

การศึกษานามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์

นายวัชรินทร์ สายทองอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

STUDY ON THE ELECTRIC FIELD AT THE CONTACT POINT BETWEEN
THE SPACE AERIAL CABLES AND SPACERS

Mr. Vatcharin Saithongin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษานามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิล อากาศและสเปเซอร์
โดย	นายวัชรินทร์ สายทองอินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เศษะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัถย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เศษะอำนาจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประดิษฐ์ เฟื่องฟู)

วัชรินทร์ สายทองอินทร์ : การศึกษาสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์. (STUDY ON THE ELECTRIC FIELD AT THE CONTACT POINT BETWEEN THE SPACE AERIAL CABLES AND SPACERS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ, 62 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย และรูปแบบสมจริงซึ่งอ้างอิงจากระบบสายเคเบิลอากาศที่มีการใช้งานในระบบ 22 kV. สเปเซอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ สเปเซอร์พอร์ชเลนและสเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง. จากผลการคำนวณของรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย สนามไฟฟ้าในอากาศมีค่ามากที่สุด ณ จุดสัมผัสและลดลง เมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสเพิ่มขึ้น. สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสเปเซอร์เพิ่มขึ้น. ในรูปแบบการจัดเรียงสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน สนามไฟฟ้าในอากาศที่เฟสต่าง ๆ มีค่าสูงสุด ณ จุดสัมผัส และลดลง เมื่อห่างจากจุดสัมผัสมากขึ้น. การจัดเรียงสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีลักษณะของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับระบบที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน แต่มีขนาดสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสต่ำกว่าประมาณ 41 %. นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน 3 กรณี ได้แก่ 1. ความหนาของสเปเซอร์, 2. การแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ชเลน และ 3. ระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. จากการศึกษา พบว่า สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของสเปเซอร์เพิ่มขึ้น. สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่ลดลงเล็กน้อยเมื่อชั้นพอลิเอทิลีนหนาเพิ่มขึ้น. นอกจากนี้ การเพิ่มระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบทำให้สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าลดลง.

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา2554.....

5270692321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ELECTRIC FIELD / CONTACT POINT / SPACER / SPACE AERIAL CABLE / FINITE ELEMENT METHOD

VATCHARIN SAITHONGIN : STUDY ON THE ELECTRIC FIELD AT THE CONTACT POINT BETWEEN THE SPACE AERIAL CABLES AND SPACERS.
ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONCHAI TECHAUMNAT, Ph.D., 62 pp.

This thesis presents the analysis of the electric field at the contact point in the space aerial cable system by using the finite element method (FEM). The analytical configurations are a simplified configuration and a configuration referred to a 22 kV space aerial cable system used in practice. Two materials of spacer are considered: porcelain and high-density polyethylene (HDPE). From the calculation results of the simplified configuration, the electric field in the air side is always maximal at the contact point and decreases with increasing distance from the contact point. The electric field at the contact point increases with increasing dielectric constant of the spacer. In the more practical configuration with the porcelain spacer, the electric field at each phase is always maximal at the contact point and decreases with increasing distance from contact point. The behavior of electric field in for the HDPE spacer is the similar to that for the porcelain spacer, but the contact-point electric field is smaller by 41 %. This thesis also investigates the parameters that may affect the contact-point electric field in the system with the porcelain spacer. The parameters are 1. the thickness of spacer, 2. the insertion of HDPE layer between the space aerial cable (SAC) and the spacer and 3. the distance from the SAC to the overhead ground wire. The results show that the contact-point electric field increases with the thickness of spacer. The field at the contact point rapidly decreases with the insertion the HDPE layer, but slightly decreases with further increasing thickness of the HDPE layer. Increasing the distance from the SAC to the overhead ground wire reduces the electric field at the contact point.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการค้นคว้าวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันมีค่า ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย. ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) สำหรับข้อมูลของสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์.

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำและที่มาของปัญหา.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ลักษณะโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ.....	4
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	6
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	7
2. วิธีวิเคราะห์.....	8
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.2 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.3 รูปแบบการจัดเรียงในการคำนวณ.....	12
2.3.1 รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย.....	12
2.3.2 รูปแบบการจัดเรียงสมจริง.....	14
2.4 ขั้นตอนการคำนวณ.....	15
3. สนามไฟฟ้า ณ จุดตำแหน่งจุดสัมผัสในระบอบสายเคเบิลอากาศ.....	18
3.1 ระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย.....	18
3.2 ระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริง.....	25
3.2.1 ระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	25
3.2.2 ระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง...	32

บทที่	หน้า
4. การแปรเปลี่ยนสนามไฟฟ้าตามปัจจัยต่าง ๆ.....	39
4.1 การเพิ่มความหนาของสเปเซอร์.....	39
4.2 ผลของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเป เซอร์พอร์ซเลน.....	43
4.3 ผลของระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวงเหนือระบบ.....	47
5. สรุป.....	50
รายการอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก. การอินทิเกรตเชิงเลข.....	55
ภาคผนวก ข. วิธีเกรเดียนท์สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพลวงหน้า.....	57
ภาคผนวก ค. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย...	59
ภาคผนวก ง. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อความหนาของสเปเซอร์ เปลี่ยนแปลง.....	60
ภาคผนวก จ. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศและสนามไฟฟ้า E_{VOID} ในแกปอากาศสมมติ เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในระบบ.....	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขนาดและคุณสมบัติของสายเคเบิลอากาศ [1].....	5
3.1 สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย เมื่อ $\phi = 1$ kV และ $D_S = 3R$	19
3.2 ความหนาของสเปเซอร์พอร์ซเลนและค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ.....	27
3.3 ความหนาของสเปเซอร์ HDPE และค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ.....	34
4.1 ความหนาของสเปเซอร์ที่เฟสต่าง ๆ เมื่อสเปเซอร์ที่ใช้คำนวณหนาขึ้น.....	40
4.2 D_S, D_{SH} และ E_C ที่เฟสต่าง ๆ ในระบบสเปเซอร์พอร์ซเลน 22 kV.....	47
4.3 E_C ในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV ซึ่งไม่มีสายดินล่อฟ้าวงเหนือระบบ.....	48
4.4 E_C ในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV และ $D_{SHA}=D_{SHB}=D_{SHC}=0.5369$ m... ..	48
ก.1 พิกัดเฉพาะที่และฟังก์ชันน้ำหนัก ณ ตำแหน่งจุดสัมผัสในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม.....	55
ค.1 E_C (kV/mm) เมื่อจำนวนโหนด (n) ที่ใช้คำนวณเปลี่ยนแปลง.....	59
ค.2 E_C (kV/mm) เมื่อขอบเขตการคำนวณ ($L = H$) เปลี่ยนแปลง.....	59
ง.1 E_C (kV/mm) เมื่อความหนาของสเปเซอร์เปลี่ยนแปลง.....	60
ง.2 ความหนาของสเปเซอร์ (D_S/R).....	60
จ.1 E_C (kV/mm) เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ.....	61
จ.2 E_{VOID} (kV/mm) เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ.....	61

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ระบบจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลอากาศ [1].....	1
1.2 จุดสัมผัสที่เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลอากาศ.....	2
1.3 โครงสร้างสายเคเบิลอากาศ [1]	5
2.1 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสอง.....	9
2.2 รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย.....	13
2.3 รูปร่างของสเปเซอร์ที่ใช้ในระบบ 22 kV.....	14
2.4 รูปแบบการจัดเรียงสมจริง.....	16
2.5 บริเวณและการแบ่งเอลิเมนต์ในการคำนวณสำหรับรูปแบบสมจริง.....	17
2.6 แกปอากาศสมมติ ณ จุดสัมผัส และสนามไฟฟ้า.....	17
3.1 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย.....	18
3.2 สนามไฟฟ้าในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย.....	20
3.3 ความคลาดเคลื่อนของค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส.....	22
3.4 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัส เมื่อ โหนดเพิ่มขึ้น.....	23
3.5 เอลิเมนต์ ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อ $n = 1,314$	23
3.6 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ เมื่อ $L = H = 20R$ และ $100R$	24
3.7 แนวเส้นสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	25
3.8 เอลิเมนต์ในชั้นตอนที่ 3 ของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน...	26
3.9 ศักย์ไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	29
3.10 สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	30
3.11 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	31
3.12 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 2 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน.....	31
3.13 แนวเส้นการกระจายสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE	32
3.14 เอลิเมนต์ในชั้นตอนที่ 3 ของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE.....	33
3.15 ศักย์ไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE.....	36
3.16 สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE.....	37
3.17 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE.....	38
3.18 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 2 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE.....	38

ภาพที่		หน้า
4.1	ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน เมื่อ $D_S/R = 5$	40
4.2	ค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อ D_S/R เปลี่ยนแปลง.....	41
4.3	ระนาบชั้นฉนวนสามชนิดซ้อนกัน.....	42
4.4	ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนและแทรกชั้น HDPE.....	44
4.5	เงื่อนไขขอบเขต ณ รอยต่อของชั้น HDPE.....	45
4.6	E_C และ E_{VOID} ในเฟส A เมื่อ D_L เพิ่มขึ้น.....	46
4.7	E_C และ E_{VOID} ในเฟส B เมื่อ D_L เพิ่มขึ้น.....	46
4.8	ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่ง $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC}$	49

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ϕ, V	ศักย์ไฟฟ้า
V_0	ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำในระบบอย่างง่าย
U	ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบของชั้นฉนวนของระบบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
ϕ_A	ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำในเฟส A ในระบบสมจริง
ϕ_B	ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำในเฟส B ในระบบสมจริง
ϕ_C	ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำในเฟส C ในระบบสมจริง
E	สนามไฟฟ้า
E_N	สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก
E_1	สนามไฟฟ้าในเส้นที่ 1
E_2	สนามไฟฟ้าในเส้นที่ 2
E_C	ค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในอากาศ
E_{CI}	ค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในฉนวนของตัวนำ
E_{CS}	ค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในสเปเซอร์
E_{L2}	ค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่สองของระบบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
E_{CN1}	ค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนของตัวนำ ณ จุดที่ 1
E_{CL1}	ค่าสนามไฟฟ้าในชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ณ จุดที่ 1
E_{CL2}	ค่าสนามไฟฟ้าในชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ณ จุดที่ 2
E_{CS2}	ค่าสนามไฟฟ้าในสเปเซอร์ ณ จุดที่ 2
E_{VOID}	ค่าสนามไฟฟ้าในแกปอากาศสมมติที่รอยต่อระหว่างชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสเปเซอร์
N	จำนวนอิเล็กเมนต์ที่ใช้คำนวณ
n	จำนวนของโหนดที่ใช้คำนวณ
ε_I	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนหุ้มสายเคเบิลอากาศ
ε_A	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศ
ε_S	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสเปเซอร์
ε_L	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่แทรกระหว่าง

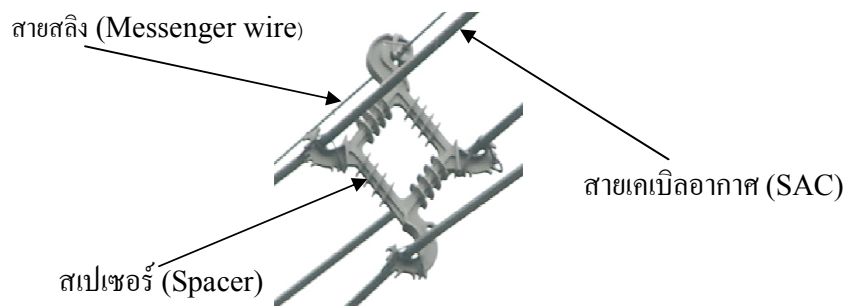
	สายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์
ϵ_1	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่หนึ่งในระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
ϵ_2	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่สองในระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
ϵ_3	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่สามในระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
R_C	รัศมีของตัวนำรวมกับซิปส์ของตัวนำในสายเคเบิลอากาศ
R	รัศมีทั้งหมดของสายเคเบิลอากาศ
D_S	ความหนาของสเปเซอร์
D_L	ความหนาของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่แทรกระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์
H	ความสูงของขอบเขตการคำนวณในรูปแบบอย่างง่าย
L	ความยาวของขอบเขตการคำนวณในรูปแบบอย่างง่าย
H_S	ความสูงของสเปเซอร์ที่อ้างอิงจากสเปเซอร์ที่ใช้จริง
L_S	ความยาวของสเปเซอร์ที่อ้างอิงจากสเปเซอร์ที่ใช้จริง
d_1	ความหนาของฉนวนชั้นที่หนึ่งของระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
d_2	ความหนาของฉนวนชั้นที่สองของระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
d_3	ความหนาของฉนวนชั้นที่สามของระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
D	ความหนารวมของฉนวนชั้นที่สองและชั้นที่สามของระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน
D_{SH}	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวงแหวนระบบ
D_{SHA}	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าของเฟส A
D_{SHB}	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าของเฟส B
D_{SHC}	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าของเฟส C

บทที่ 1

บทนำและที่มาของปัญหา

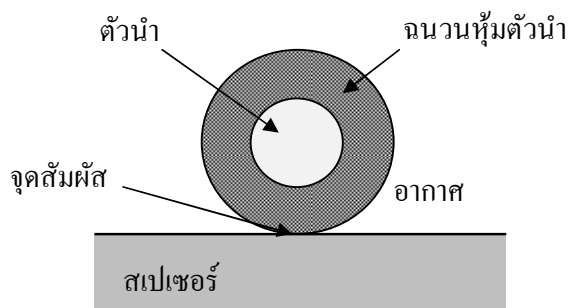
1.1 บทนำ

ในปัจจุบัน เราสามารถพบเห็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ทุกหนทุกแห่ง เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง. โดยทั่วไปแล้ว ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงมักใช้สายตัวนำเปลือยในระบบ แต่ในปัจจุบันได้มีการนำสายตัวนำหุ้มฉนวนมาใช้เพื่อลดระยะฉนวนระหว่างตัวนำ หรือป้องกันความผิดพลาดเนื่องจากการสัมผัสระหว่างตัวนำกับวัตถุในบริเวณใกล้เคียง. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลอากาศเป็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งที่เราสามารถพบเห็นได้ในปัจจุบัน. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้งานประกอบด้วยสายเคเบิลอากาศ (Space aerial cable หรือ SAC) และสเปเซอร์ (Spacer) ดังแสดงในภาพที่ 1.1. ระบบสายเคเบิลอากาศใช้สายสลิง (Messenger wire) เป็นตัวรับน้ำหนักของสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์. นอกจากนี้ สายสลิงทำหน้าที่เป็นสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ (Overhead ground wire) เพื่อป้องกันฟ้าผ่า. ทั้งนี้ ฉนวนของสายเคเบิลอากาศไม่ได้ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรับแรงดันเต็มของระบบ แต่เพียงเพื่อลดระยะฉนวนระหว่างตัวนำในระบบและลดปัญหาที่เกิดจากการสัมผัสตัวนำจากวัตถุต่าง ๆ เช่น ต้นไม้ เป็นต้น. ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลอากาศมักใช้ในการเดินสายส่งในบริเวณที่อาจมีวัสดุในบริเวณใกล้เคียง เช่น ต้นไม้ มาแตะสายเคเบิล และใช้ในการเดินสายส่งผ่านชุมชนที่มีการอยู่อาศัยหนาแน่นหรือในบริเวณที่มีระยะห่างจากตัวอาคารจำกัด. อย่างไรก็ตาม ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลไม่เหมาะจะนำไปใช้ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง เนื่องจากสายเคเบิลและสเปเซอร์มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วและเสียหายได้ง่าย [1]. ในระบบสายเคเบิลอากาศนี้มีลูกถ้วยฉนวนหรือสเปเซอร์ทำหน้าที่ยึดและรองรับสายเคเบิลอากาศรวมทั้งแยกสายเคเบิลอากาศแต่ละเฟสออกจากกันให้มีระยะที่เพียงพอต่อการฉนวน.



ภาพที่ 1.1 ระบบจ่ายไฟฟ้าแบบสายเคเบิลอากาศ [1]

จากข้อมูลการใช้งานของสายเคเบิลอากาศของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เราพบว่า มีความเสียหายของสายเคเบิลหรือสเปเซอร์ ณ บริเวณจุดสัมผัส [1]. จุดสัมผัสนี้เป็นจุดต่อสามทาง (Triple-junction point) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุฉนวน 3 ชนิด คือ ฉนวนหุ้มตัวนำ, อากาศ และสเปเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 1.2.



ภาพที่ 1.2 จุดสัมผัสที่เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลอากาศ

ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น เริ่มจากการสูญเสียฉนวนของสายเคเบิลอากาศซึ่งสามารถนำไปสู่การเกิดวาทไฟตามผิว การลัดวงจรระหว่างเฟสของตัวนำ ทำให้สายเคเบิลหรือสเปเซอร์เสียหายได้. สาเหตุที่เป็นไปได้ของความเสียหายที่เกิดขึ้นมีอยู่หลายประการ ซึ่งรวมถึงการเกิดคิสซาร์จบางส่วนขึ้นที่ผิวของฉนวน ณ จุดสัมผัส. เป็นที่ทราบกันว่าสนามไฟฟ้าที่จุดสัมผัสอาจมีค่าสูงมาก [2]. การเกิดคิสซาร์จบางส่วนเป็นผลของสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงกว่าที่ฉนวนไฟฟ้าสามารถทนได้ ซึ่งในกรณีนี้คาดว่าเป็นอากาศซึ่งมีความคงทนได้อิเล็กตริกต่ำกว่าฉนวนแข็งอีก 2 ชนิด.

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศสามารถทำได้โดยวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงตัวเลข. โดยทั่วไปแล้ว วิธีเชิงวิเคราะห์ให้ความแม่นยำของค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่า แต่อาจจะต้องประมาณรูปแบบการคำนวณ (โดยเฉพาะรูปแบบทางเรขาคณิต) ให้มีความซับซ้อนน้อยลงเพื่อที่จะได้สามารถประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ได้.

ในอีกทางหนึ่ง วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบต่าง ๆ ในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสามารถในการจำลองรูปร่างสำหรับเรขาคณิตที่ซับซ้อนได้. ปัญหาหลักในการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงก็คือความแม่นยำของคำตอบที่ได้. โดยเฉพาะในปัญหาที่ศึกษาในที่นี้ สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ณ บริเวณจุดสัมผัส. จนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาความเครียดสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสในด้านต่าง ๆ เช่น

Takuma และ Kawamoto ได้แสดงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสระหว่างฉนวนสามชนิด [2] โดยมีมุมสัมผัส (Contact angle) อยู่ระหว่าง 0 ถึง $\pi/2$. ศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าบนรอยต่อของฉนวนแปรผันตามฟังก์ชัน r^n และ r^{n-1} ตามลำดับ เมื่อ r คือระยะทางจากจุดสัมผัสและ n คือจำนวนจริงที่มีค่ามากกว่าศูนย์. Takuma และ Kawamoto ได้วิเคราะห์หาค่าของ n ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีจำลองประจุ (Charge simulation method) โดยใช้รูปแบบการจัดเรียงของฉนวนสามชนิดภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ. ผลการเปรียบเทียบพบว่า n ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย.

Techaumnat, Hamada และ Takuma ได้แสดงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสเมื่อมุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง $\pi/2$ ซึ่งวิเคราะห์ผลของสภาพนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรและสภาพนำไฟฟ้าเชิงผิว ที่มีต่อค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส [3]. สนามไฟฟ้าถูกคำนวณด้วยวิธีชั้นประกอบขอบเขต (Boundary element method) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลข. ผลการคำนวณแสดงว่า สภาพนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรทำให้สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น. ในทางตรงข้ามสภาพนำไฟฟ้าเชิงผิวช่วยลดค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส.

วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศที่มีผิวโค้งและระนาบฉนวนแข็ง ซึ่งมีมุมสัมผัสเท่ากับศูนย์ หรือที่เรียกว่า “จุดสัมผัสมุมศูนย์องศา (Zero-angle contact point)”.

ในกรณีของมุมสัมผัสเท่ากับศูนย์ Takuma และ Kawamoto ได้แสดงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าใกล้จุดสัมผัส [4]. รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการคำนวณมีหลายชนิด เช่น ตัวนำทรงกลมวางบนฉนวนแข็ง เป็นต้น. วิธีคำนวณสนามไฟฟ้าที่ใช้เป็นวิธีเชิงเลขเรียกว่าวิธีจำลองประจุ. ผลการศึกษาของ Takuma และ Kawamoto พบว่า สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในอากาศมีค่ามากที่สุดและมีค่าลดลงเมื่อห่างจากจุดสัมผัส. นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังแสดงผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็งที่มีต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส ซึ่งค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก.

