

การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Electrical Field Analysis of 230 kV AC Transmission Lines for Using in Limited area



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแส สลับแรงดัน 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัด
โดย	นายภาคภูมิ ขนุนก้อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคภูมิ ขนุนก้อน : การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัด. ( Electrical Field Analysis of 230 kV AC Transmission Lines for Using in Limited area) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

วิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์คือ การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบ 2 มิติ, แบบ 3 มิติ, และวิธีเงาประจุ. การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 3 เฟสที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, วงแหวนโคโรนา, และฉนวนพอลิเมอร์. การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าได้แก่ รัศมีที่วงแหวน ( $r$ ), รัศมีของแหวน ( $R$ ), และ ระยะห่างจากรอยต่อสามทาง ( $H$ ) ถูกนำมาใช้ปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด. สนามไฟฟ้าบริเวณขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าประมาณ  $0.7 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  ณ ความสูง 1 m จากพื้นดิน. ค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์ของ กพผ. ซึ่งระบุไว้ที่  $2 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ . ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟส B. สนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, วงแหวนโคโรนา, และฉนวนมีค่าเท่ากับ  $13 \text{ kV}_p/\text{cm}$ ,  $12 \text{ kV}_p/\text{cm}$ , และ  $3 \text{ kV}_p/\text{cm}$  ตามลำดับ. สนามไฟฟ้างกล่าวว่ามีค่าต่ำกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศที่  $21 \text{ kV}_p/\text{cm}$  บนผิวตัวนำไฟฟ้า และ  $6.4 \text{ kV}_p/\text{cm}$  บนผิวฉนวน. ผลการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ได้ค่า  $r$ ,  $R$ , และ  $H$  เท่ากับ 35 mm, 180 mm, และ 0.43 m ตามลำดับ. ค่าสนามไฟฟ้าลดลง 40 % เมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม. อย่างไรก็ตาม วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าถูกวางใกล้กับกรวดมากขึ้น. ระยะอาร์คระหว่างไฟฟ้าแรงสูงถึงกรวดจะสั้นลงไปด้วยเมื่อ  $H$  เพิ่มขึ้น.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170239021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Corona ring / Polymer insulator / Finite element method

Parkpoom Kranoongon : Electrical Field Analysis of 230 kV AC Transmission Lines for Using in Limited area. Advisor: Prof. Boonchai Techaumnat, Ph.D.

This thesis presents the analysis of electric field of the 230 kV transmission line system for an limited area by using the finite element method. The objectives of thesis are the electric field calculation at the right of way (ROW) by using a 2-dimensional (2D) model, a 3-dimensional (3D) model, and the image charge method. The 3-phase electric field at the high voltage equipments such as grading ring, corona ring, and polymer insulator are examined. The variation of grading ring parameters such as radius of ring tube ( $r$ ), radius of ring ( $R$ ), and distance from triple junction ( $H$ ) is used to improve the electric field value. The calculated electric field at the edge of the ROW is approximately  $0.7 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  at 1 m above the ground level. The electric field value is smaller than  $2 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ , which is specified by the EGAT. The calculated electric field indicates that the highest electric field occurs at phase B. The electric field values at grading ring, corona ring, insulator are  $13 \text{ kV}_p/\text{cm}$ ,  $12 \text{ kV}_p/\text{cm}$ , and  $3 \text{ kV}_p/\text{cm}$ , respectively. The values are also lower than the critical electric field in the air, which is taken as  $21 \text{ kV}_p/\text{cm}$  on the conductor surface and  $6.4 \text{ kV}_p/\text{cm}$  on the insulator surface. The results of parameter optimization yield  $r$ ,  $R$ , and  $H$  equal to 35 mm, 180 mm, and 0.43 m, respectively. The electric field is reduced by 40 % with the optimized dimensions. However, as the grading ring is placed close to the ground side, the arcing distance between high voltage and ground is shortened with increasing  $H$ .

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์. ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะผู้ทำงานจาก กฟผ. ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลประกอบการทำงานนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี. ผู้เขียนขอขอบพระคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในการทำงาน. สุดท้ายนี้ ผู้เขียนคาดหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อื่นได้ในอนาคต.

ภาคภูมิ ขนุนก้อน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	15
1.3 วัตถุประสงค์ .....	20
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	21
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method).....	22
2.1.1 ฟังก์ชันการประมาณและเอลิเมนต์ .....	22
2.1.1.1 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง 2 มิติ.....	23
2.1.1.2 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสำหรับแบบจำลอง 3 มิติ .....	23
2.2 สมการสนามไฟฟ้าสถิต (Electrostatic equations).....	24
2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions).....	25
2.4 หลักการซ้อนทับ (Principle of superposition).....	26
2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีเงาประจุ (Image charge method).....	27

บทที่ 3 แบบจำลอง.....	32
3.1 แบบจำลอง 2 มิติ.....	32
3.1.1 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	32
3.1.2 แบบจำลองสำหรับใช้กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ 3 มิติ.....	34
3.2 แบบจำลอง 3 มิติ.....	35
3.2.1 แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	35
3.2.2 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง.....	36
3.2.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง.....	38
บทที่ 4 ขั้นตอนการจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	41
4.1 ขั้นตอนการจำลองแบบ 2 มิติ.....	41
4.1.1 ขั้นตอนการจำลองการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	41
4.1.2 ขั้นตอนการจำลองสำหรับใช้กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ 3 มิติ.....	44
4.2 ขั้นตอนการจำลองแบบ 3 มิติ.....	45
4.2.1 ขั้นตอนการจำลองสำหรับเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	45
4.2.2 ขั้นตอนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง.....	46
4.2.3 ขั้นตอนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง.....	49
บทที่ 5 ผลการจำลองและวิจารณ์ผล.....	50
5.1 ผลการจำลองแบบ 2 มิติ.....	50
5.1.1 ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	50
5.1.2 ผลการคำนวณค่าเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณ 3 มิติ.....	53
5.2 ผลการจำลองแบบ 3 มิติ.....	55
5.2.1 ผลการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	55
5.2.2 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง.....	57



5.2.3 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง .....	61
บทที่ 6 การปรับปรุงสนามไฟฟ้า .....	66
6.1 ขั้นตอนการจำลองเพื่อปรับปรุงสนามไฟฟ้า.....	66
6.1.1 การออกแบบพารามิเตอร์แบบจำลอง 3 มิติ.....	66
6.1.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และชนิดวัสดุที่ใช้จำลอง .....	71
6.1.3 การปรับค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ด้วยโมดูลพื้นผิวตอบสนอง .....	73
6.2 ผลการจำลองปรับพารามิเตอร์วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า .....	77
6.2.1 ผลของพารามิเตอร์ต่อสนามไฟฟ้าสูงสุด .....	77
6.2.2 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสนามไฟฟ้าสูงสุด .....	80
6.2.3 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า .....	81
บทที่ 7 สรุปผลการจำลอง.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก ก.....	87
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	94
ภาคผนวก ง.....	96
ภาคผนวก จ.....	100
ภาคผนวก ฉ.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	107

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ระดับความสูงจากพื้นดินที่ใช้พิจารณาค่าสนามไฟฟ้า .....	33
ตารางที่ 3.2 ชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 2 มิติ .....	34
ตารางที่ 3.3 ชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ .....	36
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าคิดแบบแยกแหล่งจ่ายเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี .....	42
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ .....	47
ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณค่าเงื่อนไขขอบเขต .....	53
ตารางที่ 5.2 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณวงแหวนแต่ละชนิด .....	58
ตารางที่ 5.3 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ณ บริเวณผิวฉนวนทั้งสองชนิด .....	61
ตารางที่ 6.1 ระดับของพารามิเตอร์เรขาคณิตวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า .....	74

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การออกแบบวงแหวนโคโรนาชนิด R-type [6].....	18
รูปที่ 1.2 พารามิเตอร์การออกแบบวงแหวนโคโรนาชนิด C-type [6].....	19
รูปที่ 2.1 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับที่หนึ่ง.....	23
รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับที่หนึ่ง.....	23
รูปที่ 2.3 รูปแบบการแบ่งเงื่อนไขขอบเขตในโดเมน $\Omega$ .....	25
รูปที่ 2.4 ทิศทางของสนามไฟฟ้าระหว่างจุดประจุ.....	26
รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของตัวนำเฟสที่มีประจุจริง $+q$ และเงาประจุ $-q$ .....	27
รูปที่ 2.6 ตัวนำทรงกระบอกขนานที่มีประจุจริง $+q$ และประจุเงา $-q$ .....	28
รูปที่ 2.7 ทิศทางของสนามไฟฟ้าเมื่อมีประจุจริง $+q$ และประจุเงา $-q$ .....	29
รูปที่ 3.1 แบบจำลอง 2 มิติของระบบ 3 เฟสกรณีคิดรวมระยะหย่อนที่ตำแหน่งระหว่างเสาของสาย .....	33
รูปที่ 3.2 แบบจำลอง 2 มิติของระบบ 3 เฟสเพื่อใช้คำนวณเงื่อนไขขอบเขต .....	34
รูปที่ 3.3 แบบจำลอง 3 มิติ.....	35
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของแกนเสาส่งฉนวนที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV .....	37
รูปที่ 3.5 ขนาดขอบเขตของโดเมนอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ.....	38
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของแกนเสาส่งฉนวนที่ใช้ในระบบสายส่ง 230 kV แบบมีคิริบฉนวน.....	39
รูปที่ 3.7 เส้นวัดค่าสนามไฟฟ้าในอากาศที่อยู่เหนือระยะรั้วตามฉนวนขึ้นมา 0.5 mm .....	39
รูปที่ 3.8 ระยะรั้วเหนือฉนวน 0.5 mm เพื่อใช้วัดค่าสนามไฟฟ้าของ.....	40
รูปที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 2 มิติระบบ 3 เฟส.....	41
รูปที่ 4.2 จุดบนกริดที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดระหว่างแนวแกน X และ Y.....	42
รูปที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง 2 มิติระบบ 3 เฟสเพื่อใช้คำนวณเงื่อนไขขอบเขต.....	44

รูปที่ 4.4 การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยบริเวณเหนือตัวนำ และใต้ตัวนำ .....	44
รูปที่ 4.5 ขนาดมิติของโดเมนการคำนวณรูปแบบ 3 มิติ .....	45
รูปที่ 4.6 เงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติ .....	46
รูปที่ 4.7 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ .....	47
รูปที่ 4.8 เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการประมาณแต่ละบริเวณ .....	48
รูปที่ 4.9 เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการประมาณผิวฉนวน .....	49
รูปที่ 5.1 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 1 m ระหว่างเสาของสายส่ง .....	51
รูปที่ 5.2 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 16.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง .....	51
รูปที่ 5.3 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 20.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง .....	52
รูปที่ 5.4 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 24.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง .....	52
รูปที่ 5.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส A1 และ A2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง .....	53
รูปที่ 5.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส B1 และ B2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง .....	54
รูปที่ 5.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส C1 และ C2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง .....	54
รูปที่ 5.8 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง $H_1$ ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมการที่ (2.23) .....	55
รูปที่ 5.9 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง $H_2$ ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมการที่ (2.23) .....	56
รูปที่ 5.10 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง $H_3$ ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมการที่ (2.23) .....	56
รูปที่ 5.11 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง $H_4$ ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมการที่ (2.23) .....	57
รูปที่ 5.12 (ก) การกระจายศักย์ไฟฟ้าเฟส B (ข) การกระจายสนามไฟฟ้าเฟส B .....	58
รูปที่ 5.13 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวตัวนำแรงสูงของเฟส B .....	59

รูปที่ 5.14 ค่าสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึงเมื่อปรับรัศมีของวงแหวนเป็น ..... 60

รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณแกนเสาส่งฉนวนที่เฟส B ..... 62

รูปที่ 5.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนทั้งสองชนิด ..... 62

รูปที่ 5.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดแท่งจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B ..... 63

รูปที่ 5.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B ..... 63

รูปที่ 5.19 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวฉนวนชนิดแท่งของเฟส B ..... 64

รูปที่ 5.20 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงของเฟส B ..... 64

รูปที่ 5.21 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดแท่งจากแรงสูงถึงกราวด์ของเฟส B ..... 65

รูปที่ 5.22 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากแรงสูงถึงกราวด์ของเฟส B .... 65

รูปที่ 6.1 เรขาคณิตของลูกถ้วยฉนวนชนิดแท่งแบบตัดครึ่ง ..... 66

รูปที่ 6.2 (ก) พารามิเตอร์เรขาคณิตของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแท่ง ..... 67

รูปที่ 6.3 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง DM modeler กับ ANSYS Discovery AIM ..... 68

รูปที่ 6.4 ขนาดโดเมนการคำนวณ ..... 68

รูปที่ 6.5 (ก) หน้าต่างสำหรับกำหนดเอลิเมนต์ในโปรแกรม ..... 69

รูปที่ 6.6 การกำหนดพารามิเตอร์ขาออกในโปรแกรม ANSYS Discovery AIM ..... 70

รูปที่ 6.7 พารามิเตอร์ขาเข้า และพารามิเตอร์ขาออกในโมดูล Parameter set ..... 70

รูปที่ 6.8 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และวัสดุที่ใช้ในการจำลองในแถบ Physics ..... 71

รูปที่ 6.9 (ก) เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง ..... 72

รูปที่ 6.10 แผนผังการปรับค่าที่เหมาะสมด้วย response surface optimization ..... 73

รูปที่ 6.11 แผนผังการจำลอง ANSYS Discovery AIM ร่วมกับ Response Surface Optimization ..... 74

รูปที่ 6.12 กำหนดกรณีของแบบจำลองแบบ Full factorial ในโมดูล Design of experiment ..... 75

รูปที่ 6.13 การหาค่าต่ำสุด และสูงสุดของพารามิเตอร์ขาออกด้วยโมดูล Response surface ..... 75

รูปที่ 6.14 การหาผลการตอบสนองของพารามิเตอร์เข้าสู่สนามไฟฟ้าสูงสุด .....	76
รูปที่ 6.15 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $r$ ขณะที่ $R = 180$ mm และ $H = 0.43$ m..	77
รูปที่ 6.16 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $R$ ขณะที่ $r = 35$ mm และ $H = 0.43$ m....	77
รูปที่ 6.17 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $H$ ขณะที่ $R = 180$ mm และ $H = 0.43$ m	78
รูปที่ 6.18 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $H$ ที่ $r$ เท่ากับ 15, 25 และ 35 mm .....	78
รูปที่ 6.19 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $H$ ที่ $R$ เท่ากับ 160, 170 และ 180 mm.....	79
รูปที่ 6.20 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า $R$ ที่ $r$ เท่ากับ 15, 25 และ 35 mm.....	79
รูปที่ 6.21 พื้นผิวตอบสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ กับพารามิเตอร์ $H$ และ $r$ .....	80
รูปที่ 6.22 พื้นผิวตอบสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ กับพารามิเตอร์ $H$ และ $R$ ....	80
รูปที่ 6.23 พื้นผิวตอบสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด $E_{\max}$ กับพารามิเตอร์ $R$ และ $r$ ....	81
รูปที่ 6.24 ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณผิววงแหวนของฉนวนชนิดแห้ง.....	81
รูปที่ 6.25 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศรอบ ๆ ลูกถ้วยฉนวนชนิดแห้ง .....	82

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีโครงการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่ภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือนให้มากขึ้น อันเนื่องมาจากแนวโน้มการบริโภคพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี. ในบางกรณีเขตพื้นที่เดิมไม่สามารถขยายบริเวณขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Right of way) ให้เพิ่มมากขึ้นได้แล้ว. ทางเลือกหนึ่ง คือ การยกระดับแรงดันที่ใช้งานให้สูงขึ้นจากระบบเดิมเช่น จากระดับแรงดัน 115 kV เป็น 230 kV เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น.

การยกระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้โครงสร้างต่างๆ ของระบบไฟฟ้าระบบใหม่เปลี่ยนไป อาทิเช่น ความสูงของตัวเสาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก 32.8 m เป็น 43.3 m, ลักษณะของลูกถ้วยฉนวนที่เปลี่ยนไป จากเดิมใช้เป็นลูกถ้วยพอลิเมอร์รับแรงดึงชนิด ANSI 52-3 เป็นลูกถ้วยฉนวนวัสดุโพลีเมอร์ และจำนวนของสายตัวในแต่ละเฟสที่เพิ่มขึ้นจาก 1 ตัวต่อเฟสเป็น 2 ตัวต่อเฟส. การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยต้องค่าพิจารณาสนามไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ใกล้กับตัวนำแรงสูง ได้แก่ วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า (Grading ring) ของลูกถ้วยฉนวน และวงแหวนโคโรนา (Corona ring). ค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวของอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆ ประการ เช่น ตำแหน่งที่ติดตั้งวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, ขนาดรัศมีของพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, และรัศมีวงนอกของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า [1]. รูปร่างเรขาคณิตของอุปกรณ์แรงสูงและฉนวนเหล่านี้มีผลต่อการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดโคโรนาดีสชาร์จสูง [2, 3].

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของระบบ 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัดของ กฟผ. การวิเคราะห์ใช้โปรแกรมไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Electronic Desktop (Maxwell)<sup>®</sup> ในการคำนวณ. ผู้วิจัยใช้วิธีการคำนวณสนามไฟฟ้า 3 เฟสแบบแยกส่วนกันเพื่อลดเวลาในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละเฟส. ในการจำลอง ผู้วิจัยพิจารณาผลของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวอุปกรณ์ฝั่งแรงสูง ได้แก่ วงแหวนโคโรนา วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า และผิวฉนวนของแขนเสาส่งชนิดโพลีเมอร์โดยใช้จำลองแบบ 3 มิติ. จากนั้นผู้วิจัยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสนามไฟฟ้าระหว่างระบบใหม่ 230 kV และระบบเดิม 115 kV. เมื่อได้ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลองดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยจะศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการปรับรูปแบบของโมเดลในด้านต่างๆ ต่อไป เช่น ความละเอียด

ของการแบ่งแบบจำลอง, การกำหนดรูปร่างของฉนวน และการปรับมิติของอุปกรณ์แรงสูง วงแหวนโคโรนา และวงเกลี่ยสนามไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนได้อีกด้วย.

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรม

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบนอุปกรณ์แรงสูงไว้ ผู้เขียนสรุปข้อมูลรายละเอียดของงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ไว้ดังนี้.

B. M'hamdi, M. Tegar, A. Mekhaldi นำเสนอวิธีการออกแบบวงแหวนโคโรนาของลูกถ้วยฉนวนชนิดคอมโพสิตในระบบสายส่งไฟฟ้า 230 kV โดยใช้อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particles swarm optimization, PSO) กับทฤษฎีการพลศาสตร์กลุ่มประชากร (Dynamic population size) ร่วมกับการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ COMSOL® [1]. การออกแบบวงแหวนโคโรนาได้ออกแบบให้มีความเหมาะสมที่สุดในการลดค่าสนามไฟฟ้าบริเวณที่เป็นรอยต่อ 3 ทางซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงและเกิดโคโรนาดีสชาร์จ. คณะผู้วิจัยกำหนดตัวแปรในการออกแบบวงแหวนโคโรนาไว้ 3 ตัวแปรคือ (1) ตำแหน่งที่ติดตั้งวงแหวนโคโรนาแทนตัวแปรเป็น H, (2) รัศมีวงนอกของวงแหวนโคโรนาแทนด้วยตัวแปรเป็น R และ (3) ขนาดรัศมีของพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนโคโรนาแทนด้วยตัวแปรเป็น r. วิธีการปรับค่าตัวแปรคือให้ตัวแปรหนึ่งเปลี่ยนแปลงและตัวแปรที่เหลือคงที่. จากผลการปรับตัวแปรคณะผู้วิจัยได้ช่วงของค่าตัวแปร H, R และ r (mm) ที่ทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด ได้แก่ ตัวแปร H มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 500 mm, ตัวแปร R มีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 500 mm. และ ตัวแปร r มีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 40 mm.

ในขั้นตอนต่อมา คณะผู้วิจัยใช้อัลกอริทึม PSO ช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าตอบของตัวแปร H, R และ r ที่อยู่ในช่วงข้อมูลด้านบน โดยกำหนดช่วงของข้อมูลดังกล่าวเป็นค่าเริ่มต้นในคำนวณจนถึงรอบสุดท้ายที่ทำให้ค่าตัวแปรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงผลการคำนวณได้ H เท่ากับ 258.39 mm, R เท่ากับ 224.52 mm และค่า r เท่ากับ 40 mm. เมื่อได้คำตอบของตัวแปรที่เหมาะสมแล้ว คณะผู้วิจัยจึงนำค่าดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองวงแหวนโคโรนาและคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าระหว่างกรณีแบบจำลองเดิมที่ไม่มีการปรับตัวแปรกับแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม PSO ในการหาค่าตอบ. คณะผู้วิจัยใช้อัลกอริทึมช่วยในการหาค่าตอบของตัวแปรดังกล่าว และนำค่าตัวแปรมาใช้ในการออกแบบวงแหวนโคโรนา. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีปรับค่าตัวแปรใด ๆ ให้เหมาะสม.

Xi Yang, Naiyi Li, Zongren Peng, Jintao Liao, Qingyu Wang คำนวณค่าสนามไฟฟ้าของแกนเสาส่งฉนวนชนิดคอมโพสิตเพื่อใช้งานในระบบสายส่งกระแสสลับขนาดแรงดัน 750 kV [2].



ส่วนประกอบของแขนเสาส่งฉนวนประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแขนเสาส่งไฟฟ้า ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนชนิดแท่ง (Post insulators), ลูกถ้วยฉนวนชนิดแท่ง (Tension insulators) และส่วนที่รับน้ำหนักสายเฟสคือ พวงลูกถ้วยแขวน (Suspension string). ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์. คณะผู้วิจัยแบ่งกรณีศึกษาทางกายภาพของแขนเสาส่งฉนวนออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 เป็นการเปลี่ยนความยาวของพวงลูกถ้วยฉนวนแขวนจาก 1700 mm เป็น 4700 mm. กรณีศึกษาที่ 2 เป็นการเพิ่มจำนวนของพวงลูกถ้วยแขวนจาก 1 พวงเป็น 2 พวง. กรณีศึกษาที่ 3 เป็นการละลายพวงลูกถ้วยแขวน และเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้า. กรณีศึกษาที่ 4 เป็นการติดตั้งวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งของแขนเสาส่งฉนวน. จากผลการจำลองในกรณีศึกษาที่ 1 คณะผู้วิจัยพบว่าการเปลี่ยนความยาวของลูกถ้วยจาก 1700 mm ไปเป็น 4700 mm มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า เนื่องจากกรณีที่ลูกถ้วยแขวนความยาว 1700 mm ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่บริเวณอุปกรณ์โลหะฝังแรงสูงได้สูงกว่ากรณีลูกถ้วยความยาว 4700 mm และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณดังกล่าวเช่นกัน. กรณีศึกษาที่ 2 การเพิ่มจำนวนของพวงลูกถ้วยแขวนจาก 1 ชุดเป็น 2 ชุดส่งผลต่อการค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าไม่มากนัก. ในกรณีศึกษาที่ 3 การละลายพวงลูกถ้วยแขวนออกไปทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงขึ้นที่บริเวณส่วนหัวของลูกถ้วยชนิดแท่ง. ในกรณีศึกษาที่ 4 การติดตั้งวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้กับข้อต่อตัวนำแรงสูง (End-fittings) มีผลต่อการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าให้สม่ำเสมอขึ้นเพื่อลดโอกาสในการเกิดโคโรนา discharge ได้.

R. Anbarasan, S. Usa คำนวณค่าสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนชนิดพอลิเมอร์ในระบบ 220 kV แบบ 2 มิติแบบสมมาตรรอบแกนหมุน และแบบ 3 มิติโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]. วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณฉนวน และอุปกรณ์แรงสูงระหว่างแบบจำลอง 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่มีการปรับลดมิติของเรขาคณิตว่าค่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด.

ในส่วนของการจำลองคณะผู้วิจัยแบ่งจำลองออกเป็น 6 แบบ. แบบจำลองแบบแรกเป็นแบบจำลอง 2 มิติแบบสมมาตรรอบแกนหมุนซึ่งประกอบด้วยลูกถ้วยฉนวนชนิดคอมโพสิต และวงแหวนโคโรนา โดยตัดเรขาคณิตของอุปกรณ์อื่นๆ และเสาไฟฟ้า. แบบจำลองที่ 2 ถึง 6 เป็นแบบจำลอง 3 มิติซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างเสาไฟฟ้าแบบ 3 เฟส, ลูกถ้วยฉนวน, วงแหวนโคโรนา, อุปกรณ์โลหะแรงสูง และตัวนำในแต่ละเฟส. แต่เนื่องจากแบบจำลองแบบ 3 มิติมีอุปกรณ์จำนวนมากทำให้โปรแกรมใช้จำนวนเอลิเมนต์มากและเวลาในการคำนวณที่นานมากขึ้น. คณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีในการลดรูปแบบจำลอง 3 มิติให้ใช้เวลาในการคำนวณลดลง. จากนั้นคณะผู้วิจัยเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิววงแหวนโคโรนา และบริเวณรอยต่อ 3 ทางระหว่างแบบจำลอง 3 มิติกับแบบ

2 มิติว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร. ผลการจำลองพบว่าแบบจำลอง 2 มิติกับ 3 มิติมีค่าสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากรายละเอียดต่าง ๆ ในการจำลองระหว่างแบบ 2 มิติและ 3 มิติที่แตกต่างกัน. คณะผู้วิจัยจึงใช้สมการการปรับแก้ (Reduction factor) เพื่อให้มีความผิดพลาดของทั้งกรณี 2 มิติและ 3 มิติให้น้อยที่สุด.

D. Stefanini, J.M. Seifert, M. Clemens, D. Weida คำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณลูกถ้วยฉนวนชนิดคอมโพสิตลักษณะการวางแนวลูกถ้วยตัววี (V-string insulator) ที่ใช้ในระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage) ขนาด 420 kV [4]. โดยส่วนใหญ่แล้วฉนวนมีโอกาสได้รับความเสียหายจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จที่บริเวณรอยต่อ 3 ทางมากที่สุด เนื่องจากมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นของฉนวน. คณะผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. คณะผู้วิจัยกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละบริเวณที่สนใจคือ  $4.2 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{cm}$  ที่บริเวณเหนือผิวฉนวน,  $21 \text{ kV}_p/\text{cm}$  ที่บริเวณผิวโลหะฝั่งแรงสูง และ  $3.5 \text{ kV}_p/\text{cm}$  ที่บริเวณรอยต่อ 3 ทางของฉนวนชนิดรับแรงดึง และฉนวนชนิดแขวน.

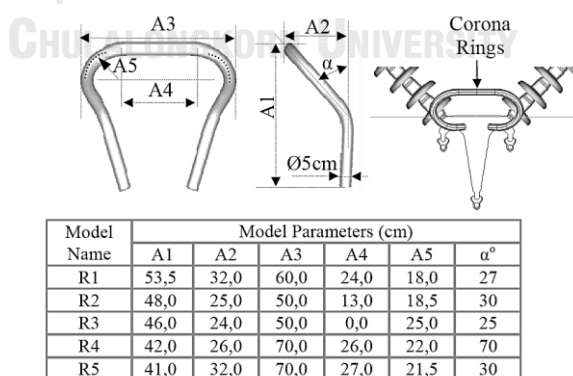
ในส่วนของการจำลอง คณะผู้วิจัยสร้างแบบจำลอง 3 มิติของลูกถ้วยชนิดคอมโพสิตขึ้น โดยบริเวณที่คณะผู้วิจัยวางแผนโคโรนา และครีบของฉนวนเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าสนามบริเวณที่สนใจ. จากนั้น คณะผู้วิจัยจำลองใช้หลักการพื้นฐานของการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. การจำลองนี้ใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ในการประมาณค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิววงแหวนโคโรนา, ครีบฉนวน และสายตัวนำ. ผลการจำลองของคณะผู้วิจัยพบว่าขนาดของค่าสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น. ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณจุดรอยต่อ 3 ทางต่ำลง จากการใช้วงแหวนโคโรนาเข้ามาช่วยปรับปรุงการกระจายสนามไฟฟ้าให้สม่ำเสมอขึ้น.

M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, M. Tegar คำนวณค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดคอมโพสิตที่ใช้ในระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดัน 400 kV แบบวงจรรู [5]. ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วของลูกถ้วยฉนวนทั้ง 3 เฟสภายใต้สภาวะทั้งสภาวะแห้ง, สภาวะเปียก และสภาวะมีสิ่งปนเปื้อนที่ผิว. คณะผู้วิจัยสร้างแบบจำลองของลูกถ้วยฉนวนแบบ 2 มิติสมมาตรรอบแกนหมุนโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> มาคำนวณสนามไฟฟ้า. ลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ในคำนวณมีทั้งหมด 3 ชนิดแตกต่างกันที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของครีบฉนวนและระยะรั้วตามผิว (Leakage distance)

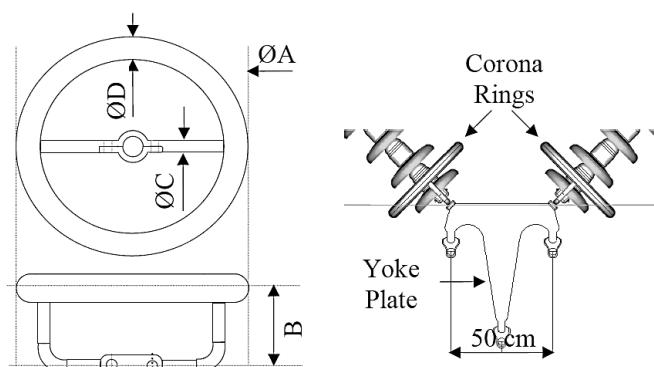
แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนชนิดคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 แบบ. แบบจำลองแบบแรกเป็นการจำลองลูกถ้วยฉนวนที่มีชั้นของฟิล์มมลภาวะที่ผิว โดยได้กำหนดให้มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ  $0.0071 \text{ S/m}$ . จากนั้นคณะผู้วิจัยปรับค่าความหนาของฟิล์มมลภาวะตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 mm

เพื่อดูค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความหนาของชั้นฟิล์ม. แบบจำลองแบบที่สองเป็นการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้ากรณีที่มีฉนวนแห้ง และฉนวนมีหยดน้ำเกาะ. แบบจำลองนี้ประกอบด้วยลูกถ้วยฉนวนที่เป็นวัสดุคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic material) และหยดน้ำทรงกลม. การจำลองแบบสุดท้ายเป็นการลดรูปแบบจำลองของระบบไฟฟ้า 2 วงจรเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าว่าเฟสใดเกิดค่าสนามไฟฟ้าที่สูงสุด. จากผลการจำลองแบบแรกพบว่ายิ่งความหนาของชั้นฉนวนที่มากขึ้นยิ่งทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงตามไปด้วย. ผลการจำลองแบบที่สองพบว่าการที่มีหยดน้ำเกาะที่มีฉนวนทำให้เพิ่มค่าสนามไฟฟ้ามากขึ้นตามด้วย และคณะผู้วิจัยยังพบว่าค่าสนามไฟฟ้ายังแปรผันกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับผิว (Contact angle) อีกด้วย. แบบจำลองสุดท้ายพบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่มีฉนวน ณ บริเวณเฟสตรงกลางมีค่ามากกว่าเฟสอื่นๆ.

Suat Ilhan, Aydogan Ozdemir ออกแบบและคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณผิววงแหวนโคโรนาสำหรับการใช้งานกับลูกถ้วยฉนวนแก้วเหนียว (Toughened glass insulator) ที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงดัน 380 kV โดยลูกถ้วยมีลักษณะการวางตัวของฉนวนเป็นรูปตัววี (V-String) [6]. คณะผู้วิจัยออกแบบวงแหวนโคโรนาไว้ 2 ชนิด คือ วงแหวนโคโรนาชนิด R-type ที่มีลักษณะคล้ายตัว R แสดงดังรูปที่ 1.1 และวงแหวนโคโรนาชนิด C-type ที่มีลักษณะเป็นท่อดวงกลมทั่วไปแสดงดังรูปที่ 1.2. ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาไปที่เรื่องของ การปรับพารามิเตอร์ในการออกแบบวงแหวนโคโรนาให้มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า. ทั้งนี้คณะผู้วิจัยกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบวงแหวนโคโรนาไว้ 3 ตัว โดยมีพารามิเตอร์ A แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของวงแหวนโคโรนา, พารามิเตอร์ B แทนความสูงที่ติดตั้งวงแหวนโคโรนาห่างจากบริเวณรอยต่อ 3 ทาง และพารามิเตอร์ D แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อของวงแหวนโคโรนา.



