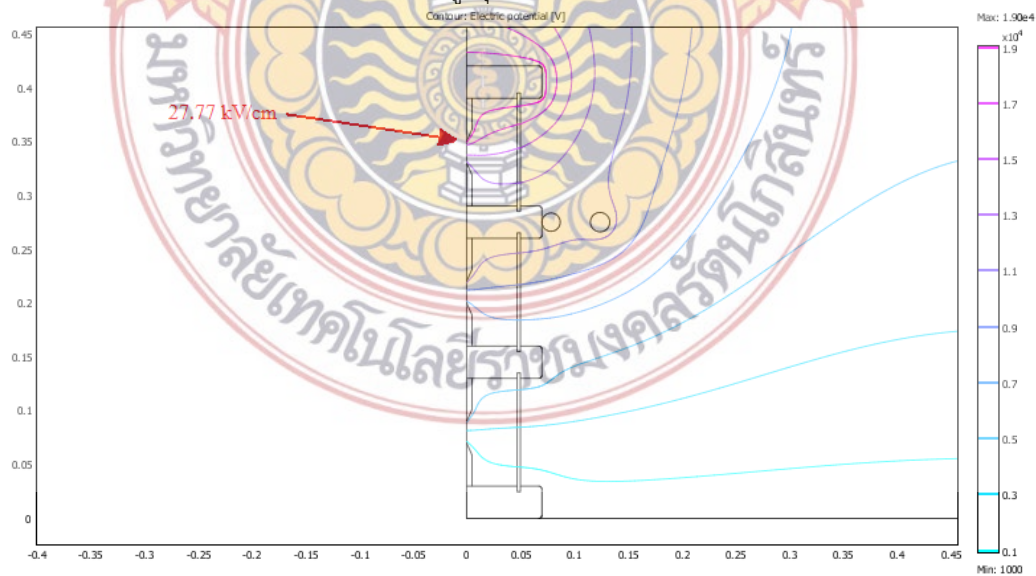
3.9 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก้ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง

3.9.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

20 kV

3.9.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

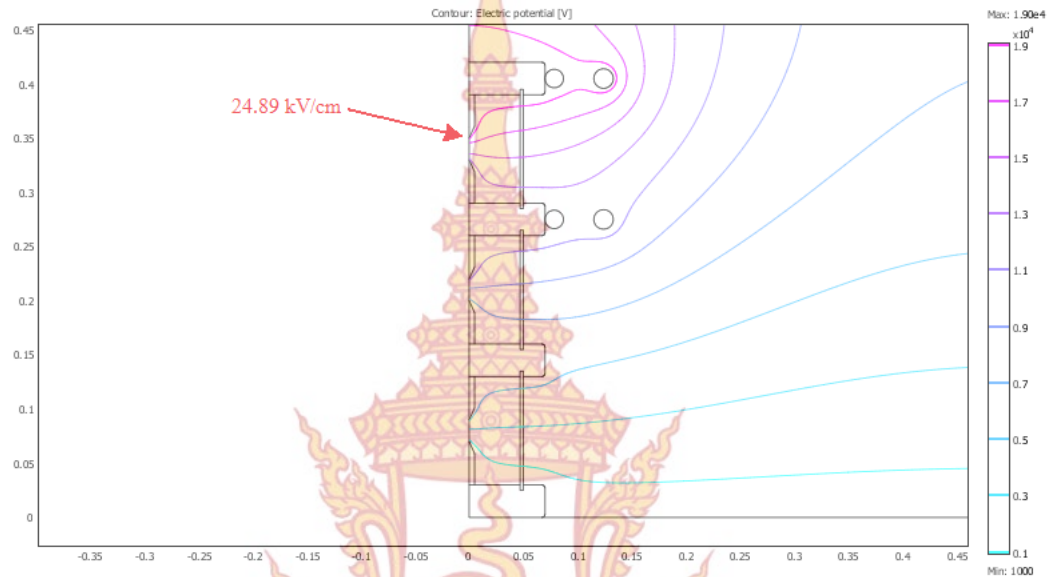
27.77 kV/cm



ภาพที่ 4-23 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง

3.10 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน - กลาง

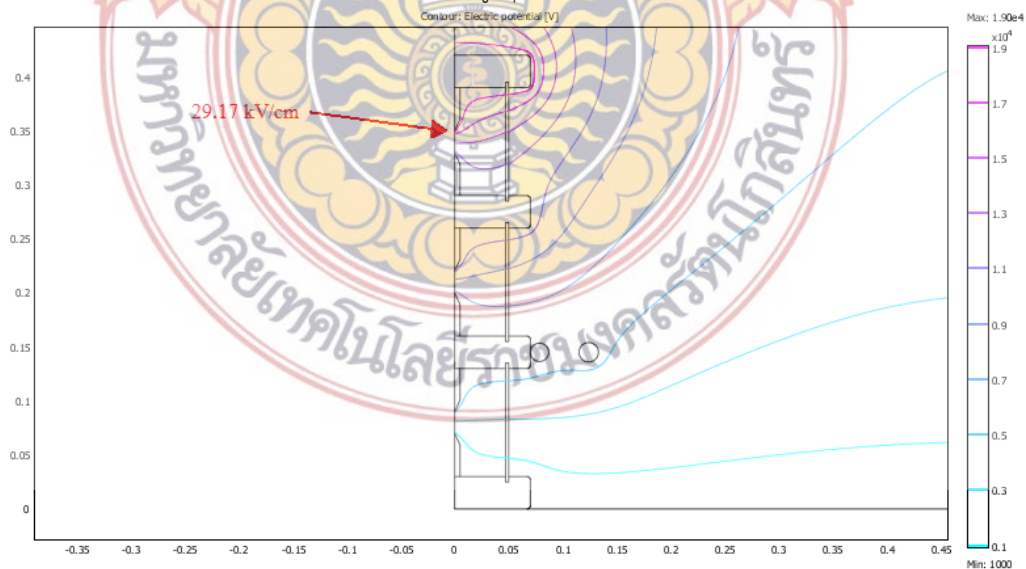
- 3.10.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.10.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 24.89 kV/cm



ภาพที่ 4-24 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน - กลาง

3.11 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์ล่าง

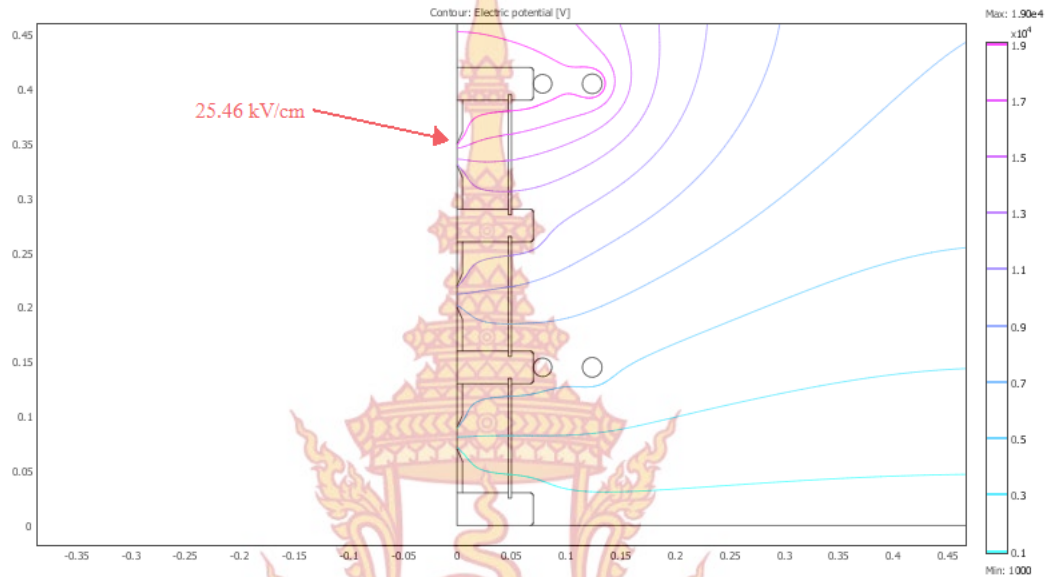
- 3.11.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.11.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 29.17 kV/cm



