

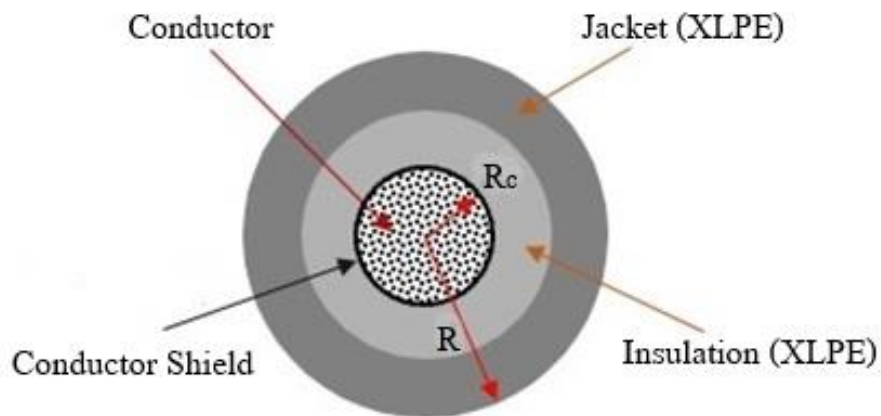
บทที่ 3

การออกแบบทางวิศวกรรม

3.1 การออกแบบคำนวณโครงสร้าง [6] [7]

3.1.1 การออกแบบสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์

การคำนวณสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลอากาศเราจะจำลองในรูปแบบการกำหนดค่าของรูปทรงกระบอกซ้อนกัน โดยพิจารณาที่สนามไฟฟ้าจากตัวนำ(สายเคเบิลอากาศ)



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ

โครงสร้างภายในพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิลอากาศประกอบไปด้วย 4 ชั้นส่วนด้วยกัน โดยแสดงให้เห็นในภาพที่ 3.1 โดยตารางที่ 3.1 คือพารามิเตอร์ขนาดของสายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. และ 185 ตร.มม. ที่ใช้กับระบบ 22 kV และ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อการคำนวณสนามไฟฟ้าในรูปแบบทรงกระบอกซ้อนกัน จึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณดังตารางที่ 3.2

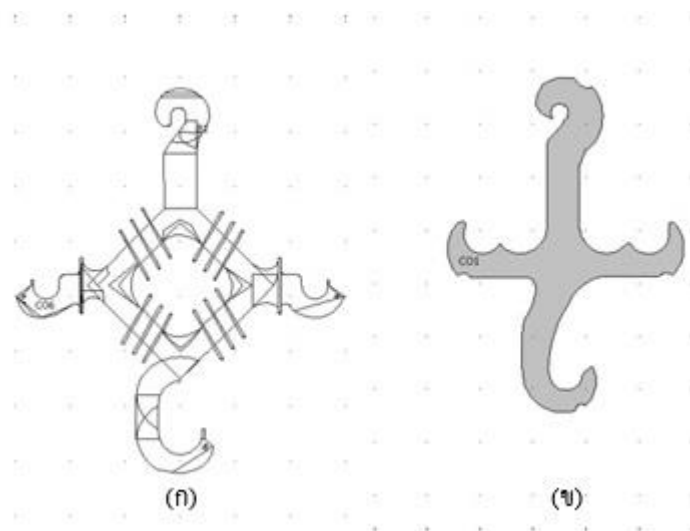
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ขนาดสายเคเบิลอากาศ

System voltage (kV)	Size (mm ²)	Diameter of conductor (mm)	Thickness of conductor shield (mm)	Thickness of insulation (XLPE) (mm)	Thickness of Jacket (XLPE) (mm)
22	50	8.33	0.3	3.175	3.175
	185	15.98			
33	50	8.33		4.445	
	185	15.98			