รูปที่ 1.1 การออกแบบวงแหวนโคโรนาชนิด R-type [6]



รูปที่ 1.2 พารามิเตอร์การออกแบบวงแหวนโคโรนาชนิด C-type [6]

ในงานวิจัยชิ้นนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าไว้ 2 ส่วน. งานวิจัยส่วนแรกเป็นการจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อดูค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เปลี่ยนไปเมื่อปรับพารามิเตอร์ โดยคณะผู้วิจัยพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าใกล้กับเฉพาะบริเวณฉนวนฝั่งแรงสูง. งานวิจัยส่วนที่สองเป็นการทดสอบแรงดันไฟฟ้ารบกวนคลื่นวิทยุเมื่อเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Radio influence voltage tests, RIV Test) และการทดสอบการวาบไฟตามผิวลูกถ้วย (Flashover voltage tests). จากผลการจำลองหาค่าสนามไฟฟ้า คณะผู้วิจัยพบว่าการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ B และ D ส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ A. และจากผลการทดสอบการวัดค่าแรงดัน RIV พบว่ามีค่าลดลงเมื่อใช้พารามิเตอร์ B ที่ความสูงมากกว่า 15 cm เป็นต้นไป.

T. Doshi, R.S. Gorur, J. Hunt คำนวณค่าสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนชนิดคอมโพสิตที่ติดตั้งในเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งระหว่างทาง และเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งปลายทาง (Dead-end tower) ของระบบไฟฟ้าแรงดันสูงอูลตรา (Ultra high-voltage) [7]. การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าใช้โปรแกรม COULOMB 8.0<sup>®</sup> ที่ใช้ทฤษฎีการคำนวณเชิงเลขวิธีขอบเขตเอลิเมนต์ (Boundary element method, BEM).

คณะผู้วิจัยศึกษากรณีศึกษาต่างๆ ในการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า. กรณีศึกษาแรกเป็นการจำลองว่าเมื่อเพิ่มจำนวนกลุ่มตัวนำไฟฟ้าในแต่ละเฟสค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยมีค่าเป็นอย่างไร โดยการปรับจำนวนตัวนำไฟฟ้าตั้งแต่ 3 - 12. กรณีศึกษาที่สองเป็นการปรับพารามิเตอร์ของวงแหวนโคโรนาซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนโคโรนา (D), ความหนาของท่อวงแหวนโคโรนา (T) และระยะห่างที่ติดตั้งจากอุปกรณ์แรงสูง (P). ผลการจำลองของกรณีศึกษาแรกพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนตัวนำในแต่ละเฟสทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนลดลงอย่างเห็นได้ชัด. ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ 12 ตัวนำต่อ 1 เฟสที่แรงดัน 1200 kV. ผลกระทบจากการปรับ

ค่าพารามิเตอร์ในกรณีศึกษาที่สอง คณะผู้วิจัยพบว่าการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ D มีผลต่อการลดค่าสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนมากกว่าพารามิเตอร์ P และ T ทั้งกรณีฉนวนแบบเดี่ยวและแบบคู่. สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ถูกพบว่าเมื่อปรับไปเรื่อย ๆ ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนอย่างชัดเจน. ทำให้คณะผู้วิจัยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ T และ P เท่ากับ 120 mm และ 400 mm เพื่อใช้ในสำหรับการออกแบบวงแหวนโคโรนา.

Fatiha Aouabed, Abdelhafid Bayadi, Alaa eddin Rahmani วิเคราะห์สนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนชนิดคอมโพสิตในสภาวะเปียกที่หยดน้ำเกาะที่ผิวฉนวน [8]. การที่มีหยดน้ำที่ผิวฉนวนเป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนจากการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge). หยดน้ำเหล่านี้มีสภาพนำไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวหยดน้ำเหล่านั้นจนทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนในที่สุด. ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยศึกษาพฤติกรรมของหยดน้ำที่เกาะบริเวณรอยต่อ 3 ทางคือ อากาศ, ผิวฉนวน และหยดน้ำ รวมทั้งรูปร่างของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ COMSOL Multiphysics®.

การทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน. ส่วนแรกเป็นการทดสอบทางไฟฟ้าโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเพื่อเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด. ส่วนที่สองเป็นการจำลองเรขาคณิตของลูกถ้วยโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการกระจายของเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential Line) และเส้นสนามไฟฟ้า (Electric field Line) ทั้งกรณีฉนวนแห้งและกรณีที่มีหยดน้ำเกาะที่ผิวฉนวน. จากนั้น คณะผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำที่เกาะผิวฉนวนในโปรแกรม. ผลการจำลองแสดงว่าเมื่อป้อนแรงดันและมีสนามไฟฟ้าทำให้หยดน้ำมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสะสมสูงบริเวณรอยต่อ 3 ทาง. บริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นขอบแหลมและทำให้หยดน้ำยึดตัวตามแนวสนามไฟฟ้าและเกิดแถบนำไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วย. อีกทั้งจำนวนของหยดน้ำ, ปริมาตรของหยดน้ำ ยังเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเบรกดาว์นระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อป้อนแรงดันจนถึงค่าๆ หนึ่งที่เกินกว่าค่าแรงดันวิกฤตที่จะเกิดวาบไฟตามผิว (Critical Flashover Voltage).

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนตัวนำไฟฟ้าแรงสูงและแขนเสาส่งฉนวนชนิดโพลีเมอร์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าระหว่างระบบใหม่ 230 kV และระบบเดิม 115kV.

1.3.2 ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการจำลอง เช่น เรขาคณิตของแขนเสาส่งและวงแหวนโคโรนาที่มีต่อค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้.

1.3.3 วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 kV ในที่จำกัด.

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟฟ้าสถิต โดยไม่คิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร และเชิงพื้นผิวของฉนวน.

1.4.2 ที่บริเวณตัวนำแรงสูง การวิเคราะห์ใช้แบบจำลอง 3 มิติ โดยคิดผลของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวนำเฟสที่พิจารณาเป็นหลัก.

1.4.3 จำกัดการพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดรับแรงดึง, วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดแท่ง, วงแหวนโคโรนา, และผิวฉนวนเท่านั้น.

1.4.4 วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าพิจารณา ณ บริเวณที่ต่ำที่สุดเมื่อคิดระยะหย่อนของสาย.

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจถึงการประยุกต์ใช้โมดูลสนามไฟฟ้าสถิตของโปรแกรม ANSYS Electronic Desktop (Maxwell)<sup>®</sup> ในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส.

1.5.2 เข้าใจถึงผลของพารามิเตอร์การจำลองในแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า.

1.5.3 สามารถยืนยันค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนดไว้หรือไม่.

1.5.4 เข้าใจถึงผลของพารามิเตอร์การจำลองในแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า.

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

เราสามารถหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาเงื่อนไขขอบเขต (Boundary value problem) ซึ่งใช้กับแบบจำลองเรขาคณิตทั้งรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติได้ด้วยวิธีเชิงเลขต่างๆ หลายวิธี เช่น วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method, FDM), วิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ (Boundary element method, BEM), วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) เป็นต้น. เนื่องจากในแบบจำลอง 3 มิติแกนเสาส่งชนิดพอลิเมอร์ที่ผู้วิจัยต้องใช้มีความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิต ผู้วิจัยได้เลือกวิธีใช้หาผลเฉลยของศักย์ไฟฟ้าโดยประมาณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี และสามารถจำลองรูปร่างลักษณะได้แม่นยำ หากเราใช้เอลิเมนต์อันดับสูง [9]. ขั้นตอนในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มี 6 ขั้นตอนหลักดังนี้ คือ

- (1) แบ่งบริเวณออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ และปม (node) ของเอลิเมนต์เหล่านี้ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาผลเฉลยโดยประมาณ.
- (2) เลือกลักษณะการกระจายของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์ที่เรียกว่า ฟังก์ชันในการประมาณ (Interpolation functions)
- (3) หาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาสนามไฟฟ้าสถิต.
- (4) นำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของเอลิเมนต์ทั้งหมดมารวมกันเป็นระบบสมการใหญ่.
- (5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงบนสมการระบบใหญ่.
- (6) แก้สมการระบบใหญ่เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณของศักย์ไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าบนปม. หลังจากนั้นเราสามารถนำค่าศักย์ประจำปมออกมาและนำค่าศักย์ไฟฟ้าไปหาค่าสนามไฟฟ้าในรูปแบบ 3 เฟสกระแสสลับต่อไป.

##### 2.1.1 ฟังก์ชันการประมาณและเอลิเมนต์

ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับที่หนึ่ง ( $N_N = 3$ ) สำหรับแบบจำลอง 2 มิติและเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับที่หนึ่ง ( $N_N = 4$ ) สำหรับแบบจำลอง 3 มิติ. การประมาณค่าการเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ถูกพิจารณาจากจำนวนปมที่ใช้ในการประมาณ. ปมเป็นตำแหน่งของตัวแปร เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi$  [9].

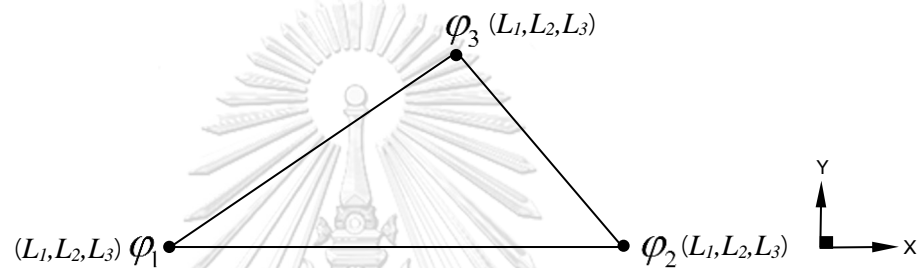
$$\varphi = \sum_{i=1}^{N_N} N_i \varphi_i \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N_i$  คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในประจําปมที่  $i$

$\varphi_i$  คือ ค่าของตัวแปรประจําปมที่  $i$

### 2.1.1.1 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสำหรับแบบจําลอง 2 มิติ

เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมถูกใช้กับแบบจําลองคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบ  
โครงข่ายไฟฟ้า. ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับที่หนึ่งแสดงในรูปที่ 2.1.



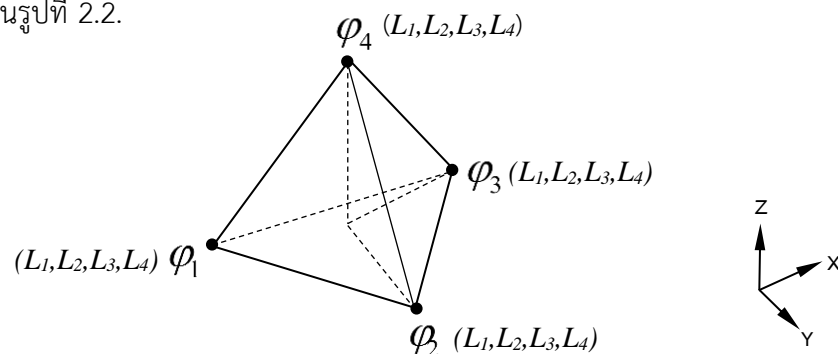
รูปที่ 2.1 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับที่หนึ่ง  
สมการการประมาณเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมอันดับที่หนึ่งแบบกำหนด 3 ปมคือ

$$N_i = L_i \quad (2.2)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3$  และ  $L_1, L_2, L_3$  คือ พิกัดเฉพาะที่ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

### 2.1.1.2 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสำหรับแบบจําลอง 3 มิติ

เอลิเมนต์เชิงปริมาตรทรงสี่หน้าถูกใช้กับแบบจําลองเรขาคณิต 3 มิติ. เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า  
อันดับที่หนึ่งแสดงในรูปที่ 2.2.



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับที่หนึ่ง



สมการการประมาณสำหรับเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับที่หนึ่งคือ

$$N_i = L_i \quad (2.3)$$

เมื่อ  $i = 1$  ถึง 4 และ  $L_1, L_2, L_3, L_4$  คือ พิกัดเฉพาะที่ของเอลิเมนต์ชนิดนี้.

## 2.2 สมการสนามไฟฟ้าสถิต (Electrostatic equations)

ผู้วิจัยนำสมการสนามไฟฟ้าสถิตมาใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบตัวนำแบบ 3 เฟส โดยใช้หลักการซ้อนทับ (Superposition principle). ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้หาค่าสนามไฟฟ้าในระบบกระแสสลับ 3 เฟสต่อไป. กฎของเกาส์ในรูปอนุพันธ์ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร  $\rho_V$  และความหนาแน่น ฟลักซ์ไฟฟ้า  $\vec{D}$  [10].

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_V \quad (2.4)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า  $\vec{D}$  หาได้จากสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  เป็น

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง

สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  สัมพันธ์กับเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า  $\phi$  มีค่าเท่ากับ

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (2.6)$$

เมื่อเราแทนสมการที่ (2.5) และ (2.6) ในสมการที่ (2.4) เราจะได้ความสัมพันธ์

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \phi) = \rho_V \quad (2.7)$$

และได้สมการปัวส์ซองของ (Poisson's equation).

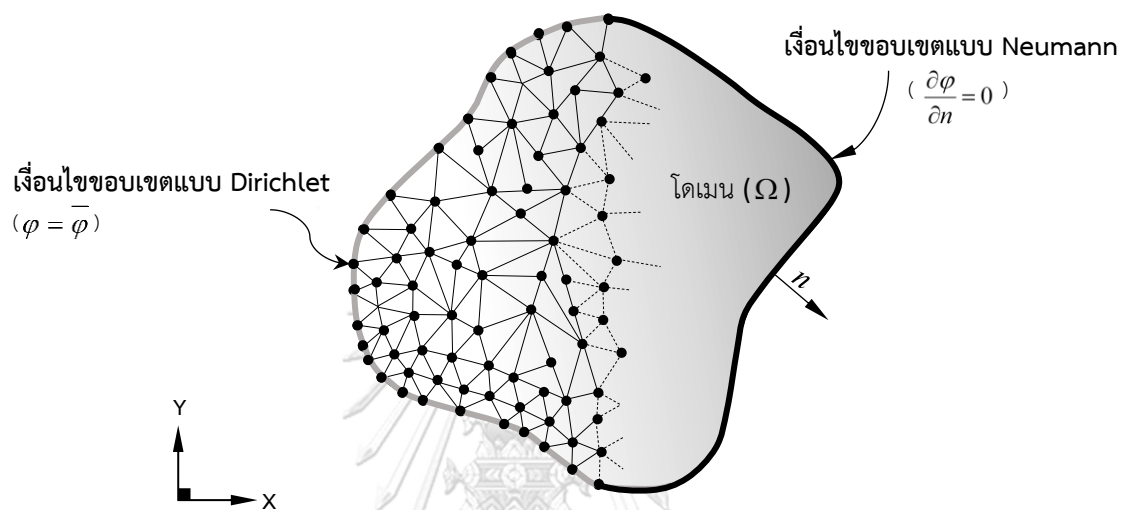
$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_V}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.8)$$

หากบริเวณนั้นมีการกระจายประจุเชิงปริมาตรเป็นศูนย์เราจะได้สมการของลาปลาซ (Laplace's equations).

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.9)$$

### 2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

การหาคำตอบของสมการลาปลาซและสมการปัวส์ซองในหัวข้อที่ 2.2 ต้องการความสัมพันธ์ตามค่าเงื่อนไขขอบเขต. ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของค่าศักย์ไฟฟ้าในบริเวณตัวนำไฟฟ้าที่ทราบค่า และหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าในบริเวณอื่น ๆ อาทิเช่น อากาศ, ฉนวนพอลิเมอร์ และตัวนำที่ไม่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้า. ในรูปที่ 2.3 แสดงเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าในแบบจำลอง.



รูปที่ 2.3 รูปแบบการแบ่งเงื่อนไขขอบเขตในโดเมน  $\Omega$

บริเวณที่กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตจำเป็น (Dirichlet boundary conditions) [11].

$$\varphi = \bar{\varphi} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\bar{\varphi}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทราบ.

ขอบเขตที่ไม่ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตจำเป็นจะมีเงื่อนไขขอบเขตธรรมชาติ (Neumann boundary conditions) [11].

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (2.11)$$

เมื่อ  $n$  คือ เวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับขอบเขต.

## 2.4 หลักการซ้อนทับ (Principle of superposition)

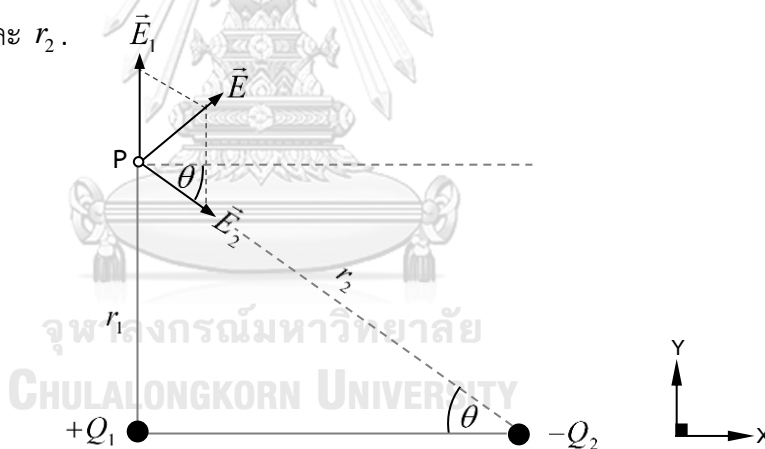
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้หลักการซ้อนทับเพื่อคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส. สนามไฟฟ้าถูกคำนวณจากศักย์ไฟฟ้าโดยใช้โมดูลสนามไฟฟ้าสถิตในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์. หลักการซ้อนทับระบุว่าผลรวมของสนามไฟฟ้าสุทธิที่เกิดขึ้น ณ จุดใด ๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแต่ละประจุไฟฟ้า [10]. ดังนั้นสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างประจุ  $Q$  และระยะทางจากประจุนั้น  $\hat{r}$  จนถึงจุดที่พิจารณาจุด P.

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r} \quad (2.12)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m.

$\hat{r}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากประจุไปหาจุด P.

เราสมมติว่ามีประจุอยู่ 2 ประจุคือ ประจุ  $+Q_1$  และ  $-Q_2$  ตามลำดับ. รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  เมื่อเราต้องการพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่จุด P. ระยะทางจากประจุทั้งสองคือ  $r_1$  และ  $r_2$ .



รูปที่ 2.4 ทิศทางของสนามไฟฟ้าระหว่างจุดประจุ

ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของประจุ  $+Q_1$  และ  $-Q_2$  คือ

$$\vec{E}_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \cdot \hat{r}_1 \quad (2.13)$$

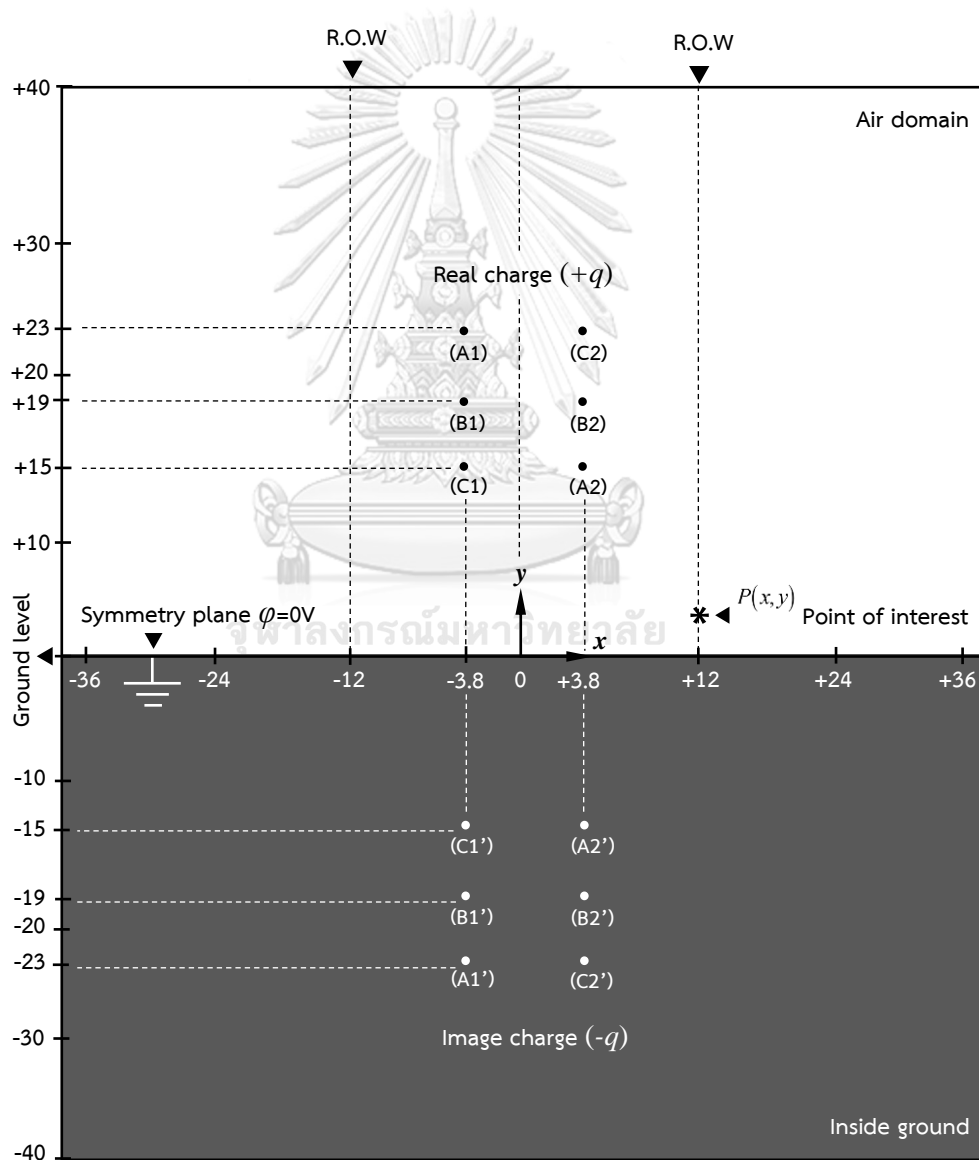
$$\vec{E}_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \cdot \hat{r}_2 \quad (2.14)$$

สนามไฟฟ้าที่คำนวณจากหลักการซ้อนทับคือ

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2.15)$$

## 2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีเงาประจุ (Image charge method)

ผู้วิจัยใช้วิธีเงาประจุเพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง  $P(x, y)$  เหนือพื้นดิน และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติที่คำนวณจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทที่ 5. วิธีเงาประจุคำนวณสนามไฟฟ้าโดยการวางประจุที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีขั้วตรงข้ามไว้ทางด้านของระนาบตัวนำ (Symmetry plane) [10]. รูปที่ 2.5 แสดงพิกัดตำแหน่งของตัวนำเฟส A1, B1, C1, A2, B2 และ C2 ที่มีประจุจริง  $+q$  อยู่เหนือระนาบตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้า  $\phi = 0$  V. ตัวนำเฟส A1', B1', C1', A2', B2' และ C2' ถูกกำหนดให้มีประจุเงา  $-q$  อยู่ใต้ระนาบตัวนำ. ผู้วิจัยกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำ  $U_0$  มีค่าเท่ากับ  $230/\sqrt{3}$  kV<sub>rms</sub> และมุมเฟส A, B และ C ห่างกัน  $120^\circ$  [12].



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของตัวนำเฟสที่มีประจุจริง  $+q$  และเงาประจุ  $-q$

ขั้นตอนในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าด้วยวิธีเงาประจุมีดังนี้

จากรูปที่ 2.6 เราสมมติว่ามีตัวนำทรงกระบอกรัศมี  $R$  วางขนานกันโดยที่มีประจุตรงข้าม  $+q$  และ  $-q$  อยู่ระหว่างระนาบสมมาตรที่มีศักย์ไฟฟ้า  $\phi = 0 V$ . การคำนวณสนามไฟฟ้าหาได้จากประจุเชิงเส้น  $\pm q$  ที่อยู่ในตัวนำทรงกระบอกขนาน.  $r$  และ  $r'$  คือระยะทางระหว่างประจุเชิงเส้นจนถึงจุด  $P$ . ระยะทางระหว่างประจุเชิงเส้นทั้งสองเท่ากับระยะ  $d$ . และระยะจากจุดศูนย์กลางในตัวนำ  $O$  จนถึงประจุเท่ากับระยะ  $c$  ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนคงที่ระหว่าง  $r/r'$  ได้ดังนี้.

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมคล้าย  $\Delta OQ_+P$  และ  $\Delta OPQ_-$  ผู้วิจัยจะถึงความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{r}{r'} = \frac{\overline{Oq_+}}{R} = \frac{R}{\overline{Oq_-}} \quad (2.16)$$

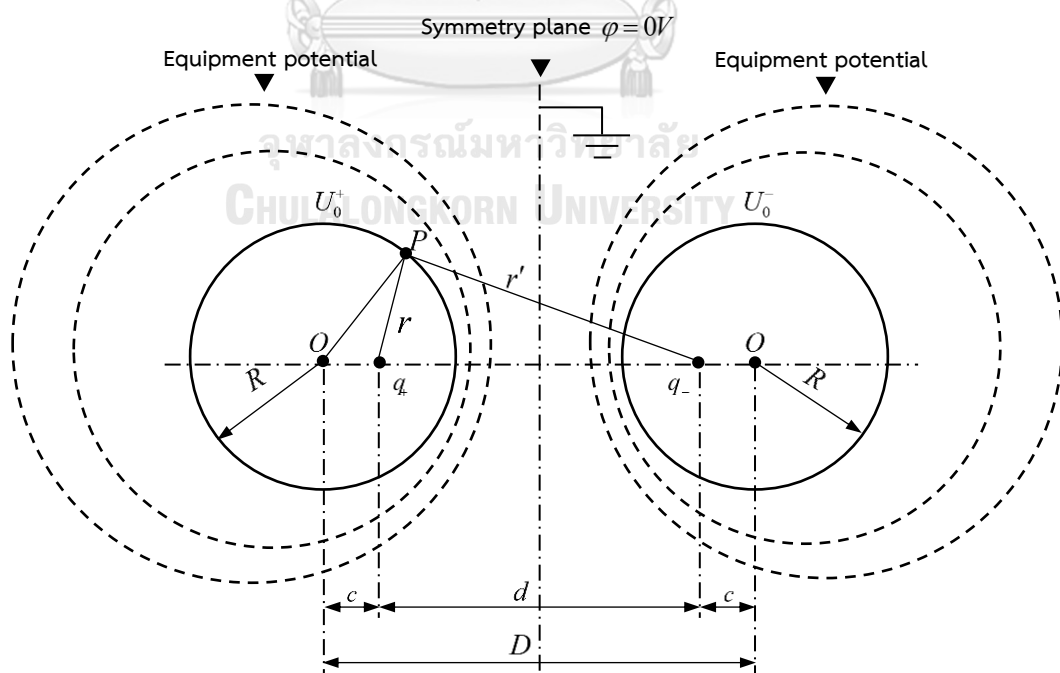
และได้

$$\overline{Oq_+} \overline{Oq_-} = c(D-c) = R^2 \quad (2.17)$$

$$c^2 - Dc + R^2 = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อเราจัดรูปสมการที่ (2.18) จะได้ระยะจากจุดศูนย์กลางในตัวนำจนถึงประจุเป็น

$$c = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - 4R^2}}{2} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.6 ตัวนำทรงกระบอกขนานที่มีประจุจริง  $+q$  และประจุเงา  $-q$

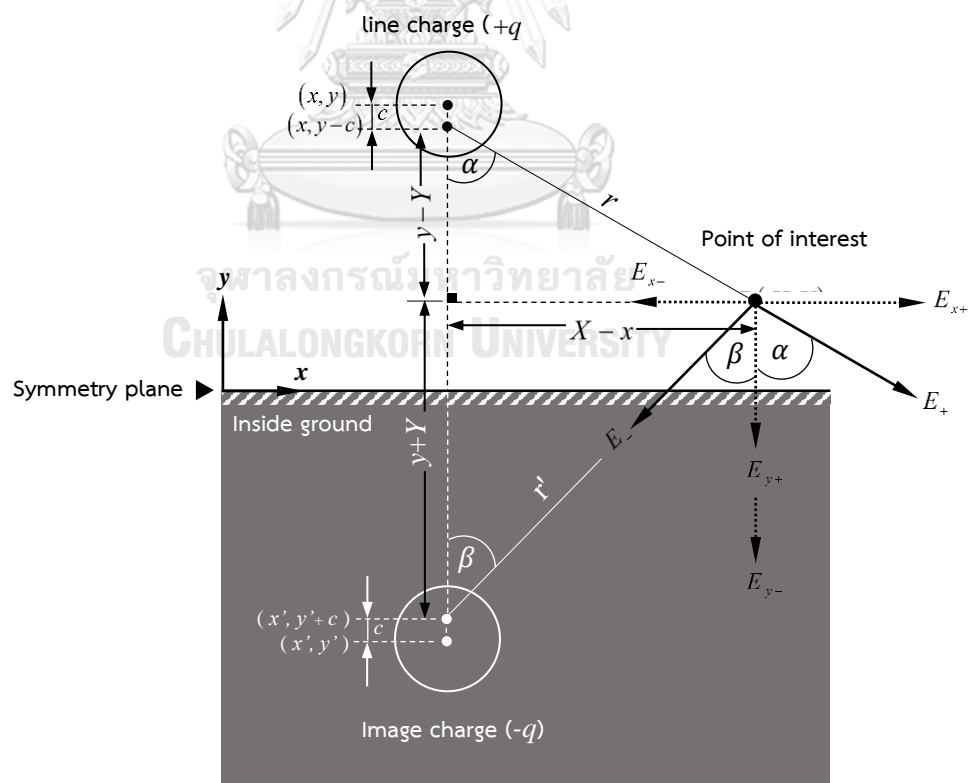
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด  $P$  เป็นผลรวมศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุเชิงเส้นทั้งสองที่เกิดจากประจุทั้งสอง

$$U = -\frac{q_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{R_0} \quad (2.20)$$

$$U_0 = U_0^+ + U_0^- = -\frac{q_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{d/2} + \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'}{d/2} = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'}{r} \quad (2.21)$$

$$q_l = \frac{2\pi\epsilon_0 U_0}{\ln \frac{r'}{r}} \quad (2.22)$$

รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าเมื่อมีประจุ  $+q$  ,  $-q$  อยู่ที่พิกัด  $(x, y-c)$  และ  $(x', y'+c)$ . ตำแหน่งของจุดที่พิจารณาค่าสนามไฟฟ้า  $P$  อยู่ที่พิกัด  $(X, Y)$ . เราสามารถหาระยะทางที่ประจุ  $+q$  กระทำต่อจุด  $P$  เป็น  $r$  โดยทำมุม  $\alpha$  กับแนวแกน  $y$ . และระยะทางที่ประจุ  $-q$  กระทำต่อจุด  $P$  เป็น  $r'$  โดยทำมุม  $\beta$  กับแนวแกน  $y$ . จากนั้นเราได้ค่าสนามไฟฟ้าจากประจุจริง และประจุเงาคือ  $E_+$  และ  $E_-$  ตามลำดับ. โดยที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  และ  $y$  คือ  $E_{x+}$ ,  $E_{y+}$ ,  $E_{x-}$ ,  $E_{y-}$ .