Huynh และ Techaumnat วิเคราะห์พฤติกรรมของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส โดยใช้วิธีเงามัลติโพลสำหรับบริเวณสองมิติ ในการคำนวณสนามไฟฟ้า [5]. รูปแบบการจัดเรียงของปัญหาที่ใช้คำนวณประกอบด้วยสายเคเบิลอากาศวางบนสเปเซอร์ โดยมีตัวกลางพื้นหลังเป็นอากาศ. Huynh และ Techaumnat หาความสัมพันธ์ของค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในอากาศ E_C กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็ง ϵ_S (สเปเซอร์) ได้ว่า E_C มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ϵ_S แบบไม่เป็นเชิงเส้น. ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วน $D/R = 3$ เมื่อ D คือความหนาของฉนวนแข็งและ R คือรัศมีของสายเคเบิลอากาศ ในกรณี $\epsilon_S = 2.2$ สำหรับครอสลิงก์พอลิเอทิลีน (XLPE), ค่า E_C เท่ากับ 0.094 kV/mm และในกรณี $\epsilon_S = 7$ สำหรับพอร์ซเลน (Porcelain), ค่า E_C เท่ากับ 0.199 kV/mm. เมื่อ

แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 22 kV ผลการเปรียบเทียบของค่า E_C ทั้งสองกรณี มีค่าผลต่างเท่ากับ 52 %. นอกจากนี้ ความหนาของสเปเซอร์มีผลต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสซึ่งมีค่าลดลง เมื่อความหนาของสเปเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น.

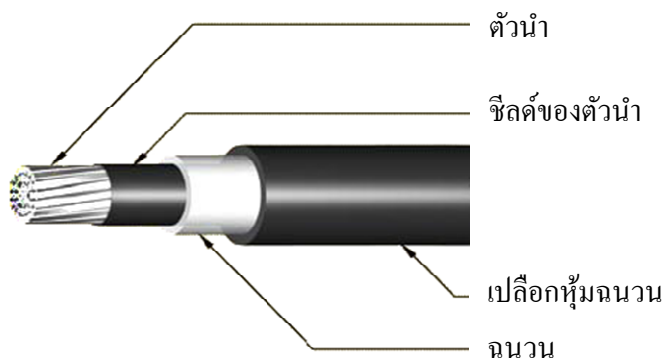
วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาลักษณะสมบัติของสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศ โดยใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายและรูปแบบสมจริงซึ่งมีมิติและรูปร่างอ้างอิงกับสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ที่ใช้งานอยู่จริง. รูปแบบการจัดเรียงของปัญหาถูกลดรูปเป็นสองมิติ เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ. ในวิทยานิพนธ์นี้ วิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นวิธีเชิงอนุพันธ์. อย่างไรก็ตาม คำตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นคำตอบโดยประมาณซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์. ความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ โดยเพิ่มจำนวนโหนด (Node) และกำหนดขนาดของขอบเขตการคำนวณให้เหมาะสม [6].

1.2 ลักษณะโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ

โครงสร้างหลักของสายเคเบิลอากาศที่ใช้ประกอบด้วยตัวนำ, ฉนวนของตัวนำ, ฉนวน และเปลือกหุ้มฉนวน ซึ่งแสดงอยู่ในภาพที่ 1.3 ดังนี้.

- ตัวนำ เป็นตัวนำอลูมิเนียมแบบตีเกลียวรวมศูนย์กลมอัดแน่น (Compact round concentric-lay-stranded aluminium conductor).
- ฉนวนของตัวนำ ทำจากวัสดุครอสลิงก์พอลิเอทิลีนชนิดกึ่งตัวนำ (Semi-conductive Cross-linked polyethylene).
- ฉนวน ทำจากวัสดุครอสลิงก์พอลิเอทิลีน (Cross-linked polyethylene หรือ XLPE) ซึ่งไม่มีส่วนผสมของผงคาร์บอน.
- เปลือกหุ้มฉนวน (Jacket) ทำจากวัสดุครอสลิงก์พอลิเอทิลีน (Black cross-linked polyethylene) มีส่วนผสมของผงคาร์บอนประมาณ 2 % โดยน้ำหนัก และมีคุณสมบัติป้องกันการเกิดรอยทางไฟฟ้า (Tracking).

ตารางที่ 1 แสดงขนาดและคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายเคเบิลอากาศที่ใช้งานในปัจจุบันตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.).



ภาพที่ 1.3 โครงสร้างสายเคเบิลอากาศ [1]

ตารางที่ 1.1 ขนาดและคุณสมบัติของสายเคเบิลอากาศ [1]

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ขนาดพื้นที่หน้าตัดของ Conductor (mm ²)	เส้นผ่าศูนย์กลางของ Conductor (mm)	ความหนาเฉลี่ยของ Conductor shield (mm)	ความหนาของ Insulation (XLPE) (mm)	ความหนาของ Jacket (Black XLPE) (mm)
22	50	8.33	0.3	3.175	3.175
	185	15.98		3.175	
33	50	8.33		4.445	
	185	15.98		4.445	

1.3 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศ ณ บริเวณจุดสัมผัสด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยพิจารณาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก, ความหนาของสเปเซอร์, การแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ และระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวงเหนือระบบ ที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าในบริเวณจุดสัมผัส.

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 วิธีการคำนวณที่นำมาใช้ในการหาสนามไฟฟ้าเป็นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับบริเวณ 2 มิติ.

1.4.2 รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการคำนวณเป็นแบบจำลองของระบบสายเคเบิลอากาศอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยฉนวนของสายเคเบิลอากาศ อากาศที่ล้อมรอบและสเปเซอร์ และรูปแบบสมจริงซึ่งมีมิติและรูปร่างอ้างอิงกับสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ที่ใช้งานอยู่จริง. สเปเซอร์ที่ใช้ร่วมกับสายเคเบิลอากาศในรูปแบบสมจริง ได้แก่ สเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน (Porcelain) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene หรือ HDPE).

1.4.3 วัสดุฉนวนที่นำมาใช้มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกคงที่ ซึ่งประกอบด้วยฉนวนของสายเคเบิล (XLPE) ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_l = 2.2$, อากาศซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_a = 1$, สเปเซอร์ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_s = 1$ (อากาศ), 2.2 (HDPE) และ 7 (พอร์ซเลน) ตามลำดับ และชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE layer) ที่นำมาแทรกระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ $\epsilon_L = 2.2$.

1.4.4 ไม่พิจารณาผลของสภาพนำไฟฟ้าทั้งเชิงปริมาตรและเชิงผิวของวัสดุฉนวน.

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า.

1.5.2 ศึกษาวิธีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า.

1.5.3 ออกแบบโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าซึ่งพัฒนาบนพื้นฐานของโปรแกรม Matlab.

1.5.4 ศึกษาวิธีการจำลองรูปแบบเรขาคณิตของปัญหาที่ซับซ้อนด้วยโปรแกรม Gmsh.

1.5.5 ทดสอบหาคำตอบและความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบสายเคเบิลอากาศ.

1.5.6 วิเคราะห์ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าบนรูปแบบที่ประกอบด้วยสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายและรูปแบบสมจริงซึ่งมีมิติและรูปร่างอ้างอิงกับสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ที่ใช้งานอยู่จริง.

1.5.7 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแปรเปลี่ยนของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลน. ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความหนาของสเปเซอร์, การ

แทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ และระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ.

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.6.1 เข้าใจพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศกับสเปเซอร์ซึ่งมีผลต่อการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบริเวณดังกล่าว.

1.6.2 เป็นพื้นฐานในการการออกแบบสเปเซอร์เพื่อสามารถลดค่าสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสในระบบจนวนได้.

บทที่ 2

วิธีวิเคราะห์

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบัน ความสามารถในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมมีการพัฒนาอย่างเนื่อง และมีเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า ทำให้เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่รอบตัวได้. ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยใช้กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ซึ่งอาจจะมีรูปแบบเป็นสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล. วิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ มีหลากหลายวิธี. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรม.

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้หาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด [7, 8]. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นิยมใช้ในการแก้ปัญหาด้านวิศวกรรม เนื่องจากสามารถใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนและสามารถจำลองรูปร่างของปัญหาที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับของจริงได้. นอกจากนี้ สมรรถนะและหน่วยความจำของเครื่องคำนวณทำให้คำตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์. ในการวิจัยนี้ เครื่องคำนวณที่ใช้เป็นคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่มีชิพ Intel(R) Core(TM)2 T5300 @ 1.73 GHz และมีหน่วยความจำเท่ากับ 3 GB. ระบบปฏิบัติการเป็น Microsoft Window 7.

ขั้นตอนการคำนวณของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการแบ่งบริเวณรูปร่างของปัญหาเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element). จากนั้นพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยสร้างสมการให้สอดคล้องกับปัญหาที่พิจารณาอยู่ และนำสมการที่สร้างในแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเป็นระบบสมการเชิงเส้น. คำตอบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตำแหน่งต่าง ๆ หาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยนำค่าเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาประยุกต์ใช้. โดยทั่วไป รูปร่างของเอลิเมนต์ที่ใช้เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular element) สำหรับการคำนวณบนบริเวณ 2 มิติ. ความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา.

2.2 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ ซึ่งเป็นคำตอบของสมการลาปลาซ

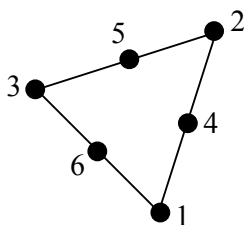
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้า. สนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้า.

หลักการพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มต้นจากแบ่งบริเวณของปัญหาที่ใช้ในการคำนวณออกเป็นรูปจำลองแบบเรขาคณิตส่วนย่อย ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์. สำหรับบริเวณ 2 มิติ รูปแบบเรขาคณิตที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ซึ่งเหมาะแก่การจำลองเอลิเมนต์ในปัญหาที่ซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง. วิทยานิพนธ์นี้ใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสองซึ่งมีความแม่นยำสูงในการคำนวณวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.



ภาพที่ 2.1 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสอง

ภาพที่ 2.1 แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสองมีจุดต่อที่เรียกว่า โหนด (Node) ที่มุมและจุดกึ่งกลางของเอลิเมนต์รวมทั้งสิ้น 6 โหนด. ความแม่นยำของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นอกจากขึ้นกับอันดับของเอลิเมนต์ว่าเหมาะสมกับคำตอบของปัญหาหรือไม่แล้ว ยังขึ้นกับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์อีกด้วย. เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการจัดเรียงซึ่งมีความซับซ้อน. ดังนั้นการแบ่งเอลิเมนต์จึงกำหนดให้ในบริเวณที่สนใจคำตอบ (ค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า) มีความหนาแน่นของเอลิเมนต์สูง และให้ในบริเวณที่ไม่สนใจคำตอบมีความหนาแน่นของเอลิเมนต์ต่ำ.

เมื่อแบ่งบริเวณย่อยของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แล้ว เราจะพิจารณาเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ให้สอดคล้องกับปัญหาที่พิจารณา จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเป็นระบบสมการเชิงเส้น. คำตอบโดยประมาณ (ค่าศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งโหนดที่ไม่ทราบค่า) คำนวณได้จากการแก้ระบบสมการเชิงเส้น โดยประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.

รายละเอียดของการคำนวณหาคำตอบของสมการลาปลาซด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสองอธิบายได้ดังนี้.

คำตอบโดยประมาณ (ค่าศักย์ไฟฟ้า) ภายในเอลิเมนต์ถูกประมาณด้วยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งโดยทั่วไปใช้การประมาณแบบพหุนาม (Polynomial). ค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ^e ภายในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสองซึ่งแสดงในภาพที่ 2.1 เขียนอยู่ในรูปของ

$$\phi^e(x, y) = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ x และ y คือพิกัดตำแหน่งที่พิจารณาศักย์ไฟฟ้าในระนาบ x - y และ a, b, c, \dots, f คือค่าคงตัวที่ได้จากตำแหน่งและศักย์ไฟฟ้าที่โหนด. นอกจากนี้ ศักย์ไฟฟ้า ϕ^e ภายในเอลิเมนต์ยังสามารถจัดในรูปของค่ารวมของผลคูณระหว่างศักย์ไฟฟ้า ϕ_i^e ที่โหนด i ของเอลิเมนต์ e กับฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function) N_i^e ของโหนด i ได้เป็น

$$\phi^e = \sum_{i=1}^6 N_i^e(L_1, L_2) \phi_i^e \quad (2.4)$$

เมื่อ (L_1, L_2) คือพิกัดเฉพาะที่ (Local coordinates) ของตำแหน่งที่ประมาณค่า ϕ_i^e . ฟังก์ชันรูปร่างของแต่ละโหนดมีนิยามดังนี้

$$\left. \begin{aligned} N_1^e(L_1, L_2) &= (2L_1 - 1)L_1 \\ N_2^e(L_1, L_2) &= (2L_2 - 1)L_2 \\ N_3^e(L_1, L_2) &= [2(1 - L_1 - L_2) - 1](1 - L_1 - L_2) \\ N_4^e(L_1, L_2) &= 4L_1L_2 \\ N_5^e(L_1, L_2) &= 4L_2(1 - L_1 - L_2) \\ N_6^e(L_1, L_2) &= 4L_1(1 - L_1 - L_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ทั้งนี้ ตำแหน่งภายในเอลิเมนต์ก็เป็นฟังก์ชันของพิกัด (x_i, y_i) และฟังก์ชันรูปร่างเช่นเดียวกัน โดย

$$x = \sum_{i=1}^6 N_i(L_1, L_2) x_i \quad \text{และ} \quad y = \sum_{i=1}^6 N_i(L_1, L_2) y_i \quad (2.6)$$

การสร้างสมการเชิงเส้น เพื่อหาคำตอบของสมการลาปลาซ จะพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าของบริเวณปัญหา. สำหรับปัญหาศักย์ไฟฟ้า 2 มิติ พลังงานไฟฟ้า W^e ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเอลิเมนต์ e คือ

$$W^e = \frac{1}{2} \int_e \epsilon^e \|\nabla \phi^e\|^2 dS \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ^e คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของเอลิเมนต์ e . จาก (2.4) เราหาเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าได้จาก

$$\nabla \phi^e = \sum_{i=1}^6 \nabla N_i^e(L_1, L_2) \phi_i^e \quad (2.8)$$

จากนั้นแทน (2.8) ใน (2.7) จะได้

$$W^e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \varepsilon^e \phi_i^e \left[\int_0^{1-L_1} \int_0^0 (\nabla N_i \cdot \nabla N_j) \left\| \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_1} \times \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_2} \right\| dL_2 dL_1 \right] \phi_j^e \quad (2.9)$$

เมื่อ i, j คือหมายเลขของโหนด, $\bar{x} = x\bar{a}_x + y\bar{a}_y$, \bar{a}_x และ \bar{a}_y คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ. กำหนดให้

$$K_{ij}^e = \varepsilon^e \left[\int_0^{1-L_1} \int_0^0 (\nabla N_i \cdot \nabla N_j) \left\| \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_1} \times \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_2} \right\| dL_2 dL_1 \right] \quad (2.10)$$

และ

$$\nabla N_i = \frac{\partial N_i}{\partial x} \bar{a}_x + \frac{\partial N_i}{\partial y} \bar{a}_y \quad (2.11)$$

โดย

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial x} &= \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \frac{\partial L_1}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial L_2} \frac{\partial L_2}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} &= \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \frac{\partial L_1}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial L_2} \frac{\partial L_2}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

และกำหนดให้ $[K^e]$ คือเมตริกซ์ขนาด 6×6 ซึ่งมี K_{ij}^e เป็นสมาชิกและ $[\phi^e]$ เป็นเมตริกซ์ขนาด 6×1 ซึ่งมีสมาชิกเป็นศักย์ไฟฟ้าที่โหนดของเอลิเมนต์. เราสามารถเขียนสมการที่ (2.9) ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$W^e = \frac{1}{2} [\phi^e]^T [K^e] [\phi^e] \quad (2.13)$$

เราสามารถนำสมการที่ (2.13) ของทุกเอลิเมนต์มาประกอบเป็นพลังงานของบริเวณทั้งหมดได้ดังนี้.

$$W = \sum_{e=1}^N W^e = \frac{1}{2} [\phi]^T [K_{SYS}] [\phi] \quad (2.14)$$

เมื่อ $[\phi]$ เป็นเมตริกซ์ $n \times 1$ ซึ่งมีสมาชิกเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ, $[K_{SYS}]$ เป็นเมตริกซ์ที่ได้จากการประกอบ $[K^e]$ ของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $n \times n$, N คือจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดในระบบ และ n คือจำนวนโหนดทั้งหมดในระบบ.

เราเรียก $[K_{SYS}]$ ว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์รวม. คำตอบของสมการลาปลาซได้จากการใช้เงื่อนไขที่ว่า ศักย์ไฟฟ้าต้องทำให้พลังงานรวมมีค่าน้อยที่สุด. เมื่อทำการหาอนุพันธ์บางส่วนของ W ในสมการที่ (2.14) เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ_i ของโหนด i ที่ไม่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้า เราจะได้

$$\frac{\partial W}{\partial \phi_i} = 0 \quad (2.15)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^n \phi_i K_{ij} = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อ i, j คือหมายเลขของโหนดและ $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ที่ทุก ๆ ค่า i และ K_{ij} คือสมาชิกของ $[K_{SYS}]$ ณ แถวที่ i และสดมภ์ที่ j .

เมื่อสร้างระบบสมการรวมเสร็จสิ้นโดยใช้ i เป็นโหนดที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด. จากเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าที่ทราบค่า เราสามารถแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาคำตอบซึ่งก็คือ ϕ_i ที่ไม่ทราบค่าได้. จากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณสนามไฟฟ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.2).

ในวิทยานิพนธ์นี้ รูปร่างทางเรขาคณิตที่นำมาใช้ในการแบ่งเอลิเมนต์ไม่ได้มีแค่เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงเท่านั้น แต่มีการใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่มีด้านโค้ง (Triangular isoparametric element) ในบริเวณผิวโค้งของปัญหา. การใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่มีด้านโค้งทำให้การหาค่า K_{ij}^e ใน (2.10) มีความซับซ้อนมาก ผู้วิจัยจึงนำอินทิเกรตเชิงเลขมาใช้ในการคำนวณ (ภาคผนวก ก.). วิธีการแก้สมการเชิงเส้นในการหาคำตอบจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ วิธีการเคลื่อนที่สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้า (Preconditioned conjugate gradient) ซึ่งเป็นวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) ทำให้หาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว (ภาคผนวก ข.). กรณีจำนวนโหนดที่ใช้มีค่าประมาณ 30,000 ถ้าใช้วิธีการทำซ้ำที่เรียกว่า Gauss-Seidel จะใช้เวลาการคำนวณประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่ง แต่ถ้าใช้วิธีการเคลื่อนที่สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้าใช้เวลาคำนวณประมาณ 5 นาที.

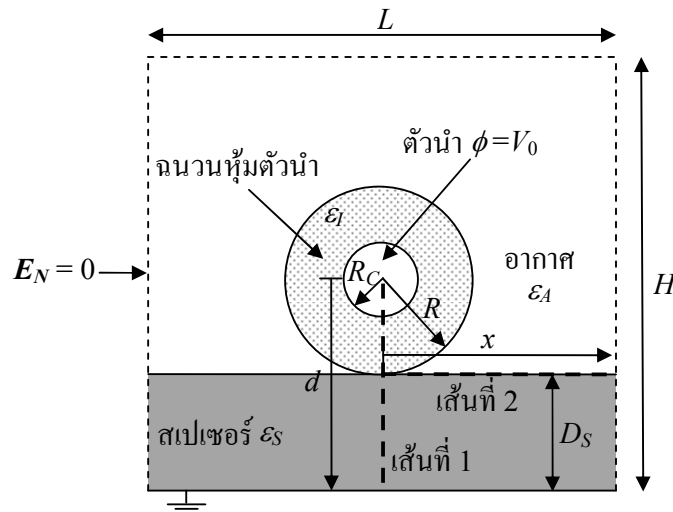
2.3 รูปแบบการจัดเรียงในการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ การศึกษาสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์มีรูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการคำนวณ 2 แบบ ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายและรูปแบบสมจริงซึ่งมีรูปร่างและขนาดอ้างอิงจากระบบสายเคเบิลอากาศที่มีการใช้งานอยู่จริง.

2.3.1 รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย

การศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศซึ่งมีรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายเป็นการศึกษาขั้นต้น เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัส. รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายของระบบสายเคเบิลอากาศประกอบด้วยสายเคเบิลอากาศวาง

บนสเปเซอร์ โดยมีตัวกลางพื้นหลังเป็นอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2.2. สายเคเบิลอากาศที่ใช้คำนวณในรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายพิจารณาตัวนำรวมกับชีลด์ของตัวนำมีรัศมีเท่ากับ R_C และมีรัศมีทั้งหมดเท่ากับ R ซึ่งพิจารณารวมกับขนาดของเปลือกหุ้มฉนวน. ในการแสดงผลการคำนวณที่ได้ ผู้วิจัยพิจารณาสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2. เส้นที่ 1 คือเส้นแนวตั้งซึ่งเริ่มที่จุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงกราวด์. เส้นที่ 2 คือเส้นตรงบนผิวของสเปเซอร์. ผู้วิจัยกำหนดให้ d คือระยะทางบนเส้นที่ 1 และ x คือระยะทางบนเส้นที่ 2 โดยมีจุดเริ่มต้นดังแสดงในภาพที่ 2.2.