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

System voltage (kV)	Size (mm ²)	Radius of conductor, Rc (mm)	Thickness of insulation layer (mm)	Outer radius of cable, R (mm)
22	50	4.465	6.35	10.815
	185	8.29		14.64
33	50	4.465	7.62	12.085
	185	8.29		15.91

โครงสร้างแบบจำลองขนาดมิติของเคเบิลสเปเซอร์ ดังภาพที่ 3.2 ตามระยะรูปแบบของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค รายละเอียดตามภาคผนวกที่ ก และ ง โดยยึดระยะระหว่างเฟส โดยกำหนดค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกของเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE มีค่าเท่ากับ 2.3 และชนิดเซรามิกเท่ากับ 6.5

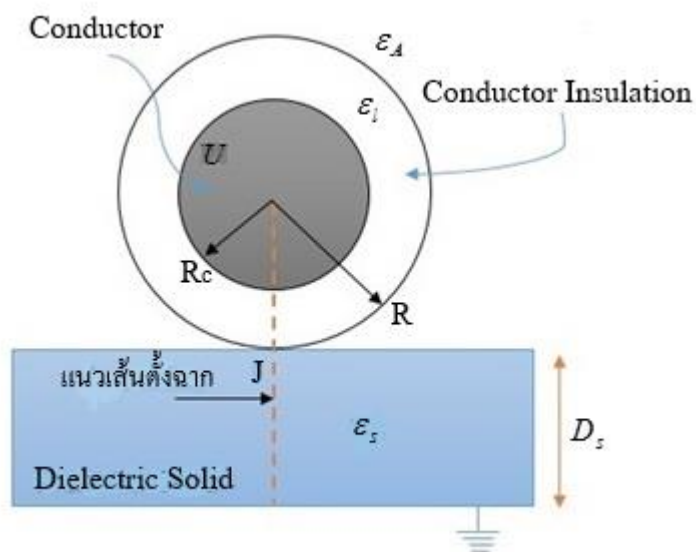


ภาพที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองของเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 ชนิด