ภาพที่ 4-25 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์ล่าง

3.12 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน - ล่าง

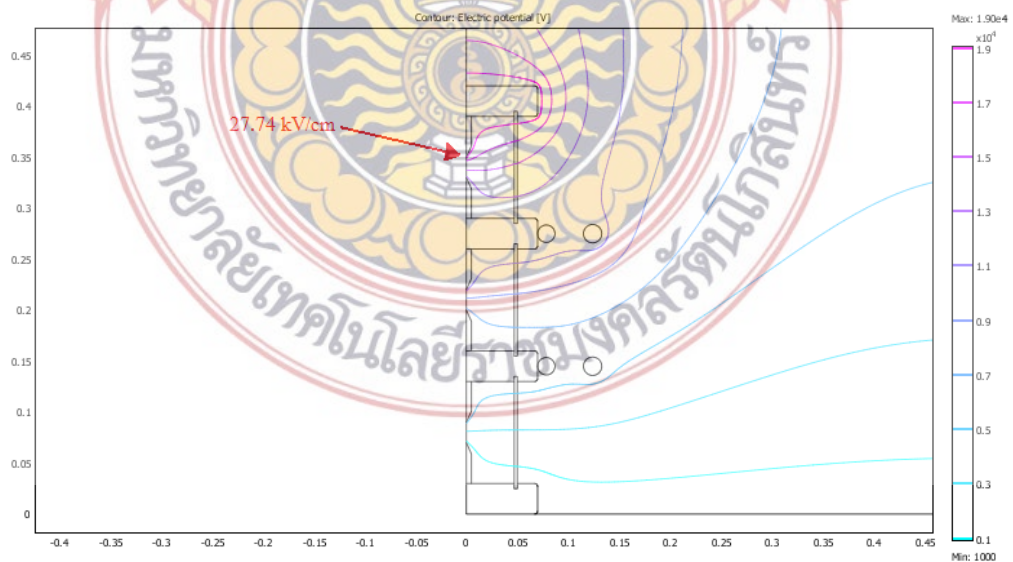
- 3.12.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.12.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 25.46 kV/cm



ภาพที่ 4-26 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์บน - ล่าง

3.13 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง - ล่าง

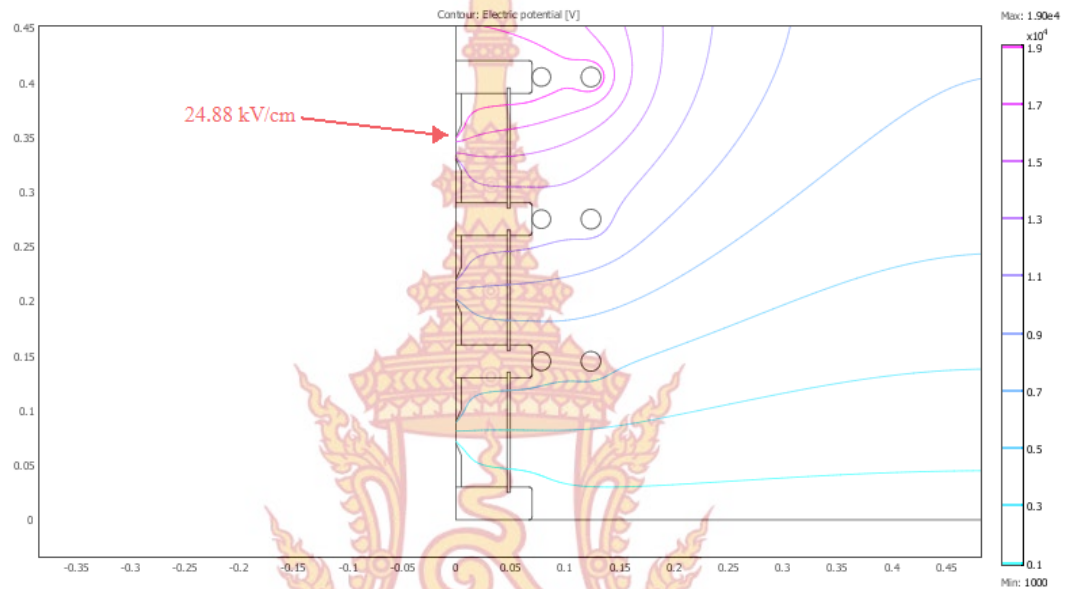
- 3.13.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.13.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 27.74 kV/cm



ภาพที่ 4-27 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อน 3 ชั้นยาว 30 cm มีโคโรนาซีลด์กลาง - ล่าง

3.14 การจำลองวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของท่อ 3 ชั้นยาว 30 cm ระยะแก๊ป 2 cm มีโคโรนาซีลด์บน - กลาง - ล่าง

- 3.14.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 20 kV
 3.14.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด 24.88 kV/cm



ภาพที่ 4-28 ผลการจำลองค่าความเข้มสนามไฟฟ้าท่อ 3 ชั้นยาว 30cm มีโคโรนาซีลด์บน-กลาง-ล่าง



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

การกระจายตัวของแรงดันและสนามไฟฟ้าต่างก็มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะนำมาสู่การเกิดปรากฏการณ์โคโรนา และเบรกดาวน์บนวัตถุทดสอบ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีการใส่โคโรนาซีลด์ชนิดสติริงริง (steering ring) ที่ตำแหน่งต่างๆบนวัตถุทดสอบทรงกระบอก และวิธีการแบ่งวัตถุทดสอบออกเป็นชั้นๆ แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบนวัตถุทดสอบก่อนทำการทดสอบจริง จากผลการทดสอบการจำลองด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics พบว่าการใส่โคโรนาซีลด์กรณีทอ 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้นนั้น จะช่วยลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลงได้ จากผลการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์พบว่าในกรณีทอ 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้น ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าต่ำลง ซึ่งหมายถึงไม่มีความสูญเสียในระบบ จึงทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่ค่าแรงดันต่ำกว่าเดิม และการแบ่งวัตถุทรงกระบอก ออกเป็นชั้นๆ สามารถเพิ่มค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงขึ้นและสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าได้ตั้งนั้นการใส่โคโรนาซีลด์และการแบ่งวัตถุทรงกระบอก ออกเป็นชั้นๆ สามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าได้จริง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี และมีปัจจัยสำคัญที่มีต่อผลของการเบรกดาวน์ก็คือ ความดัน อุณหภูมิ และความชื้น ผลการทดสอบการหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ถึงผลการทดสอบที่ออกมาเป็นเช่นนั้น รวมทั้งต้องมีการทดสอบพาร์เซียลดีสชาร์จเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้ให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากผลการศึกษาโดยสุ่มข้อมูลจากชาวบ้านที่ทำนาอยู่ได้สายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงพบว่า ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตชาวบ้านทำนาได้ตามปกติ และข้าวที่อยู่ในนาก็ไม่เกิดความเสียหายใดๆ

2. การอภิปรายผล

สำหรับผลการทดสอบที่ได้ออกมา สามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในเรื่องการทดสอบการเกิดโคโรนา ด้วยเครื่องทดสอบการดีสชาร์จบางส่วน เพื่อยืนยันผลการทดสอบให้ชัดเจนมากขึ้นว่าโคโรนาซีลด์ชนิดสติริงริง สามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าได้

3 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ

การใช้ท่ออะคริลิกเป็นวัตถุทดสอบเพราะท่ออะคริลิกส่วนใหญ่ได้ถูกนำไปในงานด้านไฟฟ้าแรงสูง เช่น โวลต์เตจดีไวเดอร์ สำหรับการทดลองจำเป็นต้องทำซ้ำหลายๆครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ส่วนผลของอุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ก็มีผลต่อค่าความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้นเราจึงไม่ควรทำการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์เกิน 80%

บรรณานุกรม

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [2] คงศักดิ์ หล่อรุ่งโรจน์, การศึกษาและการจำลองสนามไฟฟ้าเพื่อหามิติช่องว่างทรงกลมมาตรฐานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, High Voltage Insulation maintenance, Examination and Diagnosis, เอกสารประกอบการเรียนการสอนรายวิชา Selected Topics in High Voltage Engineering, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [4] นรเศรษฐ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1”, 2550
- [5] กฤษณะ แก้ววิจิตร และคณะ, การศึกษาและการออกแบบโคโรนาซีลด์, ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [6] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550