ภาพที่ 2.2 รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย

พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและทางไฟฟ้าในการคำนวณ อ้างอิงจากขนาดของสายเคเบิลอากาศและความหนาของสเปเซอร์ในระบบ 22 kV ของ กฟภ. [1] โดยมีรายละเอียดดังนี้

R_C คือรัศมีของตัวนำในสายเคเบิลอากาศ มีขนาดเท่ากับ 4.465 mm,

R คือรัศมีของสายเคเบิลอากาศ มีขนาดเท่ากับ 10.815 mm,

D_S คือความหนาของสเปเซอร์มีขนาดเท่ากับ $3R$,

ϵ_I คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนหุ้มสายเคเบิล มีค่าเท่ากับ 2.2 สำหรับ XLPE,

ϵ_A คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 และ

ϵ_S คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสเปเซอร์มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับอากาศ, 2.2 สำหรับ HDPE, และ 7 สำหรับพอร์ซเลน.

เงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ คือ ศักย์ไฟฟ้า V_0 ที่ตัวนำทรงกระบอกของสายเคเบิลอากาศมีค่าเท่ากับ 1 kV และศักย์ไฟฟ้ากราวด์ที่ระนาบด้านล่างของสเปเซอร์. เนื่องจากรูปแบบการจัดเรียงที่พิจารณาอยู่ในบริเวณเปิด การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึง

กำหนดขอบเขตความสูง H จากระนาบด้านล่างของสเปเซอร์ถึงขอบเขตด้านบนของระบบเปิด เท่ากับ $10R$ และความยาว L ของขอบเขตระบบเปิด เท่ากับ $10R$. จากขอบเขตดังกล่าว กำหนดให้ เหนือไปขอบเขตสนามไฟฟ้า E_N ในแนวตั้งจากมีค่าเท่ากับศูนย์.

2.3.2 รูปแบบการจัดเรียงสมจริง

รูปแบบการจัดเรียงแบบสมจริงที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นรูปแบบของระบบเคเบิลอากาศที่ ถูกลดรูปลงเหลือ 2 มิติ โดยมีมิติและรูปร่างอ้างอิงจากภาคตัดของระบบสายเคเบิลอากาศที่มีการใช้งานอยู่จริง [1]. ในงานวิจัยนี้ ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้อ้างอิงคือระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน (Porcelain) และระบบที่ใช้สเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene หรือ HDPE) ดังแสดงในภาพที่ 2.3.

ภาพที่ 2.3ก แสดงสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลนที่ใช้ในระบบสายเคเบิลอากาศซึ่งเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขนาด 22 kV ในพื้นที่ที่มีมลภาวะต่ำและปานกลางและ 33 kV ในพื้นที่ที่มีมลภาวะต่ำ.

ภาพที่ 2.3ข แสดงสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ในระบบสายเคเบิลอากาศซึ่งเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขนาด 22 kV.



(ก) สเปเซอร์พอร์ซเลน



(ข) สเปเซอร์ HDPE

ภาพที่ 2.3 รูปร่างของสเปเซอร์ที่ใช้ในระบบ 22 kV

รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วยสเปเซอร์และสายเคเบิลอากาศติดตั้งอยู่ เหนือระดับกราวด์ประมาณ 8 m ในภาพที่ 2.4ก ซึ่งอ้างอิงจากระบบจ่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22

kV ของสายเคเบิลอากาศขนาด 50-mm^2 และสเปเซอร์พอร์ซเลนหรือ HDPE. การจัดเรียงของตัวนำเฟสและสายกราวด์บนสเปเซอร์แสดงในภาพที่ 2.4ก. สายเคเบิลอากาศแต่ละเฟสมีแบบจำลองตามภาพที่ 2.4ข โดยเป็นทรงกระบอกซ้อนกันที่มีแกนกลางรัศมี $R_C = 4.465$ mm และมีรัศมีของผิวฉนวนด้านนอก $R = 10.815$ mm. การคำนวณใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_A เท่ากับ 1 สำหรับตัวกลางพื้นหลังที่เป็นอากาศ และ ϵ_I เท่ากับ 2.2 สำหรับฉนวนของสายเคเบิลซึ่งเป็น XLPE. สำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์ การวิเคราะห์ห้ใช้ค่า $\epsilon_S = 2.2$ (HDPE) และ 7 (พอร์ซเลน). ผู้วิจัยนิยาม L_S และ H_S คือความยาวและความสูงของสเปเซอร์มีค่าเท่ากับ 0.42 m และ 0.63 m (สเปเซอร์พอร์ซเลน) และสำหรับสเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าเท่ากับ 0.41 m และ 0.58 m. สำหรับขอบเขตการคำนวณ ผู้วิจัยกำหนดให้ความยาวและความสูงของปัญหามีค่าเท่ากับ $6L_S$ และ $3H_S + 8$ (3 เท่าของความสูงของสเปเซอร์รวมทั้งระยะห่างจากสเปเซอร์ถึงกราวด์).

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณก็คือ ศักย์ไฟฟ้า $\phi = 0$ V ที่ระนาบกราวด์และสายสลิคที่ทำหน้าที่เป็นสายดินล่อฟ้าวงแหวนระบบ. ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำเฟสของสายเคเบิลแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยให้ที่ตัวนำเฟสหนึ่งมีศักย์เท่ากับ $22\sqrt{2/3}$ kV และที่อีกสองเฟส $\phi = 0$ V เช่น $\phi_A = 22\sqrt{2/3}$ kV, $\phi_B = \phi_C = 0$ V เป็นต้น. ทั้งนี้เราสามารถหาสนามไฟฟ้ารวมของแรงดันเฟสทั้งสามได้โดยใช้ทฤษฎีทับซ้อน (Superposition theory) ของทั้งสามกรณี เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลาประกอบด้วย. นอกจากเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวแล้ว การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ในแนวตั้งฉากกับขอบเขต ณ ขอบเขตรอบนอกที่มีขนาดกว้างเพียงพอ (เส้นประในภาพที่ 2.4ก).

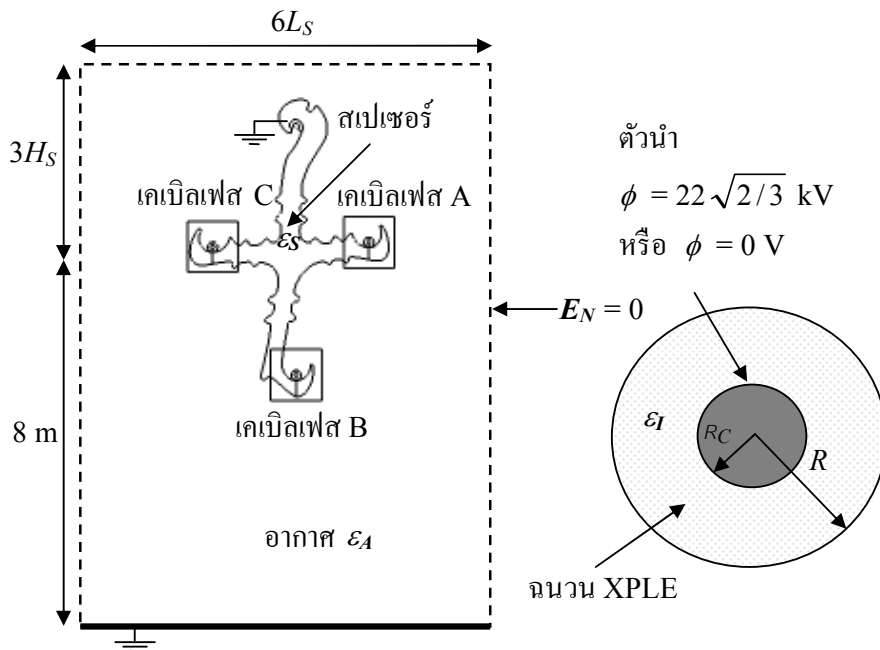
2.4 ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากแบ่งบริเวณของปัญหาที่ใช้ในการคำนวณออกเป็นรูปจำลองแบบเรขาคณิตส่วนย่อย ๆ ซึ่งผู้วิจัยใช้ Gmsh เป็นซอฟต์แวร์ในการแบ่งเอลิเมนต์ [9]. ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนารหัส (Code) สำหรับการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเองโดยใช้แพลตฟอร์มของ MATLAB© เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการพัฒนาการคำนวณต่อไปในอนาคต. สำหรับรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายในภาพที่ 2.2 การจัดเรียงของปัญหาไม่ซับซ้อนทำให้สามารถคำนวณได้ทันที แต่ในกรณีรูปแบบการจัดเรียงสมจริงเนื่องจากในการจัดเรียงของปัญหาตามภาพที่ 2.4ก เป็นบริเวณกว้าง ซึ่งมีจุดที่เราสนใจสนามไฟฟ้าอยู่ ณ บริเวณสเปเซอร์ ผู้วิจัยจึงได้แบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ทำการคำนวณบนบริเวณรวมของปัญหา (ภาพที่ 2.4ก).
2. ทำการคำนวณในรูปแบบการจัดเรียงที่มีขนาดเล็กลง ตามภาพที่ 2.5ก โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตนอกจากคำตอบที่ได้ในขั้นตอนที่ 1.
3. คำนวณบนบริเวณเฉพาะของสเปเซอร์และตัวนำเฟสที่สนใจ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตนอกจากคำตอบในขั้นตอนที่ 2. ภาพที่ 2.5ข แสดงตัวอย่างของบริเวณคำนวณและการแบ่งเอลิเมนต์ที่ใช้ (รูปสี่เหลี่ยมที่เฟส A).

เนื่องจากเอลิเมนต์ในอากาศในบริเวณจุดสัมผัสมีรูปร่างไม่เหมาะสม (สามเหลี่ยมปลายแหลมยาว) ทำให้ E_C ที่ได้จากเอลิเมนต์ในบริเวณอากาศมีความคลาดเคลื่อนสูง. ผู้วิจัยจึงคำนวณสนามไฟฟ้า E_C ที่จุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลและสเปเซอร์ในตัวกลางอากาศ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต ณ จุดสัมผัสในภาพที่ 2.6. เมื่อสมมติให้มีช่องว่างเล็ก ๆ ในอากาศที่จุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลและสเปเซอร์ และกำหนดให้ E_{CI} และ E_{CS} คือค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในฉนวนของตัวนำและในสเปเซอร์ ตามลำดับ เราจะประมาณสนามไฟฟ้าในอากาศ ณ จุดสัมผัสได้เป็น

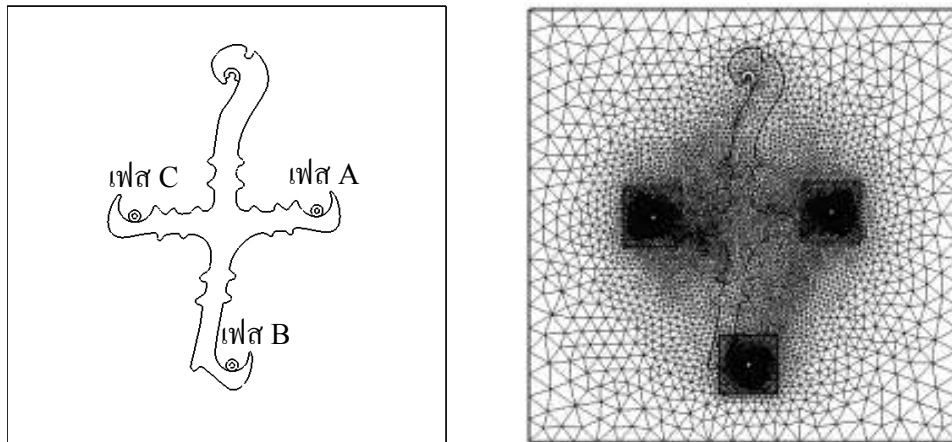
$$E_C = \frac{1}{2} (\epsilon_I E_{CI} + \epsilon_S E_{CS}) \quad (2.17)$$



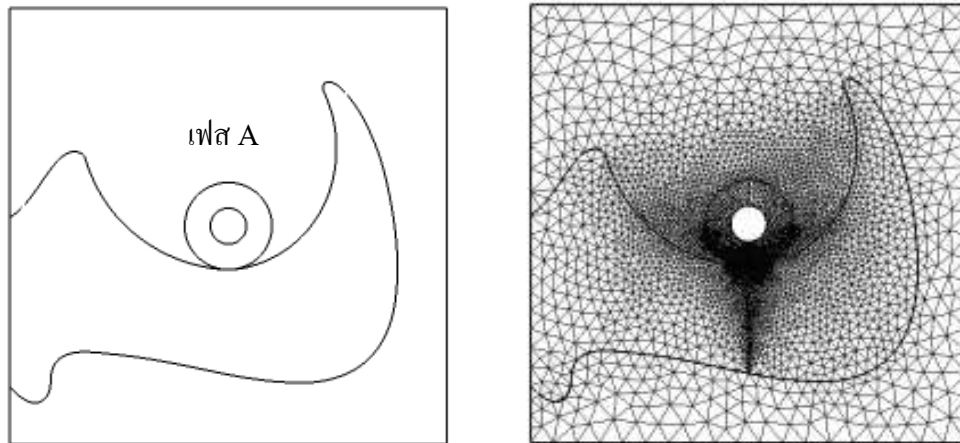
(ก) ระบบสายเคเบิลอากาศเหนือระนาบกราวนด์

(ข) สายเคเบิลอากาศ

ภาพที่ 2.4 รูปแบบการจัดเรียงสมจริง

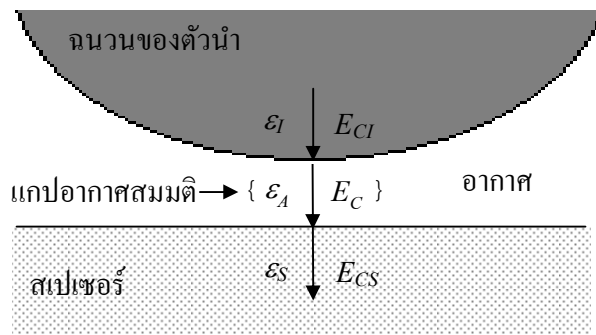


(ก) สำหรับการคำนวณในขั้นที่ 2



(ข) สำหรับการคำนวณในขั้นที่ 3

ภาพที่ 2.5 บริเวณและการแบ่งเอลิเมนต์ในการคำนวณสำหรับรูปแบบสมจริง



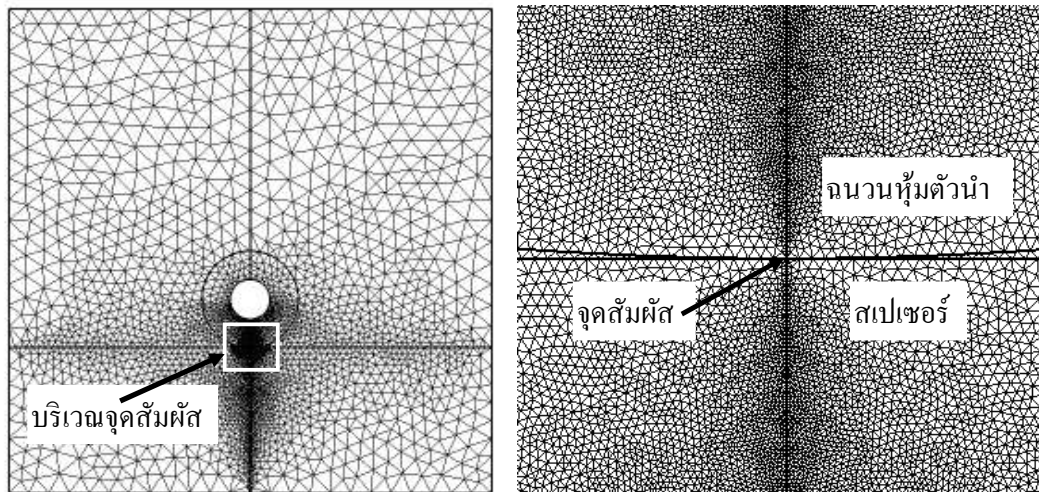
ภาพที่ 2.6 แกปอากาศสมมติ ณ จุดสัมผัส และสนามไฟฟ้า

บทที่ 3

สนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งจุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศ

3.1 ระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย

การศึกษาสมบัติของสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายเป็นการศึกษาเบื้องต้น เพื่อให้เข้าใจลักษณะสนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสและเพื่อประเมินความแม่นยำของผลการคำนวณที่ได้. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายดังแสดงในภาพที่ 2.2 ในการคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ภาพที่ 3.1ก และ ข แสดงรูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณของระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายทั้งระบบ (ในเส้นกรอบสีขาวคือบริเวณจุดสัมผัส) และในบริเวณจุดสัมผัส (จุดตัดในภาพที่ 3.1ข คือจุดสัมผัส). จำนวนของเอลิเมนต์และโหนดที่ใช้ในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 11,014 และ 22,176.



(ก) ทั้งระบบ

(ข) บริเวณจุดสัมผัส

ภาพที่ 3.1 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย

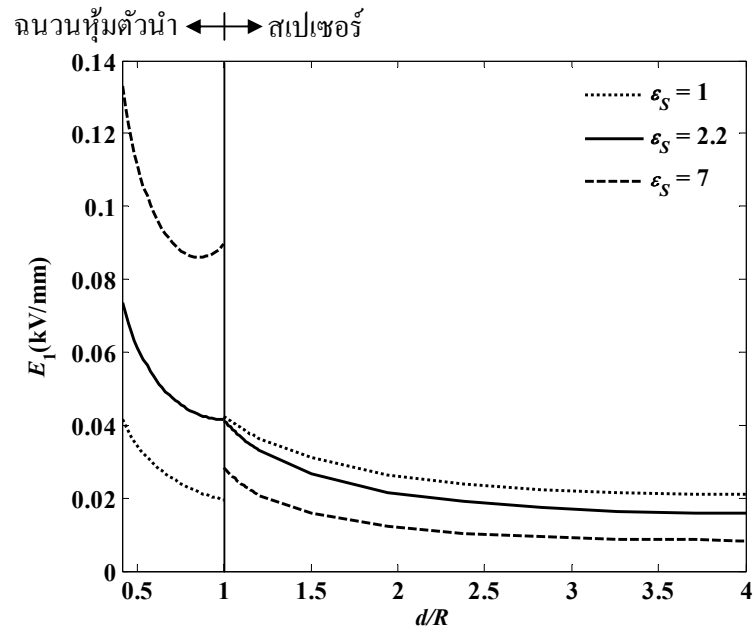
ผู้วิจัยแสดงสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และ 2 (ซึ่งมีทิศทางดังแสดงในภาพที่ 2.2) และนิยามให้ E_1 และ E_2 คือสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และ 2. เมื่อแรงดันไฟฟ้าของตัวนำเท่ากับ 1 kV และความหนาของสเปเซอร์ $D_S = 3R$, ลักษณะของสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และ 2 ของระบบสายเคเบิล

อากาศที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายแสดงในภาพที่ 3.2ก และ ข. ภาพที่ 3.2 เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าสำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์ 3 ค่า ได้แก่ 1 (อากาศ), 2.2 (HDPE) และ 7 (พอร์ซเลน). จากภาพที่ 3.2ก สนามไฟฟ้าสูงสุดบนเส้นที่ 1 อยู่ ณ ผิวของตัวนำ ($d/R = 0.4129$) และเพิ่มขึ้นตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์. ค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศสามารถคำนวณได้จาก (2.17). ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส. จากภาพที่ 3.2ข สนามไฟฟ้าในอากาศบนเส้นที่ 2 มีค่ามากที่สุด ณ จุดสัมผัส ($x = 0$) และมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสมากขึ้น. ผลการคำนวณแสดงว่า สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์.

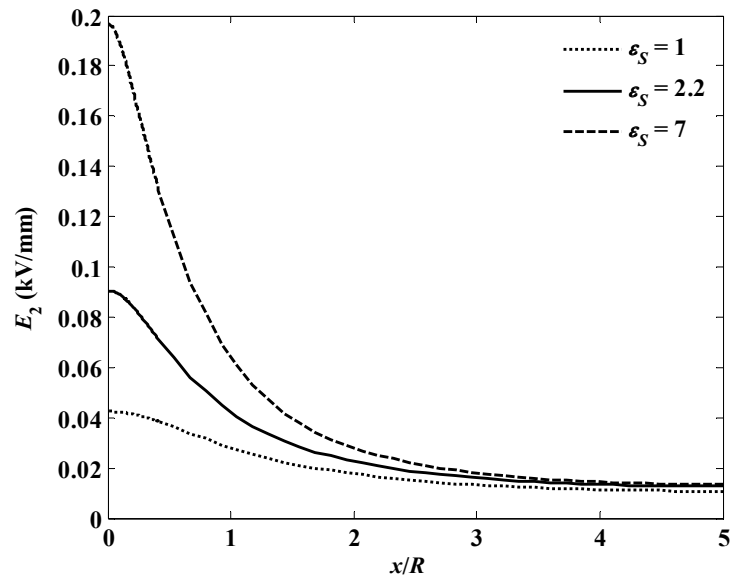
ตารางที่ 3.1 สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย เมื่อ $\phi = 1$ kV และ $D_S = 3R$

ϵ_S	E_{CI} (kV/mm)	E_{CS} (kV/mm)	E_C (kV/mm)
1	0.0194	0.0425	0.0426
2.2	0.0414	0.0413	0.0909
7	0.0898	0.0282	0.1973

อย่างไรก็ตาม ค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นคำตอบโดยประมาณ. ผู้วิจัยจึงตรวจสอบความแม่นยำของ E_C ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการเปรียบเทียบกับคำตอบเชิงวิเคราะห์ที่คำนวณด้วยวิธีเงามัลติโพล [5]. ภาพที่ 3.3ก และ ข เป็นความคลาดเคลื่อนของ E_C เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนด (n) และขอบเขตการคำนวณ (L และ H) ตามลำดับ. ภาพที่ 3.3ก แสดงผลการคำนวณ เมื่อผู้วิจัยเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดที่ใช้คำนวณโดยรักษารูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์. การเปลี่ยนขนาดขอบเขตการคำนวณในภาพที่ 3.3ข กำหนดให้รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัสเหมือนเดิมมากที่สุด. จำนวนของโหนดที่ใช้คำนวณในภาพที่ 3.3ข มีค่าประมาณ 8,000. รายละเอียดของค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดและขอบเขตการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.