รูปที่ 2.7 ทิศทางของสนามไฟฟ้าเมื่อมีประจุจริง  $+q$  และประจุเงา  $-q$

จากกฎของเกาส์ สนามไฟฟ้า  $E$  ที่เกิดจากประจุเชิงเส้น  $q_l$  คือ

$$E = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.23)$$

ระยะทาง  $r$  จากประจุ  $+q$  ถึงจุด  $P$  และระยะทาง  $r'$  จากประจุ  $-q$  ถึงจุด  $P$  คือ

$$r = \sqrt{(X-x)^2 + (y-Y)^2} \quad (2.24)$$

$$r' = \sqrt{(X-x)^2 + (y+Y)^2} \quad (2.25)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่ประจุ  $+q$  กระทำต่อจุด  $P$  ได้เป็น

$$E_{x+} = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0 r} \sin \alpha = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0 r} \frac{(X-x)}{r} \quad (2.26)$$

$$E_{y+} = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0 r} \cos \alpha = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0 r} \frac{(y-Y)}{r} \quad (2.27)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่ประจุ  $-q$  กระทำต่อจุด  $P$  ได้เป็น

$$E_{x-} = \frac{-q_l}{2\pi\epsilon_0 r'} \sin \beta = \frac{-q_l}{2\pi\epsilon_0 r'} \frac{(X-x)}{r'} \quad (2.28)$$

$$E_{y-} = \frac{-q_l}{2\pi\epsilon_0 r'} \cos \beta = \frac{-q_l}{2\pi\epsilon_0 r'} \frac{(y+Y)}{r'} \quad (2.29)$$

องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เมื่อคิดประจุจริงและประจุเงาเป็น

$$E_{xt} = E_{x+} + E_{x-} \quad (2.30)$$

$$E_{yt} = E_{y+} + E_{y-} \quad (2.31)$$

เมื่อเราจัดรูปสมการที่ (2.30) และ (2.31) ได้เป็น

$$E_{xt} = \frac{q_l(X-x)}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{r'^2} \right) \quad (2.32)$$

$$E_{yt} = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{(y-Y)}{r^2} - \frac{(y+Y)}{r'^2} \right) \quad (2.33)$$

เราสามารถแทนสมการที่ (2.36) ในสมการที่ (2.32) ได้เป็น

$$E_{xt} = \frac{U_0(X-x)}{\ln\left(\frac{D-c}{r}\right)} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{r'^2} \right) \quad (2.34)$$

$$E_{yt} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{D-c}{r}\right)} \left( \frac{(y-Y)}{r^2} - \frac{(y+Y)}{r^{12}} \right) \quad (2.35)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวม  $E_t$  เป็น

$$E_t = \sqrt{E_{xt}^2 + E_{yt}^2} \quad (2.36)$$





### บทที่ 3

#### แบบจำลอง

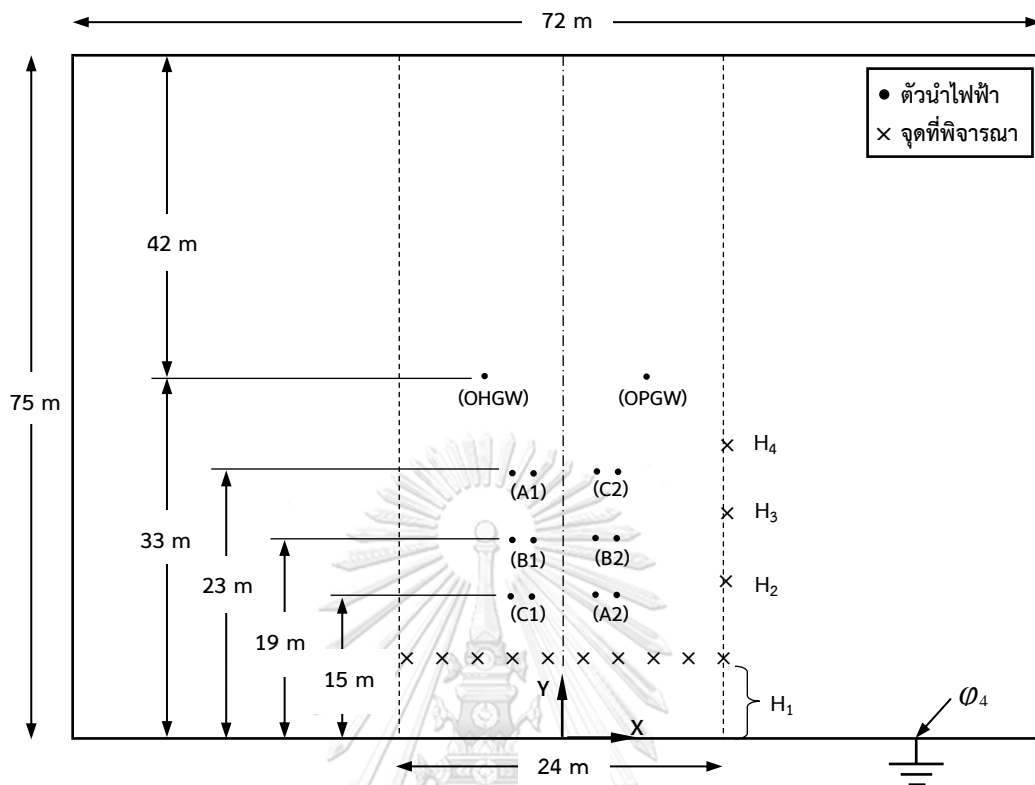
ในงานบทนี้ ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า และบริเวณแขนเสาส่งฉนวนชนิดพอลิเมอร์ในระบบ 230 kV โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์. ในการจำลองแบบ 2 มิติ ผู้วิจัยใช้แบบจำลองตัวนำไฟฟ้า 3 เฟสวงจรรูปร่างแบบคิระยะหย่อนของสายไฟ และไม่คิระยะหย่อนของสายไฟ เพื่อทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า และเพื่อหาค่าเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติ. สำหรับแบบจำลอง 3 มิติ มีสองแบบ คือ แบบแรกเป็นการใช้แบบจำลองตัวนำเพื่อเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้ากับแบบจำลอง 2 มิติ. แบบที่สองเป็นการออกแบบแขนเสาส่งฉนวน 3 มิติในรูปร่างง่ายเพื่อลดเวลาในการคำนวณ และเพื่อความแม่นยำในการคำนวณโดยเฉพาะบริเวณอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.

#### 3.1 แบบจำลอง 2 มิติ

##### 3.1.1 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การจำลองเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าใช้แบบจำลอง 2 มิติที่คิดรวมระยะหย่อนของสายส่งแสดงในรูปที่ 3.1. แบบจำลองประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้า 3 เฟสวงจรรูปร่างที่ ได้แก่ A1-B1-C1 และเฟสไขว้สลับได้แก่ A2-B2-C2. ตัวนำเฟสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.391 cm. ตัวนำลงดินแบบใยแก้วนำแสง (Optical ground wire, OPGW) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.35 cm. ตัวนำลงดิน (Overhead ground wire, OHGW) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินเท่ากับ 0.9144 cm.

ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตของโดเมนในแนวแกน X เป็น 3 เท่าของระยะขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า (กฟผ. กำหนดไว้ข้างละ 12 m. จากกึ่งกลางเสา). ขอบเขตในแนวแกน Y ถูกกำหนดขอบเขต 2 เท่าของระยะความสูงของสายดิน. จากนั้นผู้วิจัยพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ ได้แก่  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  และ  $H_4$  แสดงในตารางที่ 3.1 ( กฟผ. พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง  $H_1$  เป็นหลัก ). ผู้วิจัยเลือกระดับความสูง  $H_2$ ,  $H_3$  และ  $H_4$  ในการพิจารณาด้วยเนื่องจากสามารถอ้างอิงกับค่าสนามไฟฟ้าของทาง กฟผ. ค่าขีดจำกัดของสนามไฟฟ้าที่ กฟผ. กำหนดไว้ที่ความสูง 1 m คือ  $2 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ . นอกจากนี้ เราจำเป็นต้องเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้ากับค่ามาตรฐานสากลอย่างสถาบัน International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection หรือ ICNIRP อีกด้วย. สถาบัน ICNIRP กำหนดมาตรฐานสนามไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำไว้ที่  $5 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  [13].



รูปที่ 3.1 แบบจำลอง 2 มิติของระบบ 3 เฟสกรณีคิดรวมระยะหย่อนที่ตำแหน่งระหว่างเสาของสาย

ตารางที่ 3.1 ระดับความสูงจากพื้นดินที่ใช้พิจารณาค่าสนามไฟฟ้า

ความสูง	ระยะจากพื้นดิน (m)
H <sub>1</sub>	1.00
H <sub>2</sub>	16.57
H <sub>3</sub>	20.57
H <sub>4</sub>	24.57

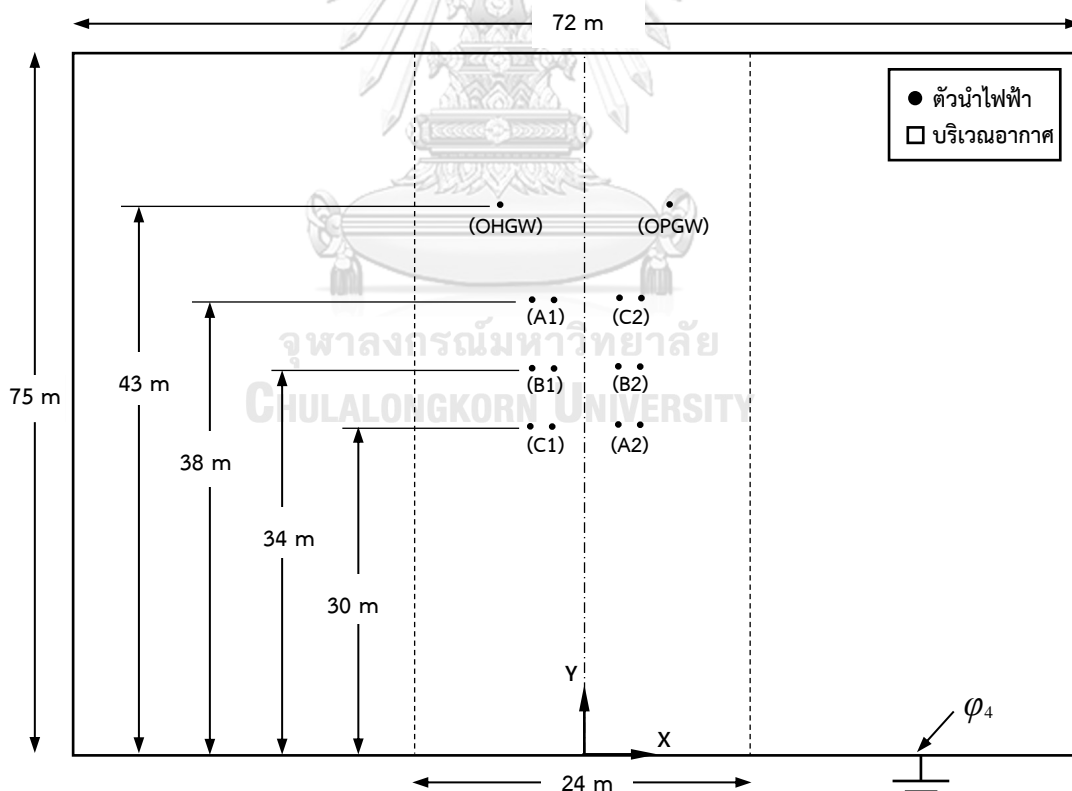
การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าใช้หลักการวงจรซ้อนทับ. ผู้วิจัยคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอิสระแต่ละแหล่งจ่ายแยกกัน ตัวอย่างเช่น วงจรที่ 1 ผู้วิจัยกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่เฟส A1 และ A2 เท่ากับ 1 kV ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เฟส B1 B2 C1 และ C2 กำหนดให้เป็น 0 kV. กรณีวงจรของเฟสอื่น ๆ มีหลักการคิดเช่นเดียวกัน. ดังนั้นผลรวมของศักย์ไฟฟ้าได้จากแหล่งจ่ายอิสระแต่ละตัวมารวมกัน. ผู้วิจัยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 3 แบบ และนำค่าศักย์ไฟฟ้าของแต่ละแบบมารวมกันเพื่อไปคำนวณค่าสนามไฟฟ้ากระแสสลับในขั้นตอนถัดไป. ชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3.2.

ตารางที่ 3.2 ชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 2 มิติ

บริเวณ	วัสดุ	สภาพยอมไฟฟ้า สัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )	สภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma, S/m$ )
ตัวนำไฟฟ้า	อลูมิเนียม	-	$3.77 \times 10^7$
พื้นหลัง	อากาศ	1.0	0

### 3.1.2 แบบจำลองสำหรับใช้กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ 3 มิติ

การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 เฟสนั้นใช้ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากแบบจำลองตัวนำไฟฟ้า 2 มิติเป็นค่าเงื่อนไขขอบเขต. เนื่องจากในจำลอง 3 มิติ ผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าแบบคิดแยกเฟสกัน. ผู้วิจัยจึงนำผลการคำนวณจากแบบจำลอง 2 มิติในรูปที่ 3.2 มาประยุกต์ใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต. รูปแบบ และขอบเขตโดเมนของแบบจำลองนี้เป็นระบบตัวนำ 3 เฟสแบบวงจรรูปร่างเช่นเดียวกับแบบจำลองรูปที่ 3.1 (ในหัวข้อที่ 3.1.1) แต่คิดที่ความสูงที่ติดตั้งฉนวน (ไม่คิดระยะหย่อนสาย). ชนิดของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองใช้ข้อมูลเดียวกับกับตารางที่ 3.2 (ในหัวข้อที่ 3.1.1)



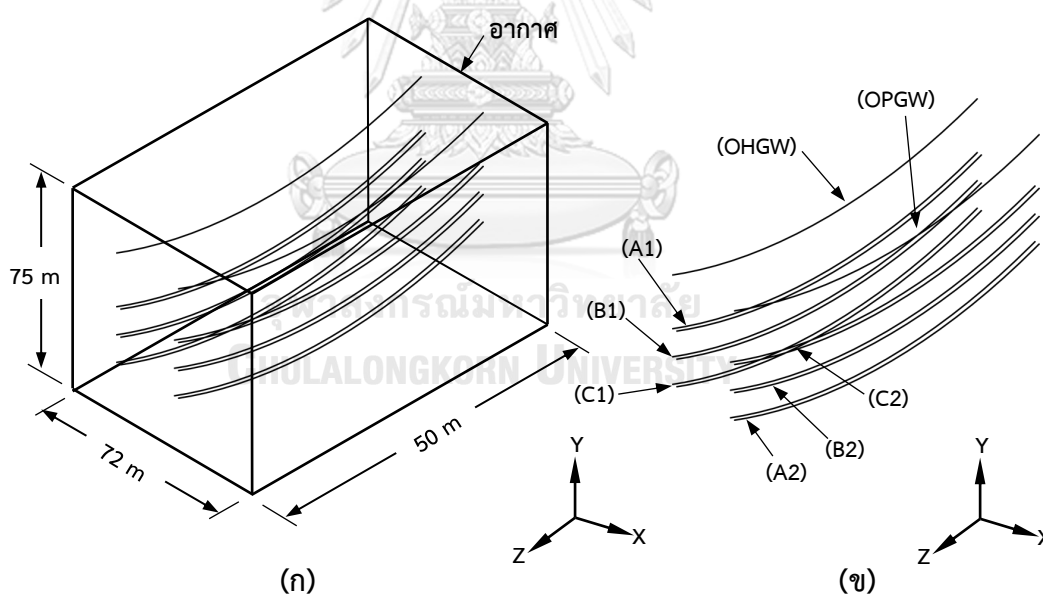
รูปที่ 3.2 แบบจำลอง 2 มิติของระบบ 3 เฟสเพื่อใช้คำนวณเงื่อนไขขอบเขต

### 3.2 แบบจำลอง 3 มิติ

#### 3.2.1 แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การจำลองแบบ 3 มิติจำกัดบริเวณที่เราสนใจคำนวณค่าสนามไฟฟ้า ณ บริเวณที่กึ่งกลางสายส่งที่มีความยาวทั้งหมด 400 เมตร. ขนาดของตัวนำเฟส และสายดินซึ่งอากาศมีค่าเช่นเดียวกับแบบจำลอง 2 มิติในหัวข้อ 3.1.1 และ 3.1.2. ทั้งนี้การจำลองตามความยาวสายทั้งหมดใช้เวลานานและทำให้สูญเสียความละเอียดในการประมาณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณที่เราสนใจไป เนื่องจากโปรแกรมใช้เอลิเมนต์จำนวนมากไปกับการประมาณส่วนอื่นที่ไม่จำเป็นไปด้วย. ผู้วิจัยเลือกจำกัดบริเวณความยาวตามแนวสายส่งให้เหลือข้างละ 50 m จากระยะกึ่งกลางเสาซึ่งเพียงพอต่อการคำนวณหาค่าในกรณีที่สายส่งมีความโค้งจากระยะหย่อน (Sag) แสดงในรูปที่ 3.3.

ความโค้ง (Curvature) ของสายตัวนำ 3 มิติถูกอ้างอิงจากสูตรสมการเส้น. ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้เอลิเมนต์เชิงปริมาตรแบบทรงสี่หน้าอันดับหนึ่งในบริเวณที่เป็นปริมาตรของอากาศ และตัวนำไฟฟ้า. ชนิดของวัสดุที่ใช้จำลองใช้จากตารางที่ 3.2 (ในหัวข้อที่ 3.1.1).



รูปที่ 3.3 แบบจำลอง 3 มิติ

(ก) ตัวนำไฟฟ้า และโดเมนอากาศ

(ข) ตัวนำเฟส และสายดิน

### 3.2.2 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง

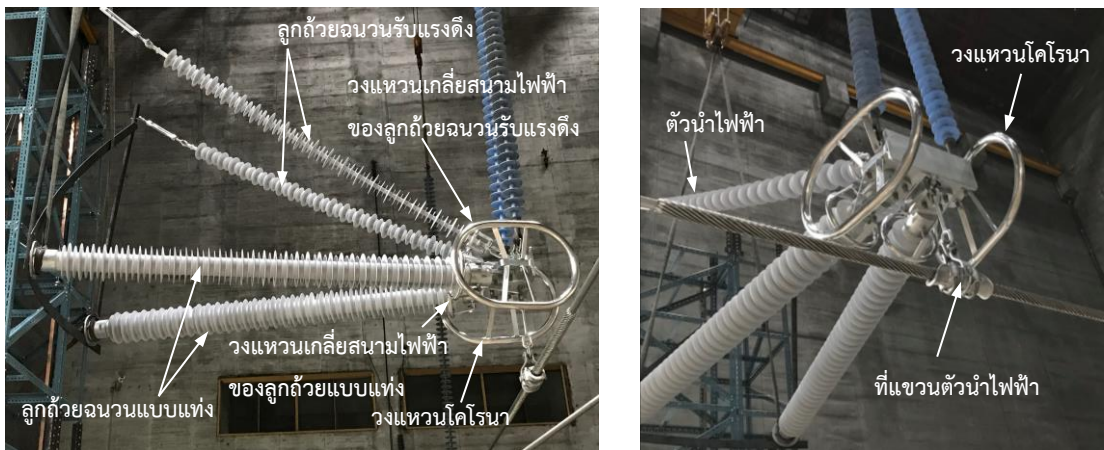
การจำลองส่วนนี้เป็นคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณตัวนำฝั่งแรงสูง ได้แก่ วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดรับแรงดึง, วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดแทง, และวงแหวนโคโรนา ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จได้สูง. ค่าสนามไฟฟ้าที่ตัวนำแรงสูงควรต่ำกว่า  $21.0 \text{ kVp/cm}$  [ 9 ] ในสภาวะอากาศแห้ง.

ในขั้นตอนแรกผู้วิจัยสร้างแบบจำลอง 3 มิติในโปรแกรม ANSYS discovery spaceclaim® และบันทึกไฟล์ในสกุลไฟล์ Parasolid format (\*.x\_t, \*.x\_b). เรขาคณิต 3 มิตินี้ถูกออกแบบในรูปแบบอย่างง่ายโดยอ้างอิงขนาดให้ใกล้เคียงกับแขนเสาส่งฉนวนที่ใช้จริงมากที่สุดดังรูปที่ 3.4. จากรูปผู้วิจัยออกแบบความยาวของฉนวนชนิดรับแรงดึง และชนิดแทงมีความยาวเท่ากับ 2.593 m และ 2.661 m ตามลำดับ. ความยาวของตัวนำเฟสถูกกำหนดให้มีความยาว 10 m. จากนั้น ผู้วิจัยนำไฟล์ดังกล่าวเข้าสู่ตัวโปรแกรม ANSYS Electronic Desktop (Maxwell)® โดยใช้โมดูลสนามไฟฟ้าสถิตในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า.

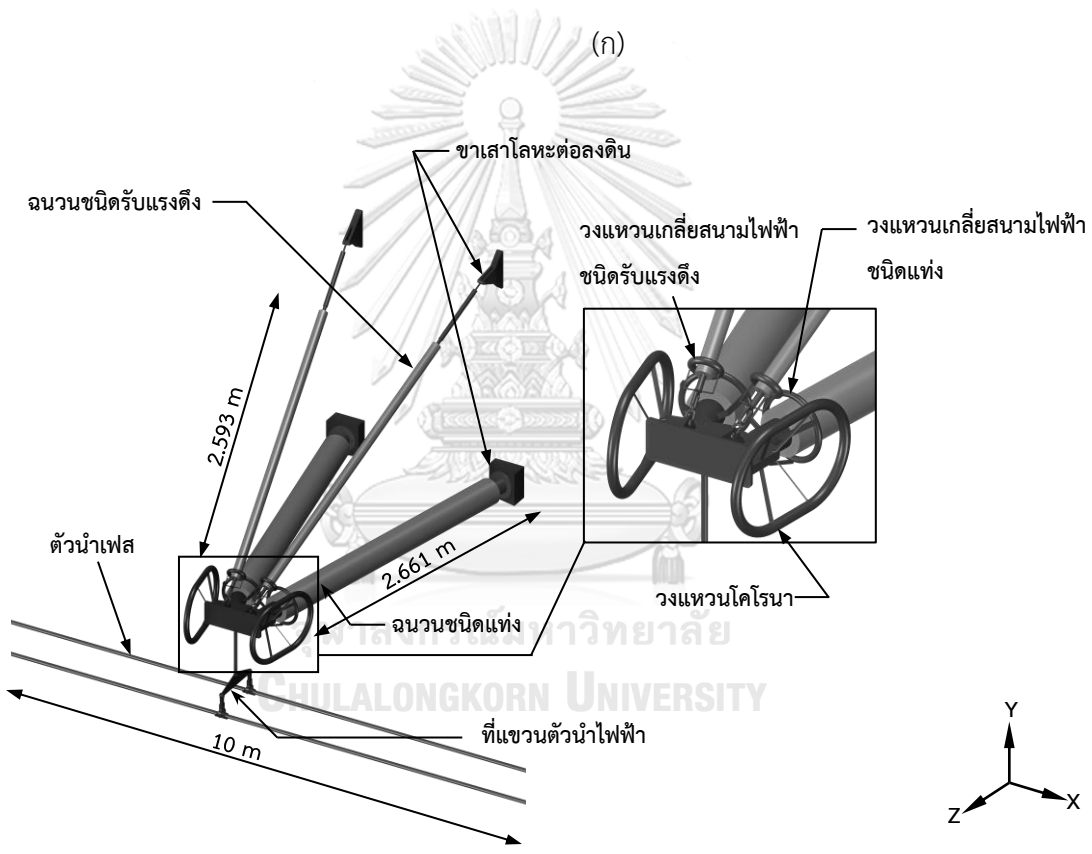
ผู้วิจัยจำกัดขอบเขตการพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าให้อยู่ในปริมาตรสี่เหลี่ยมที่เป็นโดเมนอากาศ ปริมาตร  $6 \times 6 \times 10 \text{ m}^3$  แสดงดังรูปที่ 3.5. ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

บริเวณ	วัสดุ	สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )	สภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma, S/m$ )
ตัวนำไฟฟ้า	อลูมิเนียม	-	$3.77 \times 10^7$
โดเมนอากาศ	อากาศ	1.0	0
ครีบนวน	ซิลิโคน	3.9	$1.00 \times 10^{-12}$
แกนกลางของฉนวน	พลาสติกเสริมเส้นใย	4.2	$1.00 \times 10^{-12}$
อุปกรณ์โลหะ	เหล็ก	-	$1.01 \times 10^7$



(ก)

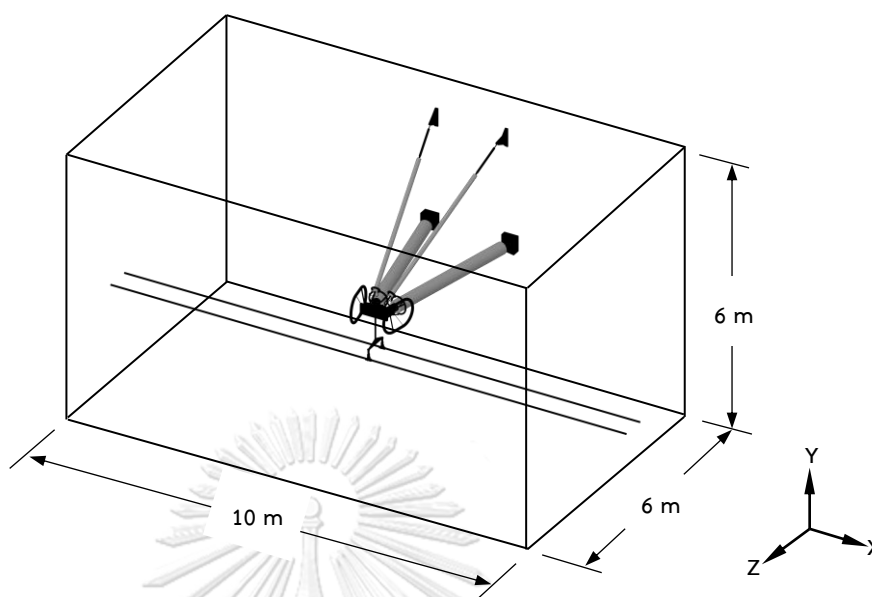


(ข)

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของแขนเสาส่งฉนวนที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV

(ก) แขนเสาส่งฉนวนที่ใช้ทดสอบจริง

(ข) แขนเสาส่งฉนวนที่ใช้จำลอง

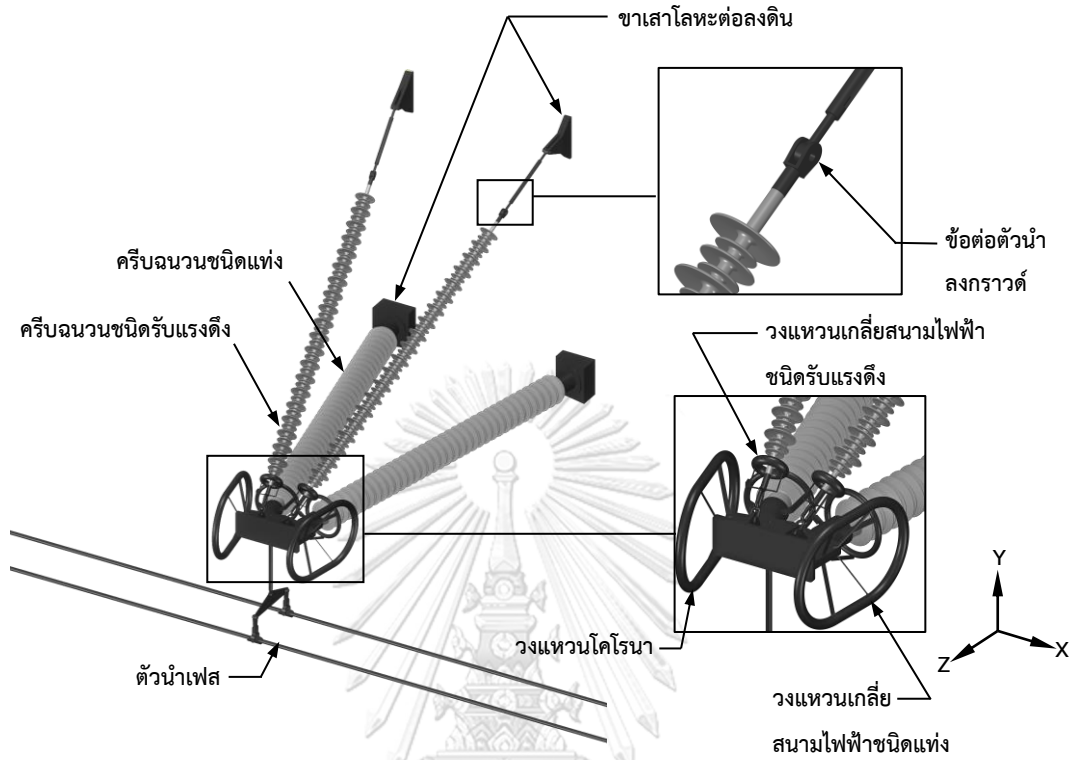


รูปที่ 3.5 ขนาดขอบเขตของโดเมนอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

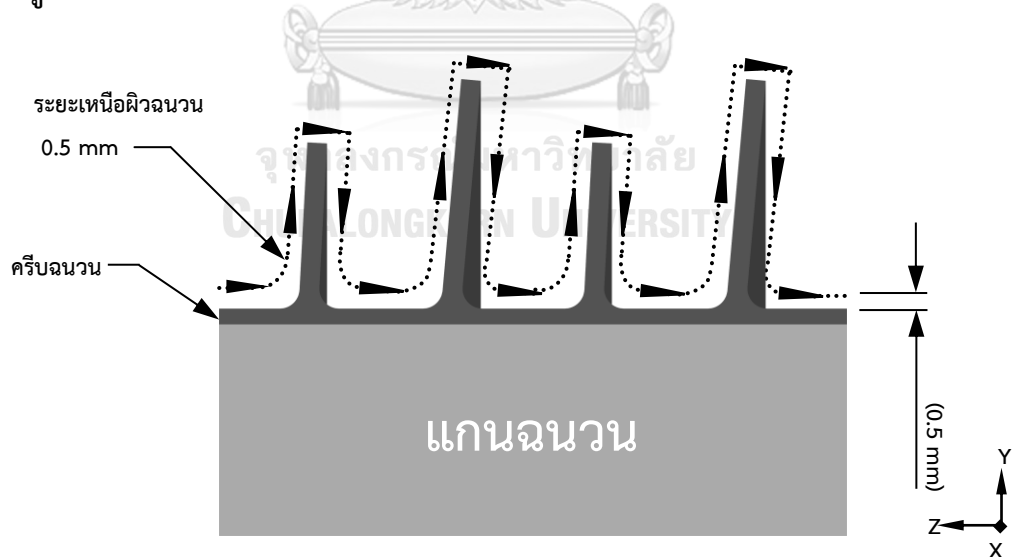
### 3.2.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

นอกจากการพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวโลหะฝั่งแรงสูงแล้ว บริเวณที่ผิวฉนวนใกล้กับตัวนำแรงสูงเป็นบริเวณที่ต้องพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าควบคู่ไปด้วย. ผู้วิจัยออกแบบเรขาคณิต 3 มิติอ้างอิงจากระยะและขนาดต่าง ๆ จากขนาดของแขนเสาส่งขนาดจริงเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.2.2. ผู้วิจัยกำหนดรายละเอียดของครีบนวนและข้อต่อโลหะอื่น ๆ ให้มีความสมบูรณ์เพื่อความแม่นยำในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนแสดงดังรูปที่ 3.6. มิติของโดเมน และชนิดของวัสดุที่ใช้ในการจำลองกำหนดเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.2.

ตำแหน่งที่พิจารณาสถาสนามไฟฟ้าอยู่ในอากาศเหนือผิวฉนวนขึ้นมา 0.5 mm. ตามระยะรั้วผิวฉนวนแสดงดังรูปที่ 3.7. สถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้า (Electric power research institute หรือ EPRI) ระบุว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนชนิดพอลิเมอร์ควรมีค่าไม่เกิน 6.4 kV/cm [14].



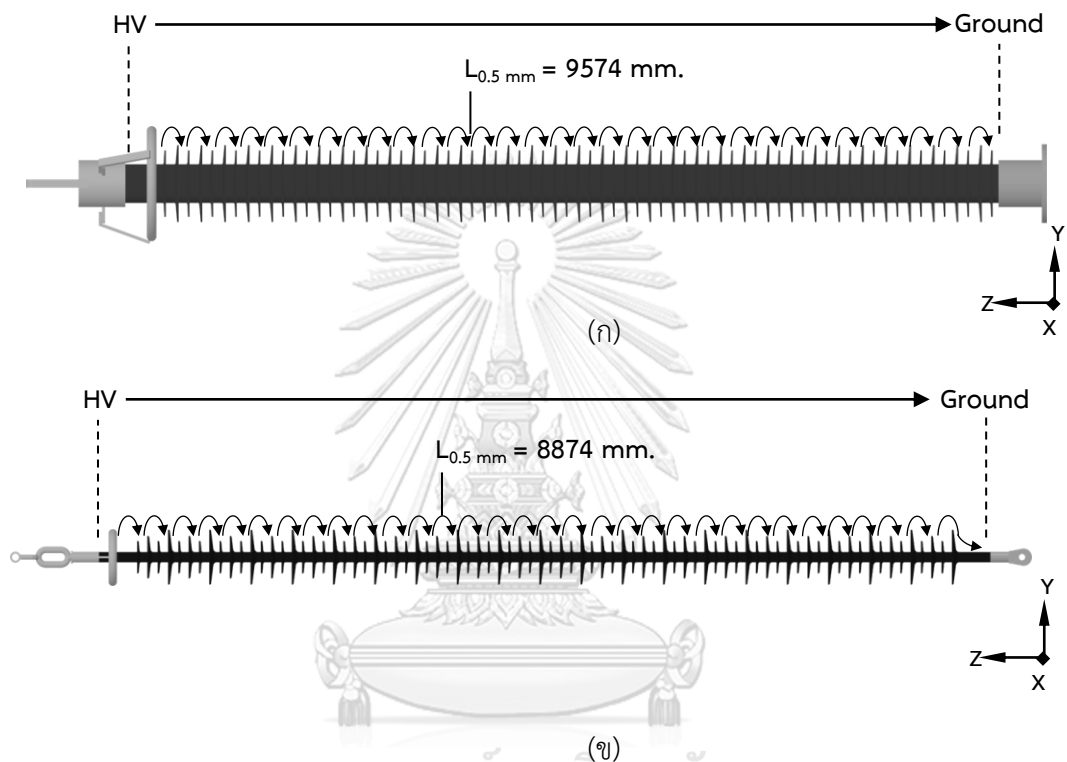
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของแขนเสาส่งฉนวนที่ใช้ในระบบสายส่ง 230 kV แบบมีครีบนวน



รูปที่ 3.7 เส้นวัดค่าสนามไฟฟ้าในอากาศที่อยู่เหนือระยะรั้วตามผิวฉนวนขึ้นมา 0.5 mm



ฉนวนที่นำมาพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วที่ผิวมีสองชนิดคือ ฉนวนชนิดแท่ง และ ฉนวนชนิดรับแรงดึงแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) และ 3.8 (ข) ตามลำดับ. การวัดค่าสนามไฟฟ้าวัดจากปลาย ของฉนวนด้านที่สัมผัสกับข้อต่อโลหะฝั่งแรงสูงไปจนถึงปลายด้านที่สัมผัสกับข้อต่อโลหะลงกราวด์. ระยะรั้วตามผิวฉนวนทั้งสองชนิดมีความยาวเท่ากับ 9574 mm. และ 8874 mm.