ภาคผนวก

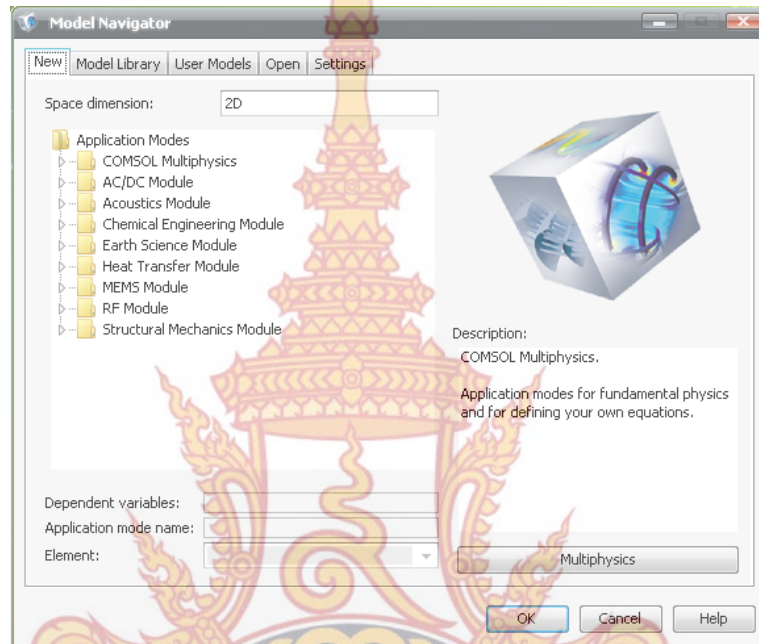
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
นakhonphanom



ภาคผนวก ก

โปรแกรม COMSOL ที่ใช้วิเคราะห์ในการวิจัย

ในภาคผนวก ก นี้ จะเป็นการนำเสนอตัวอย่างการจำลองสนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติ โดยโปรแกรม COMSOL โปรแกรม Comsol เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านความแข็งแรง ด้านสนามไฟฟ้า ด้านความร้อน และอื่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ทางด้านสนามไฟฟ้า



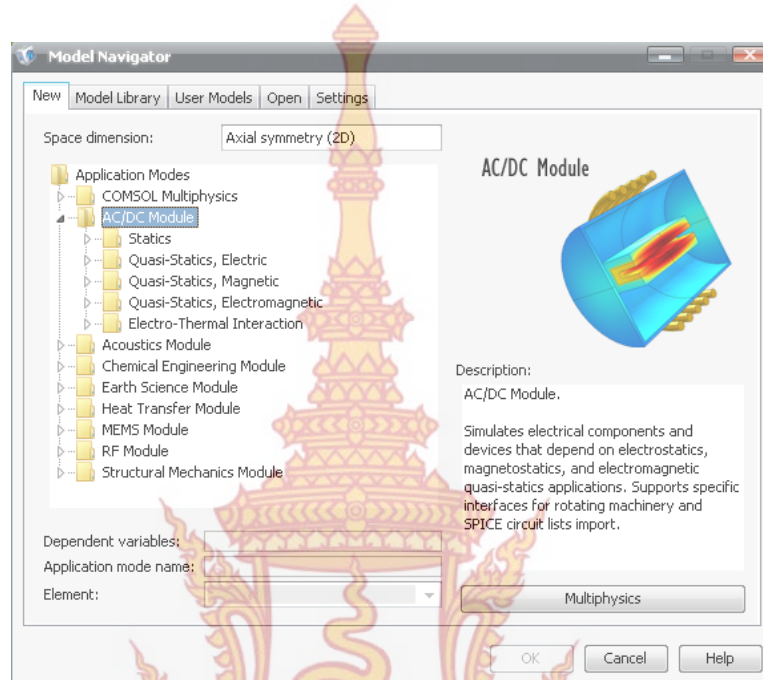
รูปที่ ก.1 ส่วนเริ่มโปรแกรม เข้าสู่ mode การวิเคราะห์ของโปรแกรม comsol

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

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

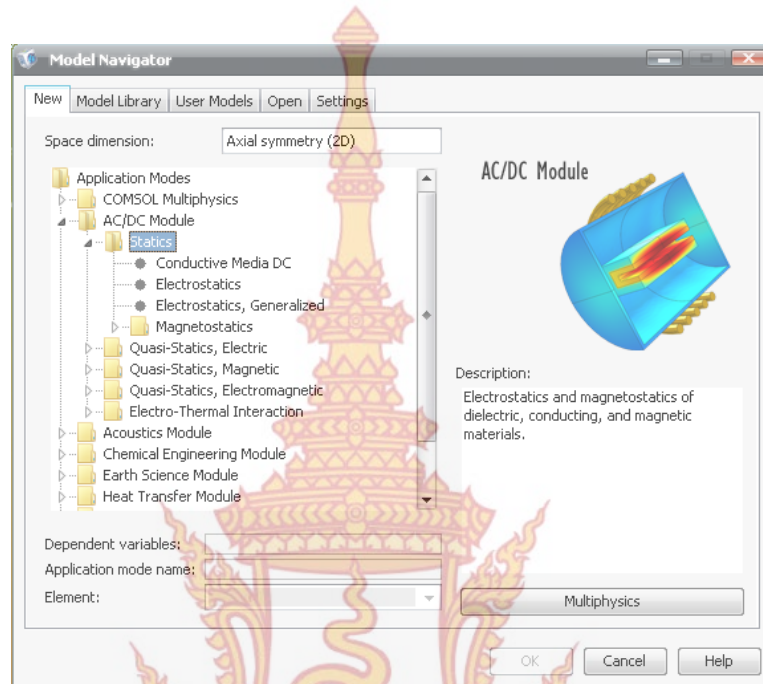
เลือกการจำลองไฟ AC/DC



รูปที่ ก. 2 โหมดต่างๆในการจำลองไฟ AC/DC

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

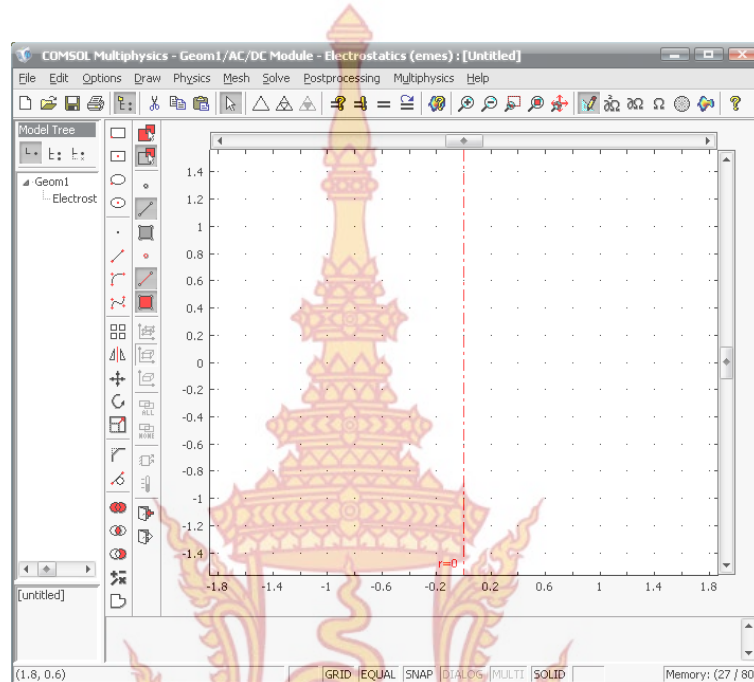
เราจะจำลองหาค่าไฟฟ้าสถิตของวัสดุฉนวน จึงเลือกโหมด Statics