(ก) HDPE

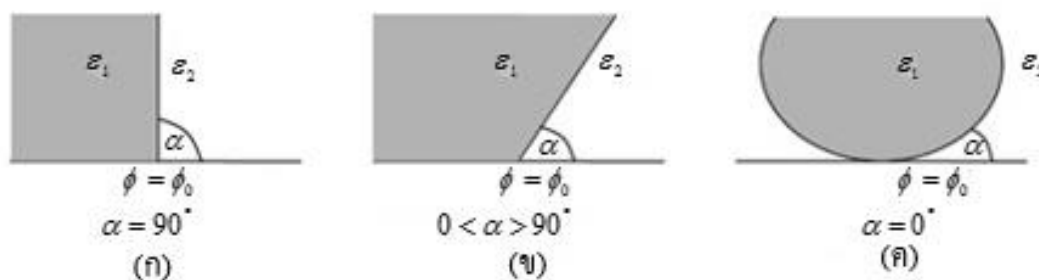
(ข) เซรามิก

3.1.2 สนามไฟฟ้าที่เฟสตัวนำและมุมสัมผัส



ภาพที่ 3.3 การกำหนดรูปทรงกระบอกวงบนฉนวนของแข็ง ในรูปแบบ 2 มิติ

สนามไฟฟ้าที่ตัวนำ ทำการกำหนดค่าในรูปแบบ 2 มิติ โดยการนำรูปแบบทรงกระบอกวงเจียงซ้อนกัน และนำไปวางไว้บนฉนวนของแข็ง ตามภาพที่ 3.3 โดยให้ตัวนำมีรัศมีเป็น R_c รัศมีตัวนำรวมกับฉนวนเป็น R ความหนาของฉนวนของแข็งเป็น D_s รูปทรงกระบอกจะสัมผัสกับฉนวนของแข็งที่จุด J และมีมุมสัมผัสที่จุด J เป็นมุม 0 องศา เนื่องจากตัวนำมีลักษณะที่โค้งมน กำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ ϵ_A มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแข็ง ϵ_s มีค่าเท่ากับ 2.3 สำหรับ ฉนวนที่เป็น HDPE และ 6.5 ที่เป็นเซรามิก การกระจายของสนามไฟฟ้าที่จุด J จะพิจารณาในเส้นแนวตั้งที่จุดศูนย์กลางของตัวนำผ่านไปยังพื้นผิวด้านล่างของฉนวนของแข็ง โดยที่พื้นผิวด้านล่างของแข็งมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ เปรียบเสมือนต่อลงดิน โดยกำหนดเส้นระยะทางจากเส้นแนวตั้งไปหาจุด J เป็นระยะ r ให้เปรียบเป็นพื้นผิวบนฉนวนของแข็งมีค่าเท่ากับด้านล่าง คือ 0 โวลต์ นั่นเอง มุมสัมผัส หรือ จุดสัมผัส โดยทั่วไปแล้วบนพื้นฐานของสนามไฟฟ้าจะสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ (ก) α มีค่าเท่ากับ 90 องศา (ข) α มีค่าอยู่ในระหว่างไม่ต่ำกว่า 0 องศา แต่ไม่เกิน 90 องศา และ (ค) α มีค่าเท่ากับ 0 องศา ตามที่แสดงในภาพที่ 3.4 สำหรับในกรณีทั้ง 3 แบบนั้น จุดสัมผัสที่มีค่าเท่ากับ 0 องศา จะเป็นค่าที่ดีที่สุด ในกรณีนี้เรานำมาวิเคราะห์ในโครงการนี้นั่นเอง



ภาพที่ 3.4 รูปแบบขนาดของมุมที่จุดสัมผัสต่างๆ

(ก) α มีค่าเท่ากับ 90 องศา

(ข) α มีค่าอยู่ในระหว่างไม่ต่ำกว่า 0 องศา แต่ไม่เกิน 90 องศา

(ค) α มีค่าเท่ากับ 0 องศา

3.1.3 การคำนวณจุดสัมผัสของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์

เนื่องสายเคเบิลอากาศซึ่งมีความเครียดของสนามไฟฟ้าตัวเองอยู่แล้ว โดยเราสามารถหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลอากาศได้ที่ ในหัวข้อที่ 2.7.1 ในบทที่ 2 โดยใช้สมการความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดของ E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{V/mm.} \quad (3.1)$$

โดย U = แรงดันไฟฟ้า (แรงดันเฟส) หน่วยเป็น V

r_1 = รัศมีของตัวนำไฟฟ้า หน่วยเป็น mm.

r_2 = รัศมีของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า หน่วยเป็น mm.

ขนาดระยะของรัศมี r_1 และ r_2 สามารถดูได้จากตารางที่ 3.1

ตัวอย่าง การหาค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่เกิดขึ้นที่ผิวของสายเคเบิลอากาศ

พิกัดแรงดันขนาด 22 kV สายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม.