รูปที่ 3.8 ระยะรั้วเหนือผิวฉนวน 0.5 mm เพื่อใช้วัดค่าสนามไฟฟ้าของ

(ก) ลูกถ้วยชนิดรับแรงดึง

(ข) ลูกถ้วยชนิดแท่ง

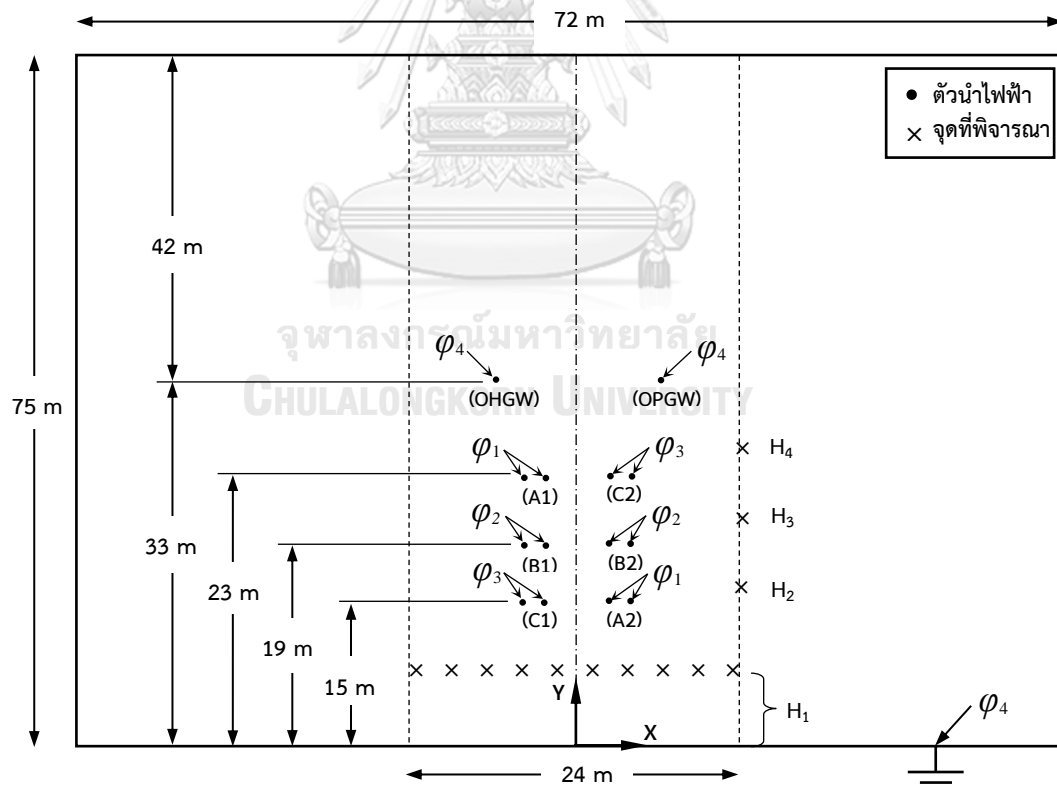
## บทที่ 4

### ขั้นตอนการจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.1 ขั้นตอนการจำลองแบบ 2 มิติ

##### 4.1.1 ขั้นตอนการจำลองการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

รูปที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกกำหนดในแบบจำลอง 2 มิติแบบคิดระยะห้อยสายไฟ. การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบเขตระบบโครงข่ายไฟฟ้าใช้หลักการวงจรร้อนทับ. ผู้วิจัยคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอิสระแต่ละแหล่งจ่ายแยกกัน. ตัวอย่างเช่น รูปแบบที่ 1 ผู้วิจัยกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่เฟส A1 และ A2 เท่ากับ 1 kV ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เฟส B1 B2 C1 และ C2 กำหนดให้เป็น 0 kV. รายละเอียดการคำนวณเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ก. ดังนั้นผลรวมของศักย์ไฟฟ้าได้จากแหล่งจ่ายอิสระแต่ละตัวมารวมกันเพื่อไปคำนวณค่าสนามไฟฟ้ากระแสสลับในขั้นตอนถัดไป. เงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าของแต่ละวงจรแสดงดังตารางที่ 4.1.



รูปที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 2 มิติระบบ 3 เฟส

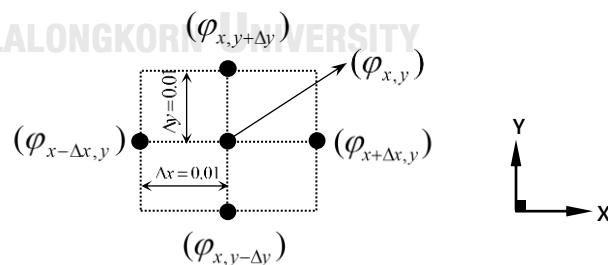
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าคิดแบบแยกแหล่งจ่ายเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี

บริเวณ	ศักย์ไฟฟ้า [kV]	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
ตัวนำเฟส A1,A2	$\varphi_1$	1	0	0
ตัวนำเฟส B1,B2	$\varphi_2$	0	1	0
ตัวนำเฟส C1,C2	$\varphi_3$	0	0	1
สายดิน และพื้นดิน	$\varphi_4$	0		

ค่าสนามไฟฟ้ากระแสสลับคำนวณได้จากผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดเพื่อคำนวณองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแต่ละแนวแกน. รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งกริดที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้า. ผู้วิจัยหาผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{x-\Delta x,y}$  ที่ขอบซ้าย และ  $\varphi_{x+\Delta x,y}$  ที่ขอบขวา ที่อยู่ในแนวแกน X และผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{x,y+\Delta y}$  ที่ขอบบน และ  $\varphi_{x,y-\Delta y}$  ที่ขอบล่าง ที่อยู่ในแนวแกน Y. ผลต่างระหว่างศักย์สองจุดส่วนระยะทางระหว่างจุดเป็นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแต่ละแนวแกน. รายละเอียดในการนำค่าศักย์ไฟฟ้าออกมาจากโปรแกรมเพื่อใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้าแสดงในภาคผนวก ข.

ผู้วิจัยกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำเฟสเท่ากับ 1 kV ในการจำลอง และนำค่าศักย์ไฟฟ้างกล่าวที่ได้จากจุดกริดมาปรับเป็นค่าแรงดันจริงคือ  $U_0 = 230 / \sqrt{3} = 132.79 kV_{rms}$ . การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในระบบกระแสสลับนั้นต้องพิจารณาตามมุมทางไฟฟ้า  $\omega t$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตั้งแต่  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  จนถึง  $180^\circ$  เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้า  $E$ , ที่เกิดขึ้นสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา. สมการที่ถูกใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาเปลี่ยนไปดังแสดงดังนี้.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.2 จุดบนกริดที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดระหว่างแนวแกน X และ Y

ค่าศักย์ไฟฟ้าขอบขวาและขอบซ้าย  $\varphi_{\alpha \pm \Delta\alpha, \beta}$  ค่าศักย์ไฟฟ้าขอบบนและขอบล่าง  $\varphi_{\alpha, \beta \pm \Delta\beta}$  หาได้จากผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละเฟสเป็น

$$\varphi_{\alpha \pm \Delta\alpha, \beta} = U_0 \left[ \sum_{n=0,2,4} \varphi_{\alpha \pm \Delta\alpha, \beta}^{\gamma} \cos \left( \omega t - \frac{n\pi}{3} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$\varphi_{\alpha, \beta \pm \Delta\beta} = U_0 \left[ \sum_{n=0,2,4} \varphi_{\alpha, \beta \pm \Delta\beta}^{\gamma} \cos \left( \omega t - \frac{n\pi}{3} \right) \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $U_0$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ 230 kV

$\gamma$  แทนเฟส A, B และ C

$\alpha, \beta$  คือพิกัด X และ Y ตามลำดับ

เราหาค่าประกอบของสนามไฟฟ้า  $E_x$  และ  $E_y$  ได้เป็น

$$E_x = \frac{\varphi_{x-\Delta x, y} - \varphi_{x+\Delta x, y}}{2\Delta x} \quad (4.3)$$

$$E_y = \frac{\varphi_{x, y-\Delta y} - \varphi_{x, y+\Delta y}}{2\Delta y} \quad (4.4)$$

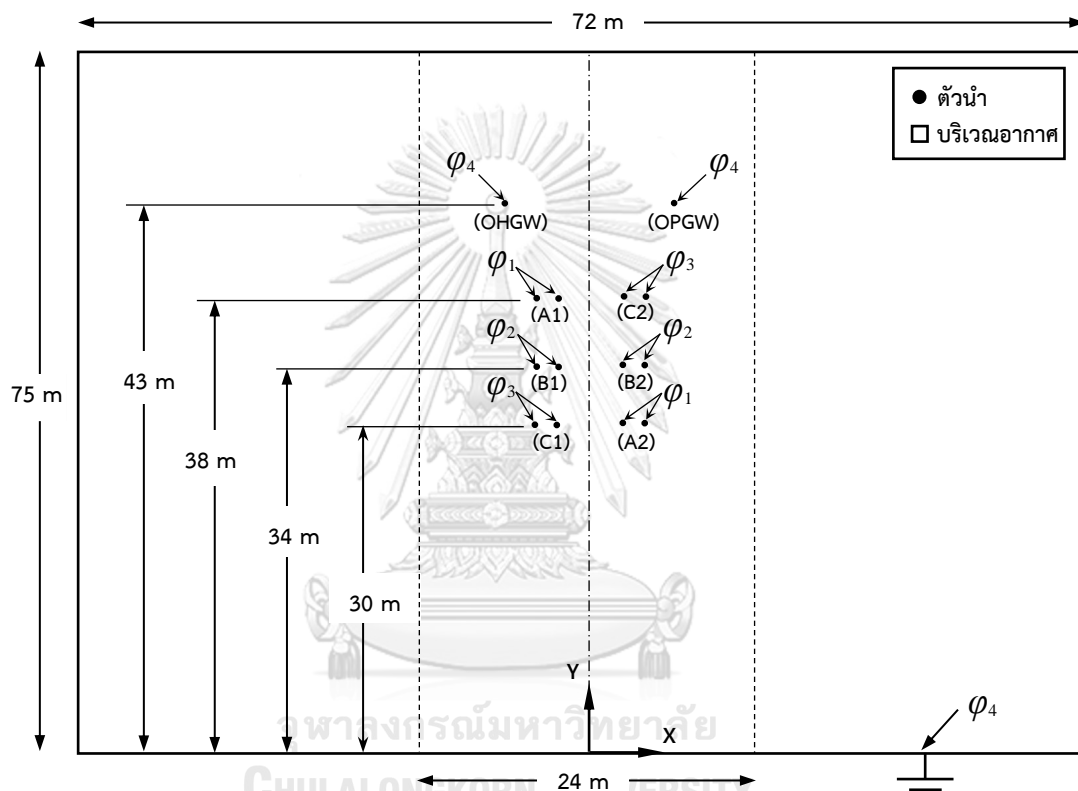
เราคำนวณสนามไฟฟ้ารวม  $E_t$  จาก

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (4.5)$$

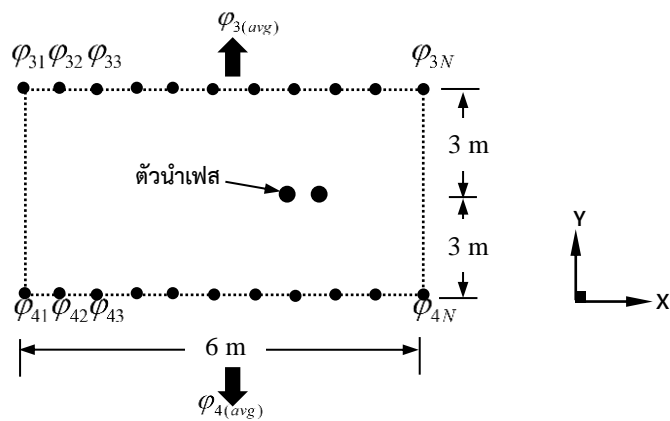
ในแบบจำลองนี้ ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับหนึ่งในการประมาณทุกส่วนของโดเมน. เอลิเมนต์ที่ถูกใช้ทั้งหมดเท่ากับ 675,427 เอลิเมนต์ในแต่ละวงจรแสดงในรูปที่ 4.2. การคำนวณใช้คอมพิวเตอร์ที่มีจำนวนหน่วยประมวลผลกลางผลรุ่น intel i7 8750H จำนวนแกนประมวลผลเท่ากับ 6 แกน, ความเร็วซีพียูเท่ากับ 2.20 GHz, และจำนวนหน่วยความจำสำรองเท่ากับ 32 GB. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงเลขโดยประมาณเท่ากับ 4 นาที 37 วินาทีในแต่ละวงจร.

#### 4.1.2 ขั้นตอนการจำลองสำหรับใช้กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณ 3 มิติ

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยใช้แบบจำลอง 2 มิติที่ไม่ได้คิดระยะหย่อนของสายไฟแสดงในรูปที่ 4.3 และคำนวณการกระจายศักย์ไฟฟ้าออกมา. ในรูปที่ 4.4 ผู้วิจัยเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{31}$  จนถึง  $\varphi_{3N}$  บริเวณเหนือตัวนำขึ้นไป 3 m ได้เป็นค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{3(avg)}$ . และค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{41}$  จนถึง  $\varphi_{4N}$  บริเวณใต้ตัวนำลงมา 3 m ถูกเฉลี่ยเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{4(avg)}$ . จากนั้น ผู้วิจัยนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวมาใช้เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติในขั้นตอนถัดไป.



รูปที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง 2 มิติระบบ 3 เฟสเพื่อใช้คำนวณเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 4.4 การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยบริเวณเหนือตัวนำ และใต้ตัวนำ

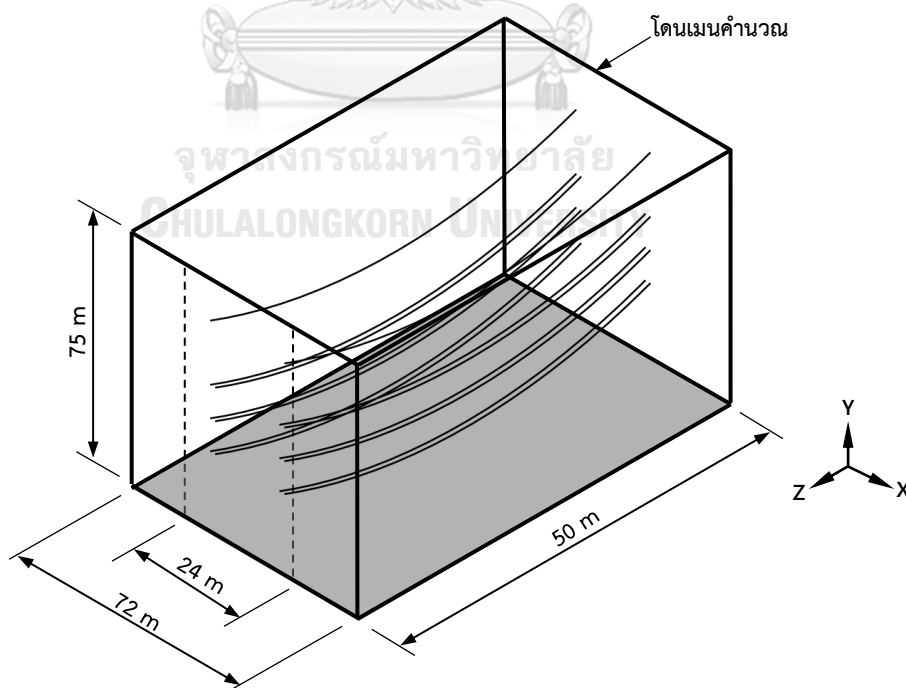
ในแบบจำลองนี้ ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับหนึ่งในการประมาณทุกส่วนของโดเมน. เอลิเมนต์ที่ถูกใช้ทั้งหมดเท่ากับ 440,050 เอลิเมนต์ในแต่ละวงจร. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงเลขโดยประมาณเท่ากับ 4 นาที 37 วินาทีในแต่ละวงจร.

## 4.2 ขั้นตอนการจำลองแบบ 3 มิติ

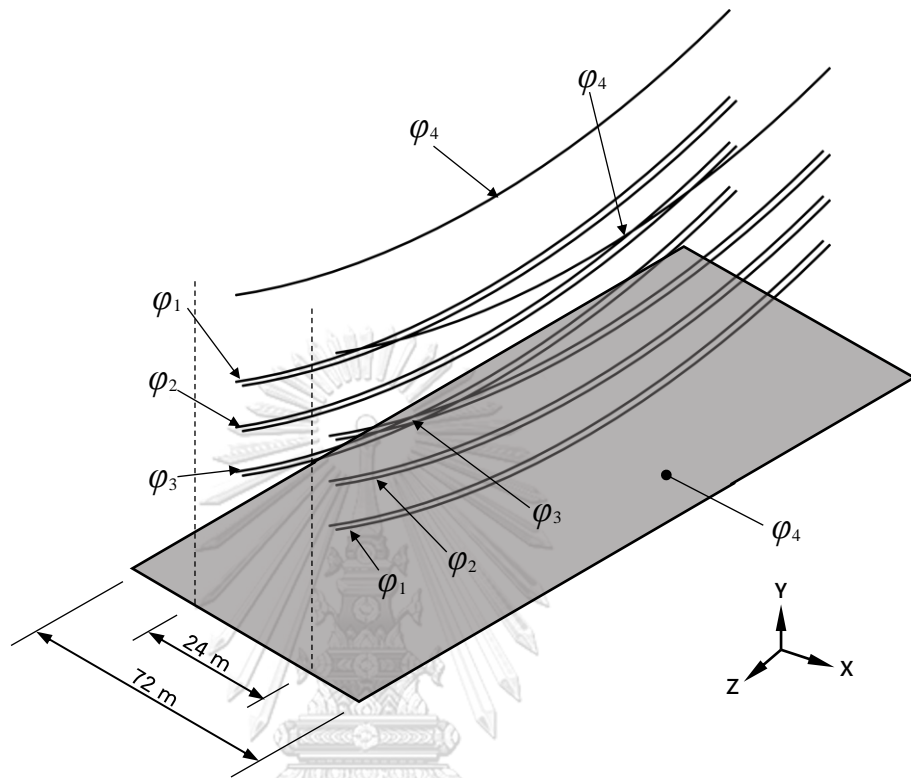
### 4.2.1 ขั้นตอนการจำลองสำหรับเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบเขตระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบ 3 มิติจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับแบบจำลอง 2 มิติในหัวข้อที่ 4.1.1. ขนาดมิติของโดเมนการคำนวณรูปแบบ 3 มิติมีขนาดเท่ากับ  $6 \times 6 \times 10 \text{ m}^3$  แสดงดังรูปที่ 4.5. ในรูปที่ 4.6 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับแบบจำลอง 2 มิติทุกประการ และคำนวณแยกแต่ละวงจรเช่นเดียวกัน. ผู้วิจัยให้โปรแกรมคำนวณเฉพาะค่าศักย์ไฟฟ้าออกเป็นกริดเพื่อทำการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าต่อไปโดยใช้สมการที่ (4.1) ถึง (4.7).

ในแบบจำลองนี้ ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่งในการประมาณทุกส่วนของโดเมน. เอลิเมนต์ที่ถูกใช้ทั้งหมดเท่ากับ 3,971,244 เอลิเมนต์. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงเลขโดยประมาณเท่ากับ 1 ชั่วโมง 55 นาทีในแต่ละวงจร.



รูปที่ 4.5 ขนาดมิติของโดเมนการคำนวณรูปแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.6 เส้นขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติ

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

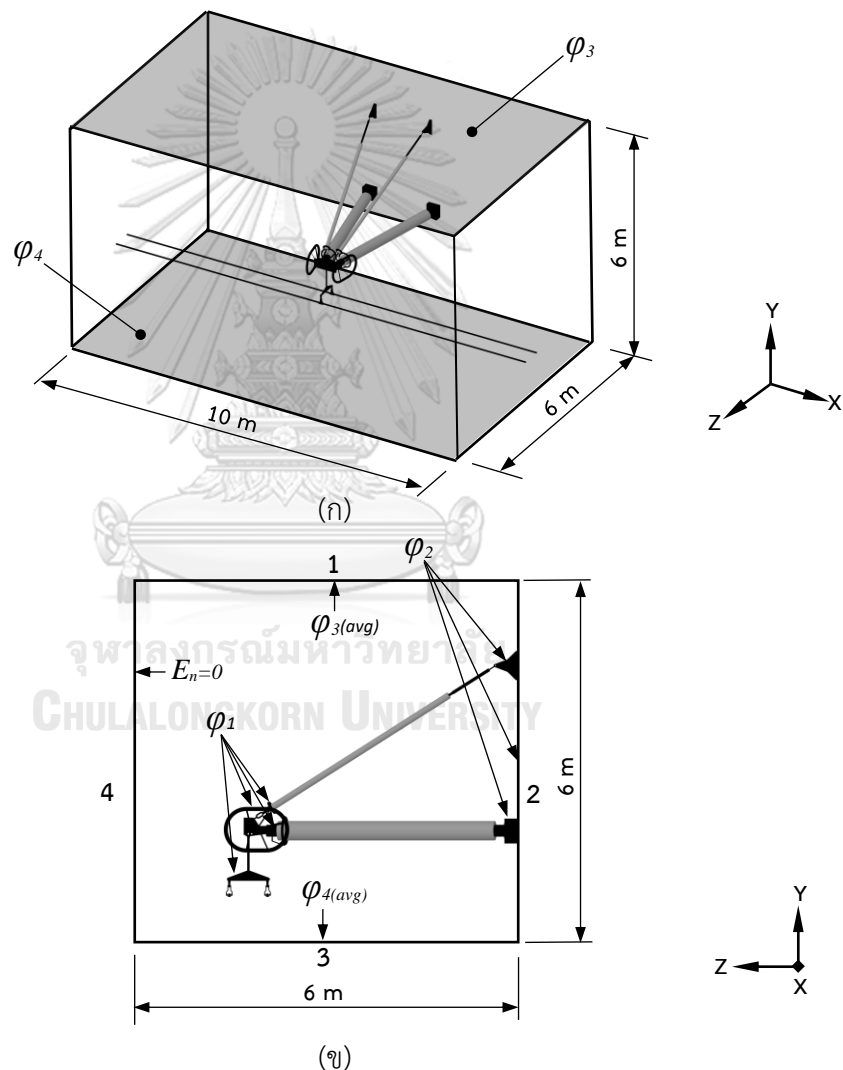
#### 4.2.2 ขั้นตอนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง

การพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าแบบ 3 เฟส นั้น ผู้วิจัยแยกการจำลองแต่ละเฟสออกจากกัน. แบบจำลองทุกแบบใช้เรขาคณิตเดียวกัน แต่แตกต่างกันตรงเงื่อนไขขอบเขต ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2. บริเวณตัวนำโลหะฝั่งแรงสูง อาทิเช่น วงแหวนโคโรนา วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า ตัวนำเฟส และที่แขวนสายตัวนำ ถูกกำหนดให้มีค่าศักย์ไฟฟ้า  $\phi_1$  เท่ากับ 187.79 kV<sub>p</sub> เป็นค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้งานในระบบ 230 kV. บริเวณตัวนำลงกราวด์ที่เป็นข้อต่อโลหะต่าง ๆ ถูกกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้า  $\phi_2$  เท่ากับ 0 kV. ค่าศักย์ไฟฟ้า  $\phi_{3(avg)}$  ถึง  $\phi_{4(avg)}$  ถูกกำหนด ณ บริเวณที่เป็นระนาบด้านบน และด้านล่างของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.7. ที่มาของค่าเงื่อนไขค่าศักย์ไฟฟ้า  $\phi_{3(avg)}$  ถึง  $\phi_{4(avg)}$  ที่มากำหนดในแบบจำลอง 3 มิติมาจากการเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าในแบบจำลอง 2 มิติในหัวข้อ 4.1.2.

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

เงื่อนไขขอบเขต	ค่าศักย์ไฟฟ้า [kV]	เฟสที่พิจารณา		
		A	B	C
ตัวนำไฟฟ้าฝั่งแรงสูง	$\varphi_1$	187.79		
กราวด์	$\varphi_2$	0		
ระนาบด้านบน	$\varphi_3(\text{avg})$	ได้จากแบบจำลอง 2 มิติ*		
ระนาบด้านล่าง	$\varphi_4(\text{avg})$			

\*หมายเหตุ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่กำหนดในแบบจำลอง 3 มิติได้มาจากการคำนวณศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแบบจำลอง 2 มิติ และคูณค่ากลับมายู่ในระบบ 230 kV



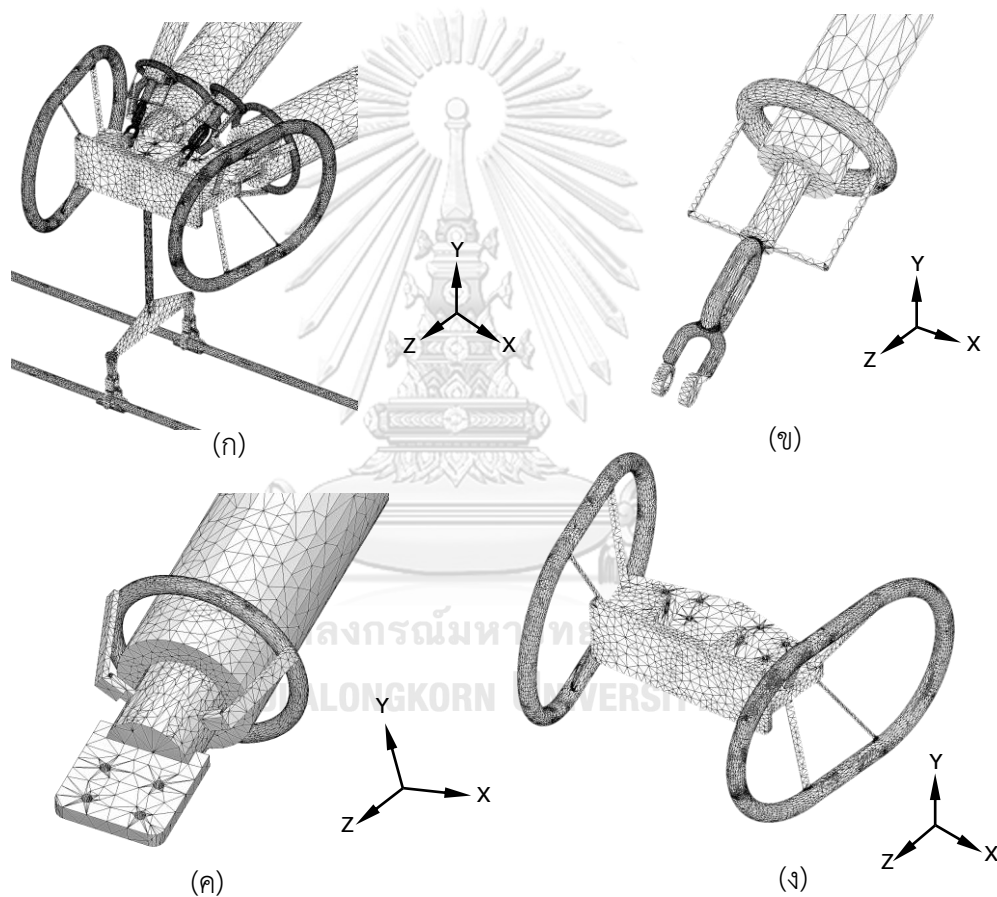
รูปที่ 4.7 เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

(ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่กำหนดบนระนาบของแต่ละเฟส

(ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าโดยรวมเมื่อมองในระนาบ YZ ของแบบจำลอง



ความละเอียดของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่ง (Tetrahedral element) ที่ใช้ในการประมาณทั้งหมดเท่ากับ 3,025,711 เอลิเมนต์. ส่วนที่เป็นโดเมนปริมาตรอากาศใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าทั้งหมดเท่ากับ 2,532,563 เอลิเมนต์. ในรูปที่ 4.8 (ก) แสดงความละเอียดของเอลิเมนต์บริเวณตัวนำแรงสูง. บริเวณที่พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าคือ บริเวณวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดรับแรงดึงใช้เอลิเมนต์จำนวน 13,629 เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.8 (ข), บริเวณวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดแท่งใช้เอลิเมนต์จำนวน 13,158 เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.8 (ค), และบริเวณวงแหวนโคโรนาใช้เอลิเมนต์จำนวน 68,711 เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.8 (ง). เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงเลขทั้งหมดเท่ากับ 1 ชั่วโมง 30 นาทีในแต่ละแบบจำลอง.

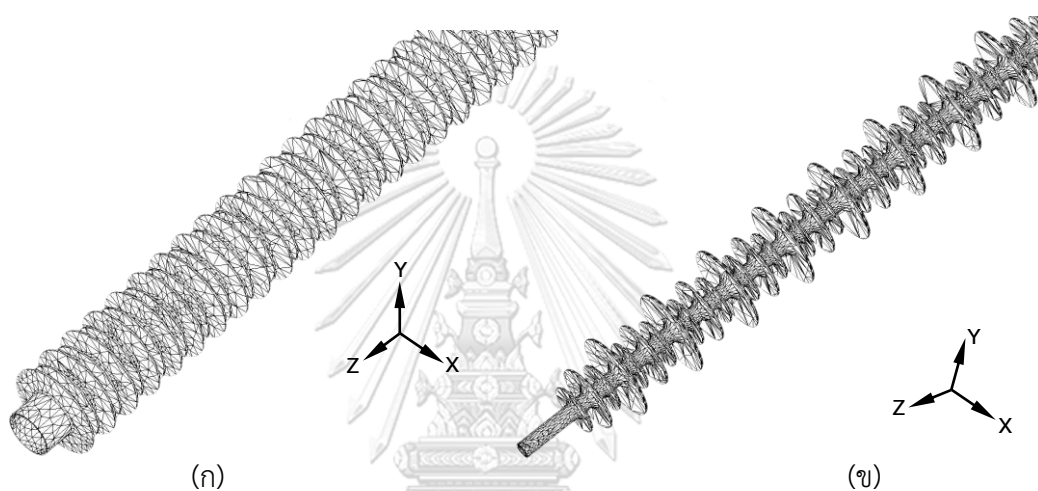


รูปที่ 4.8 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่ใช้ในการประมาณแต่ละบริเวณ

- (ก) อุปกรณ์โลหะฝั่งแรงสูง
- (ข) วงแหวนวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดรับแรงดึง
- (ค) วงแหวนวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดแท่ง
- (ง) วงแหวนโคโรนา

### 4.2.3 ขั้นตอนการจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

แบบจำลอง 3 มิติเพื่อคำนวณค่าสนามที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงใช้เงื่อนไขขอบเขต และขนาดมิติของโดเมนการคำนวณเช่นเดียวกับแบบจำลองในหัวข้อที่ 4.2.2. ความละเอียดของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่งที่ใช้ในการประมาณทั้งหมดเท่ากับ 3,710,464 เอลิเมนต์. เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าส่วนที่เป็นปริมาตรอากาศเท่ากับ 2,924,779 เอลิเมนต์. เอลิเมนต์ที่ใช้บริเวณฉนวนชนิดแท่งเท่ากับ 58,587 เอลิเมนต์ และบริเวณฉนวนชนิดรับแรงดึงเท่ากับ 74,275 เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) และ 4.9 (ข). เวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงเลขทั้งหมดประมาณ 3 ชั่วโมงในแต่ละแบบจำลอง



รูปที่ 4.9 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่ใช้ในการประมาณผิวฉนวน

(ก) ฉนวนชนิดแท่ง

(ข) ฉนวนชนิดรับแรงดึง

## บทที่ 5

### ผลการจำลองและวิจารณ์ผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ. ผลจำลอง 2 มิติประกอบด้วย (1) ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าตามแนวขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า. และ (2) ผลการคำนวณค่าเงื่อนไขขอบเขตของการแบบจำลอง 3 มิติ.