รูปที่ ก. 3 เลือกวัสดุในการวิเคราะห์

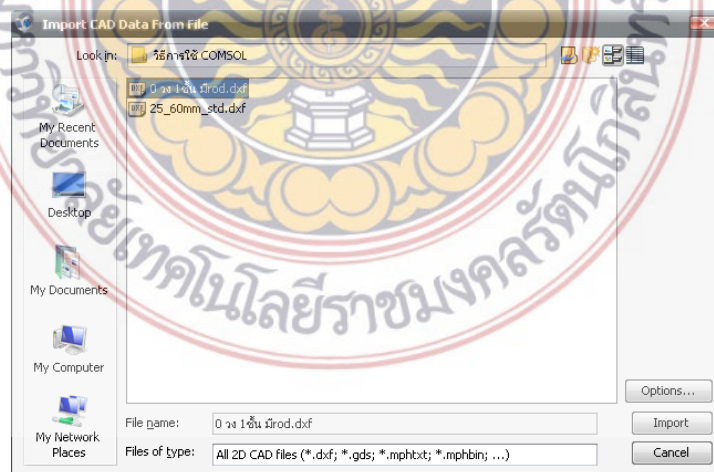
1. Conductive Media DC คือ วัสดุตัวนำ
2. Electrostatics คือ วัสดุฉนวน
3. Electrostatics, Generalized คือ การประมาณวัสดุตัวนำและฉนวน
4. Magneto statics คือ วัสดุแม่เหล็กฉนวนตัวนำ

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ Electrostatics จะเห็นว่าจะเข้ามายังหน้าต่างดังรูป



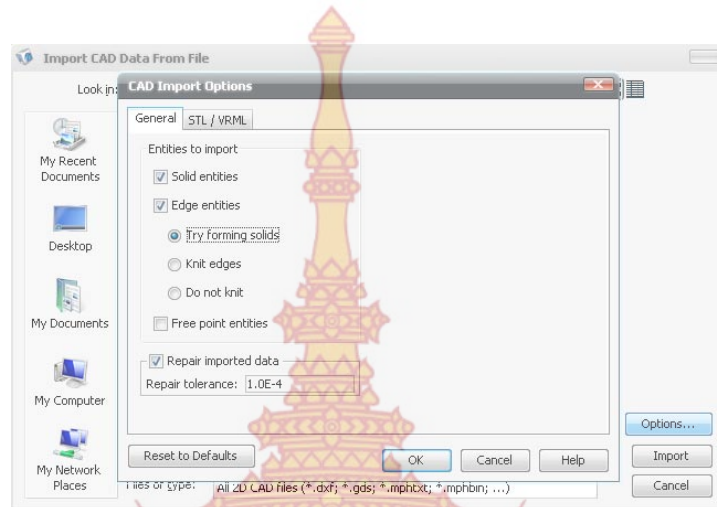
รูปที่ ก. 4 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม comsol

ขั้นที่ 1 คือ วาดภาพหรือเปิดจากโปรแกรมวาดภาพอื่นที่รองรับ ในงานวิจัยนี้จะเปิดจากไฟล์โปรแกรม AutoCAD โดยใช้นามสกุล *.dxf ไปที่ File>Import>CAD Data From File แล้วเลือกไฟล์ที่ต้องการใช้งาน

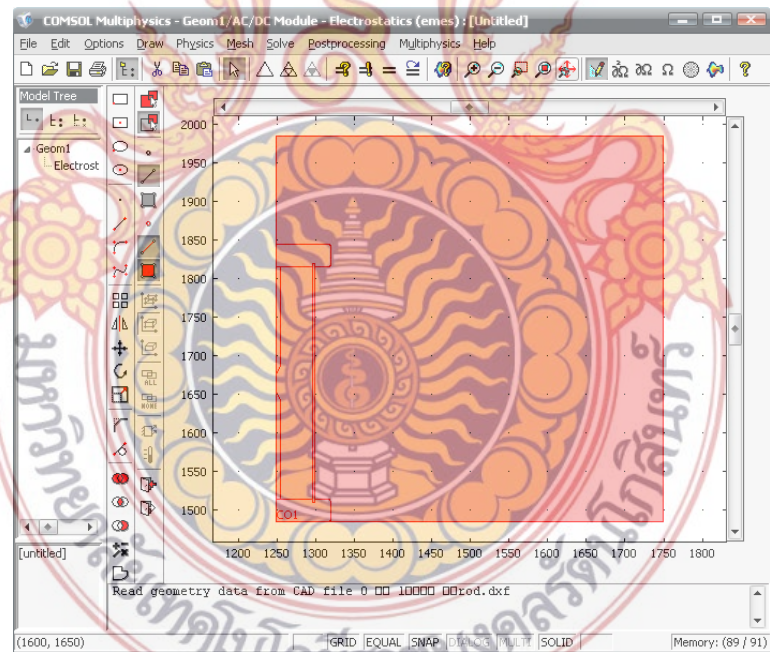


รูปที่ ก. 5 ขั้นตอนการ Import File จากโปรแกรม AutoCAD

เมื่อเลือกเสร็จแล้วให้กด options แล้วเลือก Try forming solids กด OK และ Import

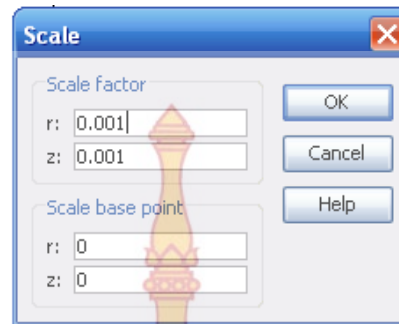


รูปที่ ก. 6 ปรับแต่งรูปแบบ File ที่ Import



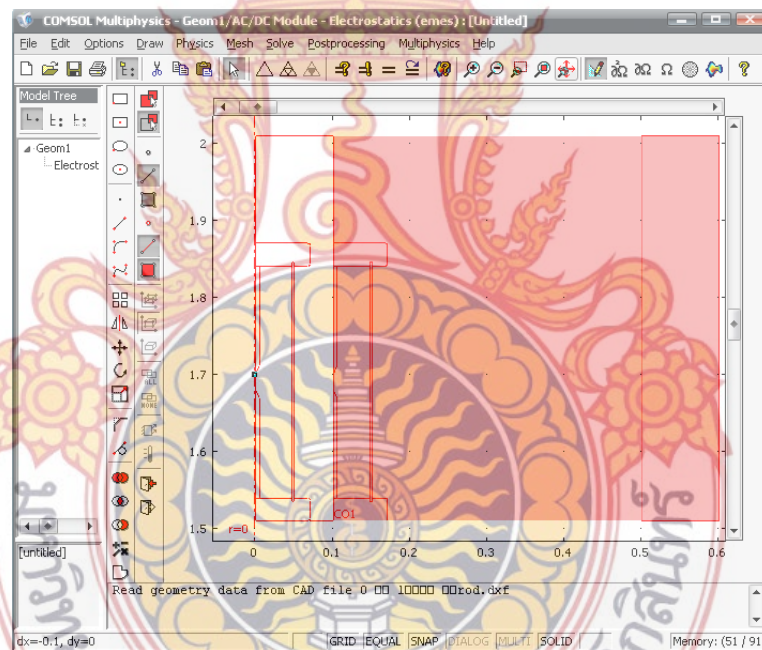
รูปที่ ก. 7 รูปที่นำจาก AutoCAD มาใช้ในโปรแกรม comsol

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



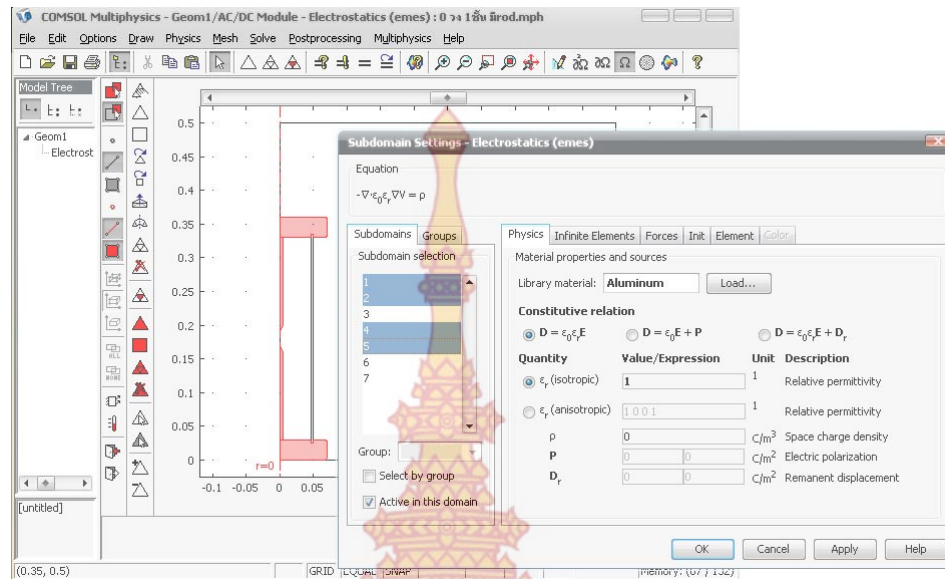
รูปที่ ก. 8 ปรับหน่วยที่ต้องการใช้

เนื่องจากภาพจะเล็กลงมากจนมองไม่เห็น ให้คลิกที่ Zoom Extents เสร็จแล้วเลื่อนให้มาติดกับเส้นสมมาตร ดังรูป