(ก) บนเส้นที่ 1



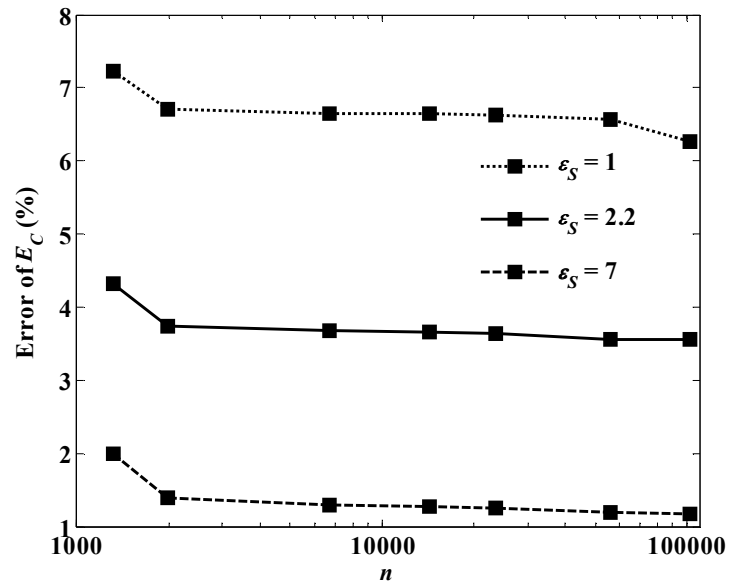
(ข) บนเส้นที่ 2

ภาพที่ 3.2 สนามไฟฟ้าในระบบการจัดเรียงอย่างง่าย

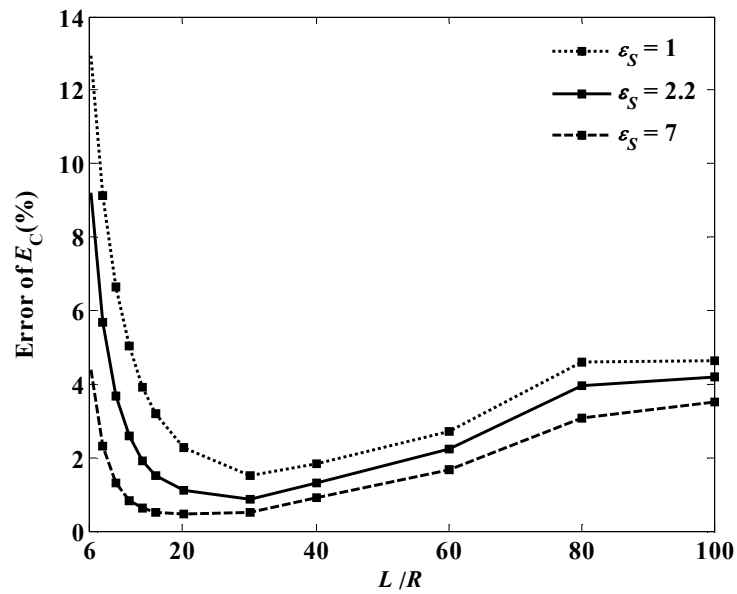
เมื่อจำนวน โหนดที่ใช้คำนวณเปลี่ยนแปลง (ในภาพที่ 3.3ก) ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่ามากที่สุด เมื่อ $\varepsilon_S = 1$ รองลงมา ได้แก่ $\varepsilon_S = 2.2$ และ 7 ตามลำดับ. ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวน โหนดเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1,000–2,000 จากนั้นลดลงเล็กน้อย ($n > 2,000$). ภาพที่ 3.4ก, ข และ ค แสดงการจัดเรียงเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัส เมื่อจำนวน โหนดที่ใช้คำนวณเท่ากับ 1,314, 2,980 และ 6,720 ตามลำดับ. ภาพที่ 3.5 แสดงรูปร่างของเอลิเมนต์ ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อจำนวน โหนดที่ใช้เท่ากับ 1,314. การเพิ่มจำนวน โหนดที่ใช้ส่งผลให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็กลงและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น.

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของขอบเขตการคำนวณ (ในภาพที่ 3.3ข) ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อขนาดของขอบเขตการคำนวณเพิ่มขึ้น. อย่างไรก็ตาม เมื่อขอบเขตการคำนวณมีขนาดใหญ่เกินไป (L และ $H > 20R$) ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่าเพิ่มขึ้น. การเพิ่มขนาดขอบเขตการคำนวณโดยกำหนดให้จำนวน โหนดที่ใช้มีค่าเท่าเดิม ($n \approx 8,000$) ส่งผลให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้คำนวณมีขนาดใหญ่ขึ้น. ภาพที่ 3.6ก, ข และ ค แสดงการเรียงเอลิเมนต์ของระบบรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายและในบริเวณจุดสัมผัส เมื่อขอบเขตการคำนวณที่ใช้เท่ากับ $20R$ และ $100R$. กรณีขอบเขตการคำนวณเท่ากับ $100R$ (ภาพที่ 3.6ข) เอลิเมนต์ที่ใช้มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นน้อย ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น. การเรียงเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัสมีลักษณะใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 3.6ค) เนื่องจากรักษารูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัส. ความคลาดเคลื่อนของสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 3 % เมื่อขนาดของขอบเขตการคำนวณมีค่าประมาณ $20R$.

จากผลการคำนวณในตารางที่ 3.1 ($N = 11,014$, $n = 22,176$ และ $L, H = 10R$) สนามไฟฟ้า E_C ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.0426, 0.0909 และ 0.1973 kV/mm สำหรับ $\varepsilon_S = 1, 2.2$ และ 7 ตามลำดับ. E_C ที่ได้ (จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) มีขนาดต่ำกว่า E_C ที่ได้วิธีแกมมาดิโพล [5] เล็กน้อยประมาณ 6.37, 3.30 และ 0.85 % สำหรับ $\varepsilon_S = 1, 2.2$ และ 7 ตามลำดับ. ดังนั้น เราสามารถนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศที่มีรูปแบบการจัดเรียงสมจริงได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนในเกณฑ์ดังกล่าว.

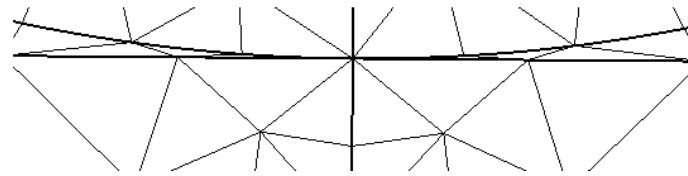
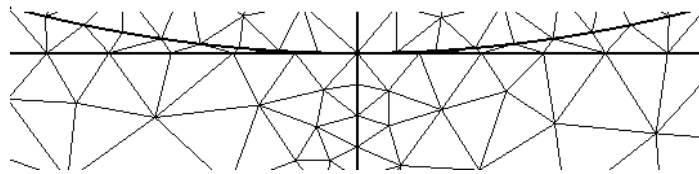
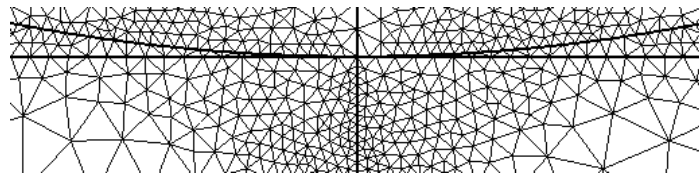


(ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของ E_C เมื่อ n เพิ่มขึ้น

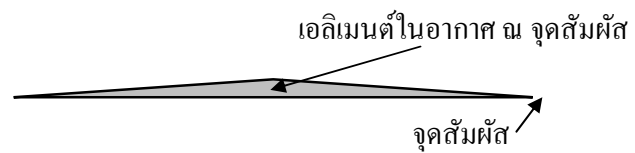


(ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของ E_C เมื่อ L และ H เพิ่มขึ้น

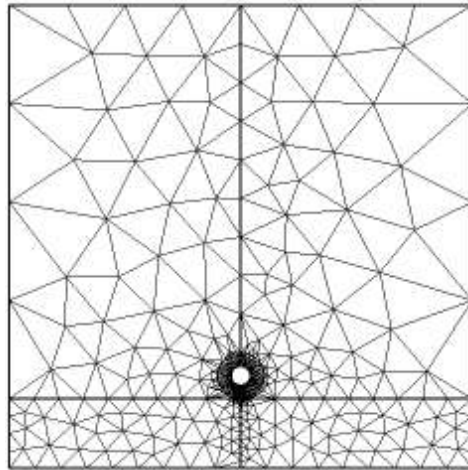
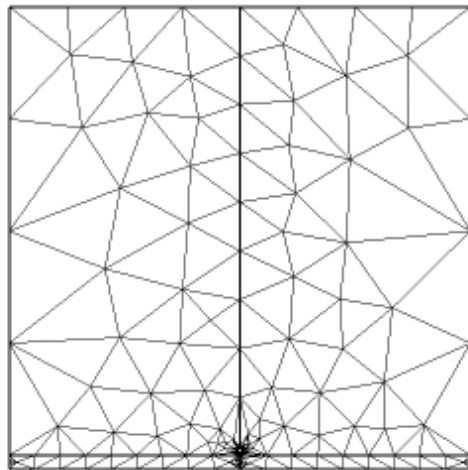
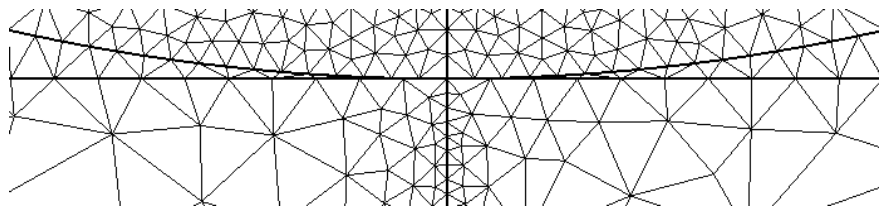
ภาพที่ 3.3 ความคลาดเคลื่อนของค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส

(ก) $n = 1,314$ (ข) $n = 1,980$ (ค) $n = 6,720$

ภาพที่ 3.4 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณจุดสัมผัส เมื่อ โหนดเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3.5 เอลิเมนต์ ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อ $n = 1,314$

(ก) $L = H = 20R$ (ข) $L = H = 100R$ 

(ค) บริเวณจุดสัมผัส

ภาพที่ 3.6 รูปแบบการเรียงตัวของเอลิเมนต์ เมื่อ $L = H = 20R$ และ $100R$

3.2 ระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริง

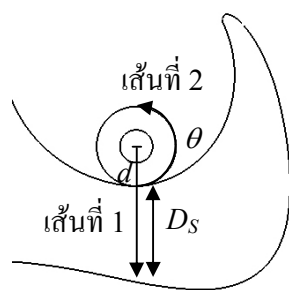
3.2.1 ระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน

การศึกษาสมบัติของสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่งเป็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 22 kV ใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริงในภาพที่ 2.4 ในการวิเคราะห์. ผู้วิจัยแสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าบนแนวเส้น 2 เส้นที่บริเวณเฟส A, B และ C เมื่อเส้นที่ 1 เป็นเส้นแนวดิ่งซึ่งลากผ่านจุดศูนย์กลางของตัวนำถึงผิวของสเปเซอร์โดยนิยามพารามิเตอร์ d เป็นระยะจากจุดศูนย์กลางของตัวนำและเส้นที่ 2 เป็นเส้นโค้งตามผิวรอบนอกของสายเคเบิลอากาศโดยมี θ เป็นมุมที่วัดจากจุดสัมผัส. ภาพที่ 3.7 แสดงทิศทางของเส้นที่ 1 และ 2 ในบริเวณเฟส A, B และ C. ภาพที่ 3.8 แสดงการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณเฟส A, B และ C. จำนวนของเอลิเมนต์ (N) และ โหนด (n) ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

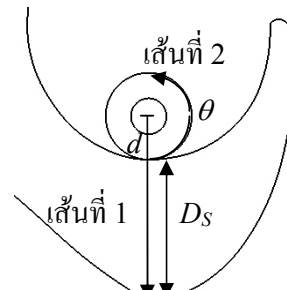
ขั้นตอนที่ 1 (ในภาพที่ 2.4ก): $N = 42,926$ และ $n = 86,073$

ขั้นตอนที่ 2 (ในภาพที่ 2.5ก): $N = 41,752$ และ $n = 83,729$

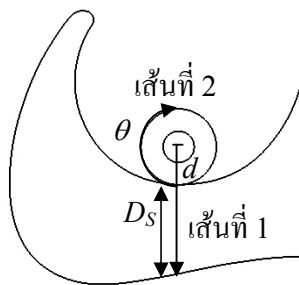
ขั้นตอนที่ 3 (ในภาพที่ 3.5): $N = 11,973, 11,766$ และ $12,045$ และ $n = 24,069, 23,650$ และ $24,213$ สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ.



(ก) เฟส A

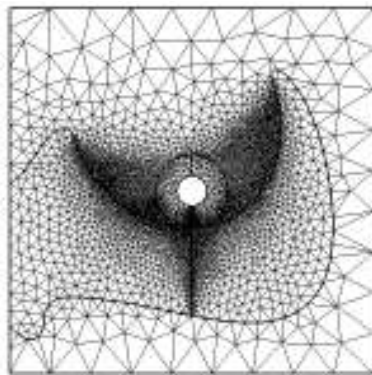


(ข) เฟส B

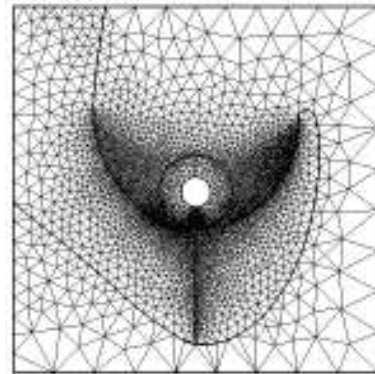


(ค) เฟส C

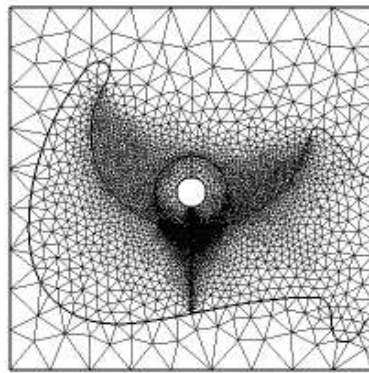
ภาพที่ 3.7 แนวเส้นสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน



(ก) เฟส A



(ข) เฟส B



(ค) เฟส C

ภาพที่ 3.8 เอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยคำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน โดยแรงดันไฟฟ้า ϕ ของตัวนำที่ใช้คำนวณในเฟสที่พิจารณาเท่ากับ $22\sqrt{2/3}$ kV และแรงดันในเฟสที่ไม่พิจารณามีค่าเท่ากับศูนย์. ภาพที่ 3.9 และ 3.10 แสดงศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลนในบริเวณเฟส A, B และ C (รูปด้านซ้ายแสดงทั้งระบบและรูปด้านขวาแสดงบริเวณเฟสที่สนใจ). ภาพที่ 3.9 และ 3.10 ใช้ความเข้มของสี (สเกลสีเทา) ในการแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า. ศักย์ไฟฟ้าในภาพที่ 3.9 แสดงในรูปของศักย์ไฟฟ้า V ที่คำนวณได้ต่อแรงดันไฟฟ้า ϕ ที่ตัวนำและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 (สีดำ). ในบริเวณจุดสัมผัส สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสูง. เอลิเมนต์ที่ใช้คำนวณในบริเวณจุดสัมผัสมี

ขนาดเล็กและความหนาแน่นสูง เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำสูง. อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบริเวณจุดสัมผัสของรูปแบบการจัดเรียงสมจริงมีโครงสร้างที่มีผิวโค้ง (สายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์) ซึ่งอาจมีเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างไม่เหมาะสม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง. ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในบริเวณเฟสที่พิจารณาพบว่า สนามไฟฟ้าในอากาศที่ผิวโค้งของฉนวนหุ้มตัวนำและสเปเซอร์พอร์ซเลนมีค่าสูงมากในบางเอลิเมนต์ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความผิดพลาดในการคำนวณเชิงเลข (รูปร่างเอลิเมนต์ไม่เหมาะสม). ดังนั้น ผู้วิจัยกำหนดให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้แสดงในภาพที่ 3.10 มีค่าเท่ากับ 1.2 kV/mm ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสโดยประมาณ (E_C โดยประมาณของเฟส C ซึ่งมีค่าสูงสุดในตารางที่ 3.2). ตารางที่ 3.2 แสดงความหนา D_S ของสเปเซอร์พอร์ซเลนและค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ.

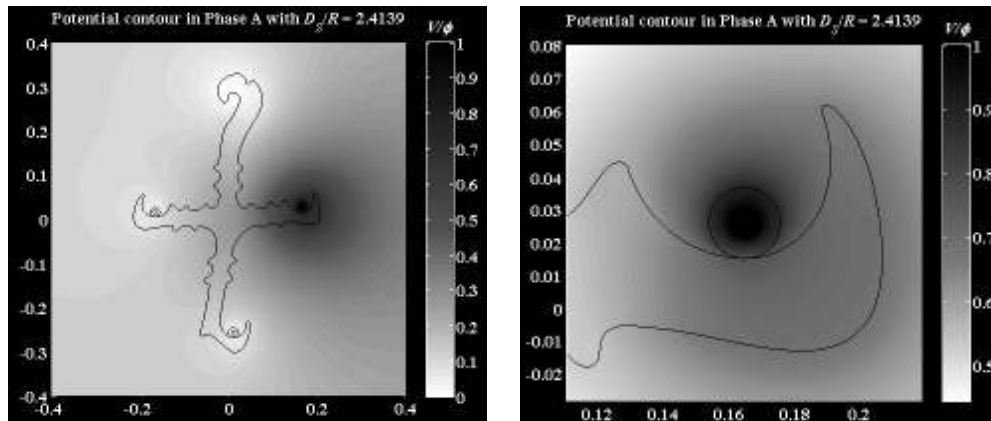
ตารางที่ 3.2 ความหนาของสเปเซอร์พอร์ซเลนและค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ

เฟส	D_S/R	E_C (kV/mm)
A	2.4139	1.1177
B	3.1836	0.9162
C	2.3482	1.1617

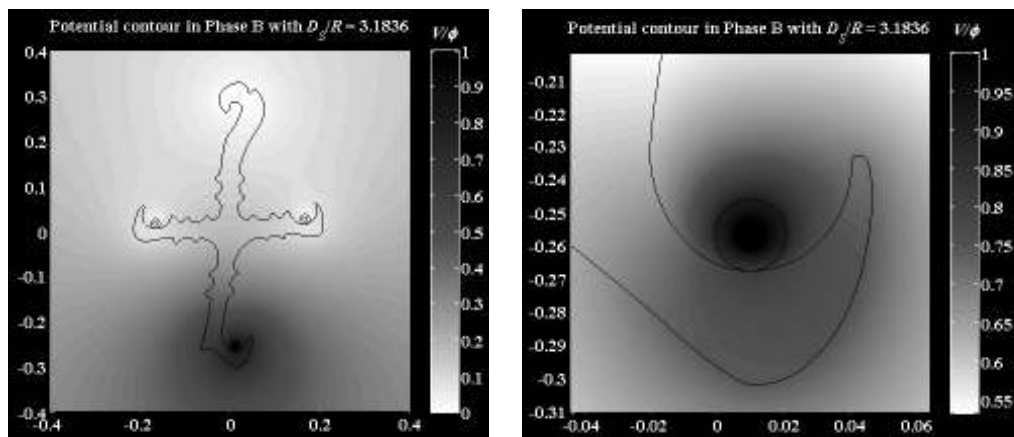
สำหรับศักย์ไฟฟ้า (ภาพที่ 3.9) ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเฟสอยู่ที่ตัวนำและมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างจากตัวนำเพิ่มขึ้น. ด้านขวามือของภาพที่ 3.9ก, ข และ ค ศักย์ไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 (อ้างอิงทิศทางตามภาพที่ 3.7) ในแต่ละเฟสที่พิจารณามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในฉนวนหุ้มตัวนำและลดลงเล็กน้อยในสเปเซอร์พอร์ซเลน ที่ระยะห่าง d จากตัวนำเพิ่มขึ้น. สำหรับสนามไฟฟ้าในบริเวณเฟสที่สนใจ (ด้านขวามือของภาพที่ 3.10ก, ข และ ค) สนามไฟฟ้าในอากาศมีค่าสูงในบริเวณจุดสัมผัสและมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งจุดสัมผัส. สนามไฟฟ้าในสเปเซอร์พอร์ซเลนมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าในอากาศและฉนวนหุ้มตัวนำ. สนามไฟฟ้า E_C ในอากาศ ณ จุดสัมผัสในเฟสที่สนใจมีค่าสูงกว่าในเฟสที่ไม่สนใจมาก (ด้านซ้ายมือของภาพที่ 3.10 ในแต่ละเฟส). E_C ของเฟสที่ไม่สนใจมีค่าต่ำ เนื่องจากจุดสัมผัสอยู่ห่างจากตัวนำที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่สนใจมาก ($\gg R$).