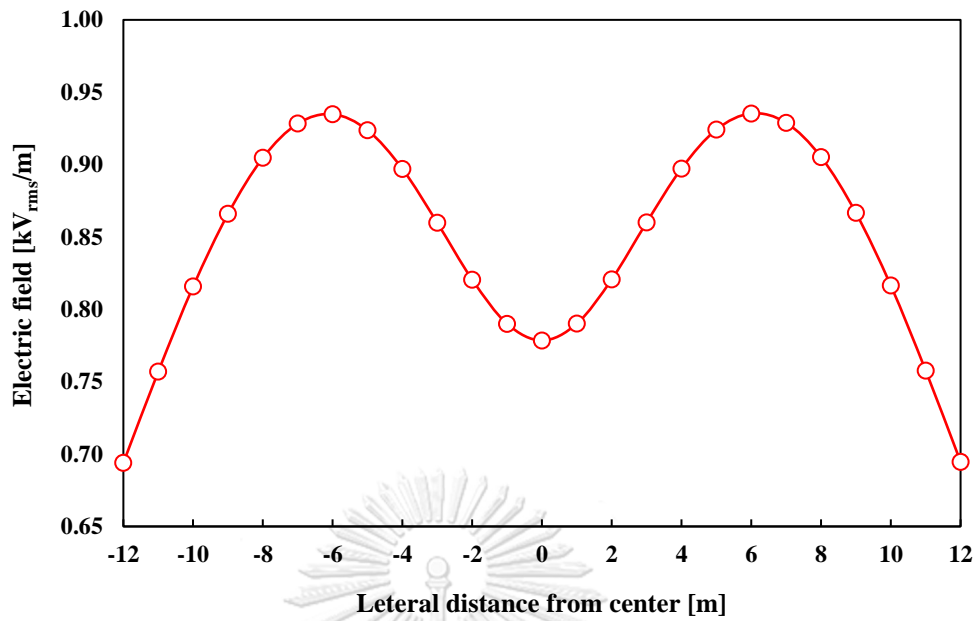
ผลจำลอง 3 มิติประกอบด้วย (1) ผลการจำลองเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าตามแนวขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้ากับแบบจำลอง 2 มิติ. (2) ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์แรงสูง อาทิเช่น วงแหวนโคโรนา, วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, และฉนวนพอลิเมอร์ เพื่อดูว่าอุปกรณ์แรงสูงสามารถทนต่อค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศได้. และ (3) ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงประกอบด้วย ฉนวนชนิดรับแรงดึง และฉนวนชนิดแทง. นอกจากนี้ ผู้วิจัยจำลองเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า ทั้งที่ผิวฉนวน และตัวนำแรงสูง ระหว่างลูกถ้วยฉนวนระบบ 115 kV (ระบบเดิม) และระบบ 230 kV (ระบบใหม่) แสดงในภาคผนวก จ.

#### 5.1 ผลการจำลองแบบ 2 มิติ

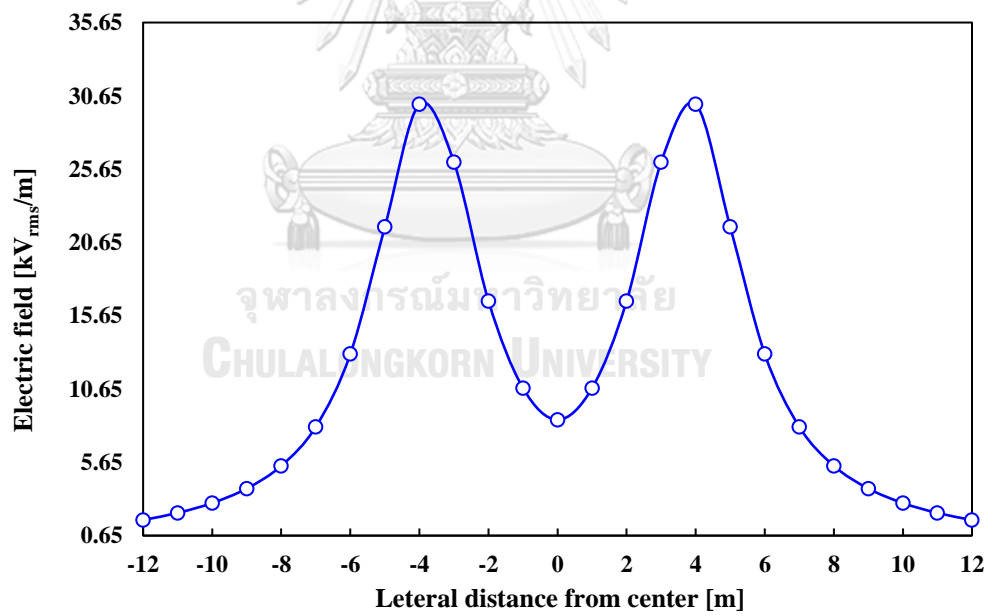
##### 5.1.1 ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

รูปที่ 5.1 ถึง 5.4 แสดงผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าจากตำแหน่งกึ่งกลางเสาไฟฟ้าจนถึงขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ระดับความสูงต่างๆ จากพื้นดิน. จากผลการจำลอง ผู้วิจัยพบว่าการกระจายของสนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวในลักษณะระฆังคว่ำ 2 ยอด และค่าสมมาตรทั้งสองฝั่ง. ในที่นี้ ผู้วิจัยพิจารณาค่าสนามไฟฟ้า ณ ความสูง 1 m จากพื้นดินเป็นหลัก. ความสูง 1 m เป็นระดับที่ กฟผ. พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหรืออุปกรณ์ใกล้เคียงเสาส่งไฟฟ้า. ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับอื่นๆ ถูกคำนวณเพื่อดูลักษณะการแปรค่าสนามไฟฟ้า.

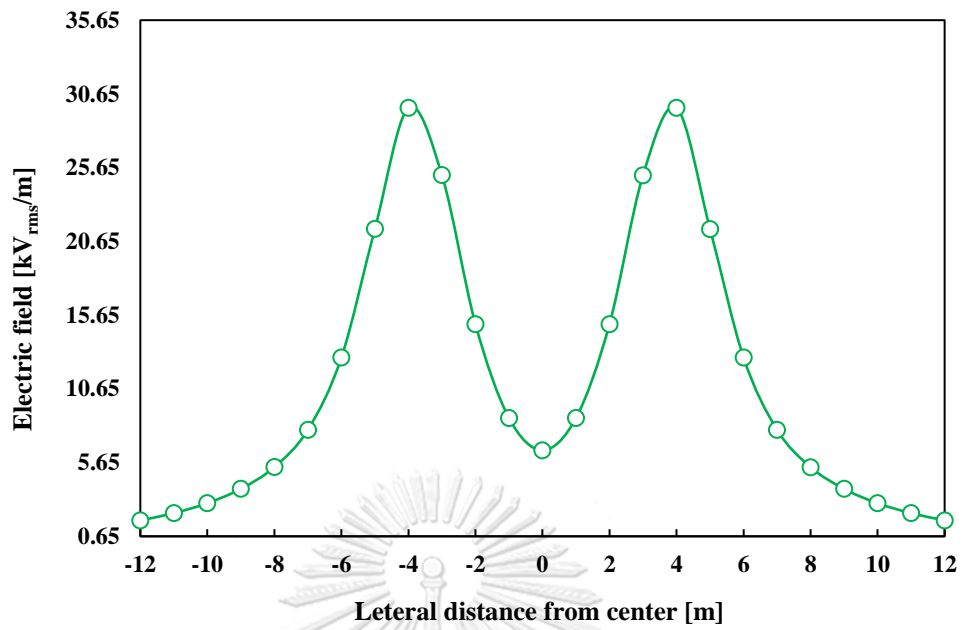
ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_1$  ณ บริเวณขอบระบบโครงข่ายไฟฟ้า และบริเวณกึ่งกลางเสามีค่าประมาณ  $0.69 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  และ  $0.82 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  ตามลำดับ. ค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าสนามไฟฟ้า ณ บริเวณขอบขอบเขตเดินระบบโครงข่ายที่ทาง กฟผ. กำหนดไว้ที่  $2 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ . ส่วนค่าสนามไฟฟ้า ณ ความสูง  $H_2, H_3, H_4$  มีลักษณะการกระจายกราฟเหมือนกับค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_1$ . แต่ค่ายอดของกราฟมีระดับที่สูงกว่า  $H_1$  เพราะตำแหน่งที่วัดค่าสนามไฟฟ้าอยู่ระดับใกล้กับตัวนำเฟส. ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ ความสูง  $H_2, H_3, H_4$  เท่ากับ  $1.71 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ ,  $1.73 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  และ  $1.42 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  ตามลำดับ. เราสามารถเห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่บริเวณใกล้กับเฟส B. ตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง.



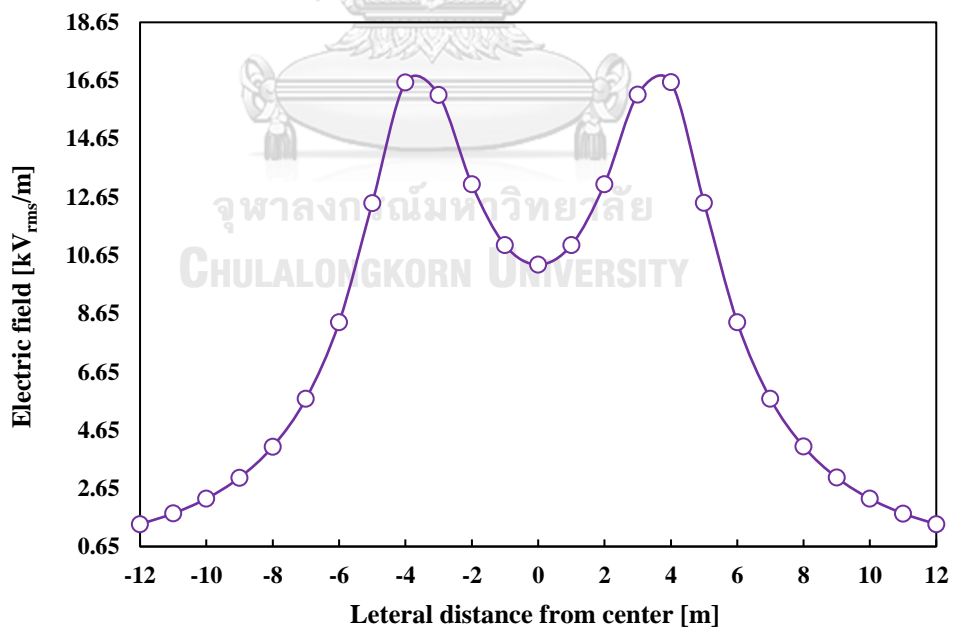
รูปที่ 5.1 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 1 m ระหว่างเสาของสายส่ง



รูปที่ 5.2 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 16.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง



รูปที่ 5.3 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 20.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง



รูปที่ 5.4 ค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบ XY ที่ความสูง 24.57 m ระหว่างเสาของสายส่ง

### 5.1.2 ผลการคำนวณค่าเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการคำนวณ 3 มิติ

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเฟส A, B และ C เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขการคำนวณสนามไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 มิติ. ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย  $\varphi_{3(avg)}$  และ  $\varphi_{4(avg)}$  ถูกคำนวณจากขอบเขตด้านบน และด้านล่างของตัวนำเฟส. ขั้นตอนการนำค่าศักย์ไฟฟ้าในโปรแกรมมาเฉลี่ยแสดงในรูปที่ ก.1 ถึง ก.4 (ภาคผนวก ก.).

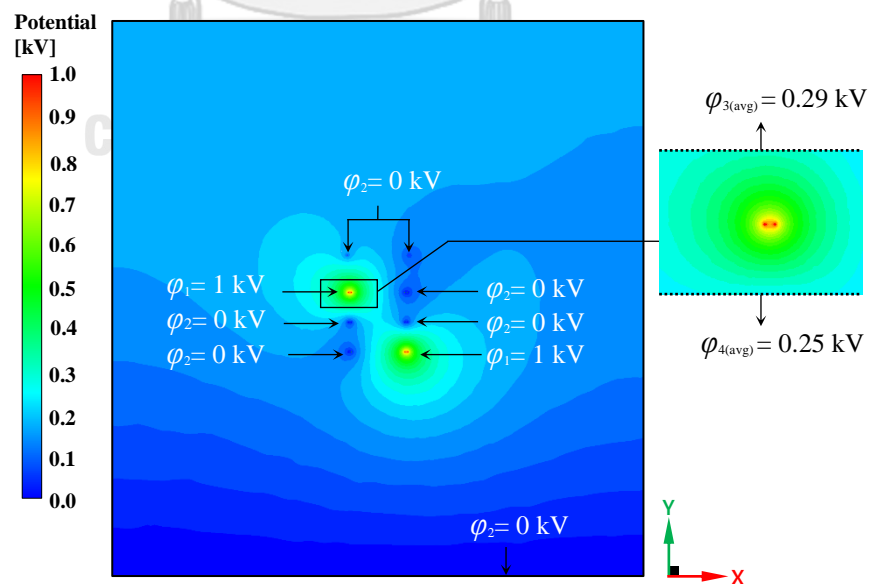
รูปที่ 5.5 ถึง 5.7 แสดงผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย  $\varphi_{3(avg)}$  และ  $\varphi_{4(avg)}$  จากแบบจำลองในแต่ละเฟส. จากรูป เราสามารถเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย  $\varphi_{k(avg)}$  คำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุด  $\varphi_i$  ถึง  $\varphi_N$  ในรูปที่ 4.4 (บทที่ 4) ส่วนด้วยจุดที่ใช้คำนวณ  $N_i$  ได้เป็น

$$\varphi_{k(avg)} = \frac{\sum_{i=1}^{\varphi_N} \varphi_i}{N_i} \quad (5.1)$$

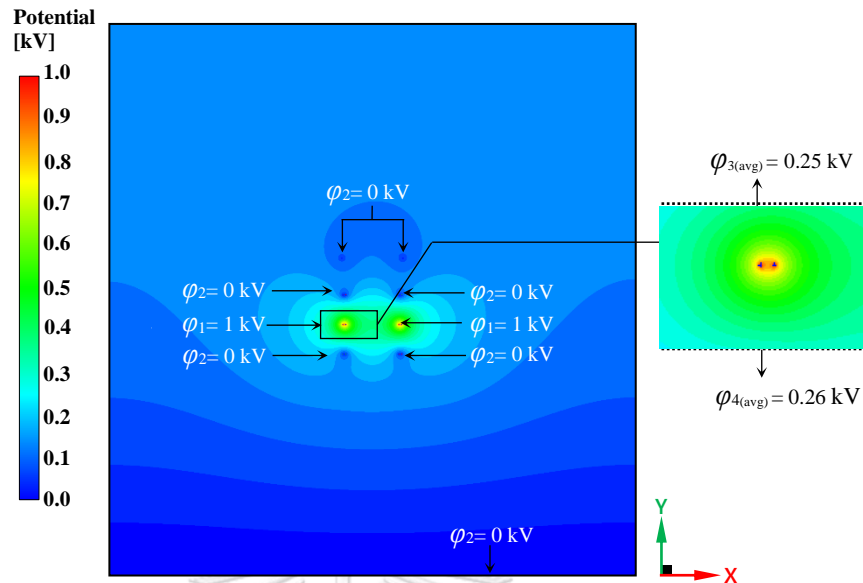
เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณค่าเงื่อนไขขอบเขต

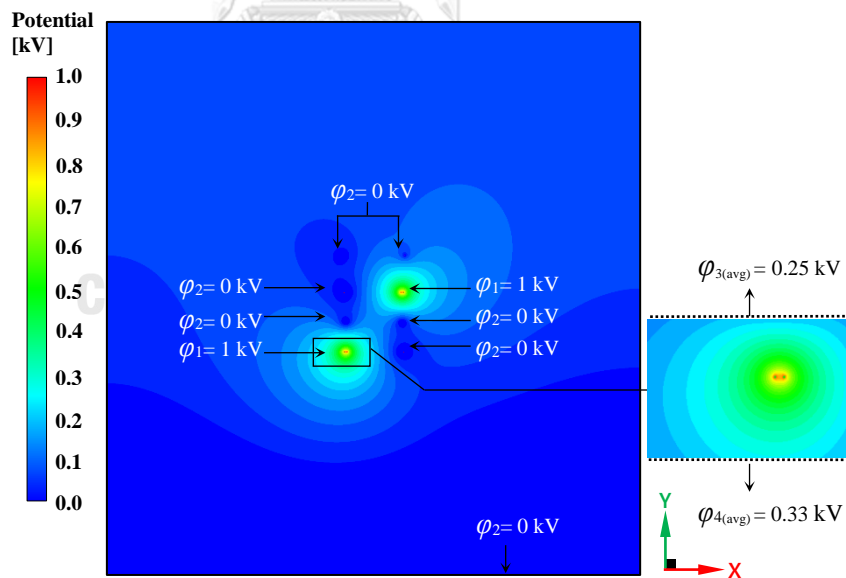
ศักย์ไฟฟ้า	เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าสำหรับแบบจำลอง 3 มิติ		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C
$\varphi_{3(avg)}$ [kV]	0.29	0.25	0.25
$\varphi_{4(avg)}$ [kV]	0.25	0.26	0.33



รูปที่ 5.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส A1 และ A2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง



รูปที่ 5.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส B1 และ B2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง



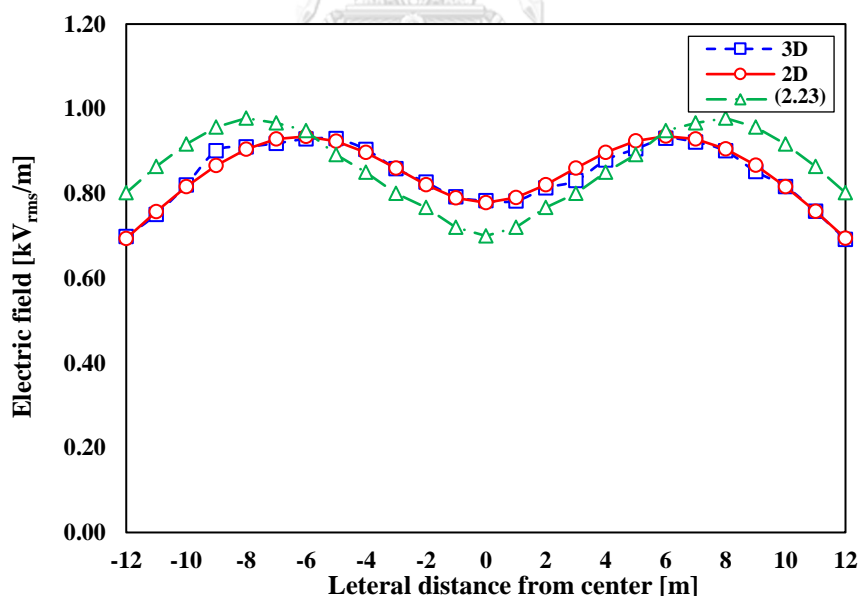
รูปที่ 5.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อป้อนแรงดันที่เฟส C1 และ C2 ของแบบจำลองกรณีไม่คิดระยะหย่อนของสายส่ง

## 5.2 ผลการจำลองแบบ 3 มิติ

### 5.2.1 ผลการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

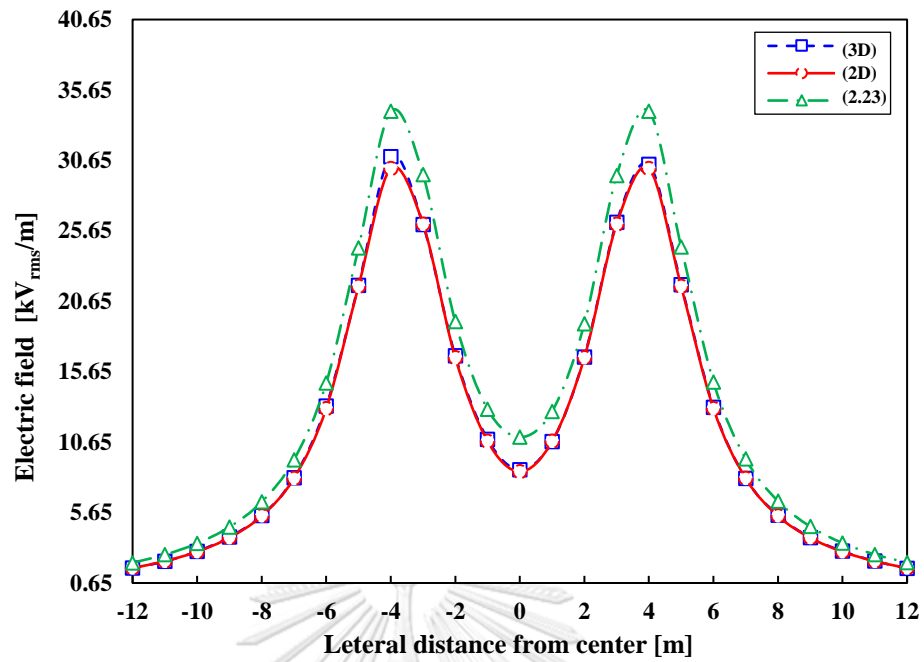
รูปที่ 5.8 ถึง 5.11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า จากบริเวณศูนย์กลางแนวสายส่ง จนถึงขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมสมการที่ (2.23) ที่ความสูงต่างๆ จากพื้นดิน. ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง 2 มิติ มีความแม่นยำ และค่าต่อเนื่องกว่าแบบจำลอง 3 มิติ. เราสามารถเห็นว่าเส้นกราฟของแบบจำลอง 2 มิติราบเรียบเรียบกว่าแบบจำลอง 3 มิติ ในทุกๆ ระดับความสูง. ผู้วิจัยคำนวณสนามไฟฟ้าแบบตัวนำเดี่ยวด้วยวิธีเงาประจุ. ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น. ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแบบจำลองจึงแตกต่างกันพอสมควรจากการคำนวณทางด้วยวิธีเงาประจุ.

ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบระบบเดินโครงข่ายไฟฟ้า ณ ความสูง  $H_1$  ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ, 3 มิติ และวิธีเงาประจุในรูปที่ 5.8 มีค่าเท่ากับ  $0.69 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$ ,  $0.70 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  และ  $0.80 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  ตามลำดับ. ตารางที่ ข.1 แสดงความแตกต่างระหว่างค่าสนามไฟฟ้าของแบบจำลอง 2 มิติ, 3 มิติ กับค่าที่คำนวณด้วยวิธีเงาประจุประมาณ 14% และ 12.5% ตามลำดับ. นอกจากนี้ ผู้วิจัยเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้น กับผลการจำลองของ กฟผ. ในตารางที่ ข.1 ถึง ข.4 (ภาคผนวก ข) อีกด้วย.

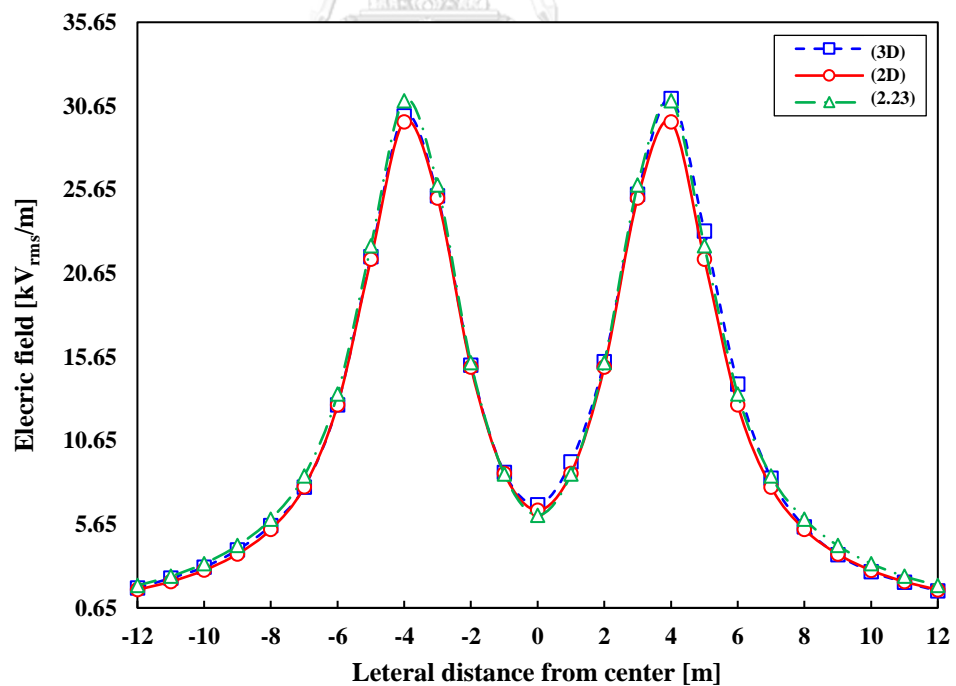


รูปที่ 5.8 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_1$  ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมสมการที่ (2.23)

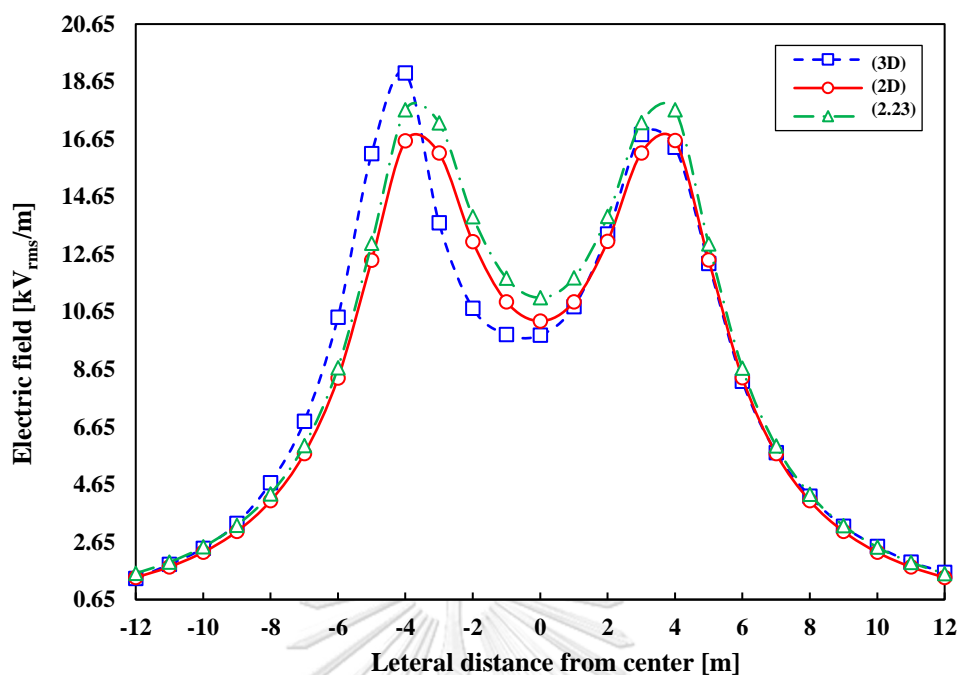




รูปที่ 5.9 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_2$  ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมกรที่ (2.23)



รูปที่ 5.10 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_3$  ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมกรที่ (2.23)



รูปที่ 5.11 ค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูง  $H_4$  ระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ (2D), แบบจำลอง 3 มิติ (3D), และวิธีเงาประจุมการที่ (2.23)

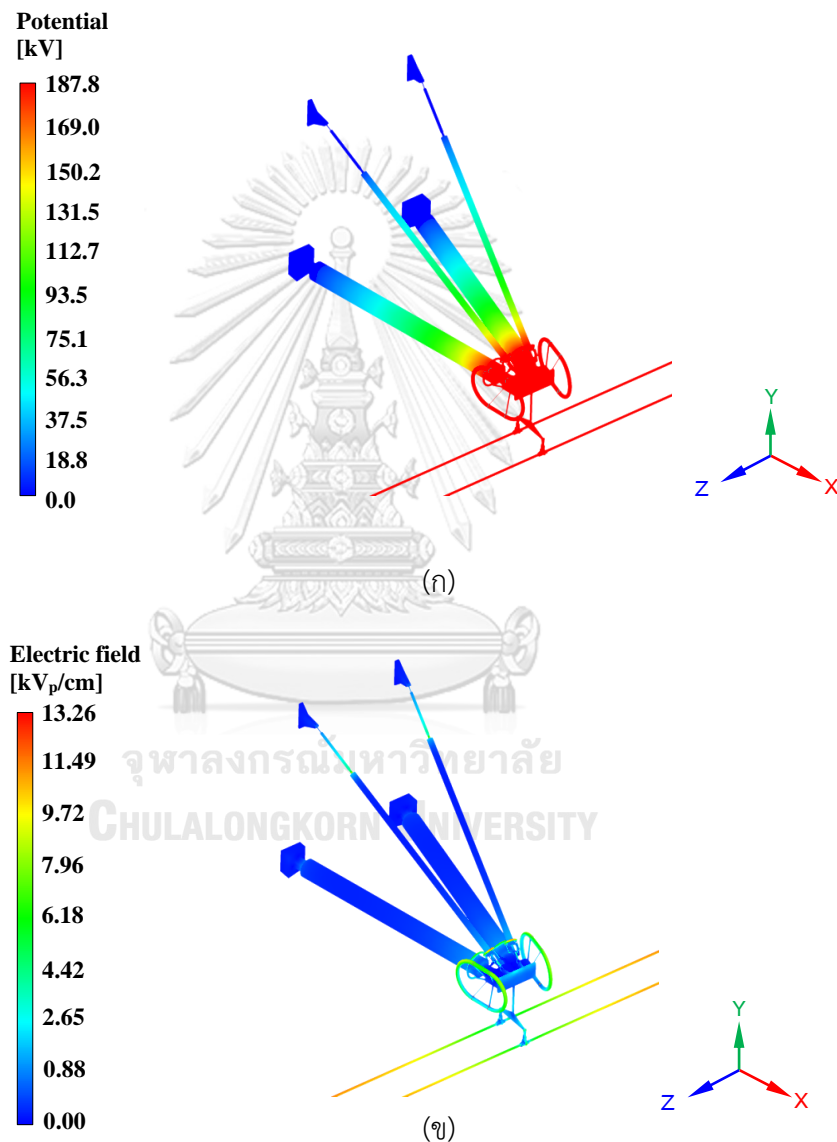
### 5.2.2 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง

ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณตัวนำแรงสูงถูกพิจารณาที่ค่ายอดเพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์สามารถทนต่อค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศได้. ตารางที่ 5.2 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณวงแหวนป้องกันโคโรนาแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับระหว่างเฟส A, B และ C. จากตาราง ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟส B. ผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ตัวนำ  $\varphi_1$  ของเฟส B กับศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบด้านบน  $\varphi_{3(\text{avg})}$  และระนาบด้านล่าง  $\varphi_{4(\text{avg})}$  มีค่ามากกว่าเฟสอื่น. เมื่อผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าสองจุดมีค่ามาก. ค่าสนามไฟฟ้าที่เฟส B จึงสูงกว่าเฟส A และ C ในระยะทางที่เท่ากัน. เมื่อเราเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าระหว่างวงแหวนแต่ละชนิด ผู้วิจัยพบว่าวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึงเกิดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด. เราจะเห็นว่ารัศมีของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้ามีขนาดเล็กกว่าวงแหวนชนิดอื่นซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าสนามไฟฟ้า.

รูปที่ 5.12(ก) เป็นตัวอย่างการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบนผิวแขนเสาส่งฉนวนของเฟส B เนื่องจากผลจำลองของเฟส A และ C มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ผู้วิจัยจึงขอยกตัวอย่างของเฟส B. รูปที่ 5.12(ข) แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนผิวแขนเสาส่งฉนวนของเฟส B. จากรูปนี้ เราสามารถเห็นได้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเกิดขึ้นที่ บริเวณสายตัวนำเฟส วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า และวงแหวนโคโรนา.