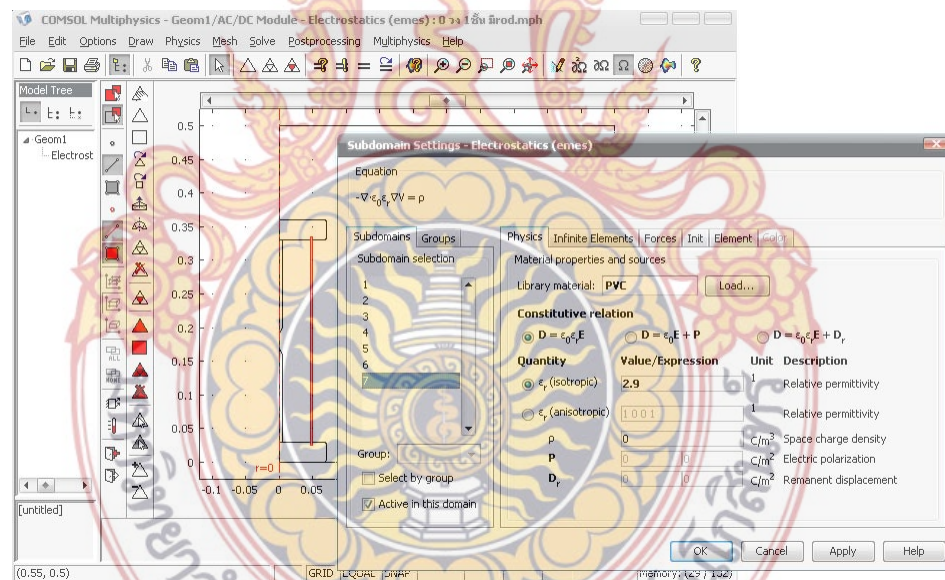


รูปที่ ก. 9 เลื่อนภาพติดกับเส้นสมมาตร

ขั้นที่ 2 ใส่เงื่อนไขขอบเขตให้กับโมเดล กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไปว่าแต่ละชั้นส่วนคืออะไร โดยการกำหนด material ไปที่ Physics > Subdomain Settings

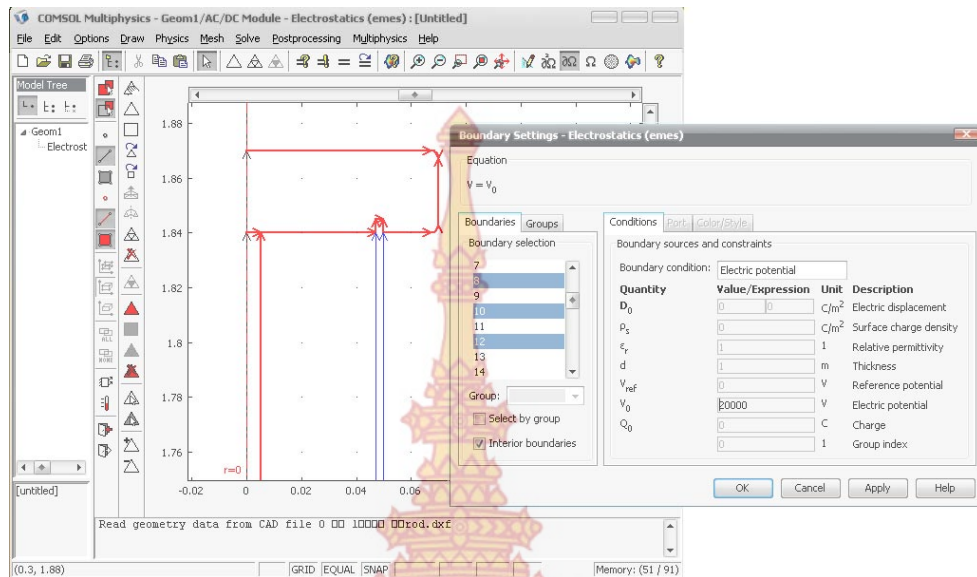


รูปที่ ก. 10 กำหนดส่วนที่เป็นวัสดุอลูมิเนียม



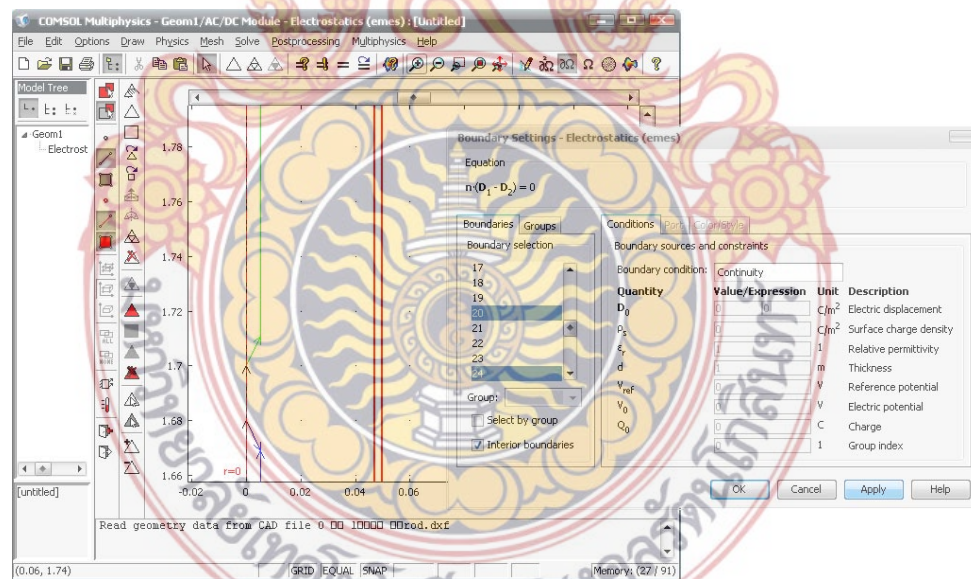
รูปที่ ก. 11 ใส่ material PVC

ไปที่ Physics > Boundary settings และเลือก Interior boundary เพราะต้องการกำหนดเงื่อนไขขอบข้างใน แสดงดังรูป