ภาพที่ 3.11 และ 3.12 เป็นกราฟของสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และ 2 ในเฟส A, B และ C. สนามไฟฟ้า E_1 บนเส้นที่ 1 ในแต่ละเฟส (ภาพที่ 3.11) มีลักษณะเหมือนกันและมีค่ามากที่สุด ณ ผิวของตัวนำ ($d/R = 0.4129$). สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 (ซึ่งรวมถึงบริเวณจุดสัมผัส) ของเฟส A และ C มีค่าใกล้เคียงกัน (สนามไฟฟ้าที่เฟส C สูงกว่า) และมีค่ามากกว่าเฟส B อย่างชัดเจน. E_1 มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในฉนวนหุ้มตัวนำและลดลงเล็กน้อยในสเปเซอร์พอร์ซเลน เมื่อระยะ d มีค่า

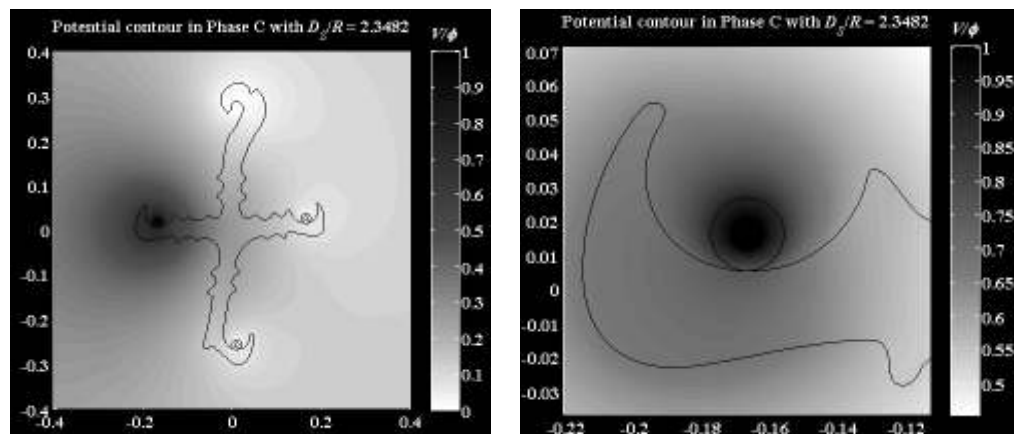
เพิ่มขึ้น. สนามไฟฟ้า E_2 บนเส้นที่ 2 ในเฟสต่าง ๆ (ภาพที่ 3.12) มีลักษณะคล้ายกันโดยมีค่ามากที่สุด ณ จุดสัมผัส ($\theta = 0$) และลดลง เมื่อมีระยะตามผิวโค้งห่างจากจุดสัมผัสมากขึ้น. E_2 มีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอโดยกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งเรียบทั้งสองด้าน ($\pm\theta$) เนื่องจากผิวของสเปเซอร์พอร์ซเลนในบริเวณจุดสัมผัสเป็นเส้นโค้งเรียบ.



(ก) เฟส A

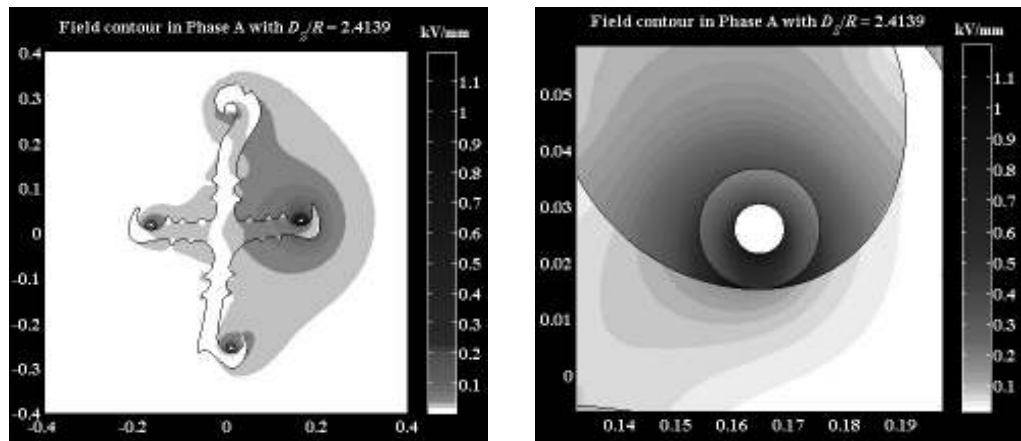


(ข) เฟส B

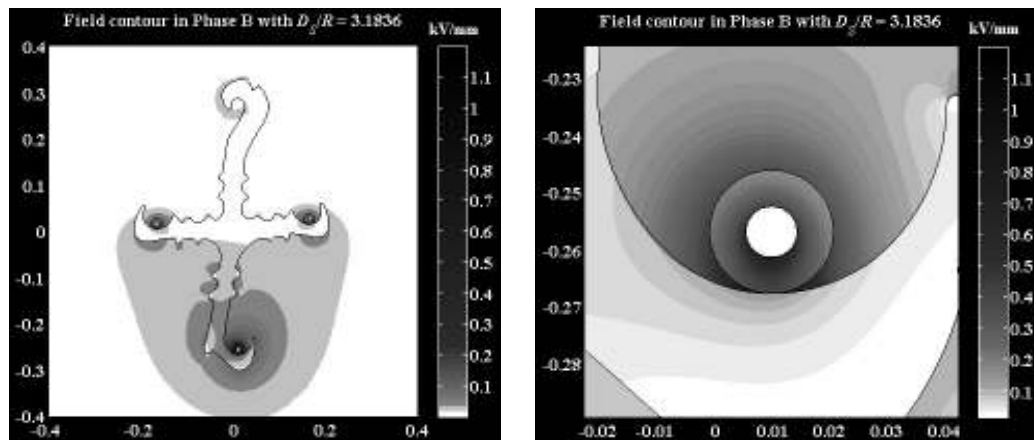


(ค) เฟส C

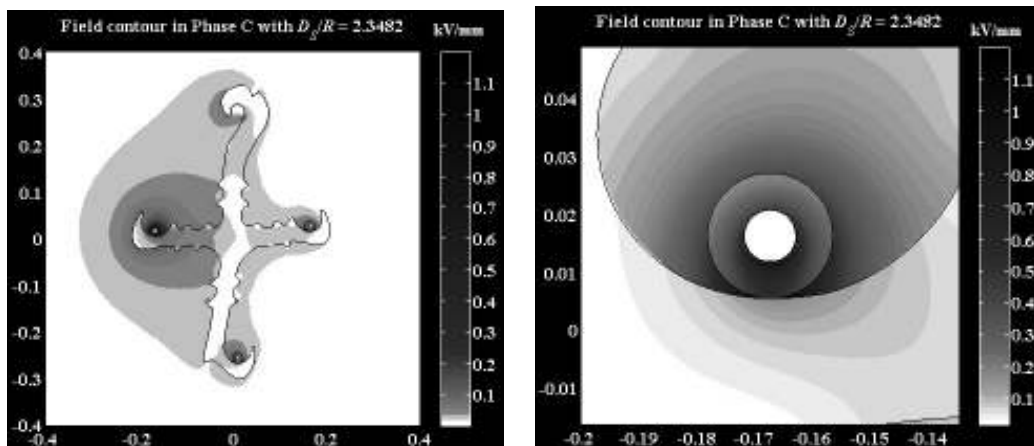
ภาพที่ 3.9 ศักย์ไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลน



(ก) เฟส A

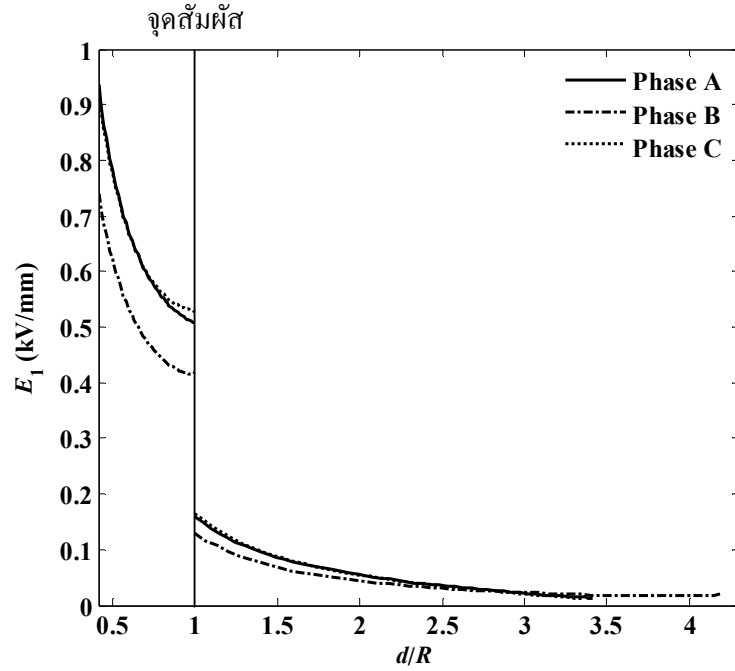


(ข) เฟส B

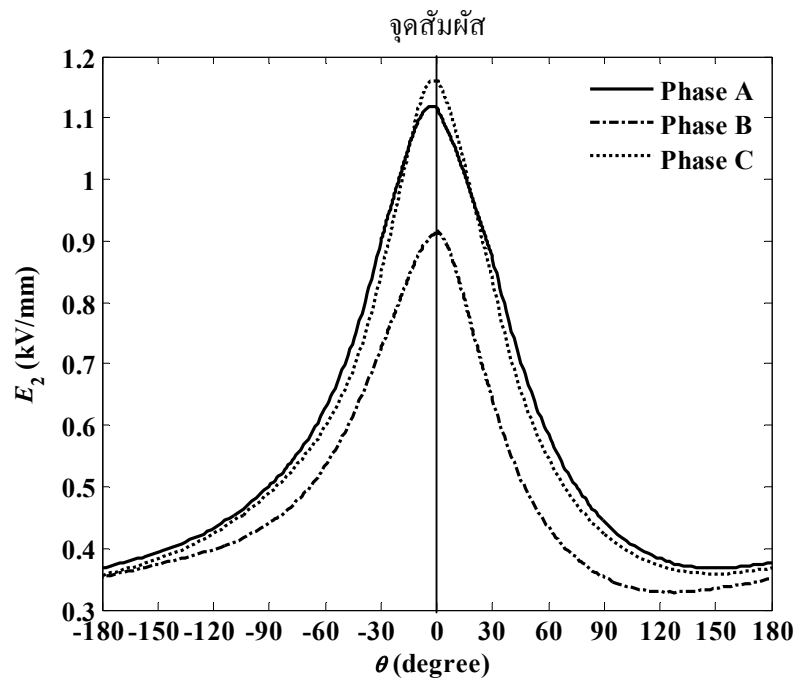


(ค) เฟส C

ภาพที่ 3.10 สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน



ภาพที่ 3.11 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน



ภาพที่ 3.12 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 2 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ชเลน

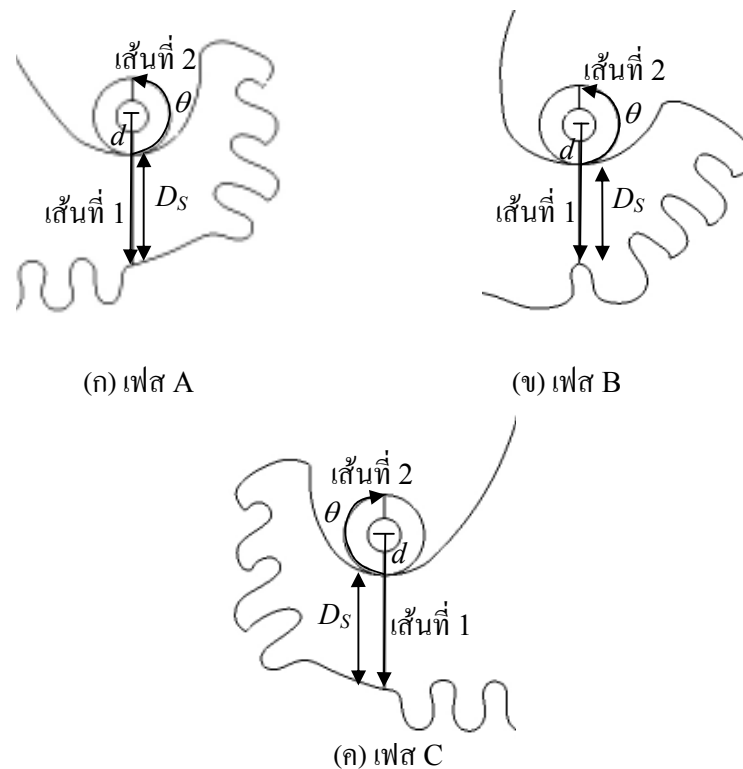
3.2.2 ระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

ระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่พิจารณาเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขนาด 22 kV ซึ่งใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริงดังภาพที่ 2.4 (ใช้สเปเซอร์ HDPE แทนสเปเซอร์พอร์ซเลน). ผู้วิจัยแสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าบนแนวเส้น 2 เส้นที่บริเวณเฟส A, B และ C ซึ่งอ้างอิงตามทิศทางที่แสดงในภาพที่ 3.13. ภาพที่ 3.14 แสดงการเรียงตัวของเอลิเมนต์ในบริเวณเฟส A, B และ C. จำนวนของเอลิเมนต์ (N) และ โหนด (n) ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละชั้นตอนมีค่ามากกว่ากรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลนเล็กน้อย เนื่องจากต้องคำนึงถึงโครงสร้างผิวโค้งของสเปเซอร์ HDPE. ทั้งนี้ จำนวนโหนดที่ผิวโค้งของสเปเซอร์ HDPE ต้องมีค่าสูงเพียงพอเพื่อให้โปรแกรม Gmsh สามารถสร้างเอลิเมนต์ที่บริเวณผิวโค้งของสเปเซอร์ HDPE ได้. จำนวนของเอลิเมนต์และโหนดที่ใช้มีรายละเอียด ดังนี้

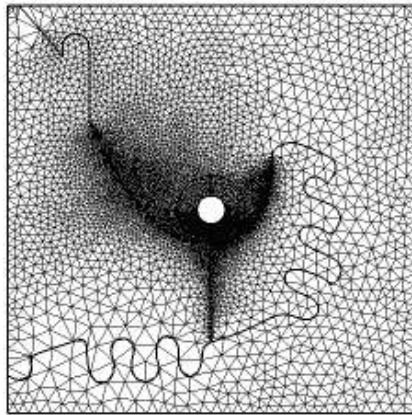
ชั้นตอนที่ 1 (ในภาพที่ 2.4ก): $N = 58,382$ และ $n = 117,109$

ชั้นตอนที่ 2 (ในภาพที่ 2.5ก): $N = 55,952$ และ $n = 112,211$

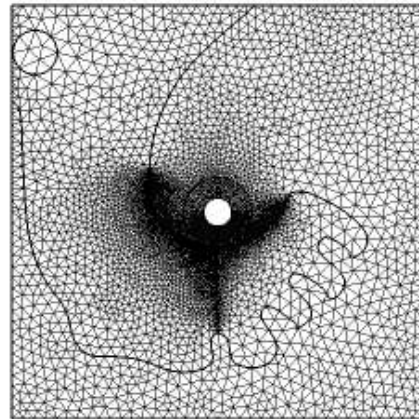
ชั้นตอนที่ 3 (ในภาพที่ 3.11): $N = 13,746, 14,395$ และ $14,940$ และ $n = 27,728, 29,041$ และ $30,126$ สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ.



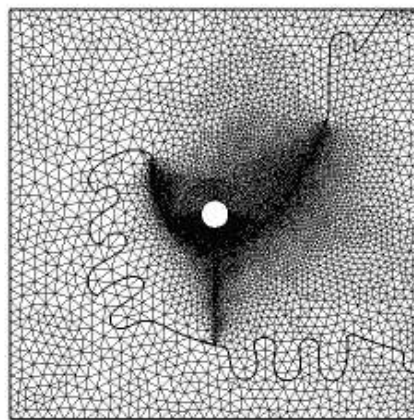
ภาพที่ 3.13 แนวเส้นการกระจายสนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE



(ก) เฟส A



(ข) เฟส B



(ค) เฟส C

ภาพที่ 3.14 เอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE

ภาพที่ 3.15 และ 3.16 แสดงศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์ HDPE ในบริเวณเฟส A, B และ C โดยใช้สเกลสีเทาในการแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้า (เช่นเดียวกับภาพที่ 3.9 และ 3.10). ผู้วิจัยกำหนดให้สนามไฟฟ้าสูงสุดที่แสดงในภาพที่ 3.16 มีค่าเท่ากับ 0.6 kV/mm ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสโดยประมาณ (มีค่าใกล้เคียงกับ E_C ที่เฟส A ซึ่งมีค่ามากที่สุดในการตารางที่ 3.3) เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากในบางเอลิเมนต์ที่บริเวณผิวโค้งของฉนวนหุ้มตัวนำและสเปเซอร์ HDPE เช่นเดียวกับกรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. ในภาพที่ 3.15 ศักย์ไฟฟ้าที่เฟสต่าง ๆ มีค่าสูงสุดที่ตัวนำและลดลงเมื่อระยะห่าง

จากตัวนำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. ในภาพที่ 3.16 สนามไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE มีลักษณะเช่นเดียวกับสเปเซอร์พอร์ซเลน (ภาพที่ 3.10) แต่มีขนาดต่ำกว่า. ตารางที่ 3.3 แสดงความหนา D_S ของสเปเซอร์ HDPE และค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่คำนวณได้จาก (2.17) ที่เฟสต่าง ๆ. สำหรับกรณีรูปแบบสมจริง E_C ในกรณีของสเปเซอร์ HDPE มีค่าลดลงเท่ากับ 46.05, 41.39 และ 49.11 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. สังเกตว่า สำหรับกรณีรูปแบบอย่างง่าย E_C ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อที่ 3.1 มีค่าลดลง 53.93 % เมื่อเปลี่ยนวัสดุของสเปเซอร์จากพอร์ซเลน ($\epsilon_S = 7$) เป็น HDPE ($\epsilon_S = 2.2$).