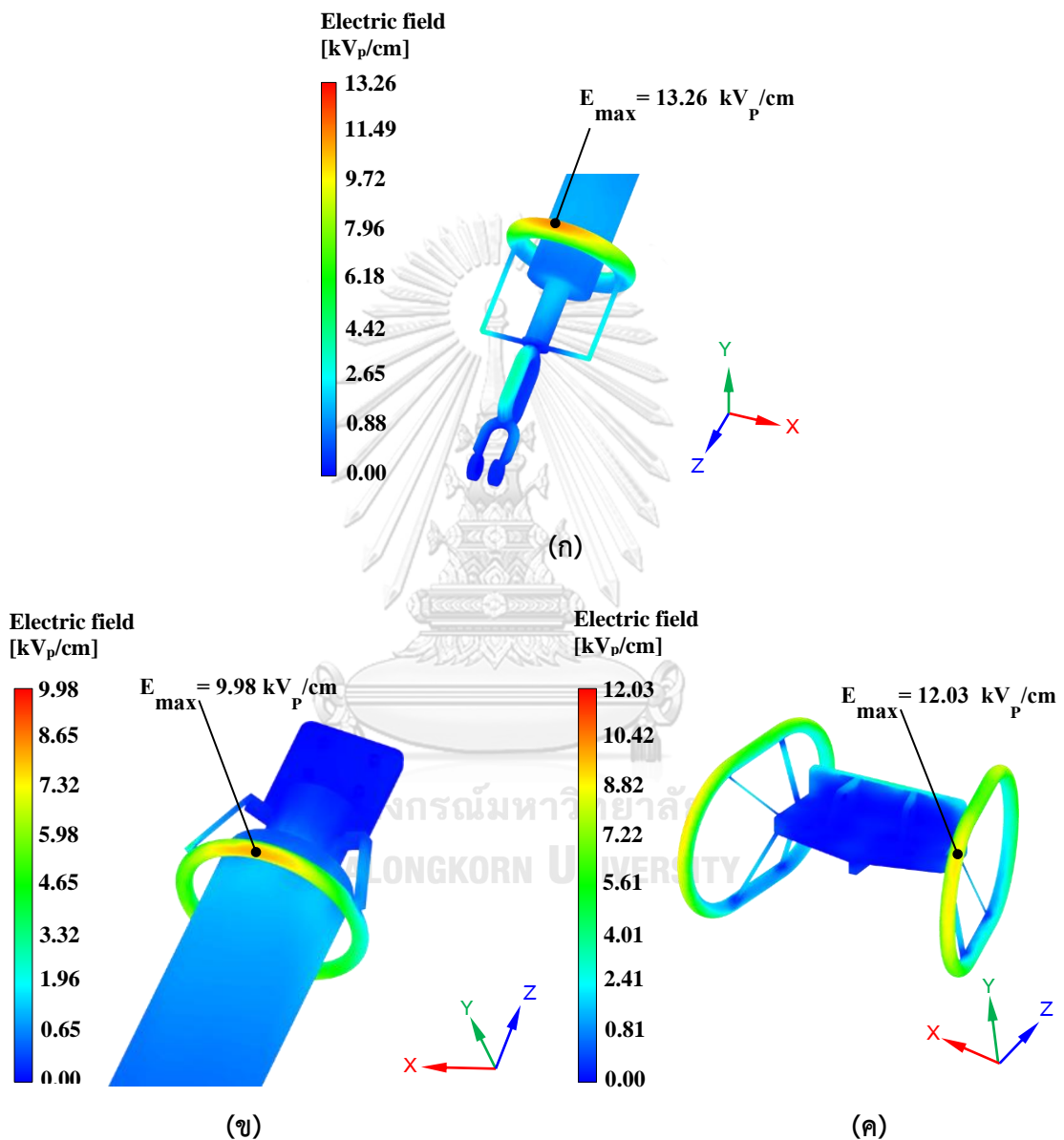
ตารางที่ 5.2 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณวงแหวนแต่ละชนิด

บริเวณ	เฟสที่พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด [kV <sub>p</sub> /cm]		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C
วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึง	12.32	13.26	12.21
วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแท่ง	9.31	9.98	8.86
วงแหวนโคโรนา	9.89	12.03	9.69



รูปที่ 5.12 (ก) การกระจายศักย์ไฟฟ้าเฟส B (ข) การกระจายสนามไฟฟ้าเฟส B

รูปที่ 5.13(ก) ถึง 5.13(ค) แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เฟส B ณ ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึง, วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแทง, และวงแหวนโคโรนามีค่าเท่ากับ 13.26 kV<sub>p</sub>/cm, 9.98 kV<sub>p</sub>/cm, และ 12.03 kV<sub>p</sub>/cm ตามลำดับ. ผู้วิจัยแสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า, วงแหวนของเฟส A, B, และ C ไว้ในรูปที่ ง.1 ถึง ง.6 (ภาคผนวก ง).



รูปที่ 5.13 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวตัวนำแรงสูงของเฟส B

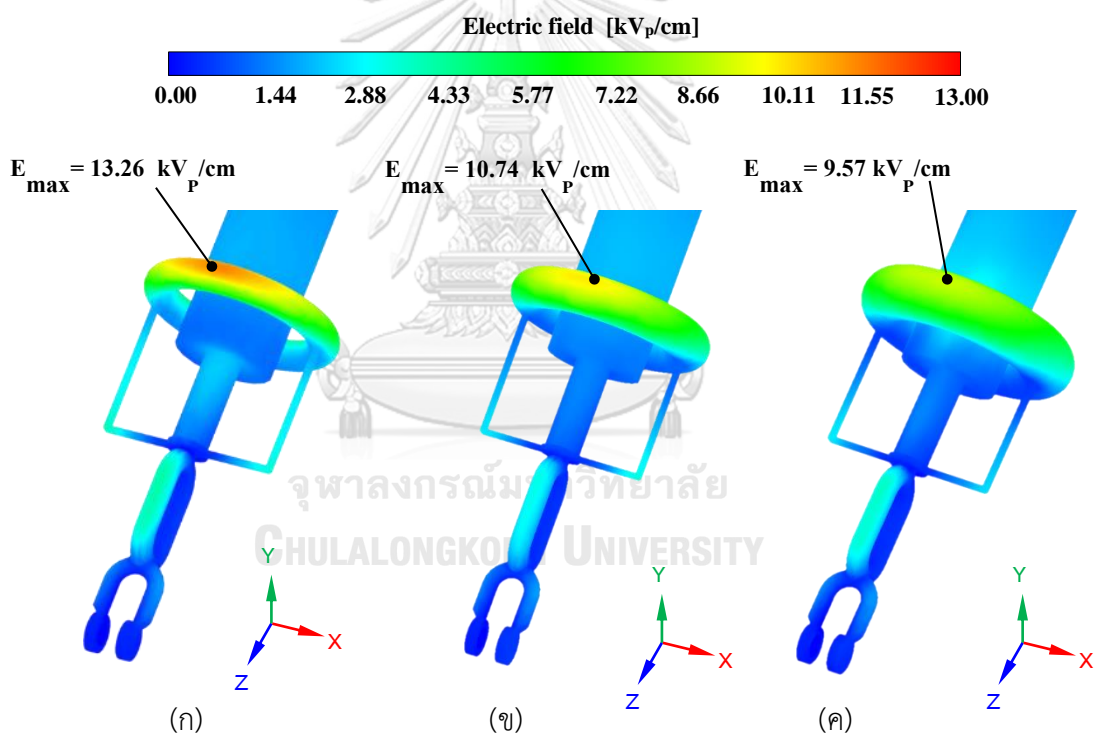
(ก) วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึง

(ข) วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแทง

(ค) วงแหวนโคโรนา

จากรูปที่ 5.13 เราสังเกตเห็นได้ว่าขนาดเรขาคณิตของวงแหวนป้องกันโคโรนาแต่ละชนิดมีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวน. ผู้วิจัยจึงทดลองปรับขนาดเรขาคณิตของวงแหวนเพื่อพิสูจน์ว่าขนาดมีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนอย่างไร. ผู้วิจัยเลือกปรับเฉพาะรัศมีของวงแหวน R ของฉนวนชนิดแท่งเพียงอย่างเดียว. รัศมีของวงแหวน r เพิ่มจาก 12.5 mm ไปจนถึง 22.5 mm โดยเพิ่มทีละ 5 mm.

รูปที่ 5.14 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนเมื่อทำการปรับค่ารัศมีของวงแหวนชนิดรับแรงดึงดังนี้.  $E_{\max} = 13.26 \text{ kV}_p/\text{cm}$  เมื่อ  $r = 12.5 \text{ mm}$ ,  $E_{\max} = 10.74 \text{ kV}_p/\text{cm}$  เมื่อ  $r = 17.5 \text{ mm}$  และ  $E_{\max} = 9.57 \text{ kV}_p/\text{cm}$  เมื่อ  $r = 22.5 \text{ mm}$ . เราสามารถเห็นได้ว่ายิ่งค่ารัศมีวงแหวนเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดก็จะลดลงตาม. จากผลขั้นต้นในที่นี้ ผู้วิจัยจึงศึกษาการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เรขาคณิตอื่นๆ ของวงแหวนเพิ่มเติมโดยจะกล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป.



รูปที่ 5.14 ค่าสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึงเมื่อปรับรัศมีของวงแหวนเป็น

- (ก)  $r$  เท่ากับ 12.5 mm.
- (ข)  $r$  เท่ากับ 17.5 mm.
- (ค)  $r$  เท่ากับ 22.5 mm.

### 5.2.3 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด บริเวณฉนวนสองชนิดระหว่าง เฟส A, B และ C. จากตาราง ผู้วิจัยพบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟส B เช่นเดียวกับกรณีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณตัวนำแรงสูง. เมื่อเราเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าระหว่างฉนวนทั้งสองชนิด ผู้วิจัยพบว่าฉนวนชนิดรับแรงดึงเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนชนิดแห้ง.

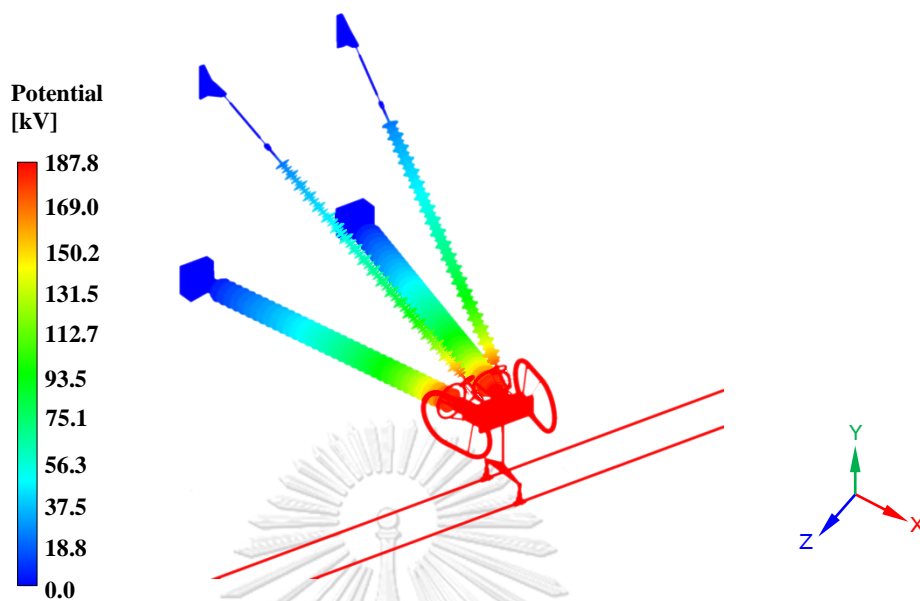
รูปที่ 5.15 และ 5.16 เป็นตัวอย่างการกระจายของศักย์ไฟฟ้าบนผิวฉนวนเสาส่งฉนวนของเฟส B เช่นเดียวกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 5.2.2. จากรูปเราสามารถเห็นได้ว่าบริเวณฉนวนรับแรงดึงใกล้แรงสูงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่าฉนวนชนิดแห้ง (เราสังเกตได้จากขอบเขตสีแดงของฉนวนรับแรงดึงมีช่วงสั้นกว่าฉนวนแห้ง). รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับระยะรั้วของฉนวนชนิดรับแรงดึง และฉนวนแห้งจากฝั่งแรงสูงไปกราวด์. ถ้าเราพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงระยะรั้วฉนวนในช่วงใกล้แรงสูง 0 mm ถึง 1000 mm. ค่าศักย์ไฟฟ้าของฉนวนรับแรงดึงอยู่ที่ประมาณ 140 kV<sub>p</sub> และฉนวนรับแรงดึงอยู่ที่ประมาณ 130 kV<sub>p</sub>.

รูปที่ 5.19 และ 5.20 แสดงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนทั้งสองชนิดของเฟส B. ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  เกิดขึ้นบริเวณครึ่งฉนวนชนิดรับแรงดึง และชนิดแห้งมีค่าเท่ากับ 3.08 kV<sub>p</sub>/cm และ 2.14 kV<sub>p</sub>/cm ตามลำดับ. ความแตกต่างของสนามไฟฟ้าของฉนวนทั้งสองชนิดอยู่ที่ประมาณ 30 %. อันเนื่องมาจากขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึงมีขนาดเล็กกว่าชนิดแห้ง.

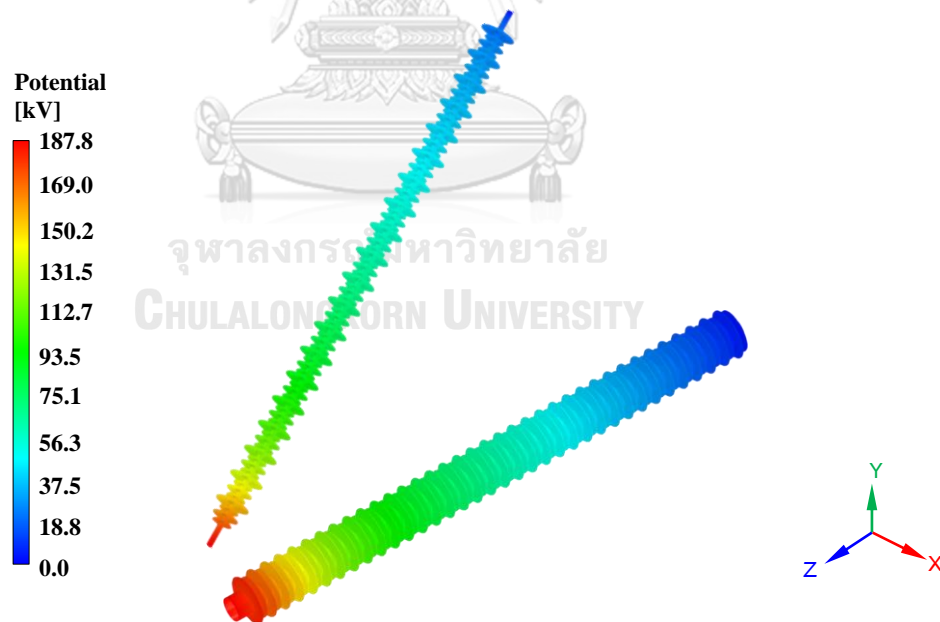
รูปที่ 5.21 และ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับระยะรั้วตามผิวฉนวนชนิดรับแรงดึง และชนิดแห้งของเฟส B. ค่าสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้ากับระยะทาง  $-\frac{d\phi}{dx}$ . เมื่อฉนวนชนิดรับแรงดึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าในระยะทางที่เท่ากัน ทำให้ฉนวนชนิดรับแรงดึงเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนชนิดแห้ง.

ตารางที่ 5.3 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ณ บริเวณผิวฉนวนทั้งสองชนิด

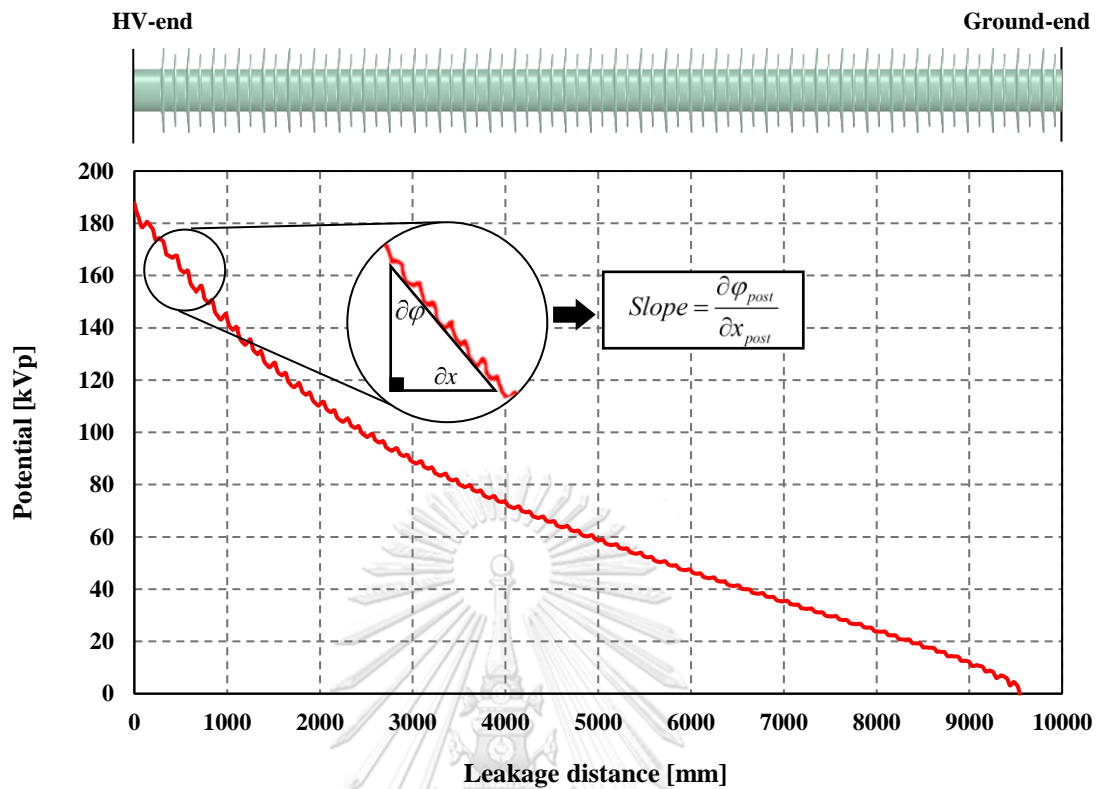
บริเวณ	เฟสที่พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด [kV <sub>p</sub> /cm]		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C
ผิวฉนวนชนิดแห้ง	2.06	2.14	2.09
ผิวฉนวนชนิดรับแรงดึง	3.02	3.08	3.08



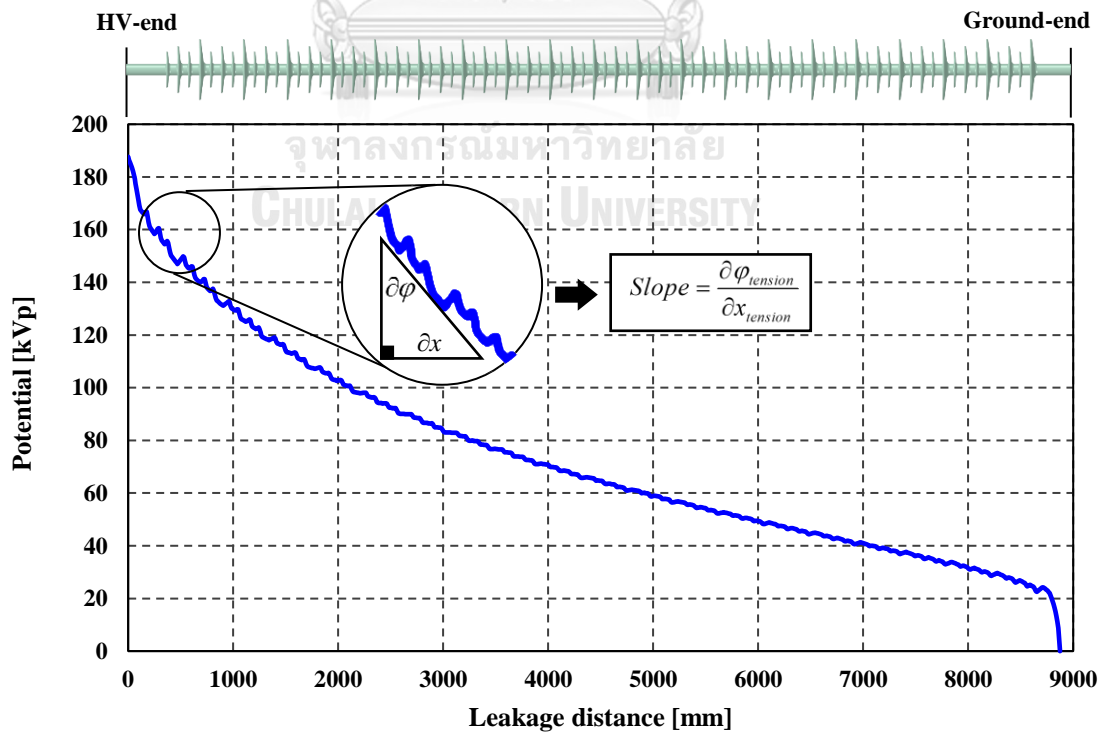
รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าบริเวณแกนเสาส่งฉนวนที่เฟส B



รูปที่ 5.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนทั้งสองชนิด

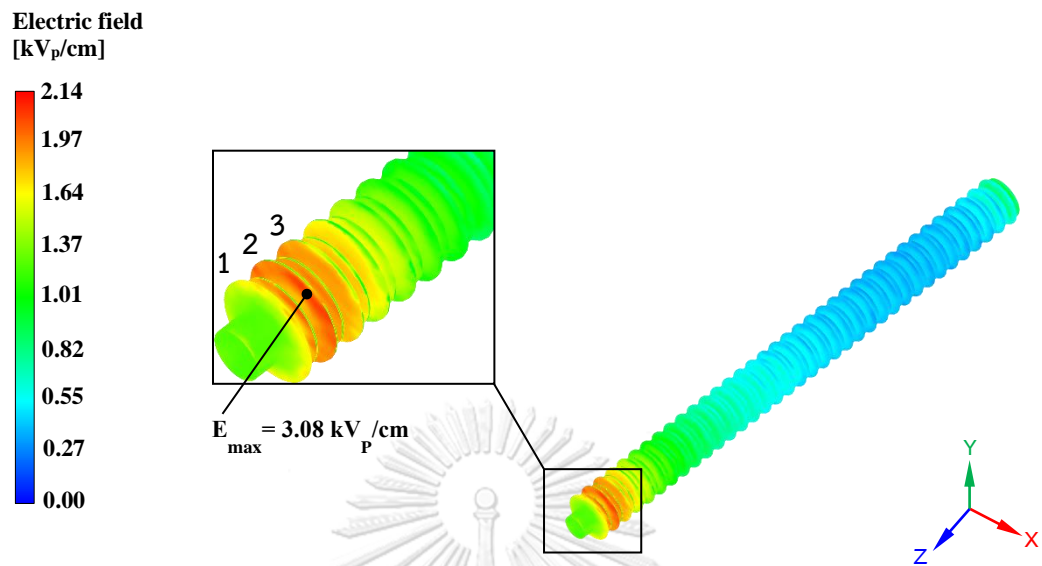


รูปที่ 5.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดแห้งจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B

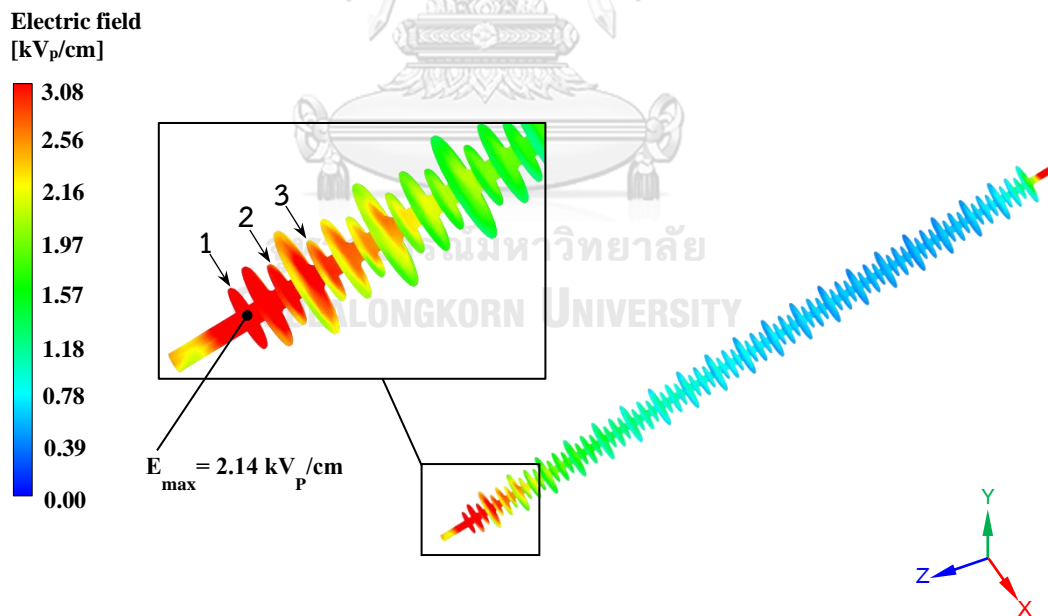


รูปที่ 5.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B

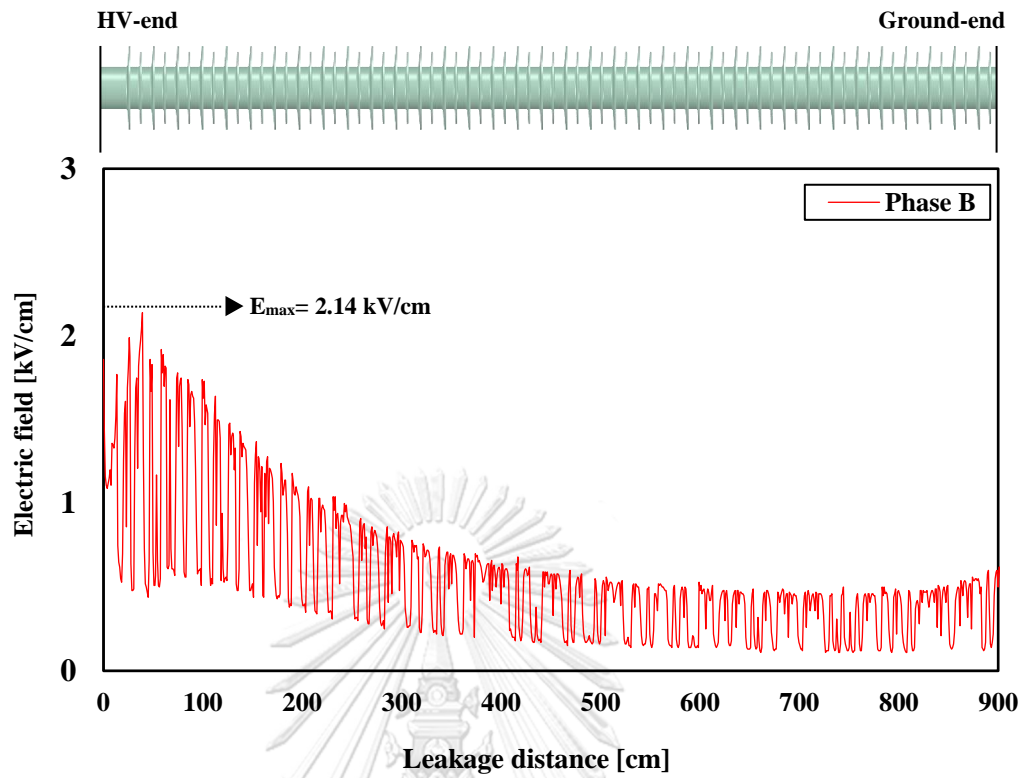




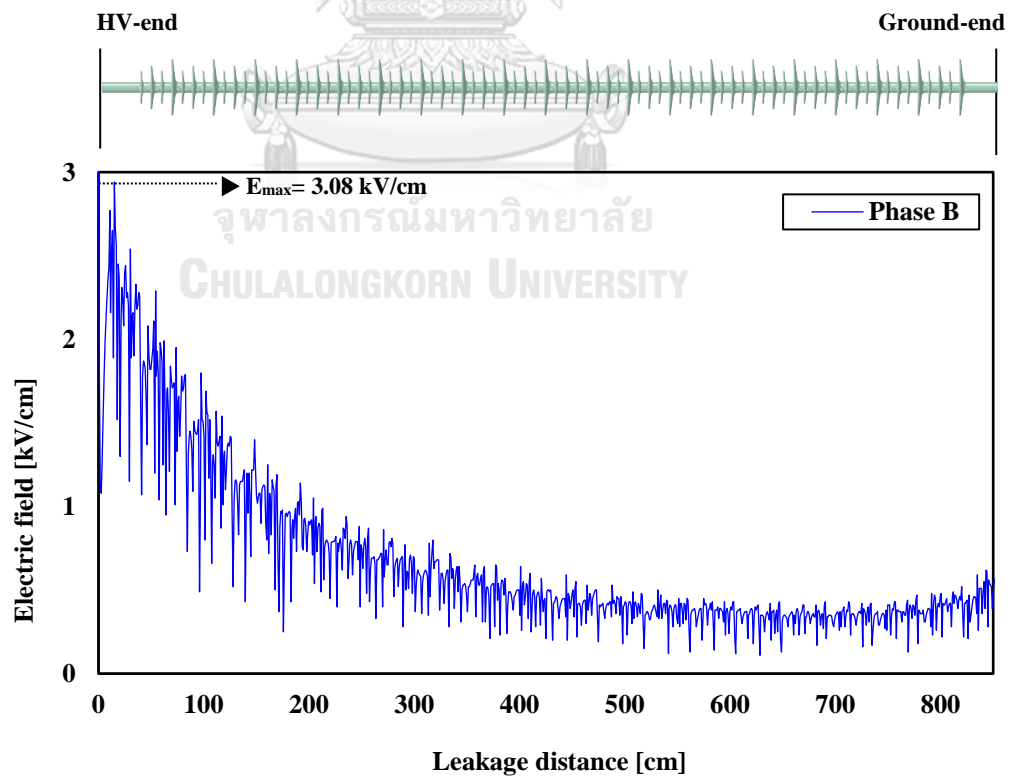
รูปที่ 5.19 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวฉนวนชนิดแห้งของเฟส B



รูปที่ 5.20 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงของเฟส B



รูปที่ 5.21 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดแห้งจากแรงสูงถึงกราวด์ของเฟส B



รูปที่ 5.22 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากแรงสูงถึงกราวด์ของเฟส B

## บทที่ 6

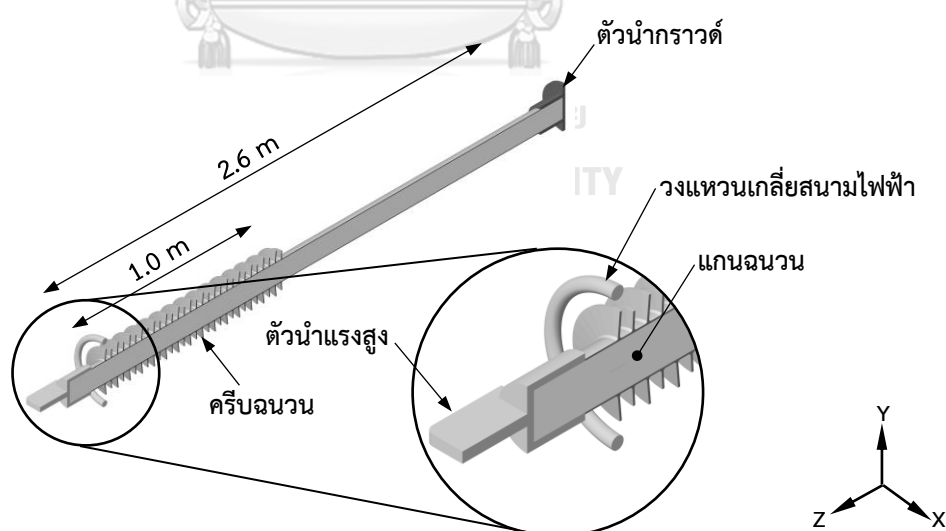
### การปรับปรุงสนามไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์บทนี้นำเสนอขั้นตอนการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ (Optimization) ที่จะปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม ANSYS Discovery AIM ร่วมกับ โมดูล พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Optimization, RSO). และผลการจำลองการการค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ถูกปรับปรุงแล้วรวมทั้งวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้.