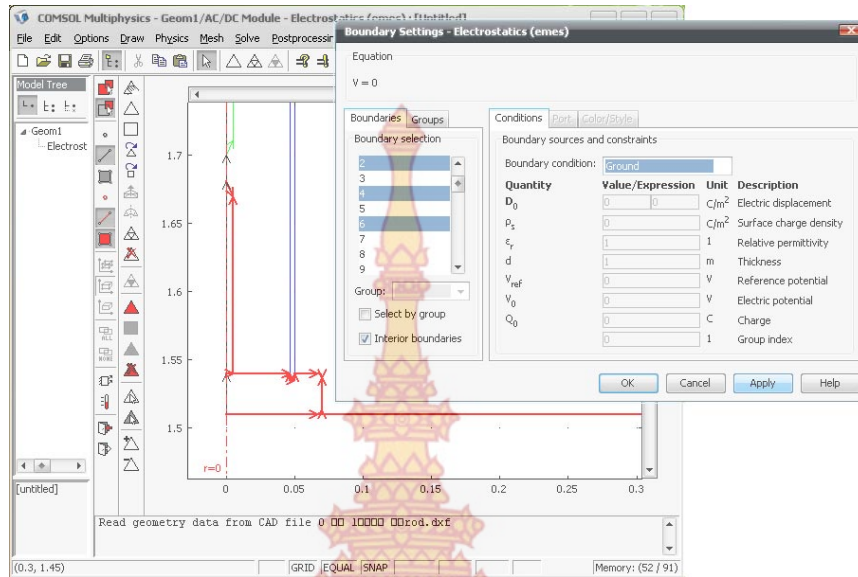


รูปที่ ก. 12 กำหนดเงื่อนไข Boundary Condition

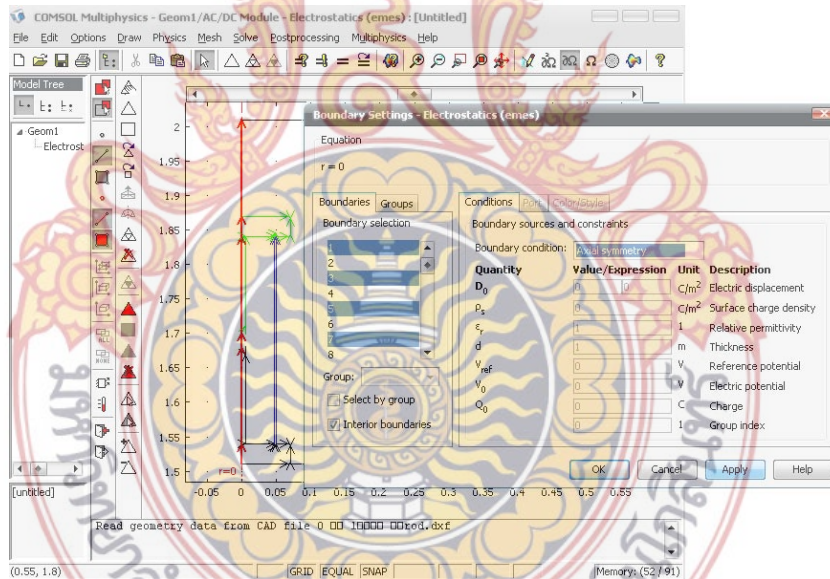
เลือกส่วนที่เป็น Electric Potential และใส่ค่าแรงดัน 20 kV เสร็จแล้วคลิก Apply



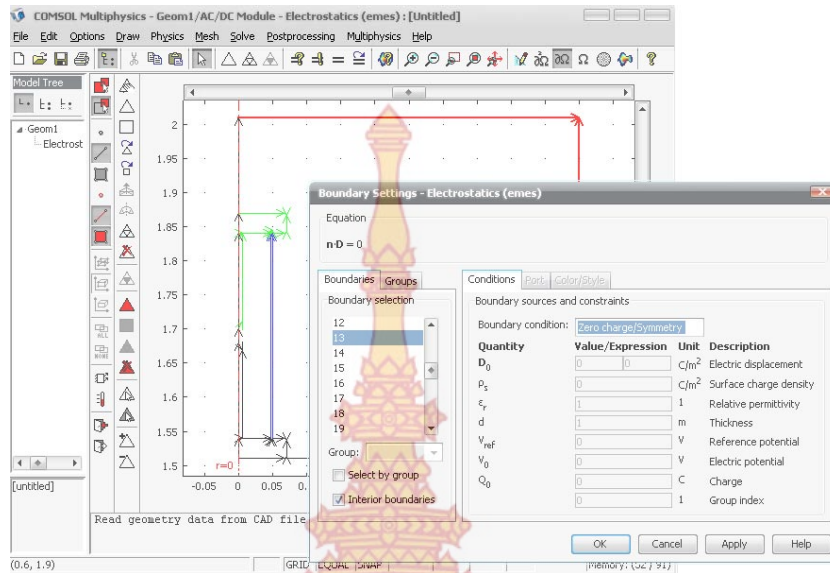
รูปที่ ก. 13 กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Continuity



รูปที่ ก. 14 กำหนดเงื่อนไขให้เป็น Ground



รูปที่ ก. 15 กำหนดให้เป็น Axial symmetry



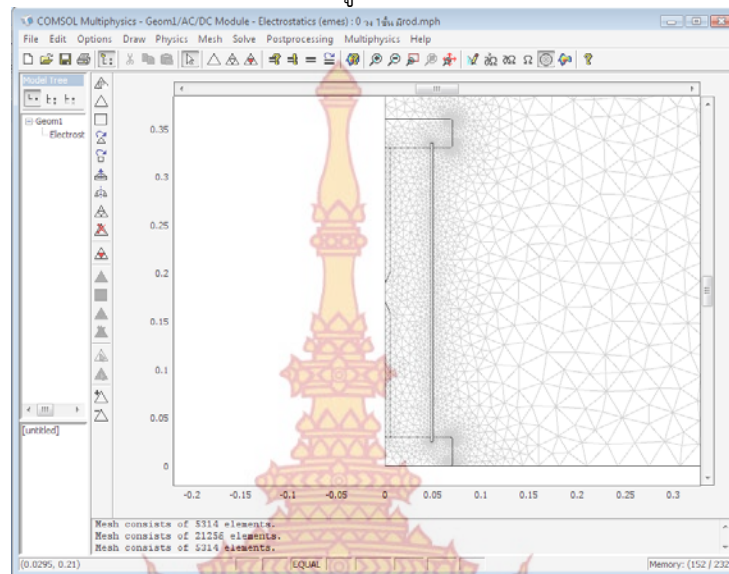
รูปที่ ก. 16 กำหนดเป็น Zero charge

ขั้นที่ 3 กลั่นกรองโดยตาข่าย ทำการติ Mesh ออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ไปที่ Mesh > Intialize Mesh ถ้าต้องการให้ Mesh เล็กกลิ้งอีกให้คลิกที่ Refine Mesh จะแสดงดัง
รูป



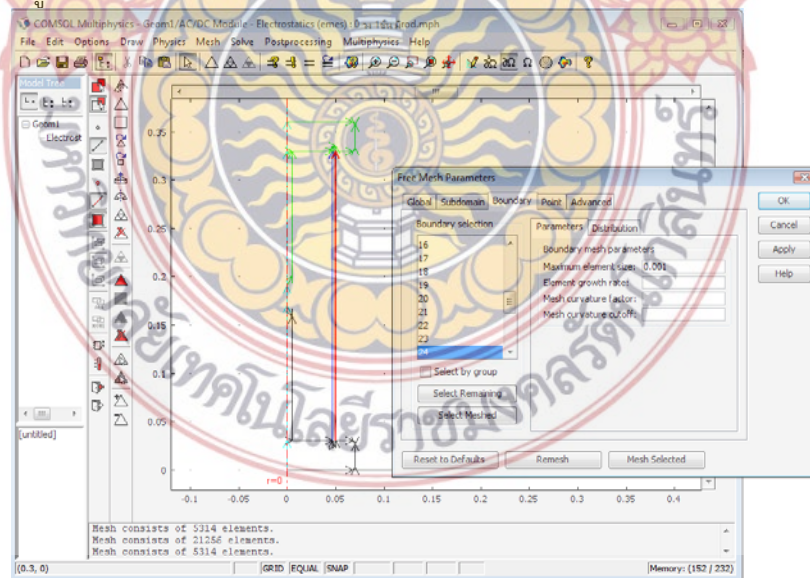
รูปที่ ก. 17 แบ่งชิ้นงานเป็นเอลิเมนต์ย่อย