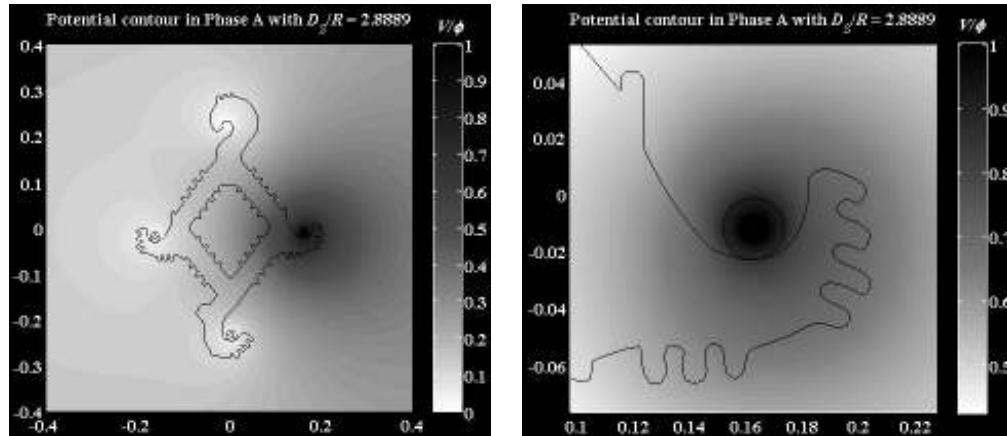
ตารางที่ 3.3 ความหนาของสเปเซอร์ HDPE และค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ

เฟส	D_S/R	E_C (kV/mm)
A	2.8889	0.6033
B	2.5077	0.5370
C	2.8404	0.5912

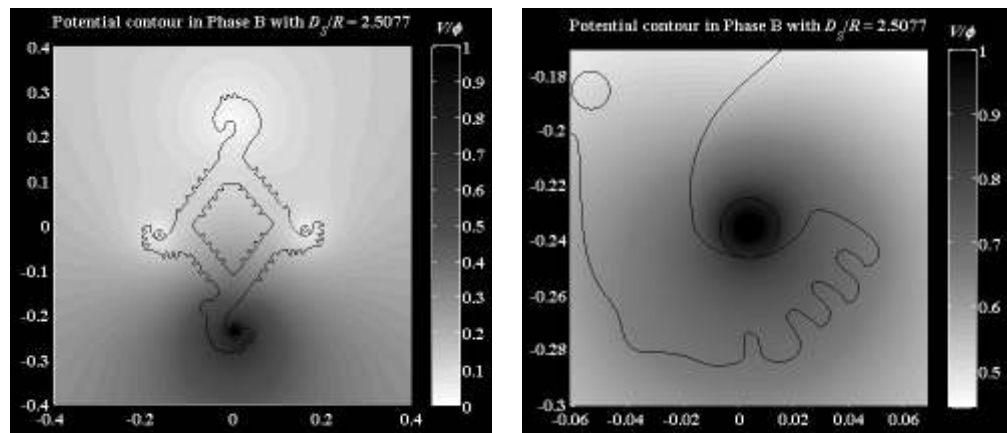
ภาพที่ 3.17 และ 3.18 แสดงสนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 และ 2 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE ที่เฟส A, B และ C. สนามไฟฟ้า E_1 และ E_2 ในกรณีที่ใช้สเปเซอร์ HDPE มีขนาดต่ำกว่ากรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. สำหรับเส้นที่ 1 (ภาพที่ 3.17) สนามไฟฟ้า E_1 ในแต่ละเฟสมีลักษณะเหมือนกันโดยมีค่ามากที่สุด ณ ผิวของตัวนำและมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างจากผิวตัวนำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีสเปเซอร์พอร์ซเลน. สำหรับเส้นที่ 2 (ภาพที่ 3.18) สนามไฟฟ้า E_2 ในแต่ละเฟสมีค่ามากที่สุด ณ ตำแหน่งจุดสัมผัสและลดลง เมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสตามผิวโค้งของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. E_2 มีค่าลดลงไม่สม่ำเสมอ เมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสตามผิวโค้งของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการคำนวณ เช่น รูปร่างของเอลิเมนต์ไม่เหมาะสม จำนวนโหนดไม่เพียงพอ หรือผิวของสเปเซอร์ HDPE ในบริเวณจุดสัมผัสไม่โค้งพอ เป็นต้น. E_1 และ E_2 มีขนาดมากที่สุดที่เฟส A รองลงมาได้แก่ เฟส C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยและเฟส B ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด.

จากผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV พบว่า สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก

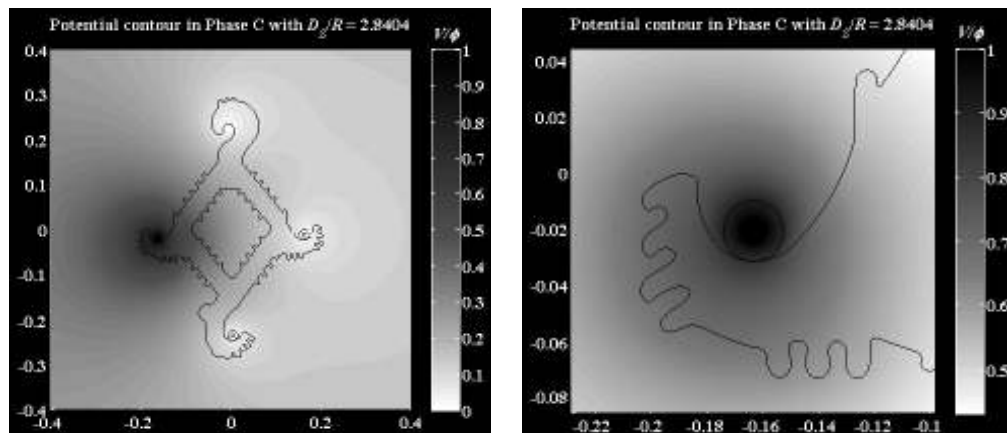
ระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายในหัวข้อ 3.1. จากตารางที่ 3.2 และ 3.3 E_C ในแต่ละเฟสในกรณีที่ใช้สเปเซอร์ HDPE มีขนาดต่ำกว่ากรณีที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนประมาณ 41 %. ดังนั้น การใช้สเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบสายเคเบิลอากาศเป็นทางเลือกที่ดีกว่า (E_C น้อยกว่า). อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้สเปเซอร์ในระบบสายเคเบิลอากาศจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นประกอบด้วย ได้แก่ มลภาวะในบริเวณใช้งาน ความแข็งแรงทางกล และการต้านทานการเสื่อมสภาพ เป็นต้น.



(ก) เฟส A

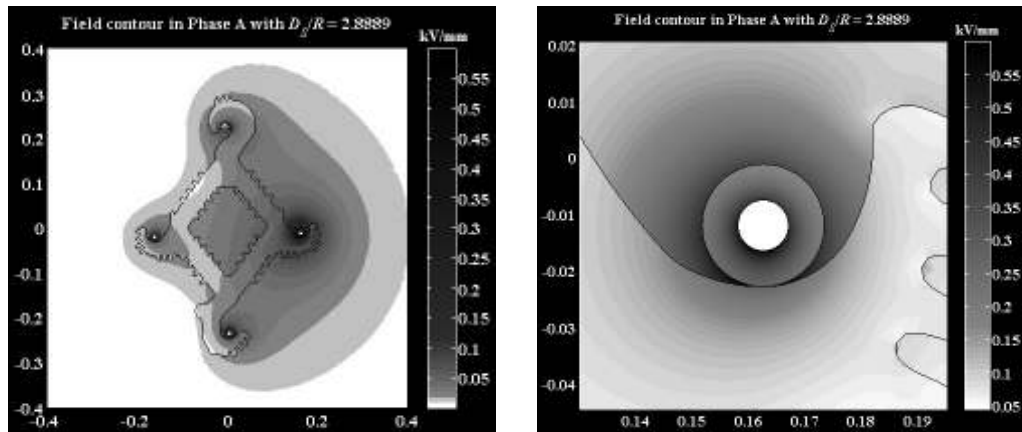


(ข) เฟส B

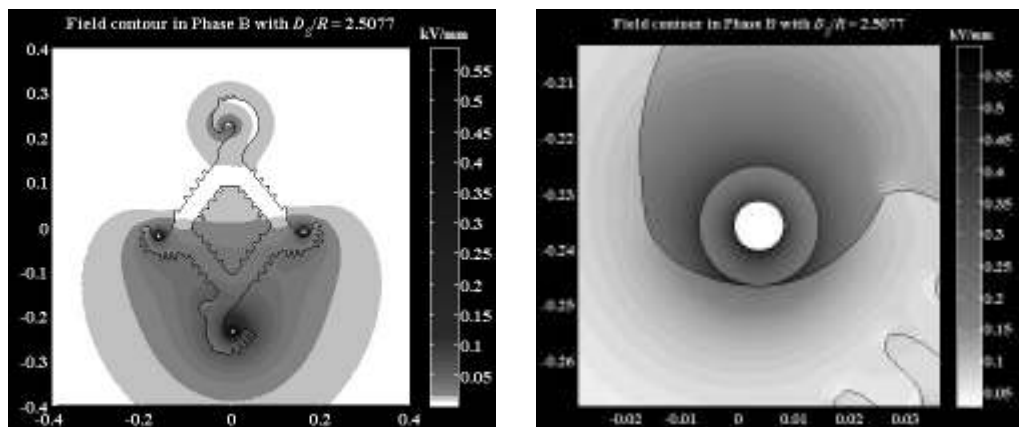


(ค) เฟส C

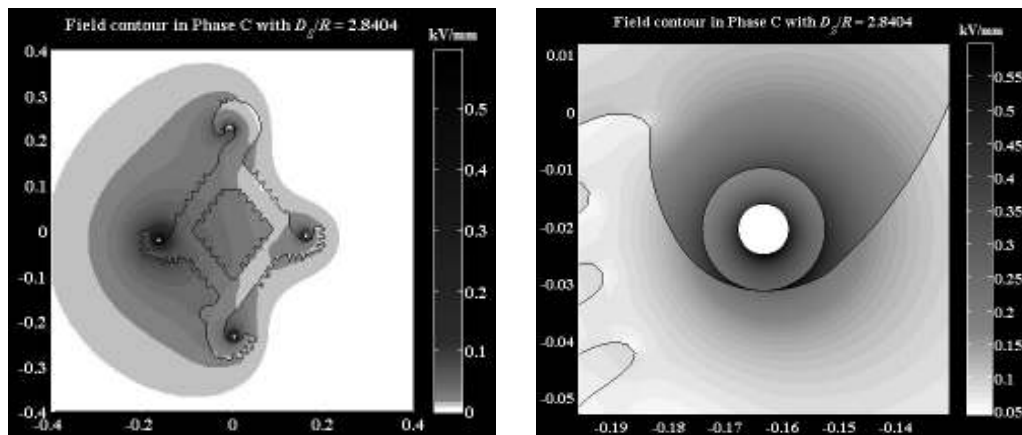
ภาพที่ 3.15 ศักย์ไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE



(ก) เฟส A

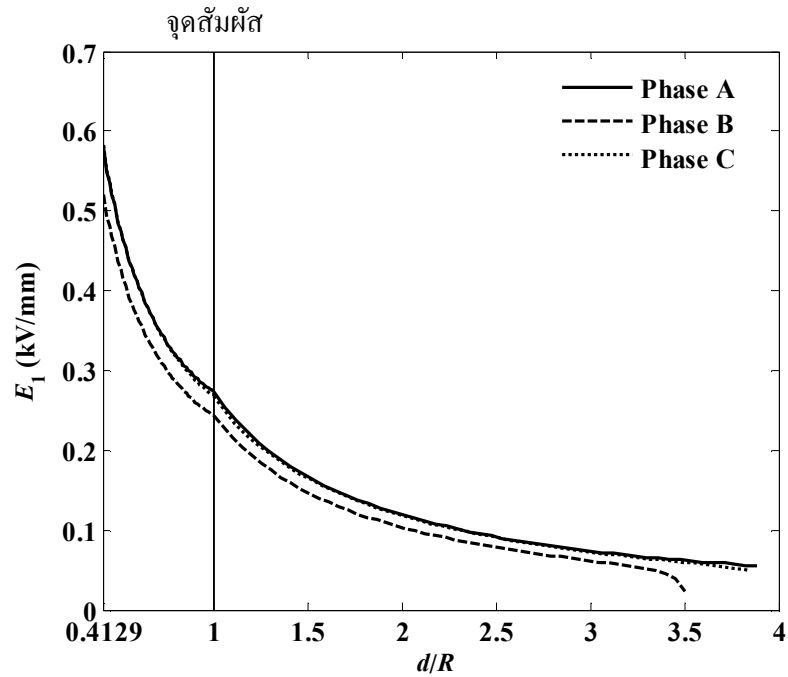


(ข) เฟส B

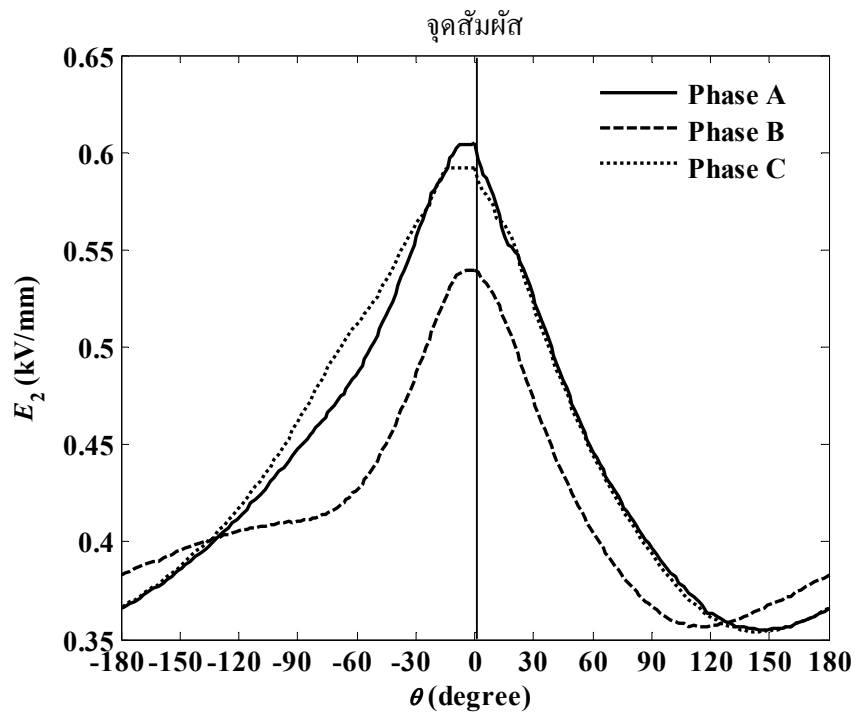


(ค) เฟส C

ภาพที่ 3.16 สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE



ภาพที่ 3.17 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 1 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE



ภาพที่ 3.18 สนามไฟฟ้าบนเส้นที่ 2 ในระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์ HDPE

บทที่ 4

การแปรเปลี่ยนสนามไฟฟ้าตามปัจจัยต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พบว่า สนามไฟฟ้าในอากาศมีค่าสูง ณ ตำแหน่งจุดสัมผัสซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการแปรเปลี่ยนของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสตามปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การเพิ่มความหนาของสเปเซอร์ การแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ และการเพิ่มระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวงเหนือระบบ. ผู้วิจัยต้องการข้อมูล เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมสนามไฟฟ้าต่อไป.

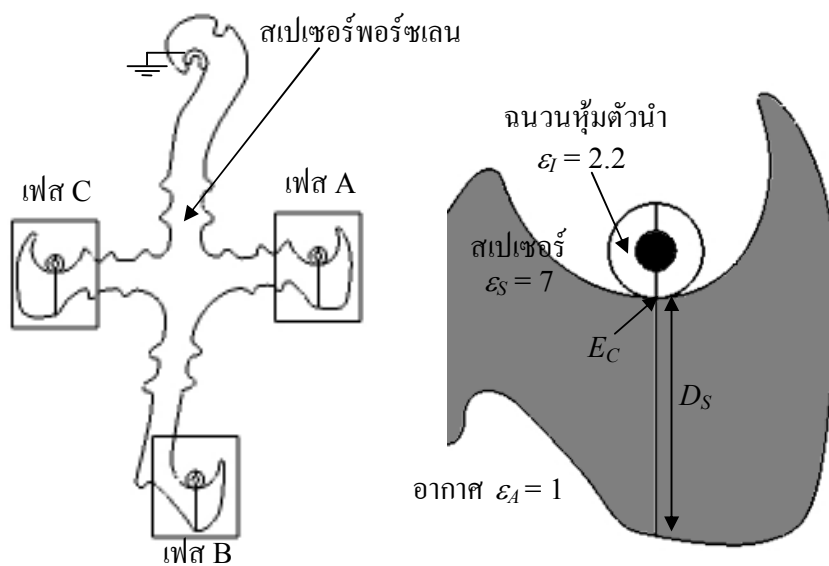
4.1 การเพิ่มความหนาของสเปเซอร์

ความหนาของสเปเซอร์ที่ใช้ในระบบสายเคเบิลอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส. ในกรณีระบบสายเคเบิลอากาศที่มีลักษณะเป็นรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายในภาพที่ 2.2 สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศมีค่าลดลง เมื่อสเปเซอร์หนาขึ้น [5]. สำหรับระบบสายเคเบิลอากาศที่มีรูปแบบการจัดเรียงสมจริง ผู้วิจัยศึกษาผลของความหนาของสเปเซอร์ที่มีต่อค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสโดยพิจารณาระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนซึ่งปรับเปลี่ยนความหนาของสเปเซอร์. ทั้งนี้ แรงดันไฟฟ้าของตัวนำในระบบมีขนาดเท่ากับ $22\sqrt{2/3}$ kV เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.1. อัตราส่วนความหนาสเปเซอร์พอร์ซเลนของรูปแบบสมจริงที่พิจารณาต่อรัศมีของสายเคเบิลอากาศ (D_S/R) มีค่าเท่ากับ 2.4139, 3.1836 และ 2.3482 สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับซึ่งแสดงในตารางที่ 3.2. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้แบ่งการคำนวณ E_C ออกเป็น 9 กรณีโดยเพิ่มความหนาของสเปเซอร์พอร์ซเลนในแต่ละเฟส. ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนความหนาสเปเซอร์พอร์ซเลนต่อรัศมีของสายเคเบิลอากาศ (D_S/R) ในเฟสต่าง ๆ เมื่อเพิ่มความหนาของสเปเซอร์ที่ใช้คำนวณ.

ภาพที่ 4.1ก และ ข แสดงตัวอย่างการจัดเรียงของระบบสายเคเบิลอากาศบนสเปเซอร์พอร์ซเลนและสเปเซอร์พอร์ซเลนในเฟส A ซึ่งมีอัตราส่วน D_S/R เท่ากับ 5. รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้คำนวณมีลักษณะการจัดเรียงเช่นเดียวกับภาพที่ 2.4ก. ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวนของโหนดที่ใช้คำนวณมากกว่าในหัวข้อที่ 3.2.1 เนื่องจากต้องการผลลัพธ์ (E_C) ที่มีความแม่นยำสูง. จำนวนโหนดที่ใช้คำนวณในแต่ละกรณีมีค่าประมาณ 100,000 ซึ่งมากกว่าในหัวข้อที่ 3.2.1 ซึ่งมีจำนวนโหนดเท่ากับ 86,000.

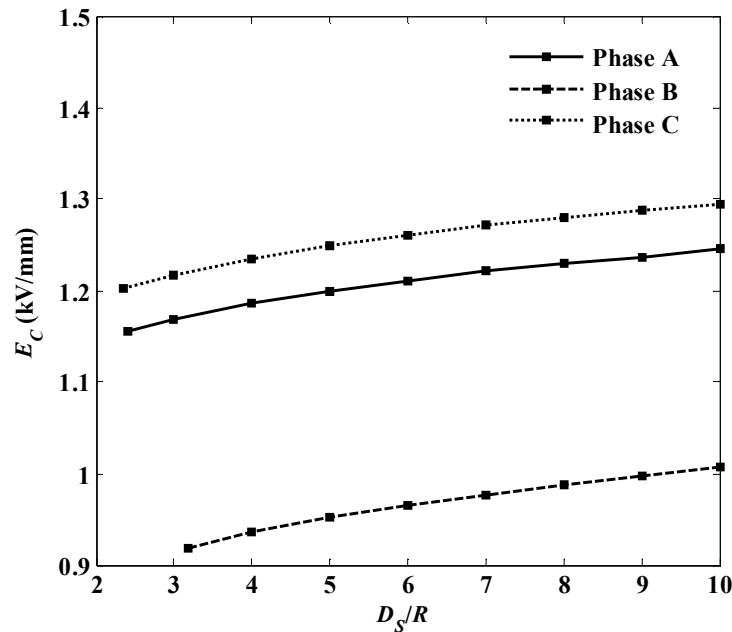
ตารางที่ 4.1 ความหนาของสเปเซอร์ที่เฟสต่าง ๆ เมื่อสเปเซอร์ที่ใช้คำนวณหาขึ้น

กรณี	ความหนาของสเปเซอร์ (D_S/R)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส A	2.4139	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส B	3.1836	3.1836	4	5	6	7	8	9	10
เฟส C	2.3482	3	4	5	6	7	8	9	10



ภาพที่ 4.1 ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน เมื่อ $D_S/R = 5$

ภาพที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ ตามความหนาของสเปเซอร์. สำหรับความหนาของสเปเซอร์พอร์ชเลนที่มีการใช้จริง (กรณี 1) E_C มีค่าเท่ากับ 1.1549, 0.9190 และ 1.2024 kV/mm ซึ่งมีค่ามากกว่าในตารางที่ 3.2 เท่ากับ 3.22, 0.3 และ 3.38 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ ($N = 51,562$ และ $n = 103,455$). เมื่ออัตราส่วน $D_S/R = 10$, E_C ในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 7.27, 8.70 และ 7.16 % จาก E_C ในกรณี 1. ดังนั้น ผลการศึกษาในที่นี้แสดงว่า E_C ในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อสเปเซอร์หนาขึ้น. ตารางค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อสเปเซอร์หนาขึ้น ($n \approx 100,000$) แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



ภาพที่ 4.2 ค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อ D_S/R เปลี่ยนแปลง

ผลของความหนา D_S ของสเปเซอร์ที่มีต่อ E_C ในระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริงมีลักษณะตรงข้ามกับรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย. สำหรับรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย E_C มีค่าลดลง เมื่อสเปเซอร์หนาขึ้น [5] แต่สำหรับรูปแบบการจัดเรียงสมจริง E_C ที่เฟสต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อสเปเซอร์หนาขึ้น. ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงทดลองประมาณระบบสายเคเบิลอากาศสมจริงในบริเวณจุดสัมผัสเป็นระนาบชั้นฉนวนสามชนิดซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า [10]. ภาพที่ 4.3 แสดงระนาบชั้นฉนวนสามชนิดซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยฉนวนที่ใช้ ได้แก่ XLPE, พอร์ซเลนและอากาศ สำหรับฉนวนชั้นที่หนึ่ง, ชั้นที่สองและชั้นที่สามตามลำดับ. ผู้วิจัยนิยมให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในภาพที่ 4.3 มีรายละเอียด ดังนี้

U เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระนาบของชั้นฉนวน ($U = 1$ V),

ϵ_1 เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่หนึ่งซึ่งเป็น XLPE ($\epsilon_1 = 2.2$),

ϵ_2 เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่สองซึ่งเป็นพอร์ซเลน ($\epsilon_2 = 7$),

ϵ_3 เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนชั้นที่สามซึ่งเป็นอากาศ ($\epsilon_3 = 1$),

d_1 เป็นความหนาของฉนวนชั้นที่หนึ่ง,

d_2 เป็นความหนาของฉนวนชั้นที่สอง,

d_3 เป็นความหนาของฉนวนชั้นที่สาม,

D เป็นความหนารวมของฉนวนชั้นที่สองและชั้นที่สาม ($D = d_2 + d_3 =$ ค่าคงที่) และ

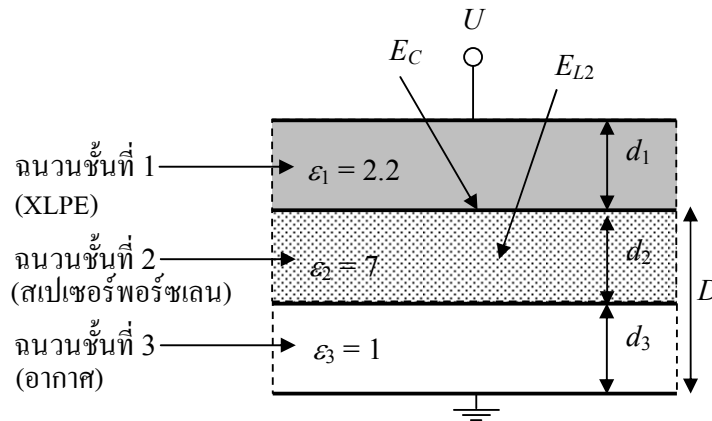
E_{L2} เป็นค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้นที่สอง.