#### 6.1 ขั้นตอนการจำลองเพื่อปรับปรุงสนามไฟฟ้า

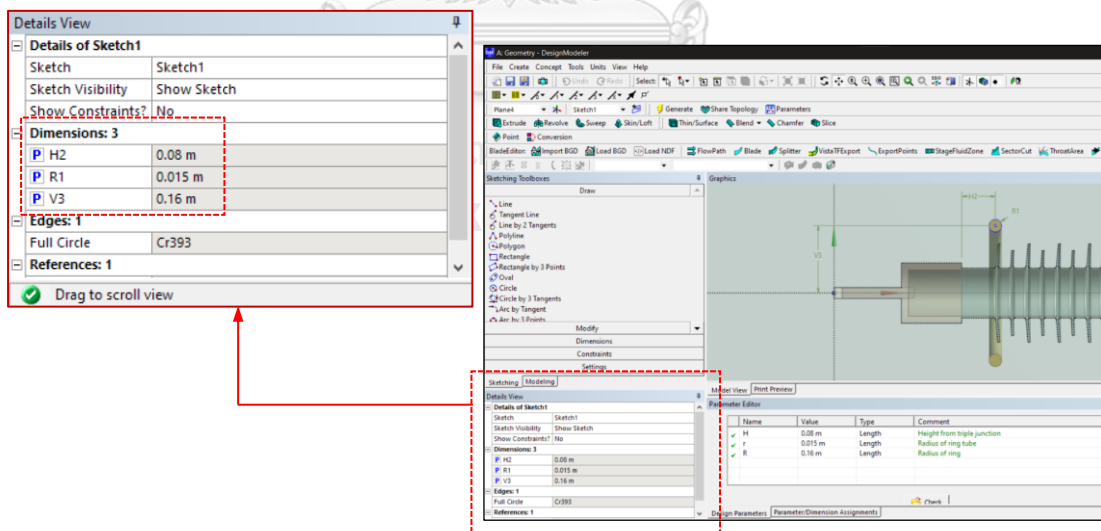
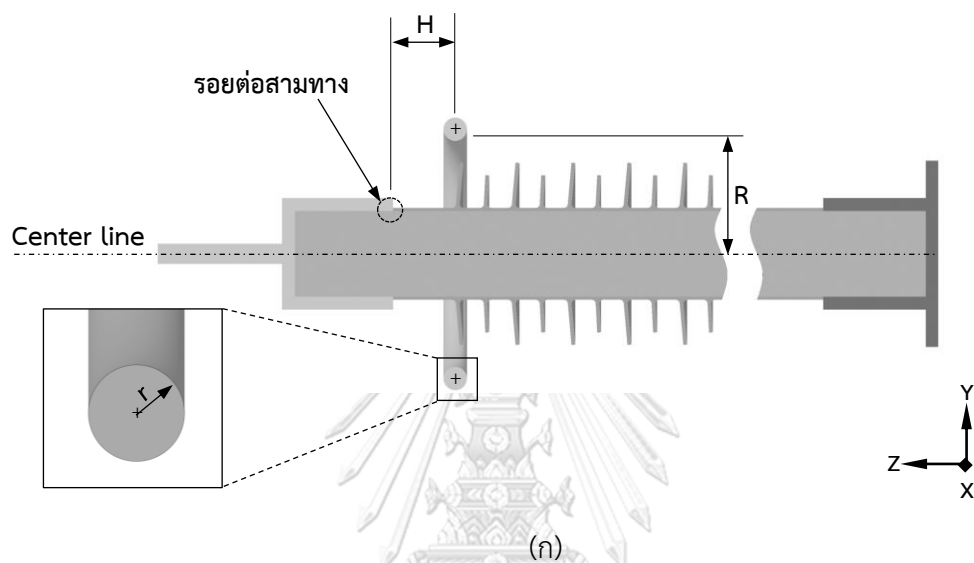
##### 6.1.1 การออกแบบพารามิเตอร์แบบจำลอง 3 มิติ

โปรแกรม DM modeler ในรูปที่ 6.1 ถูกใช้เพื่อสร้างเรขาคณิตของลูกถ้วยฉนวนชนิดแท่ง สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์. ส่วนประกอบของฉนวนชนิดแท่งเหมือนกับรูปที่ 3.6 (บทที่ 3). ในที่นี้ ผู้วิจัยออกแบบเรขาคณิตเพียงครั้งเดียวเพื่อลดเวลาคำนวณที่ต้องปรับค่าพารามิเตอร์หลายๆ ค่าพร้อมกัน. ครีบฉนวนพอลิเมอร์ถูกกำหนดให้มีความยาว 1 m จากความยาวฉนวนทั้งหมด 2.6 m เพื่อให้ระยะครอบคลุมบริเวณฉนวนใกล้ตัวนำแรงสูง. ส่วนครีบฉนวนบริเวณอื่นถูกออกแบบให้ราบเรียบ.



รูปที่ 6.1 เรขาคณิตของลูกถ้วยฉนวนชนิดแท่งแบบตัดครึ่ง

รูปที่ 6.2(ก) แสดงชนิดของพารามิเตอร์ของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดได้แก่ H แทนตำแหน่งของวงแหวนห่างจากบริเวณรอยต่อสามทาง, R แทนรัศมีวงแหวน, และ r แทนรัศมีที่ต่อวงแหวน. รูปที่ 6.2(ข) เป็นวิธีการกำหนดพารามิเตอร์ทั้ง 3 ชนิดในโปรแกรม DM modeler. จากรูป H2 เท่ากับ 0.08 m (พารามิเตอร์ H). R1 เท่ากับ 0.015 m (พารามิเตอร์ r). V3 เท่ากับ 0.16 m (พารามิเตอร์ R). พารามิเตอร์ที่กล่าวมาเป็นค่าที่ผู้ผลิตลูกถ้วยฉนวนออกแบบไว้.

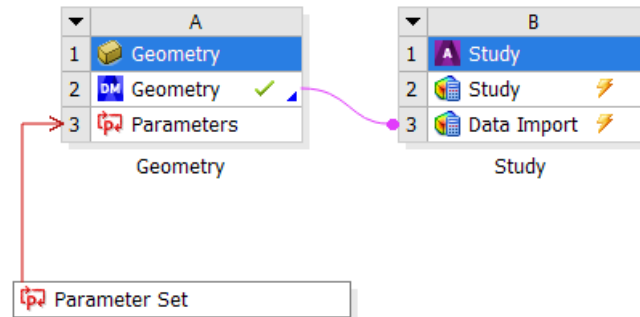


(ข)

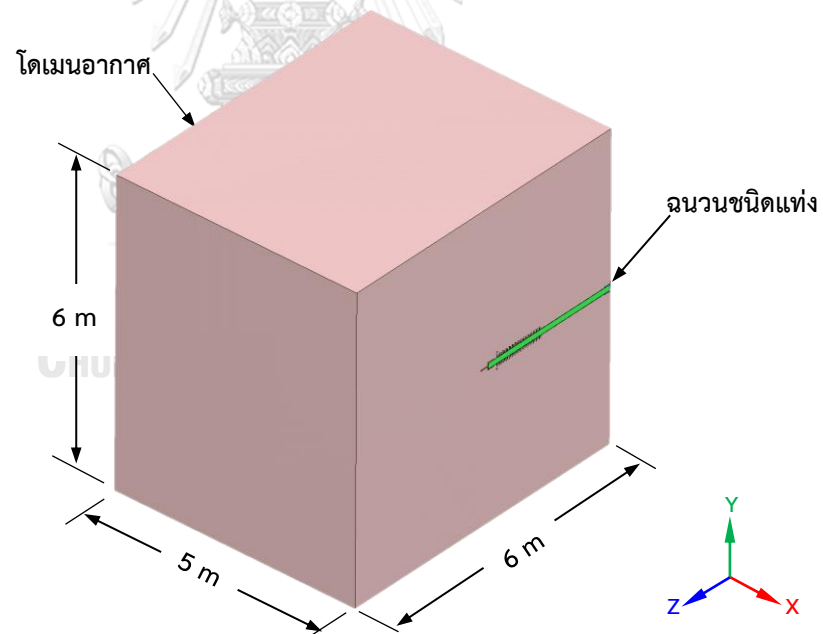
รูปที่ 6.2 (ก) พารามิเตอร์เรขาคณิตของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดต่าง

(ข) การกำหนดพารามิเตอร์ในโปรแกรม DM modeler

หลังจากเราสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และกำหนดค่าพารามิเตอร์. ขั้นตอนถัดมาเป็นการเชื่อมโยงเรขาคณิตในโปรแกรม DM modeler กับโปรแกรม ANSYS Discovery AIM ดังแสดงในรูปที่ 6.3. แบบจำลอง 3 มิติถูกนำเข้าสู่โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 6.4. จากรูป โดเมนการคำนวณมีขนาดเท่ากับ  $6 \times 5 \times 6 \text{ m}^3$ .

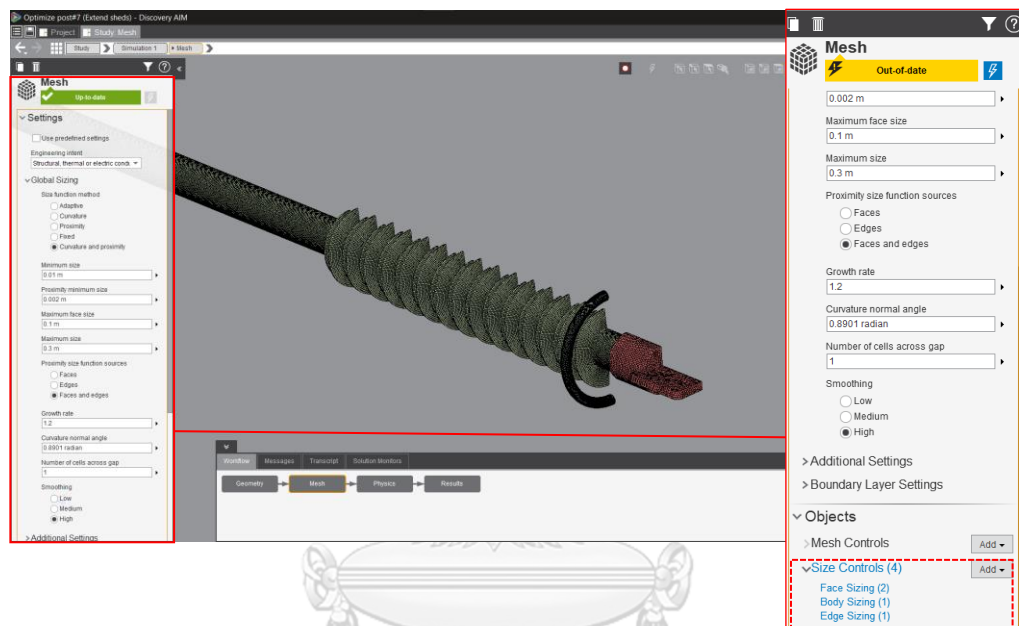


รูปที่ 6.3 แผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง DM modeler กับ ANSYS Discovery AIM

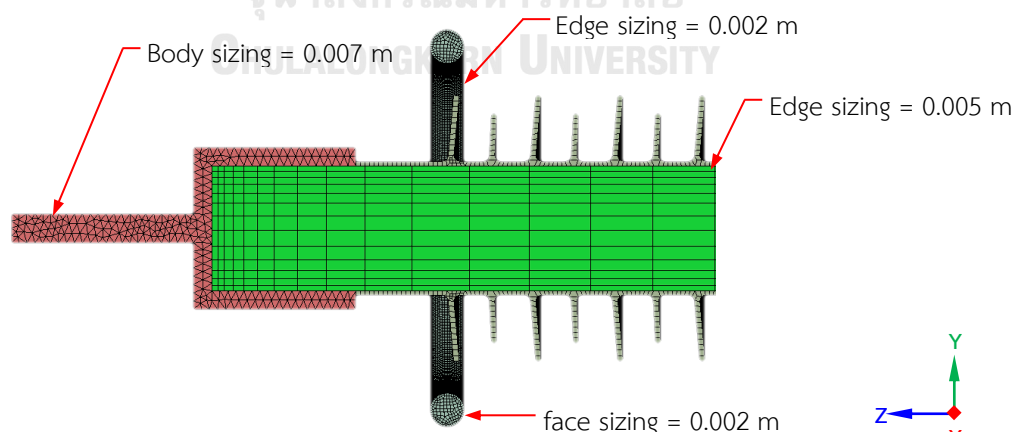


รูปที่ 6.4 ขนาดโดเมนการคำนวณ

ผู้วิจัยกำหนดขนาดและชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้ในการประมาณในแถบ Mesh ดังแสดงในรูปที่ 6.5(ก). ในรูปที่ 6.5(ข) แสดงขนาดเอลิเมนต์ ณ บริเวณต่างๆ ดังนี้ ขนาดเอลิเมนต์บริเวณผิว และขอบของวงแหวนเท่ากับ 0.002 m. ขนาดเอลิเมนต์บริเวณตัวนำแรงสูงเท่ากับ 0.007 m. ขนาดเอลิเมนต์บริเวณขอบรอยต่อระหว่างฉนวน และแกนฉนวนเท่ากับ 0.005 m. จากรูป เอลิเมนต์ถูกกำหนดให้มีความหนาแน่นบริเวณรอยต่อของวงแหวน และอากาศเพื่อความแม่นยำในการประมาณตรงบริเวณที่เราสนใจ. จำนวนของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า และทรงหกหน้ารวมกันทั้งหมดเท่ากับ 1,696,180 เอลิเมนต์ 2,970,501 โหนด.




(ก)

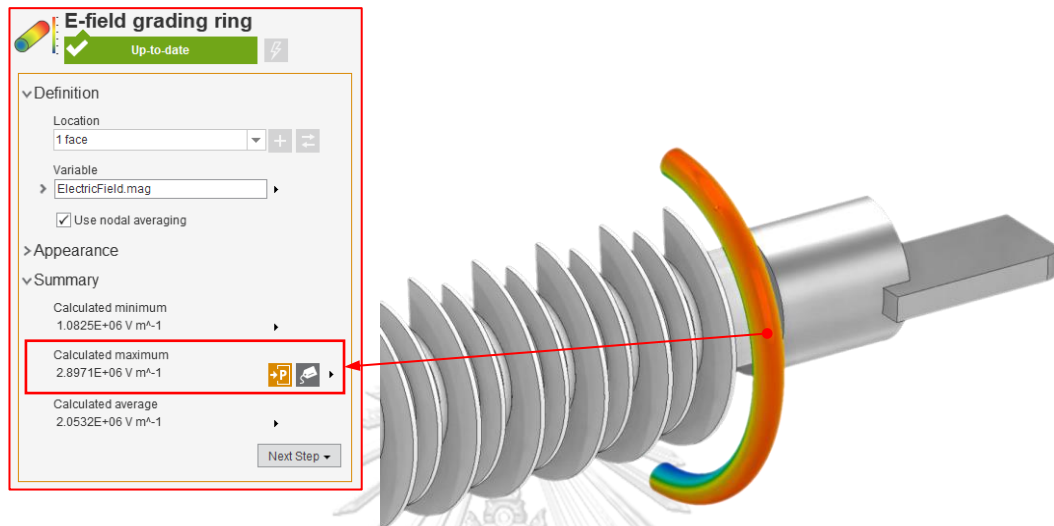


(ข)

รูปที่ 6.5 (ก) หน้าต่างสำหรับกำหนดเอลิเมนต์ในโปรแกรม

(ข) ขนาดเอลิเมนต์ ณ บริเวณต่างๆ

ผู้วิจัยกำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนเป็นพารามิเตอร์ขาออกโดยการกดที่ปุ่ม  ดังแสดงในรูปที่ 6.6. จากรูป ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนก่อนหาค่าที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ  $2.8971E+06$  V/m.



รูปที่ 6.6 การกำหนดพารามิเตอร์ขาออกในโปรแกรม ANSYS Discovery AIM

รูปที่ 6.7 แสดงพารามิเตอร์ขาเข้า (Input parameter) ในโมดูล Parameter set อันได้แก่ พารามิเตอร์ H, r และ R. และพารามิเตอร์ขาออก (Output parameter) คือค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดแห้ง. ค่าพารามิเตอร์ขาเข้า และขาออกจะถูกนำไปคำนวณค่าที่เหมาะสมในโมดูล Response surface optimization ในขั้นตอนถัดไป.

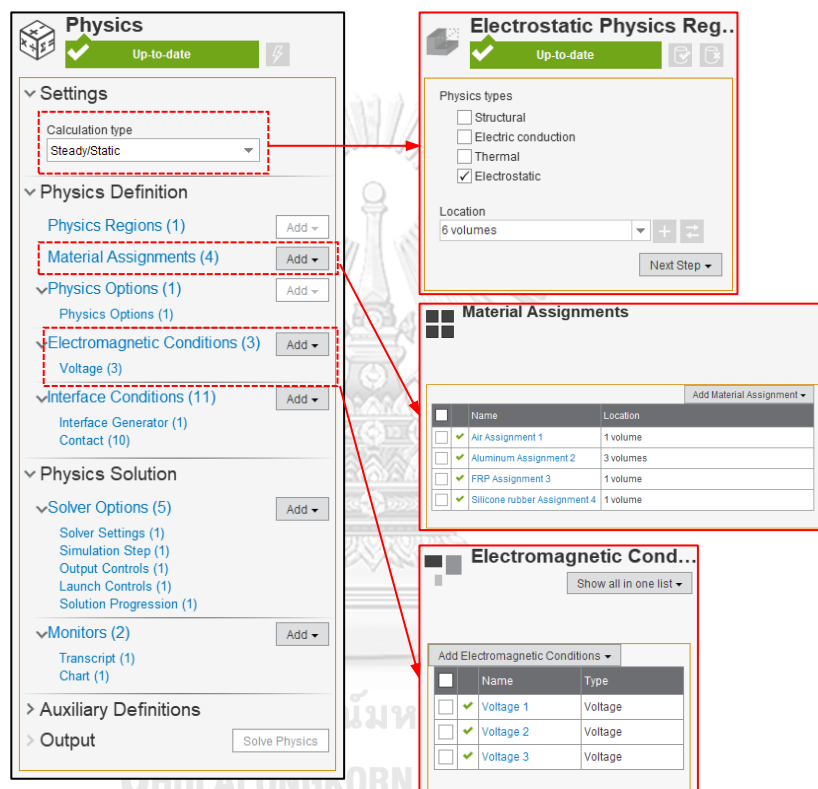
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Geometry (A1)			
4	P1	H	0.08	m
5	P2	r	0.015	m
6	P3	R	0.16	m
*	New input parameter	New name	New expression	
8	Output Parameters			
9	Study (B1)			
10	P4	E-field grading ring Calculated maximum	2.8971E+06	V m <sup>-1</sup>
*	New output parameter		New expression	
12	Charts			
13	Parameter Parallel Chart 0			
14	Parameters Chart			

รูปที่ 6.7 พารามิเตอร์ขาเข้า และพารามิเตอร์ขาออกในโมดูล Parameter set

### 6.1.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และชนิดวัสดุที่ใช้จำลอง

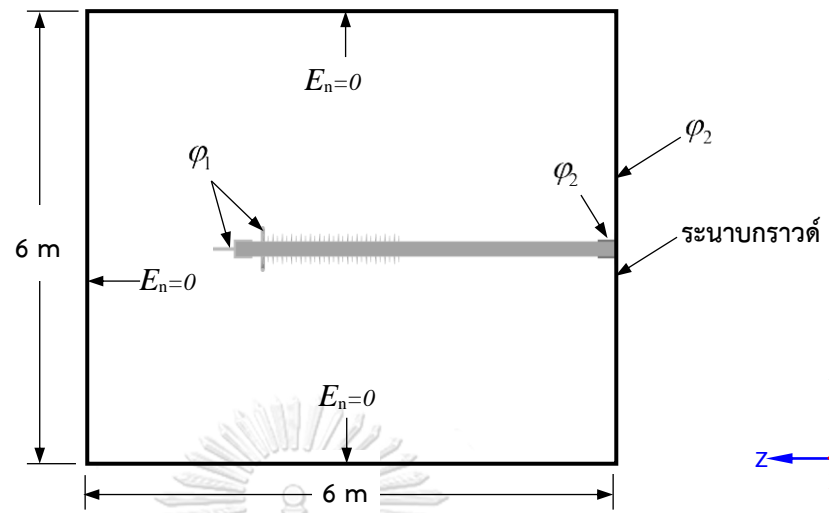
เรากำหนดเงื่อนไขขอบเขต และชนิดของวัสดุที่ใช้จำลองในแถบ Physics ดังแสดงในรูปที่ 6.8. แถบย่อย Calculation type ถูกเลือกเป็น Steady/Static (Electrostatic) ซึ่งประกอบด้วย ปริมาตรวัตถุ 6 ปริมาตร. ในแถบย่อย Material Assignments ผู้วิจัยเลือกชนิดวัสดุตามบริเวณต่างๆ เหมือนกับตารางที่ 3.3 (บทที่ 3). แถบย่อย Electromagnetic Conditions เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลอง.



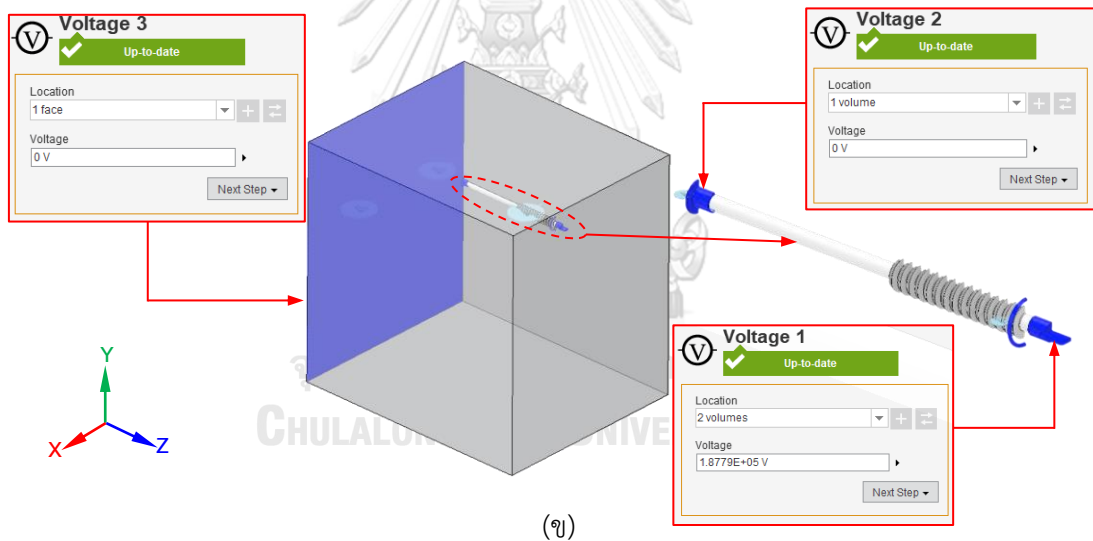
รูปที่ 6.8 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และวัสดุที่ใช้ในการจำลองในแถบ Physics

รูปที่ 6.9(ก) และ รูปที่ 6.9(ข) แสดงเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ ณ บริเวณต่างๆ ของ โดเมน. ตัวนำแรงสูง อาทิเช่น วงแหวนเกลี้ยงสนามไฟฟ้า และตัวนำถูกกำหนดให้มีศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_1$  (Voltage 1) เท่ากับ  $230 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 187.79 kV_p$ . บริเวณตัวนำกราวด์ และกราวด์ระนาบถูก กำหนดให้มีศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_2$  (Voltage 2 และ Voltage 3) เท่ากับ  $0 kV$ . ระนาบด้านอื่นๆ ของโดเมน การคำนวณไม่ได้ถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขต. จากรูป โปรแกรมจะกำหนดเงื่อนไขสนามไฟฟ้าใน แนวตั้งฉากกับระนาบ  $E_n$  เท่ากับ 0 สำหรับบริเวณที่ผู้วิจัยไม่ได้กำหนดเงื่อนไขใดๆ.





(ก)



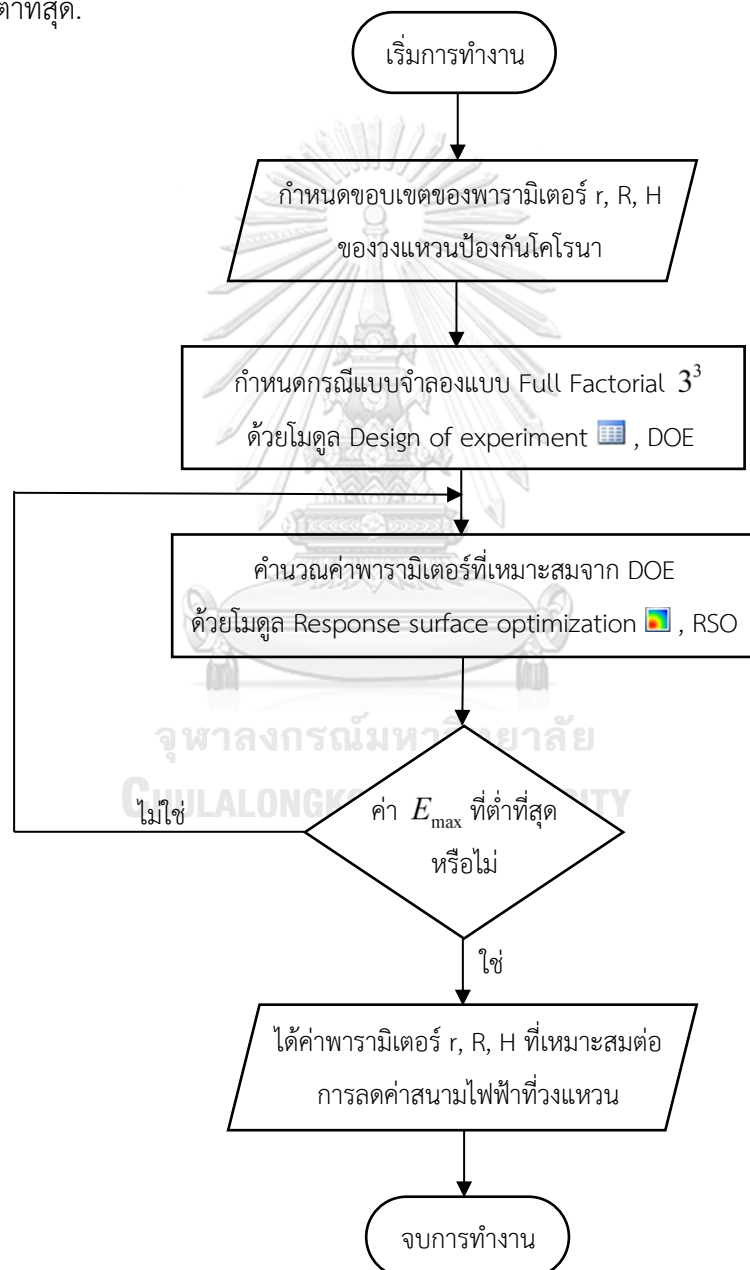
(ข)

รูปที่ 6.9 (ก) เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

(ข) เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

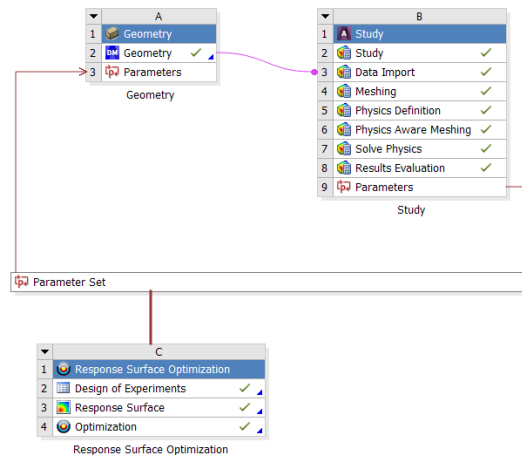
### 6.1.3 การปรับค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ด้วยโมดูลพื้นผิวตอบสนอง

รูปที่ 6.10 แสดงแผนผังการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์วงแหวนด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface optimization, RSO). ผู้วิจัยกำหนดให้ตัวแปร  $r$ ,  $R$  และ  $H$  เป็นพารามิเตอร์ขาเข้า (Input parameter) และกำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  บนผิววงแหวนเป็นพารามิเตอร์ขาออก (Output parameter). ผู้วิจัยต้องการทราบว่าที่พารามิเตอร์  $r$ ,  $R$  และ  $H$  เท่าใดถึงทำให้มีค่า  $E_{max}$  ที่ผิววงแหวนต่ำที่สุด.



รูปที่ 6.10 แผนผังการปรับค่าที่เหมาะสมด้วย response surface optimization

รูปที่ 6.11 แสดงแผนผังการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม DM modeler (โมดูลสร้างพารามิเตอร์ และสร้างเรขาคณิต), ANSYS Discovery AIM (โมดูลคำนวณค่าสนามไฟฟ้า) และโมดูล Response surface optimization (โมดูลหาค่าที่เหมาะสม).



รูปที่ 6.11 แผนผังการจำลอง ANSYS Discovery AIM ร่วมกับ Response Surface Optimization

ผู้วิจัยกำหนดระดับของพารามิเตอร์แต่ละชนิดในโมดูล Design of experiment ดังแสดงในรูปที่ 6.12. จากรูป ผู้วิจัยเลือกแถบ Design of experiment types เป็น Custom เพื่อกำหนดกรณีแบบจำลอง. ตารางที่ 6.1 แสดงระดับของพารามิเตอร์เรขาคณิตวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า. ระดับที่ 1 หมายถึงค่าที่ต่ำที่สุดของพารามิเตอร์. ระดับ 0 หมายถึงค่ากลางของพารามิเตอร์. และระดับ 1 หมายถึงค่าสูงสุดของพารามิเตอร์. กรณีของการจำลองแบบ Full factorial 3 พารามิเตอร์ 3 ระดับมีทั้งหมด  $3^3 = 27$  กรณีดังแสดงในตารางที่ 6.1 (ภาคผนวก ฉ). ผู้วิจัยจำกัดขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ชนิดไว้ดังนี้. สำหรับพารามิเตอร์ r และ R ผู้วิจัยพิจารณาค่าต่ำสุดเป็นค่าที่ผู้ผลิตฉนวนออกแบบไว้. ส่วนค่าสูงสุดถูกพิจารณาจากคาร์รัคมีวงแหวนที่สามารถประกอบได้จริงโดยไม่ทับซ้อนกับอุปกรณ์ส่วนอื่นของแกนเสาส่งฉนวน. สำหรับพารามิเตอร์ H ผู้วิจัยพิจารณาค่าต่ำสุด และสูงสุดเป็นระยะใกล้จุดรอยต่อสามทางฝั่งแรงสูงจนถึงฝั่งกราวด์.

ตารางที่ 6.1 ระดับของพารามิเตอร์เรขาคณิตวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า

พารามิเตอร์	Code factor	ระดับของพารามิเตอร์		
		-1	0	1
r [mm]	$x_1$	15	25	35
R [mm]	$x_2$	160	170	180
H [mm]	$x_3$	0	1.3	2.6

Outline of Schematic D2: Design of Experiments		Table of Outline A5: Design Points of Design of Experiments				
A	B	Name	P1 - H (m)	P2 - r (m)	P3 - R (m)	P4 - E-field grading ring Calculated maximum (V m <sup>-1</sup> )
1	Enabled	1	0	0.015	0.16	
2	Design of Experiments	2	0	0.025	0.16	
3	Input Parameters	3	0	0.035	0.16	
4	Geometry (A1)	4	0	0.015	0.17	
5	P1 - H	5	0	0.025	0.17	
6	P2 - r	6	0	0.035	0.17	
7	P3 - R	7	0	0.015	0.18	
8	Output Parameters	8	0	0.025	0.18	
9	Study (B1)	9	0	0.035	0.18	
10	P4 - E-field grading ring Calculated maximum	10	1.3	0.015	0.16	3.4643E+06
11	Charts	11	1.3	0.025	0.16	2.4662E+06
12	Parameters Parallel	12	1.3	0.035	0.16	2.0058E+06
13	Design Points vs Parameter	13	1.3	0.015	0.17	3.6351E+06
		14	1.3	0.025	0.17	2.4167E+06
		15	1.3	0.035	0.17	1.9653E+06
		16	1.3	0.015	0.18	3.298E+06
		17	1.3	0.025	0.18	2.3713E+06
		18	1.3	0.035	0.18	1.9278E+06
		19	2.6	0.015	0.16	5.1497E+06
		20	2.6	0.025	0.16	3.8408E+06
		21	2.6	0.035	0.16	3.2414E+06
		22	2.6	0.015	0.17	4.8379E+06
		23	2.6	0.025	0.17	3.6143E+06
		24	2.6	0.035	0.17	3.167E+06
		25	2.6	0.015	0.18	4.7606E+06
		26	2.6	0.025	0.18	3.5564E+06
		27	2.6	0.035	0.18	3.0027E+06
		28	2.6	0.015	0.18	

Properties of Outline : Design of Experiments	
A	B
Property	Value
Design Points	
Preserve Design Points After DX Run	
Failed Design Points Management	
Number of Retries	0
Design of Experiments	
Design of Experiments Type	Custom
Design Point Report	
Report Image	None

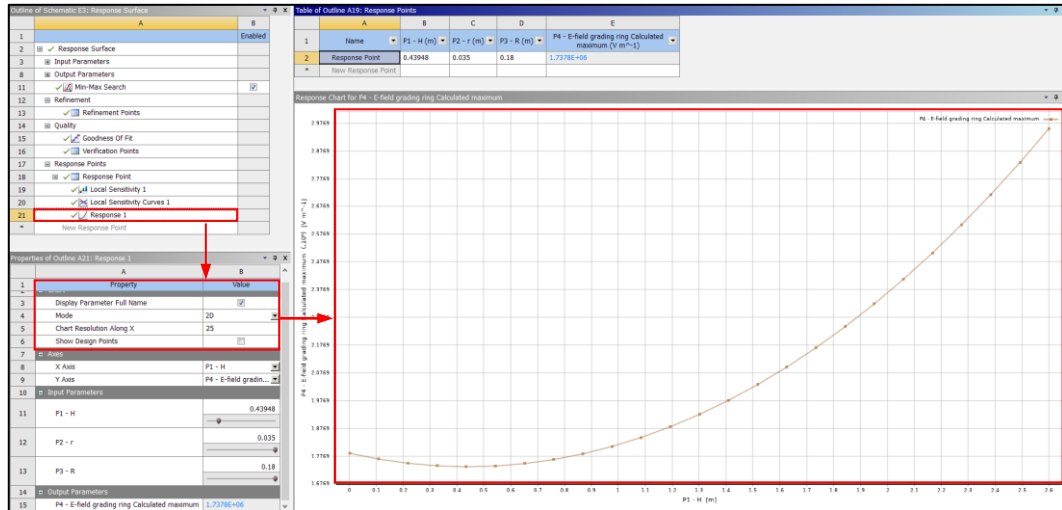
รูปที่ 6.12 กำหนดกรณีของแบบจำลองแบบ Full factorial ในโมดูล Design of experiment

หลังจากการโปรแกรมคำนวณค่าสนามไฟฟ้าแต่ละกรณีในโมดูล Design of experiment. โมดูล Response surface optimization จะนำค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  มาคำนวณหาต่ำสุด และสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 6.13. ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่ต่ำที่สุดเท่ากับ  $1.7378E+6$  V/m เมื่อ พารามิเตอร์ H เท่ากับ 0.43948 m, พารามิเตอร์ r เท่ากับ 0.035 m, และพารามิเตอร์ R เท่ากับ 0.18 m. ค่าพารามิเตอร์นี้จึงเป็นค่าที่เหมาะสมในการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า.