ดูบริเวณที่เราสนใจ ในที่โครงการนี้จะดูการกระจายแรงดันต้นตอบริเวณผิวท่อ PVC

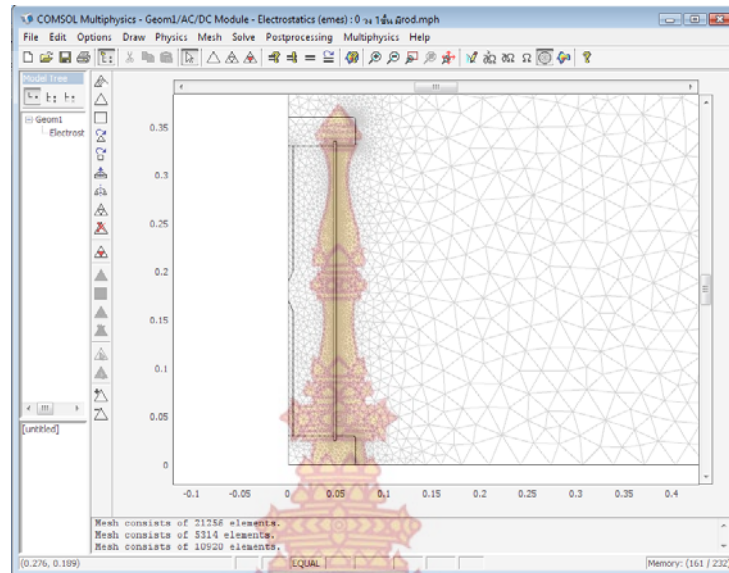


รูปที่ ก. 18 บริเวณที่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

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 Remesh ดังรูป



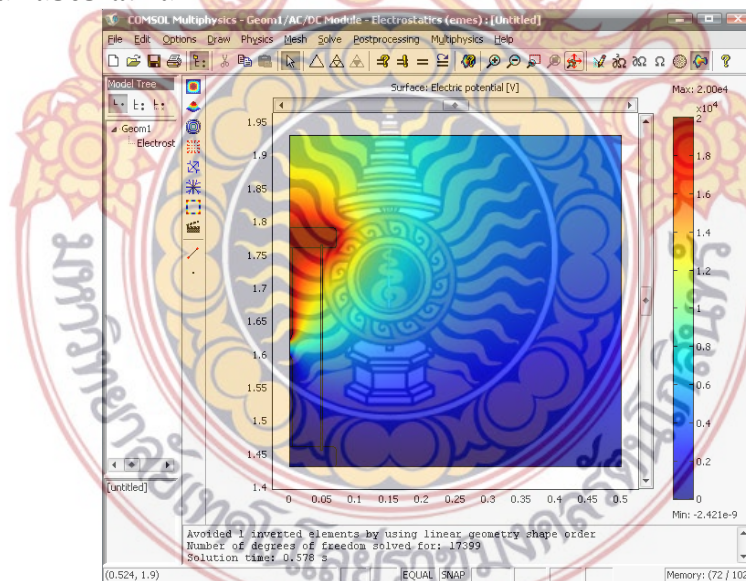
รูปที่ ก. 19 ลดขนาดของเอลิเมนต์ลง



รูปที่ ข. 20 ชิ้นส่วนเอลิเมนต์ของช่องว่างระหว่างรีดปลายแหลม

จะเห็นว่าบริเวณที่เราสนใจแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างละเอียด

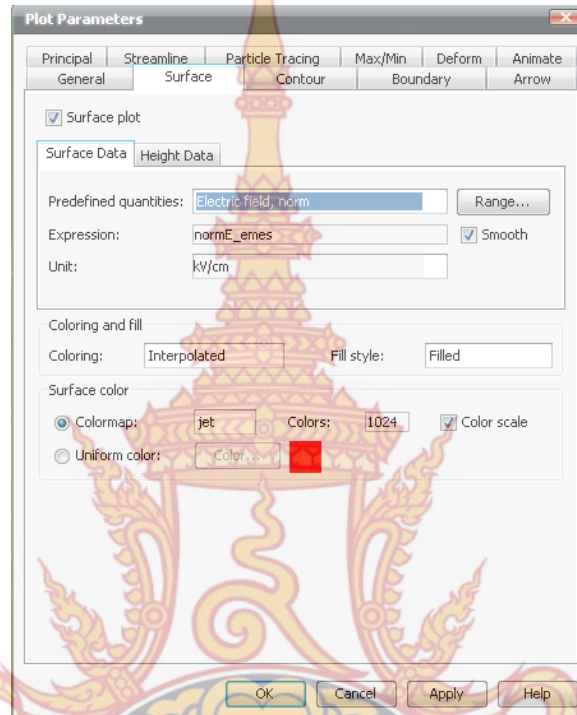
ขั้นที่ 4 การหาคำตอบจากการกำหนดค่า ไปที่ Solve > Solve Problem โปรแกรมจะทำการหาผลเฉลยของโมเดล



รูปที่ ก. 21 ผลเฉลยที่คำนวณได้

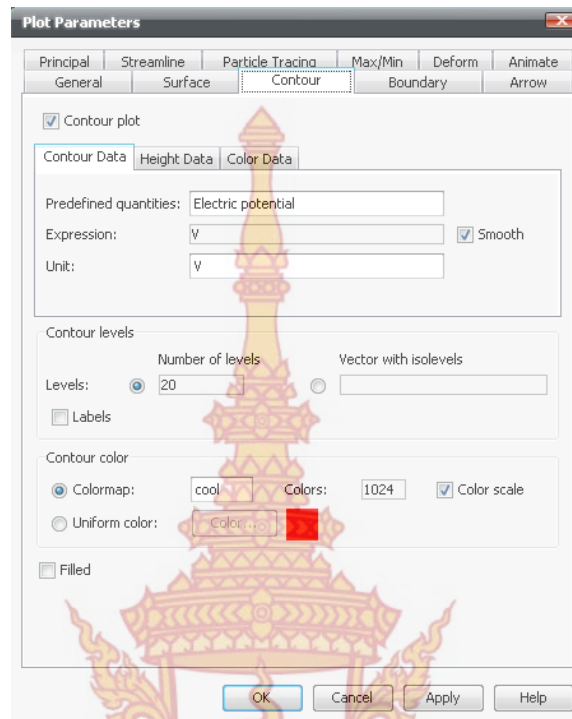
แถบข้างขวาบ่งบอกสีส้ม คือ ค่า max และสีน้ำเงิน คือ ค่า min (ของ Electric potential)

ขั้นที่ 5 การเลือกสิ่งที่จะดู ปรับการแสดงผลให้ Surface แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าและให้ Contour แสดงการกระจายแรงดันไฟฟ้า ไปที่ Post processing > Plot Parameters จะแสดงการปรับดังรูป

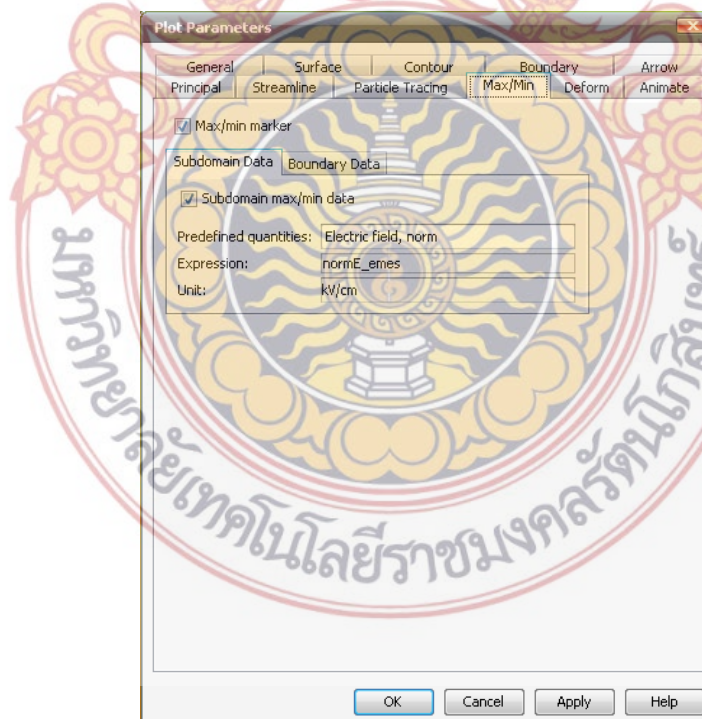


รูปที่ ก. 22 ในส่วนของ Surface

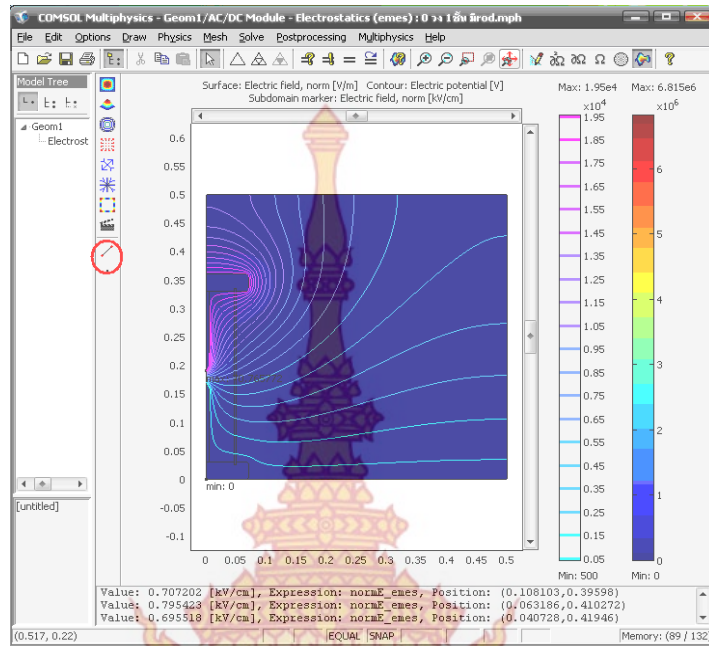
ปรับการแสดงผลให้ Surface แสดงการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าและให้ Contour แสดงการกระจายแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ ข. 23 ตี๊กเครื่องหมายถูกที่ Contour plot