แทนค่า $U = 22 \text{ kV}$

$$r_1 = 4.465 \text{ mm.}$$

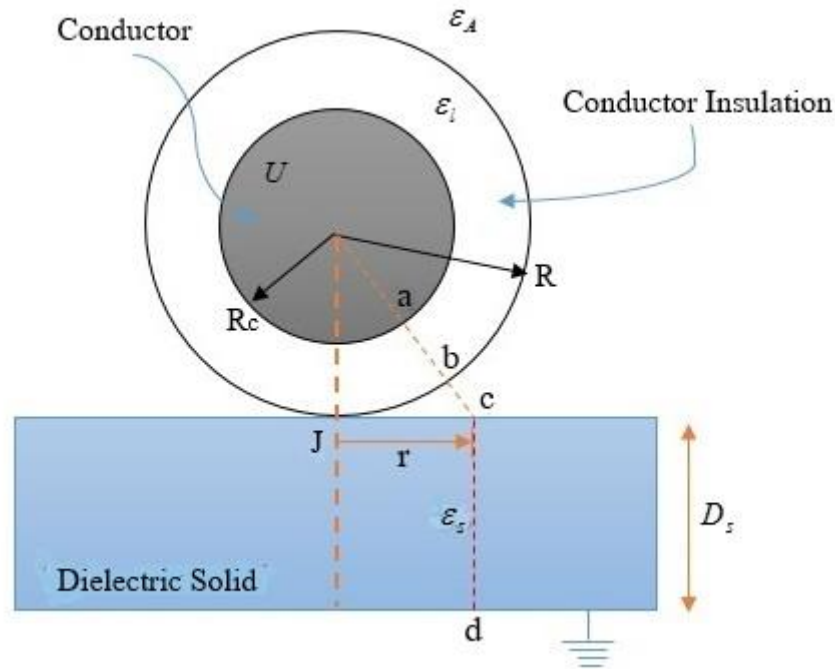
$$r_2 = 10.815 \text{ mm.}$$

$$\begin{aligned} E_{\max} = E_{r_1} &= \frac{22 \text{ kV}}{4.465 \text{ mm.} \ln \frac{10.815 \text{ mm.}}{4.465 \text{ mm.}}} \\ &= 5.569 \text{ kV/mm.} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่ผิวของทรงกระบอกซ้อนหรือที่ผิวของสายเคเบิลอากาศในระบบแรงดัน 22 kV นั้นเอง ซึ่งจะสรุปได้จากทฤษฎีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุด ว่าความเครียดของสนามไฟฟ้าเกิดที่ผิวตัวนำหรือสายเคเบิลอากาศ สรุปค่าความเครียดที่ได้ตามแรงดันที่ใช้และขนาดสายเคเบิลอากาศได้ดังนี้

ระบบแรงดัน 22 kV สายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. จะเกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าเท่ากับ 5.569 kV/mm. และ ในระบบแรงดัน 33 kV ที่ขนาดสายเดียวกันจะมีค่าเท่ากับ

7.423 kV/mm. ส่วนในขนาดสายเคเบิลอากาศที่ขนาด 185 ตร.มม. ที่ระบบแรงดัน 22 kV จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าเท่ากับ 4.667 kV/mm. และ 6.106 kV/mm. ที่แรงดัน 33 kV ตามลำดับ



ภาพที่ 3.5 การกำหนดค่าเพื่อคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้า

ส่วนการคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจุดสัมผัสนั้น เราจำคำนวณหาค่าที่จุด J ในภาพที่ 3.5 ในภาพเป็นการคำนวณตัวอย่าง โดยเลือกใช้สายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. ที่แรงดัน 22 kV ฉนวนของแข็งหรือเคเบิลสเปเซอร์แทนค่าด้วย $D_s = 3R$ โดยในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่แสดงในภาพที่ 3.5 จะทำการกำหนดจุดเพื่อให้ง่ายในการคำนวณ โดยกำหนดจุดทั้งหมด 4 จุด ด้วยกัน ได้แก่ จุด a , b , c , และ d ในที่นี้จะกำหนดระยะทางจากจุดกึ่งกลางของตัวนำถึงจุด a คือระยะรัศมีของตัวนำ (R_c) ที่จุด b คือระยะทางจากจุดกึ่งกลางตัวนำรวมฉนวน เรียกว่า ระยะรัศมี R ที่จุด c และ d คือระยะทางระหว่างของผิวฉนวนของแข็งด้านบนจนถึงพื้นผิวด้านล่าง โดยที่ r คือระยะทางจากเส้นตั้งฉากจนมาถึงจุด c คือมุมสัมผัสนั่นเอง โดยให้มีค่าเท่ากับ 0 องศา