สนามไฟฟ้า E_{L2} ในฉนวนชั้นที่สองสามารถคำนวณได้เป็น

$$E_{L2} = \frac{U}{d_2} \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 \cdot d_2}{\varepsilon_2 \cdot d_1} \right)}{1 + \left(\frac{\varepsilon_1 \cdot d_2}{\varepsilon_2 \cdot d_1} \right) + \left(\frac{\varepsilon_1 \cdot d_3}{\varepsilon_3 \cdot d_1} \right)} \quad (4.1)$$

E_{L2} เป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ. ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่ขอบเขตด้านบนในฉนวนชั้นที่สองมีขนาดเท่ากับ E_{L2} . ในภาพที่ 4.3 ผู้วิจัยกำหนดให้มีแกปอากาศสมมติที่รอยต่อของฉนวนชั้นที่หนึ่งและสอง (XLPE และพอร์ซเลน) ซึ่งพิจารณาเป็นจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ซเลนในระบบสายเคเบิลอากาศสมจริง. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัส (ในแกปอากาศสมมติ) สามารถคำนวณโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตระหว่างแกปอากาศสมมติและฉนวนชั้นที่สองเป็น

$$E_C = \varepsilon_2 E_{L2} \quad (4.2)$$



ภาพที่ 4.3 ระบายชั้นฉนวนสามชนิดซ้อนกัน

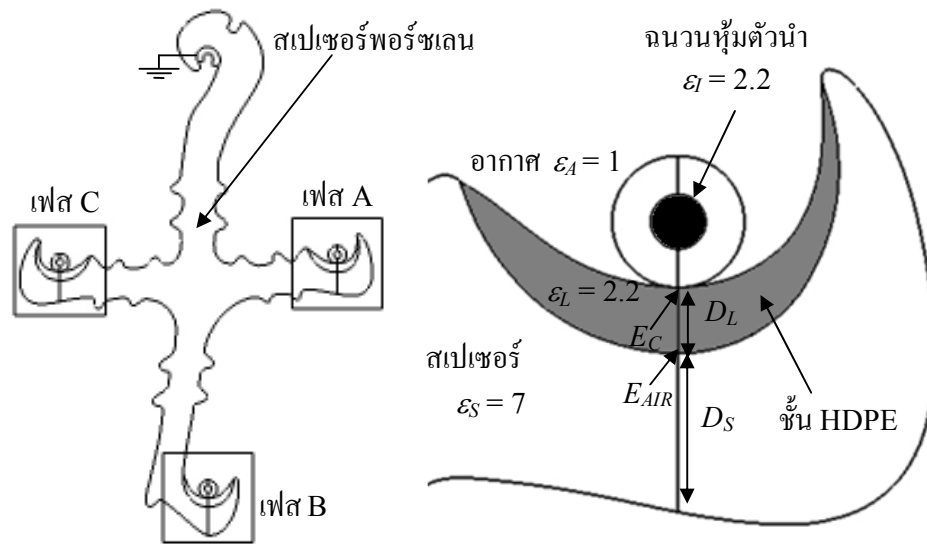
สำหรับระบบสายเคเบิลอากาศสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนและพิจารณาที่เฟส A ความหนา D_S ของสเปเซอร์มีขนาดเท่ากับ 2.4139R และสเปเซอร์อยู่เหนือพื้น 8.011 m (จุดกึ่งกลางของสเปเซอร์พอร์ซเลนสูงจากพื้น 8 m). ขนาดของพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมออ้างอิงจากระบบสมจริงที่เฟส A ($d_1 = 0.00635$ m ซึ่งเป็นระยะจากตัวนำถึงผิวชั้นนอกของสายเคเบิลอากาศและ $d_3 = 8.011$ m). สำหรับระนาบฉนวนสามชนิดซ้อนกัน เมื่อความหนา $d_2 = 2.4139R$ (เท่ากับขนาดของสเปเซอร์พอร์ซเลนสมจริงที่เฟส A) E_C ที่ได้จาก (4.2) มีค่าเท่ากับ 0.1247 V/m. การหนาขึ้นของฉนวนชั้นที่สองส่งผลให้ฉนวนชั้นที่สามหนาลง เนื่องจากความหนารวม D ของฉนวนชั้นที่สองและชั้นที่สามมี

ขนาดเท่าเดิม. สำหรับกรณี $d_2 = 10R$ ($d_3 = 7.929$ m) E_C มีค่าเท่ากับ 0.1258 V/m ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 0.88 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $d_2 = 2.4139R$. การเพิ่มขึ้นของ E_C (ไม่ถึง 1 %) เมื่อฉนวนชั้นที่สองหนาขึ้นจาก 2.4139R เป็น 10R มีขนาดน้อยกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับ E_C ที่เพิ่มขึ้นในระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนที่หนาขึ้นจาก 2.4139R เป็น 10R (E_C เพิ่มขึ้น 7.27 % ที่เฟส A). ความหนา d_2 ของฉนวนชั้นที่สองมีขนาดน้อยกว่าความหนา d_3 ของฉนวนชั้นที่สามมาก ($d_2 \ll d_3$). ดังนั้น เราจะเห็นได้ว่าผลของความหนาของสเปเซอร์ในการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง (ณ ตำแหน่งจุดสัมผัส) ไม่สามารถประมาณเชิงปริมาณได้อย่างแม่นยำด้วยโมเดลแบบง่ายดังกล่าว.

4.2 ผลของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ชเลน

สำหรับระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลน สนามไฟฟ้า ณ บริเวณจุดสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนหุ้มตัวนำและสเปเซอร์พอร์ชเลนมีค่าแตกต่างกันมาก ($\epsilon_I = 2.2$ และ $\epsilon_S = 7$). ผู้วิจัยจึงพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่จุดสัมผัส โดยนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกโดยประมาณเท่ากับฉนวนหุ้มตัวนำมาแทรกระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ชเลน. ผู้วิจัยได้แปรค่าความหนา D_L ของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงตั้งแต่ 0 ถึง 2.5R. อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่า การแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ชเลนในทางปฏิบัติอาจมีแกปอากาศเกิดขึ้น ณ รอยต่อของชั้น HDPE และสเปเซอร์พอร์ชเลน. สนามไฟฟ้าในแกปอากาศอาจมีค่าสูงและส่งผลให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนซึ่งทำให้อิทธิพลเสียหายได้เช่นเดียวกัน. การวิเคราะห์ในที่นี่จึงพิจารณาสนามไฟฟ้าในแกปอากาศดังกล่าวควบคู่ไปด้วย.

สำหรับการวิเคราะห์ รูปแบบการจัดเรียงสมจริงที่ใช้มีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 2.4ก แต่มีการแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์. แรงดันไฟฟ้าของตัวนำมีขนาดเท่ากับ $22\sqrt{2/3}$ kV เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1. ผู้วิจัยกำหนดให้มีแกปอากาศสมมติที่รอยต่อของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสเปเซอร์พอร์ชเลนและนิยามให้ E_{VOID} คือค่าสนามไฟฟ้า ณ แกปอากาศสมมติและ ϵ_L คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง. ภาพที่ 4.4ก แสดงตัวอย่างการจัดเรียงของระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่งแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์. ภาพที่ 4.4ข แสดงตัวอย่างชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในเฟส A.



(ก) รูปแบบการจัดเรียง (ข) ชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในเฟส A
 ภาพที่ 4.4 ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนและแทรกชั้น HDPE

การคำนวณสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศและ E_{VOID} ในแก๊ปอากาศสมมติสามารถทำได้ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างสายเคเบิลอากาศและชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (สำหรับ E_C) และชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและสเปเซอร์พอร์ซเลน (สำหรับ E_{VOID}). ภาพที่ 4.5 แสดงเงื่อนไขขอบเขต ณ รอยต่อของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่แทรกระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ โดยกำหนดให้จุดที่ 1 คือจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและชั้น HDPE และจุดที่ 2 คือจุดสัมผัสระหว่างชั้น HDPE และสเปเซอร์พอร์ซเลน. ผู้วิจัยนิยามให้

E_{C1} เป็นค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนของตัวนำ ณ จุดที่ 1,

E_{CL1} เป็นค่าสนามไฟฟ้าในชั้น HDPE ณ จุดที่ 1,

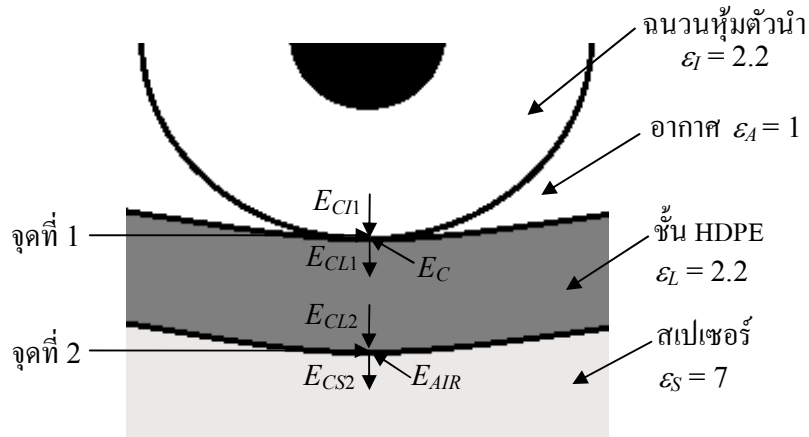
E_{CL2} เป็นค่าสนามไฟฟ้าในชั้น HDPE ณ จุดที่ 2 และ

E_{CS2} เป็นค่าสนามไฟฟ้าในสเปเซอร์ ณ จุดที่ 2.

เราจะประมาณสนามไฟฟ้า E_C และ E_{VOID} ได้เป็น

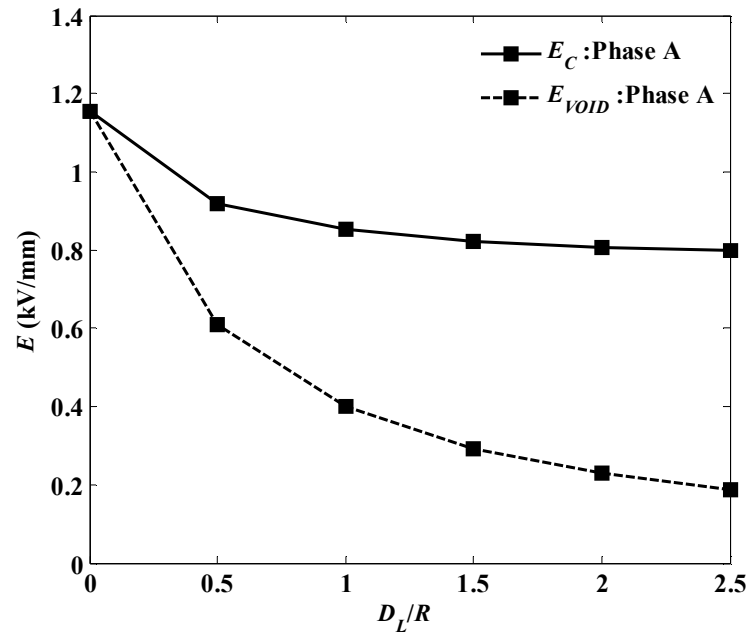
$$E_C = \frac{1}{2} (\epsilon_r E_{C1} + \epsilon_L E_{CL1}) \quad (4.3)$$

$$E_{VOID} = \frac{1}{2} (\epsilon_L E_{CL2} + \epsilon_S E_{CS2}) \quad (4.4)$$

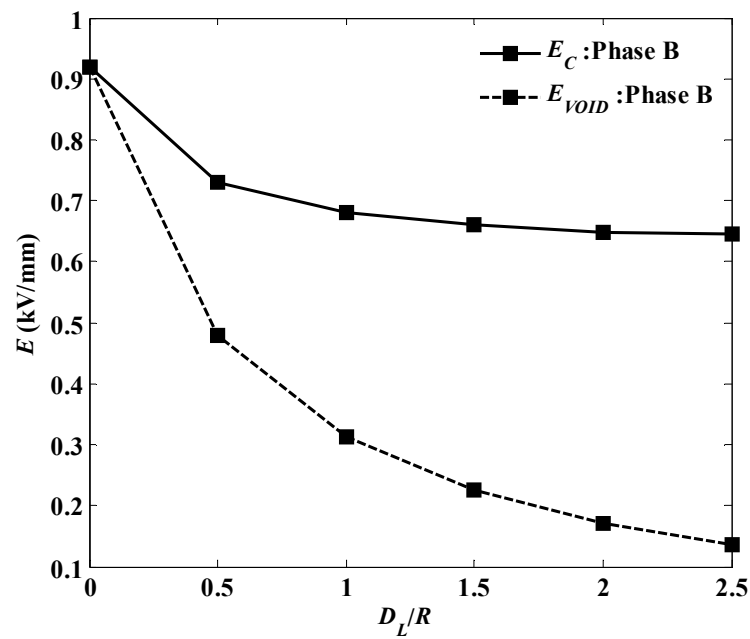


ภาพที่ 4.5 เส้นไขขอบเขต ณ รอยต่อของชั้น HDPE

ภาพที่ 4.6 และ 4.7 แสดงค่าสนามไฟฟ้า E_C ในอากาศ ณ จุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและชั้น HDPE และ E_{VOID} ในแกปอากาศสมมติระหว่างชั้น HDPE และสเปเซอร์พอร์ซเลนที่เฟส A และ B. เราเห็นได้ว่า E_C และ E_{VOID} มีค่าลดลง เมื่อชั้น HDPE หนาขึ้นและ E_C มีค่ามากกว่า E_{VOID} เสมอ. E_C และ E_{VOID} ของเฟส B มีค่าน้อยกว่าค่าของเฟส A (E_C และ E_{VOID} ของเฟส C มีค่าใกล้เคียงกับค่าของเฟส A เสมอ). เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้น HDPE แทรก ($D_L = 0$), กรณี $D_L = 0.5R$ E_C มีขนาดลดลงเท่ากับ 20.42, 20.41 และ 22.20 % และกรณี $D_L = 2.5R$, E_C มีขนาดลดลงเท่ากับ 30.84, 29.75 และ 32.73 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ. ผลการศึกษาพบว่า การแทรกชั้น HDPE ส่งผลให้ E_C มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งลดลงทันทีประมาณ 21.01 % เมื่อแทรกชั้น HDPE ซึ่งหนาเท่ากับ $0.5R$. E_C มีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อแทรกชั้น HDPE ระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ เนื่องจากการลดผลต่างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่จุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศและชั้น HDPE. การเพิ่มความหนา D_L ของชั้น HDPE ทำให้ค่า E_C ลดลงเล็กน้อย (เพิ่ม D_L เป็น $2.5R$, E_C ลดลงประมาณ 31.11 % เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้น HDPE). สนามไฟฟ้า E_{VOID} ในแกปอากาศสมมติมีลักษณะเช่นเดียวกับ E_C แต่มีขนาดน้อยกว่า. ดังนั้น ผลของค่า E_{VOID} ที่มีต่อการดิสชาร์จบางส่วนในแกปอากาศสมมติจึงมีไม่มากนัก. ค่าสนามไฟฟ้า E_C และ E_{VOID} เมื่อความหนา D_L ของชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้นแสดงในภาคผนวก จ.



ภาพที่ 4.6 E_C และ E_{VOID} ในเฟส A เมื่อ D_L เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.7 E_C และ E_{VOID} ในเฟส B เมื่อ D_L เพิ่มขึ้น

4.3 ผลของระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ

ผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้เราทราบว่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนา D_S ของสเปเซอร์พอร์ชเลนเพิ่มขึ้น. ผลการคำนวณในตารางที่ 3.2 พบว่า E_C ในเฟส B มีค่าน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าสเปเซอร์ที่เฟส B จะหนาที่สุดก็ตาม. ดังนั้น ผู้วิจัยเห็นว่ามียุทธศาสตร์อื่นที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมากกว่าผลของความหนาของสเปเซอร์. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยทดลองพิจารณาผลของระยะห่างจากสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบที่มีต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส. ผู้วิจัยนิยามให้ D_{SH} เป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาของสเปเซอร์พอร์ชเลน, ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบและสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ ในระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่งใช้รูปแบบการจัดเรียงสมจริงและแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำมีขนาด $22\sqrt{2/3}$ kV. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของ D_{SH} ที่มีต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV ที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนในกรณีศึกษา 2 กรณี ได้แก่

1. ระบบสายเคเบิลอากาศที่ไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ
2. ระบบสายเคเบิลอากาศซึ่งมีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบและกำหนดให้ $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC}$ เมื่อ D_{SHA} , D_{SHB} และ D_{SHC} เป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบที่เฟส A, B และ C.

ตารางที่ 4.2 D_S , D_{SH} และ E_C ที่เฟสต่าง ๆ ในระบบสเปเซอร์พอร์ชเลน 22 kV

เฟส	D_S/R	D_{SH} (m)	E_C (kV/mm)
A	2.4139	0.2978	1.1549
B	3.1836	0.5369	0.9190
C	2.3482	0.3177	1.2024

สำหรับกรณีระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนและไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ รูปแบบการจัดเรียงสมจริงที่ใช้วิเคราะห์มีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 2.4ก แต่ไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสนามไฟฟ้า E_C ที่เฟสต่าง ๆ ในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV ที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนและไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟส C มีค่ามากที่สุด รองลงมา ได้แก่ เฟส A และ B ตามลำดับ (E_C ที่เฟส C มากกว่าเฟส A

เล็กน้อย). E_C มีค่าลดลงเท่ากับ 16.36, 5.93 และ 14.75 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ (ตารางที่ 4.2).

ตารางที่ 4.3 E_C ในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV ซึ่งไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ

เฟส	E_C (kV/mm)
A	0.9659
B	0.8645
C	1.0250

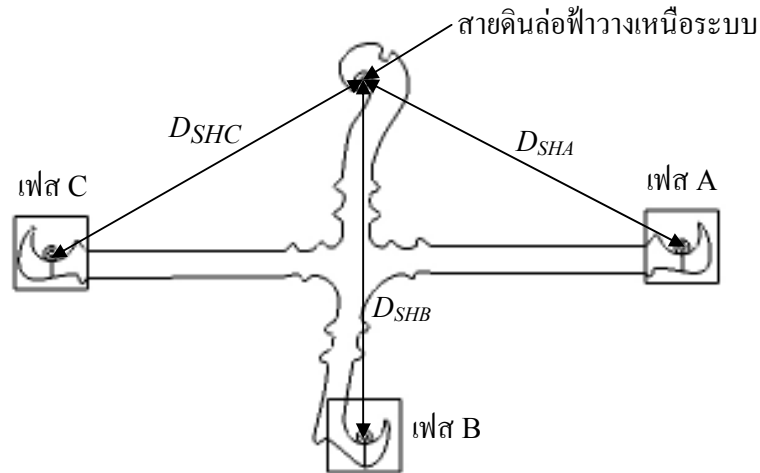
สำหรับระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่งมีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ และ D_{SH} ในแต่ละเฟสมีขนาดเท่ากัน รูปแบบการจัดเรียงสมจริงที่ใช้วิเคราะห์มีลักษณะเช่นเดียวกับภาพที่ 2.4ก แต่เพิ่มความยาวของแขนสเปเซอร์ที่เฟส A และ C. ผู้วิจัยกำหนดให้ค่า $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC} = 0.5369$ m (เท่ากับเฟส B ในตารางที่ 4.2). ภาพที่ 4.8 แสดงรูปแบบการจัดเรียงสมจริงของระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่ง $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC}$. ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสที่เฟสต่าง ๆ ในระบบสายเคเบิลอากาศที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบและ $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC} = 0.5369$ m. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสมีขนาดลดลง เมื่อเพิ่มความยาวของแขนสเปเซอร์ที่เฟส A และ C. E_C ที่ได้มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ระบบที่ใช้งานจริง. E_C ในแต่ละเฟสมีขนาดใกล้เคียงกัน (มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 7%) และมีค่าประมาณ 0.854 kV/mm. E_C มีค่าลดลงเท่ากับ 29.27, 4.45 และ 27.94 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้งานจริง (ตารางที่ 4.2).