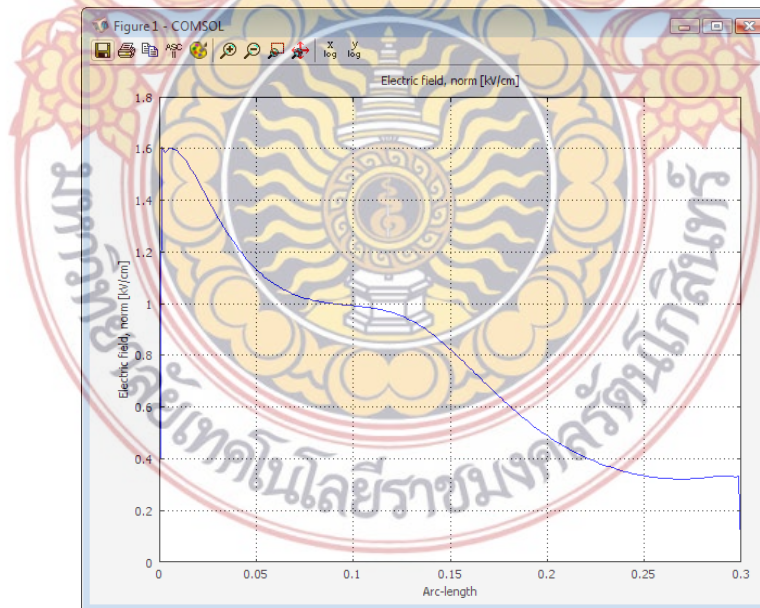


รูปที่ ก. 24 แสดงค่า max, min ของสนามไฟฟ้า




รูปที่ ก. 25 แสดง Surface และค่า max, min

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



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



ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ภูชิต ถึงสุข และพีรวัจน์ มีสุข. 2557. การศึกษาวิธีการลดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงโดยใช้โคโรนาซีลด์สตีริงริง. ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET 2014), ณ โรงแรมมารีไทม์ พาร์ค แอนสปาร์ตอร์ท จังหวัดกระบี่. วันที่ 26 – 27 มีนาคม 2557, 201 – 204 น.



ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล (ภาษาไทย) นายภูชิต ถึงสุข
ชื่อ สกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Poochit Tuengsook

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3.หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์ , Email:poochit.tue@rmutr.ac.th

4.ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี พ.ศ. 2552

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี พ.ศ. 2550

5.สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง

6.ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

ผู้ร่วมวิจัย : การทดสอบคาปาซิเตอร์ Model 415 20 kVAR

ผู้ช่วยนักวิจัย : การออกแบบสร้างเคเบิลสเปซเซอร์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง

ผู้ช่วยนักวิจัย : การทดสอบวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 20 kV

ผู้ร่วมวิจัย : ทดสอบสายเคเบิลภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงกด และแรงดึง

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

1.ภูชิต ถึงสุข นรเศรษฐ์ พัฒนเดช กฤษวัฒน์ ทองแกมแก้ว และสุรินทร์ คำฝอย. การ
วินิจฉัยสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดผลตอบสนองทางความถี่. การประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 31) ครั้งที่ 31 รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก
วันที่ 29-31 ตุลาคม 2551.

2. ภูชิต ถึงสุข นรเศรษฐ พัฒนเดช และกฤษฎวัฒน์ ทองแกมแก้ว. **พื้นฐานและตัวอย่างการประยุกต์การวิเคราะห์การวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลง.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 32) ครั้งที่ 32 โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จังหวัดปราชินบุรี วันที่ 28-30 ตุลาคม 2552.

3. นรเศรษฐ พัฒนเดช ภูชิต ถึงสุข และศรัณย์ ชิวทวีทรัพย์. **การศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าตอนที่1.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 32) ครั้งที่ 32 โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จังหวัดปราชินบุรี วันที่ 28-30 ตุลาคม 2552.

4. นรเศรษฐ พัฒนเดช ภูชิต ถึงสุข และศรัณย์ ชิวทวีทรัพย์. **การศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าตอนที่2.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 32) ครั้งที่ 32 โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จังหวัดปราชินบุรี วันที่ 28-30 ตุลาคม 2552.

5. นรเศรษฐ พัฒนเดช เพทาย นิมสนอง ภูชิต ถึงสุข และนิจธนกร สุระพร. **การศึกษาผลตอบสนองทางเวลาของโวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม ATPDraw.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 32) ครั้งที่ 32 โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จังหวัดปราชินบุรี วันที่ 28-30 ตุลาคม 2552.

6. ภูชิต ถึงสุข นรเศรษฐ พัฒนเดช และปยุณวีร์ ทองเขียว. **เทคนิคการควบคุมสนามไฟฟ้าภายใต้แรงดันกระแสสลับ.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 33) ครั้งที่ 33 โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 1-3 ธันวาคม 2553

7. ประสพโชค ให้อ่องคำ สูดาทพร อร่ามรุณ ณรงค์ชัย ทศพร ไชยยันต์ ทองสองยอด และ ภูชิต ถึงสุข. **การประเมินสมรรถนะเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง กำลังไฟฟ้าต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วม.** การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON 35) ครั้งที่ 35 รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก วันที่ 12-14 ธันวาคม 2555

8. ประสพโชค ให้อ่องคำ ณรงค์ชัย ทศพร และ ภูชิต ถึงสุข. **การสร้างทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวกับพาสซีฟโหลด.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2012) ครั้งที่ 4 โรงแรมแกรนด์ พาราไดซ์ จังหวัดหนองคาย วันที่ 3-5 เมษายน 2555

9. ประสพโชค ให้อ่องคำ สูดาทพร อร่ามรุณ ณรงค์ชัย ทศพร ไชยยันต์ ทองสองยอด ภูชิต ถึงสุข และจักรกฤษณ์ จันทรเขียว. **เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง กำลังไฟฟ้าต่ำ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วม.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2013) ครั้งที่ 5 โรงแรมหัวหินแกรนด์แอนด์พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ วันที่ 27-29 มีนาคม 2556

10. ภูชิต ถึงสุข พีรวัจน์ มีสุข และครองยศ โพธิ์ชัย. **ตัวอย่างการประยุกต์การวิเคราะห์การวัดผลตอบสนองทางความถี่ของหม้อแปลง.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2013) ครั้งที่ 5 โรงแรมหัวหินแกรนด์แอนด์พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ วันที่ 27-29 มีนาคม 2556

11.พีรวัจน์ มีสุข ภูชิต ถึงสุข และเจนศักดิ์ เอกบุรณวัฒน์. การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความผิดปกติของในหม้อแปลงจำหน่าย. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2014) ครั้งที่ 6 โรงแรมมารีไทม์ พาร์ค แอนสปา รีสอร์ท จังหวัดกระบี่ วันที่ 26-28 มีนาคม 2557

12.ภูชิต ถึงสุข และโสภา แซ่เฮ้ง. การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อเซลล์วันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2014) ครั้งที่ 6 โรงแรมมารีไทม์ พาร์คแอนสปา รีสอร์ท จังหวัดกระบี่ วันที่ 26-28 มีนาคม 2557

13.ภูชิต ถึงสุข และพีรวัจน์ มีสุข. การศึกษาวิธีการลดสนามไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสูงโดยใช้โคโรนาซิลด์สตีร์ริง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET 2014) ครั้งที่ 6 โรงแรมมารีไทม์ พาร์คแอนสปา รีสอร์ท จังหวัดกระบี่ วันที่ 26-28 มีนาคม 2557