ในรูปแบบนี้จะสามารถคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้า โดยใช้แรงดันที่จ่ายให้กับตัวนำ โดยวางอยู่บนฉนวนของแข็ง โดยกำหนดให้มีแรงดันไฟฟ้าแบบสมดุจ และให้สนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจายแบบสม่ำเสมอ ความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$E_c = \frac{U}{\overline{bc} + \overline{ab}(\varepsilon_A / \varepsilon_l) + \overline{cd}(\varepsilon_A / \varepsilon_s)} \quad (3.2)$$

โดยกำหนดใหม่ว่า ระยะ $\overline{ab} = R - Rc$, $\overline{bc} = \sqrt{R^2 + r^2} - R$ และ $\overline{cd} = D_s$ ตามจุดที่ได้กำหนดไว้แต่แรก เพื่อที่จะสามารถคำนวณความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_c และให้จุดสัมผัสหรือระยะของ \overline{bc} มีค่าเท่ากับ 0 องศา จะได้สมการใหม่ว่า

$$E_c = \frac{U}{(R - Rc)(\varepsilon_A / \varepsilon_l) + D_s(\varepsilon_A / \varepsilon_s)} \quad \text{V/mm.} \quad (3.3)$$

นั่นคือความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดสัมผัส หรือที่จุด J นั่นเอง

แทนค่าพารามิเตอร์ของสายเคเบิลอากาศและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ ε_A เท่ากับ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกฉนวนสายเคเบิลอากาศ ε_l เท่ากับ 2.3 และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนของแข็งหรือตัวเคลือบสเปเซอร์ ชนิด HDPE มีค่า 2.3 และชนิดเซรามิก 6.5 ในที่นี้ จะคำนวณในระบบแรงดัน 22 kV ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบสมดุจ และใช้สายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. โดยเลือกใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเซรามิกคือ 6.5 โดยทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ 3.3 หน่วยของรัศมีเป็น mm. จะได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดสัมผัส มีหน่วยเป็น kV/mm. คือ

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{22\sqrt{2} / \sqrt{3}}{(10.815 - 4.465)(1/2.3) + 32.445(1/6.5)} \\ &= \frac{17.9629}{(6.35)(0.4347) + 32.445(0.1538)} \\ &= 2.3177 \text{ kV/mm.} \end{aligned}$$

สรุปความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 22 kV

แรงดัน	ขนาดสาย (mm ²)	รัศมีตัวนำ Rc (mm.)	รัศมีตัวนำ รวมฉนวน R (mm.)	ระยะความหนา D _s =3R (mm.)	ϵ_l	ϵ_A	ϵ_s	ผลที่ได้ E_c kV/mm.
22	50	4.465	10.815	32.445	2.3	1	2.3	1.0652
	185	8.29	14.64	43.95	2.3	1	2.3	0.8215
	50	4.465	10.815	32.445	2.3	1	6.5	2.3177
	185	8.29	14.64	43.95	2.3	1	6.5	1.8869

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 33 kV

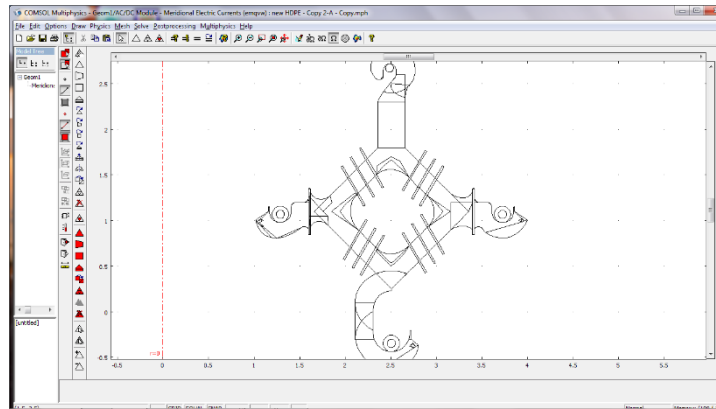
แรงดัน	ขนาดสาย (mm ²)	รัศมีตัวนำ Rc (mm.)	รัศมีตัวนำ รวมฉนวน R (mm.)	ระยะความหนา D _s =3R (mm.)	ϵ_l	ϵ_A	ϵ_s	ผลที่ได้ E_c kV/mm.
33	50	4.465	12.085	36.255	2.3	1	2.3	1.4127
	185	8.29	15.91	47.73	2.3	1	2.3	1.1260
	50	4.465	12.085	36.255	2.3	1	6.5	3.0314
	185	8.29	15.91	47.73	2.3	1	6.5	2.5292