ตารางที่ 4.4 E_C ในระบบสายเคเบิลอากาศ 22 kV และ $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC} = 0.5369$ m

เฟส	E_C (kV/mm)
A	0.8168
B	0.8781
C	0.8664

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบมีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัส. ในระบบใช้งานจริงที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในระบบ

สายเคเบิลอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. ในระบบที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบและเพิ่มระยะ D_{SH} ระหว่างสายเคเบิลอากาศและสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบในแต่ละเฟสให้เท่ากัน ($D_{SH} = 0.5369$ m) E_C มีขนาดลดลง เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้งานจริง. อย่างไรก็ตาม ระบบสายเคเบิลอากาศมีความจำเป็นต้องใช้สายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบเพื่อป้องกันปัญหาฟ้าผ่า. ดังนั้น การไม่ใช้สายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบในระบบสายเคเบิลอากาศจึงไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ. สำหรับการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศและสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบสามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวของแขนสเปเซอร์ แต่ต้องคำนึงปัญหาด้านแรงกล เช่น สเปเซอร์สามารถรองรับน้ำหนักของสายเคเบิลได้หรือไม่ เป็นต้น.



ภาพที่ 4.8 ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้สเปเซอร์พอร์ชเลนซึ่ง $D_{SHA} = D_{SHB} = D_{SHC}$

บทที่ 5

สรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลอากาศ โดยใช้รูปแบบการจัดเรียง 2 มิติในการวิเคราะห์ 2 แบบ ได้แก่ รูปแบบอย่างง่ายและรูปแบบสมจริงโดยมีมิติและรูปร่างอ้างอิงจากภาคตัดของระบบที่มีการใช้งานอยู่จริง. สเปเซอร์ที่ใช้ในระบบสมจริงมี 2 ชนิด ได้แก่ สเปเซอร์พอร์ซเลนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง. วิธีที่ใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้า ได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.

สำหรับรูปแบบการจัดเรียงอย่างง่ายซึ่งมีอัตราส่วนความหนา D_S ของสเปเซอร์ต่อรัศมี R ของสายเคเบิลอากาศเท่ากับ 3 และแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำมีขนาด 1 kV สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ผิวของตัวนำ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_S ของสเปเซอร์. สนามไฟฟ้าที่ผิวของสายเคเบิลในอากาศมีค่าสูงสุด ณ จุดสัมผัส และมีค่าลดลง เมื่อมีระยะห่างจากจุดสัมผัสเพิ่มขึ้น. สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0426, 0.0909 และ 0.1973 kV/mm สำหรับ $\epsilon_S = 1, 2.2$ และ 7 ตามลำดับ. E_C ที่ได้จากรูปไฟไนต์เอลิเมนต์มีขนาดลดลงเล็กน้อย เท่ากับ 6.37, 3.30 และ 0.85 % สำหรับ $\epsilon_S = 1, 2.2$ และ 7 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแกมมาดิโพล [5]. กรณีจำนวนโหนดเปลี่ยนแปลง ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่าลดลง เมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น. สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดขอบเขตการคำนวณ ความคลาดเคลื่อนของ E_C มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อขนาดของขอบเขตการคำนวณเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขอบเขตการคำนวณมีขนาดใหญ่เกินไป.

กรณีรูปแบบสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนสำหรับระบบ 22 kV กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำในเฟสที่สนใจมีขนาด $22\sqrt{2/3}$ kV และในเฟสที่ไม่สนใจเท่ากับ 0 V. ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเฟสอยู่ที่ตัวนำ และมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างจากตัวนำเพิ่มขึ้น. ในบริเวณเฟสที่สนใจ สนามไฟฟ้าในอากาศมีค่าสูงในบริเวณจุดสัมผัส และมีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งจุดสัมผัส. E_C มีค่าเท่ากับ 1.1177, 0.9162 และ 1.1617 kV/mm สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ. E_C ในเฟสที่สนใจมีค่าสูงกว่า E_C ในเฟสที่ไม่สนใจมาก. สนามไฟฟ้าในแนวตั้งซึ่งเริ่มต้นที่จุดศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศและสิ้นสุดที่ผิวของสเปเซอร์ในแต่ละเฟสมีลักษณะเหมือนกัน โดยมีค่ามากที่สุด ณ ผิวของตัวนำ และมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างจากตัวนำเพิ่มขึ้น. สนามไฟฟ้าที่ผิวของสายเคเบิลในอากาศที่เฟสต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีค่ามากที่สุด ณ จุดสัมผัสและลดลง เมื่อมีระยะตามผิวโค้งห่างจากจุดสัมผัสมากขึ้น. สนามไฟฟ้าในแนวตั้งและที่ผิวของสายเคเบิลอากาศที่เฟส A และ C มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าที่เฟส B อย่างชัดเจน.

กรณีรูปแบบสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ในระบบ 22 kV และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำเช่นเดียวกับระบบที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลน ศักย์ไฟฟ้าและ

สนามไฟฟ้าในระบบที่ใช้สเปเซอร์ HDPE มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลน. E_C ในระบบที่ใช้สเปเซอร์ HDPE มีค่าเท่ากับ 0.6033, 0.5370 และ 0.5912 kV/mm และมีค่าลดลงเท่ากับ 46.05, 41.39 และ 49.11 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของสเปเซอร์พอร์ซเลน. ทั้งนี้ สำหรับกรณีรูปแบบอย่างง่าย E_C ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าลดลง 53.93 % เมื่อเปลี่ยนวัสดุของสเปเซอร์จากพอร์ซเลน ($\epsilon_S = 7$) เป็น HDPE ($\epsilon_S = 2.2$).

การศึกษาการแปรเปลี่ยนของสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในระบบสายเคเบิลอากาศ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ที่มีผลต่อสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสโดยศึกษา 3 กรณี ได้แก่ ความหนาของสเปเซอร์, การแทรกชั้น HDPE ระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ และระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. ระบบสายเคเบิลอากาศที่ใช้วิเคราะห์เป็นระบบสมจริงที่ใช้สเปเซอร์พอร์ซเลนและศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนตัวนำเท่ากับ $22\sqrt{2/3}$ kV.

จากการศึกษาผลของความหนาของสเปเซอร์ ผู้วิจัยพบว่า สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของสเปเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น. ในกรณีที่อ้างอิงมิติของสเปเซอร์จริง E_C มีค่าเท่ากับ 1.1549, 0.9190 และ 1.2024 kV/mm สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ. เมื่อเพิ่มค่า $D_S/R = 10$, E_C ในแต่ละเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับ 7.27, 8.70 และ 7.16 % จากกรณีแรก.

การแทรกชั้น HDPE ระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์พอร์ซเลนมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่า E_C . การเพิ่มชั้น HDPE อาจทำให้มีแก๊ปอากาศเกิดขึ้น ณ รอยต่อของชั้น HDPE และสเปเซอร์พอร์ซเลนในทางปฏิบัติ. สนามไฟฟ้า E_{VOID} ในแก๊ปอากาศอาจมีค่าสูงและส่งผลให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน. ผลการศึกษาพบว่า E_C และ E_{VOID} มีค่าลดลง เมื่อชั้น HDPE หนาขึ้นและ E_C มีค่ามากกว่า E_{VOID} เสมอ. กรณีความหนา D_L ของชั้น HDPE เท่ากับ $0.5R$, E_C มีขนาดลดลงเท่ากับ 20.42, 20.41 และ 22.20 % และกรณี $D_L = 2.5R$, E_C มีขนาดลดลงเท่ากับ 30.84, 29.75 และ 32.73 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้น HDPE แทรก. ดังนั้น การแทรกชั้น HDPE ส่งผลให้ E_C มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในขั้นต้น และการเพิ่มความหนา D_L ขึ้นไป ทำให้ค่า E_C ลดลงเล็กน้อย. สนามไฟฟ้า E_{VOID} มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ E_C แต่มีขนาดน้อยกว่า. ดังนั้น ผลของ E_{VOID} ที่มีต่อการดิสชาร์จบางส่วนในแก๊ปอากาศสมมติจึงมีไม่มากนัก.

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ระบบสายเคเบิลอากาศโดยไม่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ พบว่า E_C มีขนาดลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. E_C มีค่าลดลงเท่ากับ 16.36, 5.93 และ 14.75 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีสายดินล่อฟ้าวางเหนือระบบ. ผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่มระยะห่างระหว่างสายเคเบิลอากาศถึงสายดินล่อฟ้าในแต่ละเฟสให้มีค่าเท่ากัน เท่ากับ 0.5369 m. ผลการคำนวณแสดงว่า E_C ในแต่ละเฟสมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.8168, 0.8781 และ 0.8664 kV/mm สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ. E_C มีค่าลดลงเท่ากับ

29.27, 4.45 และ 27.94 % สำหรับเฟส A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้งานจริง.

จากผลการศึกษา เราสามารถลดค่าสนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสได้โดย การแทรกชั้น HDPE ระหว่างสายเคเบิลอากาศและสเปเซอร์ และการเพิ่มความยาวแขนของสเปเซอร์. ส่วนการเพิ่มความหนาของสเปเซอร์ส่งผลให้สนามไฟฟ้า ณ จุดสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น. อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความหนาของชั้น HDPE สามารถลดสนามไฟฟ้าได้ดีเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น. การเพิ่มความยาวแขนของสเปเซอร์ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงทางกลของสเปเซอร์ประกอบด้วย.

รายการอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. รายงานปัญหาการใช้งานสายเคเบิลอากาศกับ Space กรุงเทพฯ: แผนกวิจัย อุปกรณ์ไฟฟ้า กองวิจัย ฝ่ายวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค, 2009.
- [2] Takuma, T., and Kawamoto, T. Field enhancement at a triple junction in arrangements consisting of three media. IEEE Trans. Electrical Insulation 14 (2007): 566–571.
- [3] Techaumnat, B., Hamada, S., and Takuma, T. Effect of conductivity on electric field behavior near a contact point. 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering 1 (Aug. 2001): 5–8.
- [4] Takuma, T., and Kawamoto, T. Field intensification near various points of contact with a zero contact angle between a solid dielectric and an electrode. IEE Trans. Power Apparatus System 103 (Sept. 1984): 2486–2494.
- [5] Huynh, V., and Techaumnat, B. Study of electric field at a zero-angle contact point between three dielectrics. 15th Asian Conference on Electrical Discharge A32 (Nov. 2010).
- [6] Saithongin, V., and Techaumnat, B. Numerical Analysis of Electric Field at the Contact Point Between a Spacer Aerial Cable and a Spacer. 3rd International Conference on Electrical Engineering and Informatics 1 (July 2011): 336–340.
- [7] Jin, J. The finite element method in electromagnetic. 2nd Edition. Canada: Wiley, 2002.
- [8] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2007.
- [9] Geuzaine, C., and Remacle, J. F. Gmsh a three-dimensional finite element meshgenerator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79 (2009): 1309-1331.
- [10] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การอินทิเกรตเชิงเลข

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการอินทิเกรตที่ซับซ้อน. ดังนั้นจึงมีการนำการอินทิเกรตเชิงเลขเข้ามาช่วยในการอินทิเกรตซึ่งมีรูปแบบการอินทิเกรตดังนี้.

$$\begin{aligned} \int_S f(L_{1,i}, L_{2,i}) dS &= \int_0^{1-L_1} \int_0^{1-L_1-L_2} f(L_{1,i}, L_{2,i}) \left\| \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_{1,i}} \times \frac{\partial \bar{x}}{\partial L_{2,i}} \right\| dL_1 dL_2 \\ &= \int_0^{1-L_1} \int_0^{1-L_1-L_2} f'(L_{1,i}, L_{2,i}) dL_1 dL_2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i f'(L_{1,i}, L_{2,i}) \end{aligned} \quad (ก.1)$$

เมื่อ n คือจำนวนของจุดสุ่ม (Sampling point), (L_1, L_2) คือพิกัดเฉพาะที่ (Local coordinate) ของตำแหน่งจุดสุ่มและ w_i คือฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight function) ณ ตำแหน่งจุดสุ่ม. ขนาดของพิกัดเฉพาะที่และฟังก์ชันน้ำหนัก ณ ตำแหน่งจุดสุ่มในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแสดงในตารางที่ ก.1.

ตารางที่ ก.1 พิกัดเฉพาะที่และฟังก์ชันน้ำหนัก ณ ตำแหน่งจุดสุ่มในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

n	L_1	L_2	w
7	0.3333333333333333	0.3333333333333333	0.2250000000000000
	0.05971587179877	0.47014206410512	0.13239415278851
	0.47014206410512	0.05971587179877	0.13239415278851
	0.47014206410512	0.47014206410512	0.13239415278851
	0.79742698535309	0.10128650732346	0.12593918054483
	0.10128650732346	0.79742698535309	0.12593918054483
	0.10128650732346	0.10128650732346	0.12593918054483

n	L_1	L_2	w
13	0.333333333333333	0.333333333333333	-0.14957004446767
	0.47930806784192	0.26034596607904	0.17561525743320
	0.26034596607904	0.47930806784192	0.17561525743320
	0.26034596607904	0.26034596607904	0.17561525743320
	0.86973979419557	0.06513010290222	0.05334723560884
	0.06513010290222	0.86973979419557	0.05334723560884
	0.06513010290222	0.06513010290222	0.05334723560884
	0.63844418856981	0.31286549600488	0.07711376089026
	0.31286549600488	0.63844418856981	0.07711376089026
	0.63844418856981	0.04869031542532	0.07711376089026
	0.04869031542532	0.63844418856981	0.07711376089026
	0.31286549600488	0.04869031542532	0.07711376089026
	0.04869031542532	0.31286549600488	0.07711376089026
16	0.333333333333333	0.333333333333333	0.14431560767779
	0.17056930775176	0.17056930775176	0.10321737053472
	0.17056930775176	0.65886138449648	0.10321737053472
	0.65886138449648	0.17056930775176	0.10321737053472
	0.05054722831703	0.05054722831703	0.03245849762320
	0.05054722831703	0.89890554336594	0.03245849762320
	0.89890554336594	0.05054722831703	0.03245849762320
	0.45929258829272	0.45929258829272	0.09509163426728
	0.45929258829272	0.08141482341455	0.09509163426728
	0.08141482341455	0.45929258829272	0.09509163426728
	0.26311282963464	0.00839477740996	0.02723031417444
	0.26311282963464	0.72849239295540	0.02723031417444
	0.00839477740996	0.26311282963464	0.02723031417444
	0.00839477740996	0.72849239295540	0.02723031417444
	0.72849239295540	0.00839477740996	0.02723031417444
0.72849239295540	0.26311282963464	0.02723031417444	

ภาคผนวก ข

วิธีเกรเดียนต์สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้า

วิธีเกรเดียนต์สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้า (Preconditioned conjugate gradient หรือ PCG) เป็นวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) ซึ่งใช้ในการแก้ระบบสมการเชิงเส้น. วิธีการดังกล่าวมีการปรับสภาพล่วงหน้า (Preconditioning) เพื่อลดจำนวนรอบการทำซ้ำในการคำนวณ ทำให้ระยะเวลาในการคำนวณหาคำตอบรวดเร็วขึ้น. การแก้ระบบสมการเชิงเส้นมีรายละเอียดดังนี้.

ระบบสมการเชิงเส้นแสดงอยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (\text{ข.1})$$

คำตอบของระบบสมการเชิงเส้น

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ \mathbf{A} เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$, \mathbf{b} เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times 1$, n เป็นจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าและ \mathbf{x} เป็นคำตอบของระบบสมการ.

การหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีเกรเดียนต์สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้าเริ่มจากการกำหนดค่า $\mathbf{x}_0 = 0$ ซึ่ง \mathbf{x}_0 เมตริกซ์ขนาดและ $\mathbf{M} \approx \mathbf{A}$ เมื่อ \mathbf{M} คือเมตริกซ์ตัวปรับสภาพล่วงหน้า. ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือก \mathbf{M} เป็นเมตริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) ของ \mathbf{A} . ขั้นตอนวิธีของวิธีเกรเดียนต์สังยุคแบบอาศัยตัวปรับสภาพล่วงหน้ามีรายละเอียดดังนี้.

เริ่มต้นจาก

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_0 \quad (\text{ข.3})$$

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}_0 \quad (\text{ข.4})$$

$$\mathbf{d}_0 = \mathbf{z}_0 \quad (\text{ข.5})$$

สำหรับ $k = 0, 1, 2, \dots$

$$\alpha_k = \frac{\mathbf{z}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{A} \mathbf{d}_k} \quad (\text{ข.6})$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (\text{ข.7})$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{A} \mathbf{d}_k \quad (\text{ข.8})$$

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{r}_{k+1} \quad (\text{ข.9})$$

$$\beta_{k+1} = \frac{\mathbf{z}_{k+1}^T \mathbf{r}_{k+1}}{\mathbf{z}_k^T \mathbf{A} \mathbf{d}_k} \quad (\text{ข.10})$$

$$\mathbf{d}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} + \beta_{k+1} \mathbf{d}_k \quad (\text{ข.11})$$

สิ้นสุดกระบวนการคำนวณ

ภาคผนวก ก

สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในระบบที่ใช้รูปแบบการจัดเรียงอย่างง่าย

ตารางที่ ก.1 E_C (kV/mm) เมื่อจำนวนโหนด (n) ที่ใช้คำนวณเปลี่ยนแปลง

$\epsilon_s \backslash n$	1,314	1,980	6,720	14,256	23,648	56,236	102,736
1	0.042207	0.042447	0.042476	0.042479	0.042485	0.042514	0.042646
2.2	0.08993	0.090485	0.090538	0.090553	0.090581	0.090649	0.090654
7	0.195021	0.196241	0.196433	0.196459	0.196506	0.196642	0.196673

ตารางที่ ก.2 E_C (kV/mm) เมื่อขอบเขตการคำนวณ ($L = H$) เปลี่ยนแปลง

$\epsilon_s \backslash L$	6R	8R	10R	12R	14R	16R	20R	30R	40R	60R	80R	100R
1	0.039617	0.041348	0.042483	0.043205	0.043719	0.044053	0.04447	0.044815	0.044675	0.044276	0.043411	0.043397
2.2	0.085334	0.088654	0.090537	0.091566	0.092217	0.09258	0.092968	0.093175	0.09276	0.091919	0.090276	0.090055
7	0.19029	0.194447	0.19643	0.197327	0.197802	0.197994	0.198103	0.198002	0.197202	0.195672	0.192873	0.19202

ภาคผนวก ง

สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศ เมื่อความหนาของสเปเซอร์เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ ง.1 E_C (kV/mm) เมื่อความหนาของสเปเซอร์เปลี่ยนแปลง

กรณีที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส A	1.15486	1.168273	1.185765	1.199741	1.211163	1.221001	1.230085	1.237065	1.245459
เฟส B	0.918966	0.918966	0.937061	0.952029	0.965697	0.977017	0.987751	0.996972	1.006503
เฟส C	1.202395	1.216952	1.234405	1.248486	1.26078	1.271099	1.280124	1.288365	1.295153

ตารางที่ ง.2 ความหนาของสเปเซอร์ (D_S/R)

กรณีที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส A	2.4139	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส B	3.1836	3.1836	4	5	6	7	8	9	10
เฟส C	2.3482	3	4	5	6	7	8	9	10

ภาคผนวก จ

สนามไฟฟ้า E_C ณ จุดสัมผัสในอากาศและสนามไฟฟ้า E_{VOID} ในแก๊ปอากาศสมมติ เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ

ตารางที่ จ.1 E_C (kV/mm) เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ

D_L	0	0.5R	R	1.5R	2R	2.5R
เฟส A	1.15486	0.918817	0.851017	0.821394	0.805756	0.798678
เฟส B	0.918966	0.73137	0.680691	0.659814	0.64917	0.645542
เฟส C	1.202395	0.93549	0.86347	0.830567	0.812316	0.80886

ตารางที่ จ.2 E_{VOID} (kV/mm) เมื่อแทรกชั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ

D_L	0	0.5R	R	1.5R	2R	2.5R
เฟส A	1.15486	0.610682	0.401656	0.293415	0.228284	0.185691
เฟส B	0.918966	0.48034	0.313273	0.225007	0.171245	0.136173
เฟส C	1.202395	0.62823	0.413689	0.301671	0.23386	0.190003

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัชรินทร์ สายทองอินทร์ เกิดที่จังหวัดนครสวรรค์ เมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2529. จบการศึกษาปริญญาบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าในปี 2552.