3.2 การคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมไฟฟ้า [8]

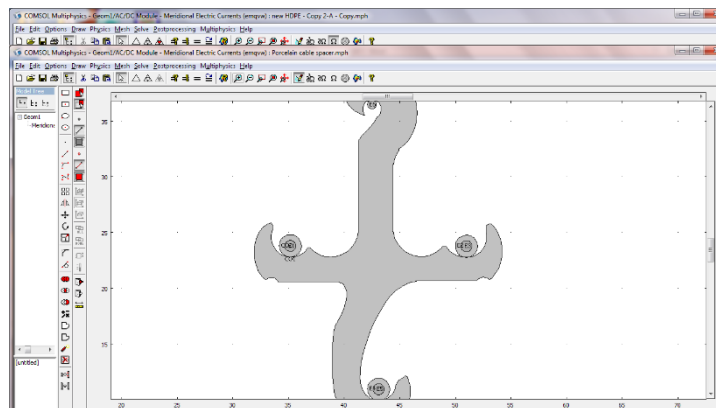
การจำลองผลของความเครียดสนามไฟฟ้าของการใช้งานร่วมกันของสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์โดยทางผู้จัดทำโครงการได้ทำการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ในด้านระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ซึ่งสามารถหาคำตอบโดยประมาณการได้และมีความนิยมในการใช้งานในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนทางรูปร่างลักษณะรวมถึงขอบเขตได้ดีด้วย โดยวิธีการแบบนี้จะเริ่มต้นด้วยการแบ่งการวิเคราะห์ห่อออกเป็นส่วนเล็กๆ ชิ้นส่วนที่แบ่งออกเราจะ

เรียกว่า Element โดยที่ Element จะมีจุดเชื่อมต่อถึงกันเราจะเรียกว่าจุดนั้นๆว่า Node และเมื่อจำนวนชิ้นส่วน Element เชื่อมต่อเป็นจำนวนมากเป็นไปตามรูปร่างรูปแบบ เราเรียกรูปร่างนั้นว่า Finite Element Model โดยขั้นตอนนี้เราจะแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. การเตรียมข้อมูล คือ การออกแบบวาดโครงสร้าง (Model) ส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกัน



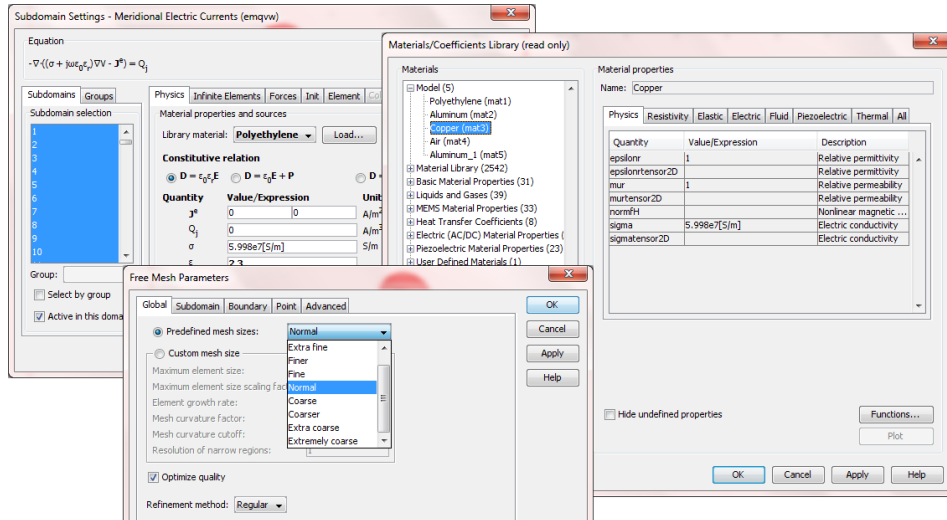
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างของเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE



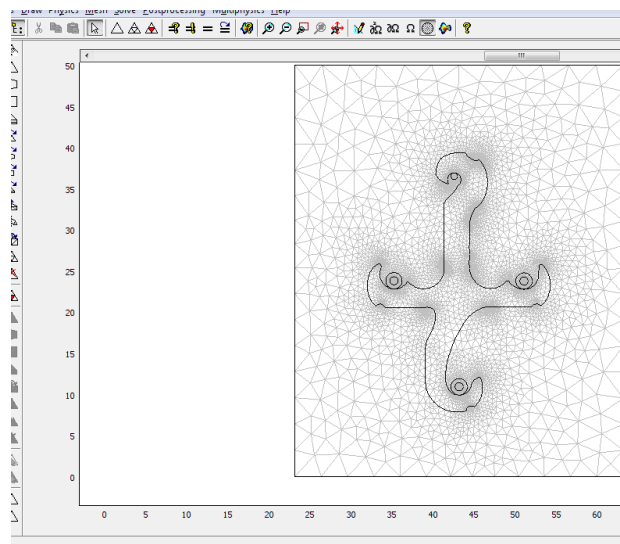
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน

2. ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับโครงสร้าง เพื่อใช้ในการประกอบในการคำนวณโครงสร้าง และทำการตีตารางโครงข่าย (Mesh) ในที่นี้ในการตีตารางโครงข่ายที่มีขนาดเล็กและ

จำนวนมากขึ้นในการคำนวณจะมีความแม่นยำสูง แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณและประมวลผลก็จะนานตามไปด้วย โดยขึ้นอยู่กับสเปคของคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้นั่นเอง

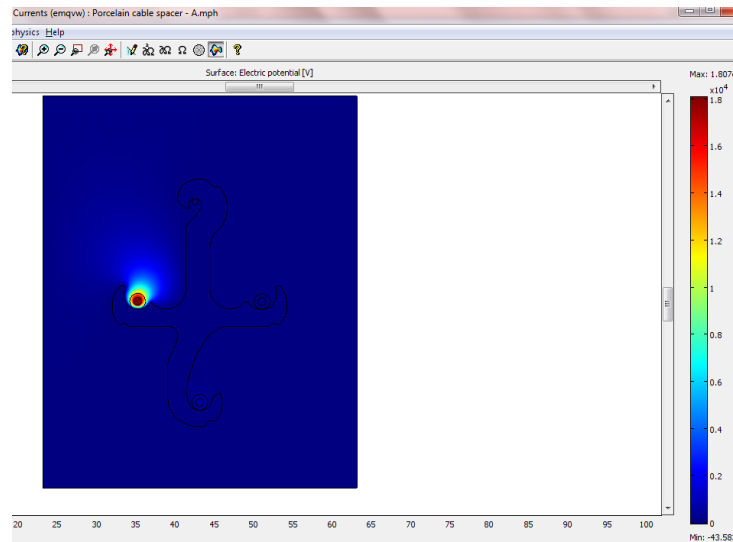


ภาพที่ 3.8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับโครงสร้าง



ภาพที่ 3.9 การตีตารางโครงข่าย (Mesh)

3. การแสดงผลในการประมวลผลออกมาในรูปแบบกราฟสีต่างๆพร้อมค่าประมาณในการคำนวณ



ภาพที่ 3.10 ผลของ Finite Element Model

การใช้งานของเคเบิลสเปเซอร์ของการไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นจะมีใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน และชนิด HDPE โดยมีการใช้งานร่วมกับสายเคเบิลอากาศ มีขนาดของสาย 50 ตร.มม. และขนาด 185 ตร.มม.

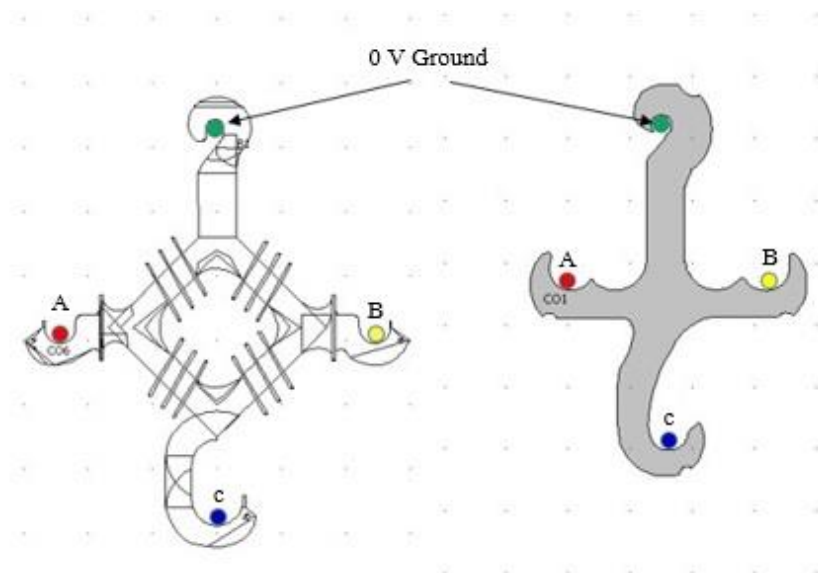


ภาพที่ 3.11 การใช้งานของเคเบิลสเปเซอร์ชนิด HDPE



ภาพที่ 3.12 การใช้งานของเคเบิลสเปเซอร์ชนิด พอร์ซเลน

โครงการนี้จะศึกษาผลกระทบของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับเคเบิลสเปเซอร์ โดยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเคเบิลสเปเซอร์โดยการจำลองป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลอากาศในแต่ละเงื่อนไขดังนี้



ภาพที่ 3.13 ตำแหน่งเฟสที่ใช้ในการทดสอบบนเคเบิลสเปเซอร์ ทั้ง 2 แบบ

1. การศึกษาโดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบที่เฟส A, B และ C ตามลำดับ ทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV ให้กับสายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. บนเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 แบบ
2. การศึกษาโดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบที่เฟส A, B และ C ตามลำดับ ทั้งในระบบ 22 kV และ 33 kV ให้กับสายเคเบิลอากาศขนาด 185 ตร.มม. บนเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 แบบ
3. การศึกษาโดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เฟส A, B และ C โดยหลักการใช้งานจริงในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสพร้อมกัน ในระบบ 22 kV และ 33 kV ให้กับสายเคเบิลอากาศขนาด 50 ตร.มม. บนเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 แบบ
4. การศึกษาโดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เฟส A, B และ C โดยหลักการใช้งานจริงในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสพร้อมกัน ในระบบ 22 kV และ 33 kV ให้กับสายเคเบิลอากาศขนาด 185 ตร.มม. บนเคเบิลสเปเซอร์ทั้ง 2 แบบ
5. การศึกษาทดลองความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันความถี่ต่ำในสภาวะผิวแห้งของเคเบิลสเปเซอร์โดยไม่เกิดการวาวไฟตามผิว โดยการทดสอบให้แรงดันทดสอบเริ่มต้นที่ 90 kV จนไปถึงแรงดันระดับที่เคเบิลสเปเซอร์เกิดการวาวไฟที่ผิวหรือเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศรอบๆตัวเคเบิลสเปเซอร์