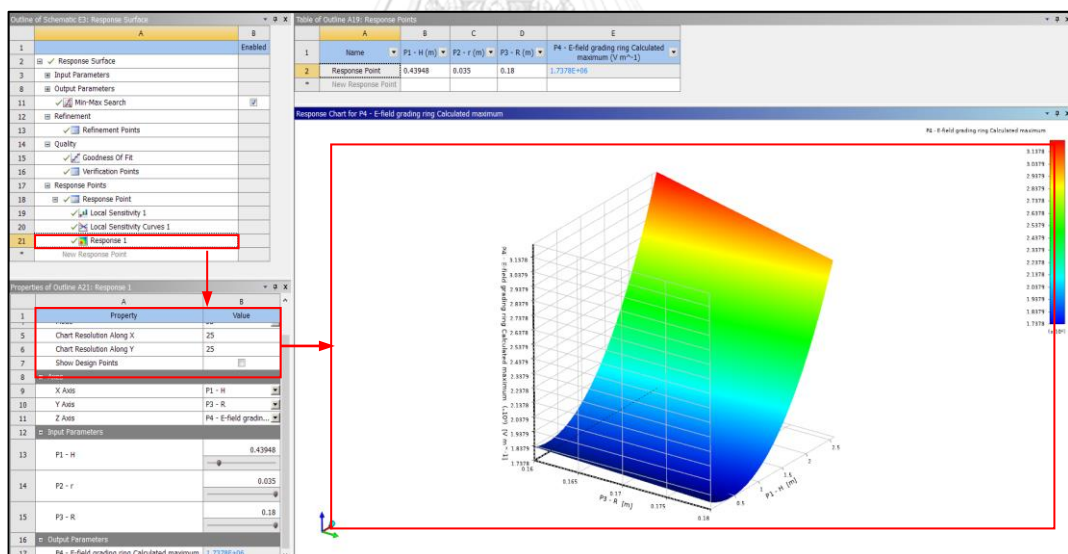
Outline of Schematic E3: Response Surface		Table of Outline A11: Min-Max Search				
A	B	Name	P1 - H (m)	P2 - r (m)	P3 - R (m)	P4 - E-field grading ring Calculated maximum (V m <sup>-1</sup> )
1		1				
2	Response Surface	2				
3	Input Parameters	3	0.43948	0.035	0.18	1.7378E+06
4	Geometry (A1)	4				
5	P1 - H	5	2.6	0.015	0.16	5.0611E+06
6	P2 - r					
7	P3 - R					
8	Output Parameters					
9	Study (B1)					
10	P4 - E-field grading ring Calculated maximum					
11	Min-Max Search					
12	Refinement					
13	Refinement Points					
14	Quality					
15	Goodness Of Fit					
16	Verification Points					
17	Response Points					

รูปที่ 6.13 การหาค่าต่ำสุด และสูงสุดของพารามิเตอร์ขาออกด้วยโมดูล Response surface

รูปที่ 6.14(ก) และ 6.14(ข) แสดงผลการตอบสนองผลการตอบสนองของพารามิเตอร์เข้าต่อพารามิเตอร์ขาออก  $E_{\max}$  . ในรูปเป็นตัวอย่างของผลของพารามิเตอร์ H ต่อค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดในรูปแบบกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ.



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.14 การหาผลการตอบสนองของพารามิเตอร์เข้าต่อสนามไฟฟ้าสูงสุด

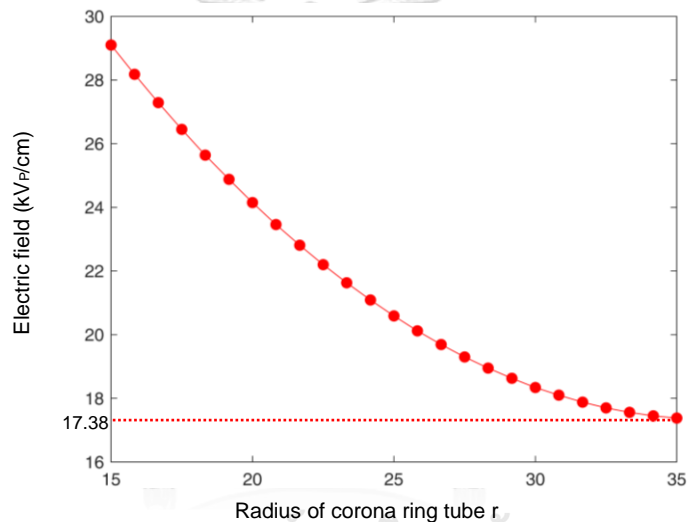
(ก) แบบ 2 มิติ

(ข) แบบ 3 มิติ

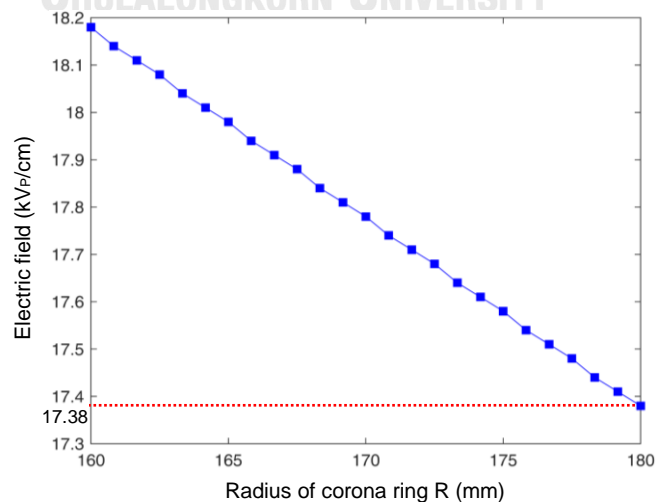
## 6.2 ผลการจำลองปรับพารามิเตอร์วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า

### 6.2.1 ผลของพารามิเตอร์ต่อสนามไฟฟ้าสูงสุด

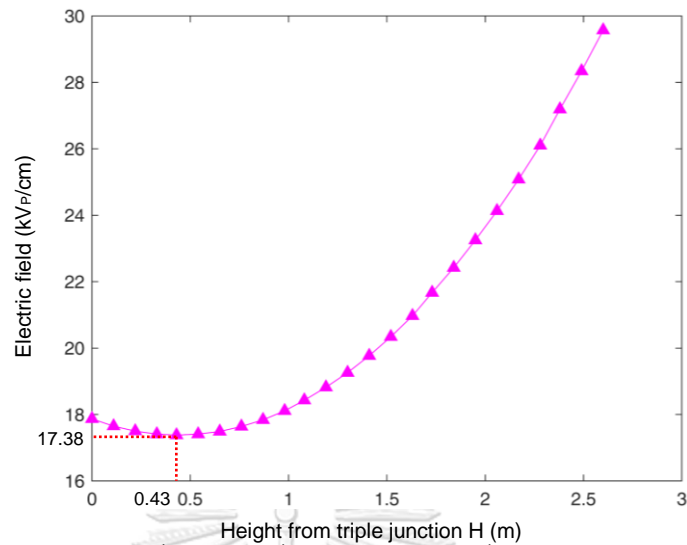
รูปที่ 6.15 ถึง 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแท่งกับพารามิเตอร์  $r$ ,  $R$  และ  $H$  ตามลำดับ. จากรูปทั้งสาม เราพบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำสุดเป็นค่าเดียวกันอยู่ที่ประมาณ 17.38 kV/cm. รูปที่ 6.15 แสดงแนวโน้มค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรพารามิเตอร์  $r$ . ค่าสนามไฟฟ้าลดลงประมาณ 40% ในลักษณะเส้นโค้ง. รูปที่ 6.16 แสดงแนวโน้มค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรค่าพารามิเตอร์  $R$ . ค่าสนามไฟฟ้าลดลงประมาณ 5% ในอัตราคงที่เป็นเส้นตรง. รูปที่ 6.17 แสดงแนวโน้มค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรพารามิเตอร์  $H$ . ค่าสนามไฟฟ้าลดลงอยู่ที่จุดต่ำสุดของเส้นโค้ง. จากนั้น ค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากระยะทางที่ห่างออกไปจากรอยต่อสามทาง.



รูปที่ 6.15 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า  $r$  ขณะที่  $R = 180$  mm และ  $H = 0.43$  m

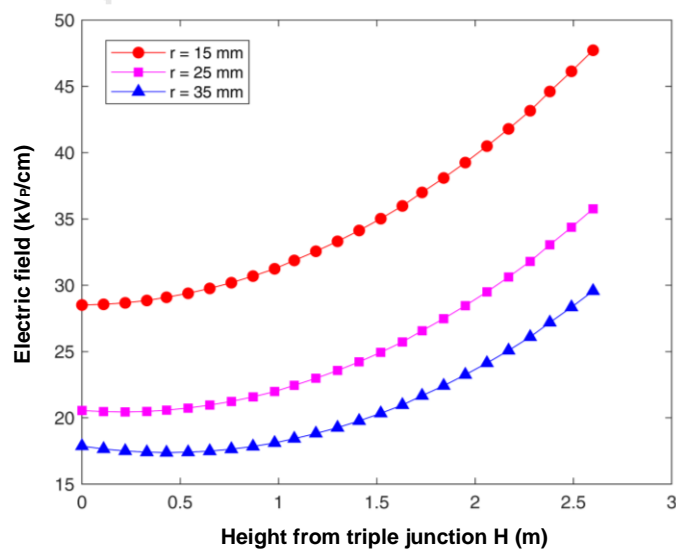


รูปที่ 6.16 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า  $R$  ขณะที่  $r = 35$  mm และ  $H = 0.43$  m

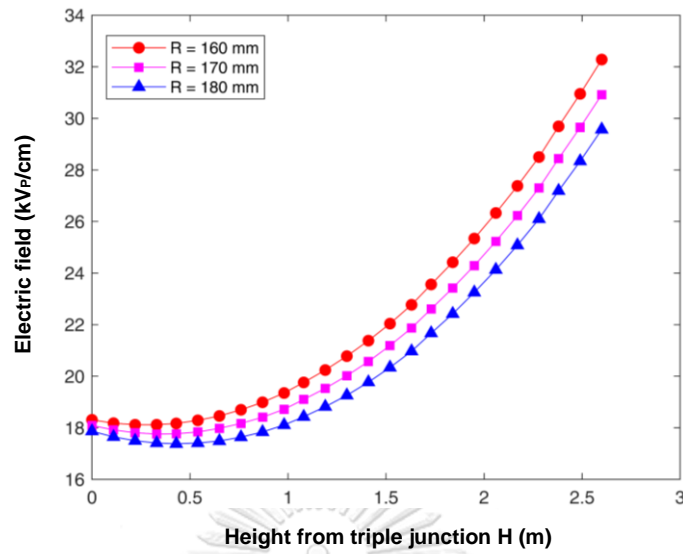


รูปที่ 6.17 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า H ขณะที่  $R = 180$  mm และ  $H = 0.43$  m

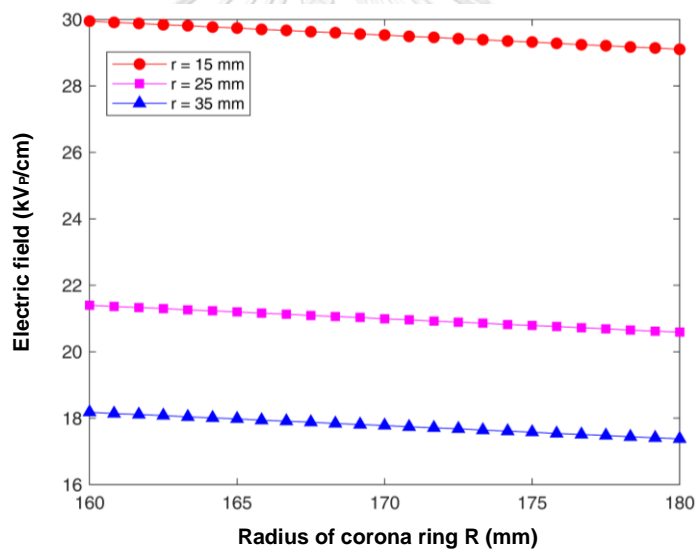
รูปที่ 6.18 ถึง 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าเมื่อแปรพารามิเตอร์หนึ่ง เทียบกับพารามิเตอร์คงที่. รูปที่ 6.18 แสดงค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรค่า H ที่  $r$  เท่ากับ 15, 25, 35 mm. จากรูป ค่าสนามไฟฟ้าลดลงพอสมควรจาก  $r$  เท่ากับ 15 เป็น  $r$  เท่ากับ 35 mm. รูปที่ 6.19 แสดงค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรค่า H ที่  $R$  เท่ากับ 160, 170, 180 mm. เราสามารถเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าระหว่างกราฟทั้ง 3 เส้นไม่มีความแตกต่างกันมาก. ในรูปที่ 6.20 ค่าสนามไฟฟ้าเมื่อแปรค่า  $R$  ที่  $r$  เท่ากับ 15, 25, 35 mm. ค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละเส้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก.



รูปที่ 6.18 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า H ที่  $r$  เท่ากับ 15, 25 และ 35 mm



รูปที่ 6.19 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า H ที่ R เท่ากับ 160, 170 และ 180 mm



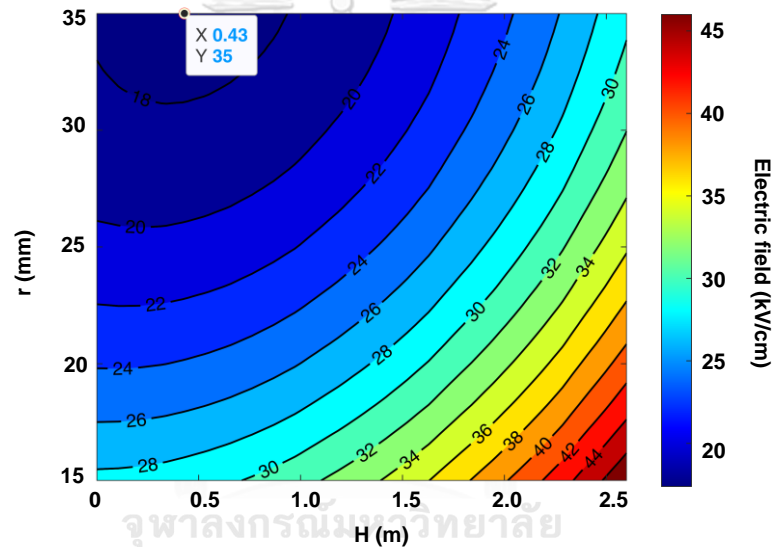
รูปที่ 6.20 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วงแหวนเมื่อแปรค่า R ที่ r เท่ากับ 15, 25 และ 35 mm

จากผลลัพธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เราสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้าคือพารามิเตอร์ H เท่ากับ 0.43 m, พารามิเตอร์ r เท่ากับ 35 mm และ พารามิเตอร์ R เท่ากับ 180 mm.

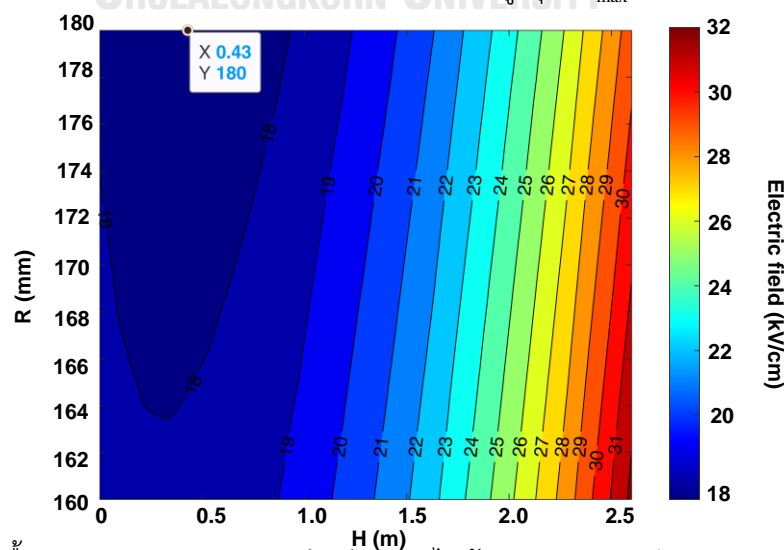


### 6.2.2 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสนามไฟฟ้าสูงสุด

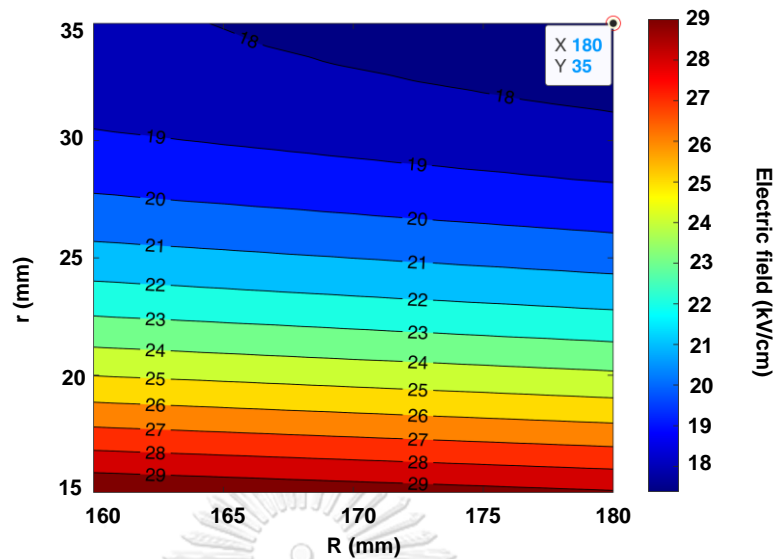
ผู้วิจัยศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า. รูปที่ 6.21 ถึง 6.23 แสดงพื้นผิวการตอบสนองแบบ 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  และพารามิเตอร์คู่. รูปที่ 6.21 และ รูปที่ 6.22 แสดงพื้นผิวตอบสนองค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ระหว่างพารามิเตอร์ H และ r, R ตามลำดับ. จากรูปทั้งสอง เราเห็นได้ว่าเส้นเค้าโครงค่า r มีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าเส้นเค้าโครงค่า R. รูปที่ 6.23 แสดงพื้นผิวตอบสนองค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ระหว่างพารามิเตอร์ R และ r. เส้นเค้าโครงค่าเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าสองรูปแรก. เราสามารถเห็นได้ว่าอิทธิพลของการปรับพารามิเตอร์ r และ H มีผลต่อการลดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ที่วงแหวนมากกว่าพารามิเตอร์ R. เมื่อเราปรับขนาดรัศมี r และ R เพิ่ม และให้พารามิเตอร์ H คงที่.



รูปที่ 6.21 พื้นผิวตอบสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  กับพารามิเตอร์ H และ r



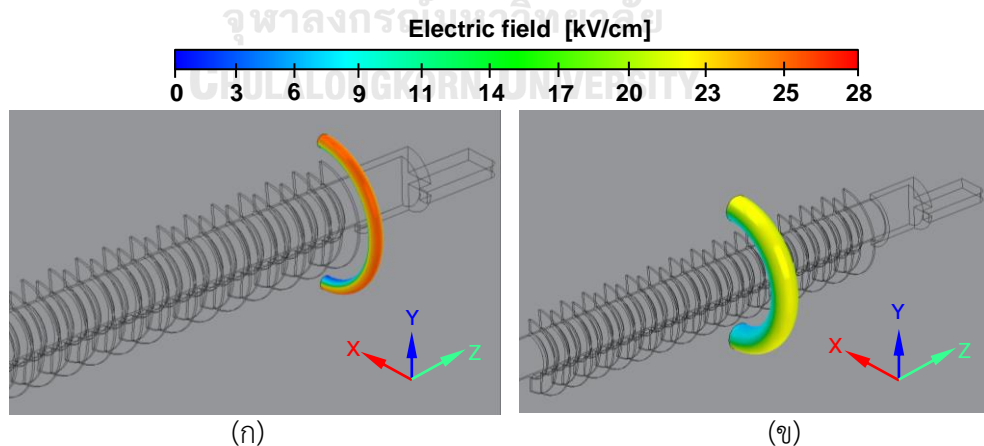
รูปที่ 6.22 พื้นผิวตอบสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  กับพารามิเตอร์ H และ R



รูปที่ 6.23 พื้นผิวดอปสนอง 2 มิติระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  กับพารามิเตอร์ R และ r

### 6.2.3 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า

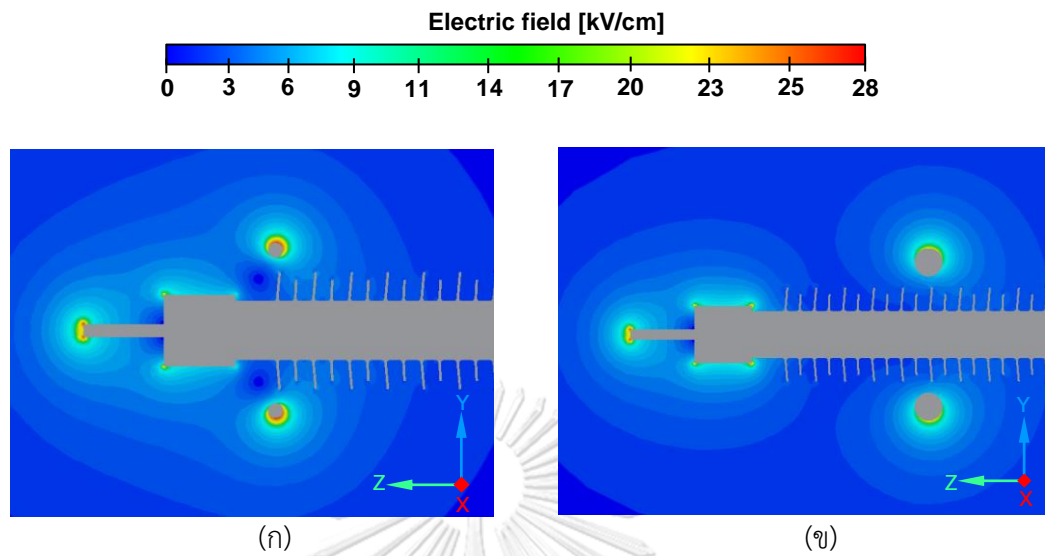
รูปที่ 6.24 และ 6.25 แสดงผลเปรียบเทียบการกระจายตัวสนามไฟฟ้าก่อนปรับปรุงพารามิเตอร์ และหลังปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า. จากรูปทั้งสอง เราเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าลดลงจาก 28 kV/cm เป็น 17 kV/cm. ตำแหน่งของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าหลังจากปรับปรุงพารามิเตอร์เลื่อนห่างจากตำแหน่งเดิมประมาณ 0.35 m. การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ภายใต้สถานการณ์จำลองที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นมาเท่านั้น. ทั้งนี้เมื่อระยะห่างของวงแหวนจากบริเวณรอยต่อสามทางเพิ่มขึ้นระยะอาร์ครระหว่างฝั่งแรงสูง และฝั่งกราวด์สั้นลงตามไปด้วย.



รูปที่ 6.24 ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณผิววงแหวนของฉนวนชนิดแห้ง

(ก) ก่อนปรับปรุง (  $r=15\text{mm}$ ,  $R=160\text{mm}$ ,  $H=0.08\text{ m}$  )

(ข) หลังปรับปรุง (  $r=35\text{mm}$ ,  $R=180\text{mm}$ ,  $H=0.43\text{ m}$  )



รูปที่ 6.25 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณอากาศรอบ ๆ ลูกถ้วยฉนวนชนิดแห้ง

(ก) ก่อนปรับปรุง (  $r=15\text{mm}$ ,  $R=160\text{mm}$ ,  $H=0.08\text{ m}$  )

(ข) หลังปรับปรุง (  $r=35\text{mm}$ ,  $R=180\text{mm}$ ,  $H=0.43\text{ m}$  )

## บทที่ 7

### สรุปผลการจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV เพื่อใช้งานในพื้นที่จำกัดของ กฟผ. โดยใช้โปรแกรมโมดูลเอลิเมนต์ ANSYS Electronics Desktop (Maxwell)<sup>®</sup> เป็นเครื่องมือในการคำนวณ. การศึกษานี้ผู้วิจัยแบ่งการจำลองเป็นรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ.

แบบจำลอง 2 มิติถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ. แบบจำลองที่ 1 ถูกใช้เพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยวิธีวงจรร้อนทับ. จากผลการจำลอง ค่าสนามไฟฟ้า ณ ความสูง  $H_1 = 1$  m ที่ขอบของระบบโครงข่ายไฟฟ้าทั้งสองข้างมีค่าเท่ากับ  $0.70$  kV<sub>rms</sub>/m และ  $0.69$  kV<sub>rms</sub>/m. ค่าสนามไฟฟ้างกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์ของ กฟผ. ( $2$  kV<sub>rms</sub>/m) และเกณฑ์ของสถาบัน ICNIRP ( $5$  kV<sub>rms</sub>/m) สำหรับสาธารณะ[13]. ค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูงอื่นๆ  $H_2$ ,  $H_3$ , และ  $H_4$  ถูกคำนวณเพื่อกรณีมีโครงสร้าง หรืออุปกรณ์มาติดตั้งใกล้กับแนวสายส่งไฟฟ้าในอนาคต. แบบจำลองที่ 2 ถูกใช้คำนวณศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยเพื่อนำมาเป็นเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติ. ในที่นี้ ผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าเฟส 3 เฟสโดยแบบแยกโดเมนการคำนวณ.

แบบจำลอง 3 มิติถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบ. แบบจำลองที่ 1 ถูกใช้เพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 2 มิติ, ค่าจากวิธีเงาประจุ. ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง 2 มิติ. แต่ค่าสนามไฟฟ้าของแบบจำลอง 3 มิติที่บริเวณกลางเสาส่งมีความแม่นยำน้อยกว่าแบบจำลอง 2 มิติ. กราฟของแบบจำลอง 3 มิติมีค่าไม่ต่อเนื่อง และไม่ราบเรียบมากกว่า. แบบจำลองที่ 2 ถูกใช้เพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำแรงสูงที่เฟส A, B และ C เปรียบเทียบกัน. ผู้วิจัยพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่อุปกรณ์แรงสูงได้แก่ วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึง, วงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแบ่ง, วงแหวนโคโรนา. ผลการจำลองพบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟส B เพราะว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณแขนเสาส่งฉนวนเฟส B มีค่าห่างจากค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ระนาบด้านบน และด้านล่างของโดเมนการคำนวณ เมื่อเทียบในระยะทางที่เท่ากัน. แบบจำลองที่ 3 ถูกใช้เพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนทั้งสองชนิดที่เฟส A, B และ C. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนที่เฟส B เช่นกัน. ผู้วิจัยสนใจค่าสนามไฟฟ้า ณ บริเวณครีบนวนใกล้กับตัวนำแรงสูงเท่านั้น เพราะว่ามีโอกาสดังกล่าวมีโอกาสเกิดโคโรนาดีสชาร์จได้สูง. ที่เฟส B ค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนชนิดรับแรงดึง และชนิดแบ่งมีค่าเท่ากับ  $3.08$  kV<sub>p</sub>/cm,  $2.14$  kV<sub>p</sub>/cm ตามลำดับ. ค่าสนามไฟฟ้าที่ฉนวนชนิดรับแรงดึงสูงกว่าฉนวนชนิดแบ่งอยู่ประมาณ 30 %. อันเนื่องมาจากขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ

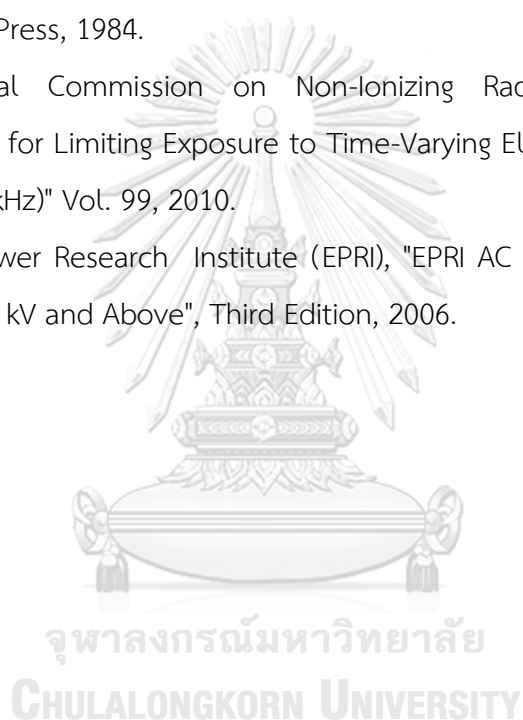
ของวงแหวนเกลีสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึงมีขนาดเล็กกว่าชนิดแท่ง. นอกจากนี้ ผู้วิจัยทดลองปรับพารามิเตอร์รัศมีที่  $r$  ของวงแหวนชนิดรับแรงดึงเพิ่มจาก 12.5 mm. ถึง 22.5 mm. ผู้วิจัยพบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ. ผู้วิจัยจึงศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์วงแหวนเกลีสนามไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า. อย่างไรก็ตาม ค่าสนามไฟฟ้าที่วงแหวนเกลีสนามไฟฟ้า และฉนวนยังคงต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนดไว้ที่ 21 kV<sub>p</sub>/cm และ 6.4 kV<sub>p</sub>/cm ในสภาวะอากาศแห้ง และไม่มีสิ่งเปราะเปื้อนที่ผิว [14].

การจำลองปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้านั้น ผู้วิจัยเลือกจำลองเพียงแค่ฉนวนชนิดแท่งเท่านั้นโดยใช้โปรแกรม ANSYS Discovery AIM ร่วมกับ โมดูลพื้นผิวตอบสนอง Response Surface Optimization. หลังปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  ลดลงประมาณ 40 % จาก 28 kV<sub>p</sub>/cm เป็น 17 kV<sub>p</sub>/cm. ค่าพารามิเตอร์  $r$  และ  $R$  ที่เหมาะสมขนาดเท่ากับ 35 mm และ 180 mm ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของขอบเขต. ค่าพารามิเตอร์  $H$  ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.43 m ซึ่งเป็นระยะทางที่ห่างจากรอยต่อสามทางออกมาฝั่งใกล้กราวด์. เมื่อระยะห่างของวงแหวนจากบริเวณรอยต่อสามทางเพิ่มขึ้น. เป็นเหตุให้ระยะอาร์คระหว่างฝั่งแรงสูง และฝั่งกราวด์ลดลงตามไปด้วย. นอกจากนี้ ผู้วิจัยศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์แต่ละชนิดต่อการลดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จากกราฟพื้นผิวตอบสนองแบบ 2 มิติ. อิทธิพลของพารามิเตอร์  $r$  และ  $H$  ส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าพารามิเตอร์  $R$ . เมื่อเราปรับขนาดรัศมี  $r$  และ  $R$  เพิ่มและให้พารามิเตอร์  $H$  คงที่.

### บรรณานุกรม

- [1] B. M' hamdi, M. Teguer, A. Mekhaldi, "Optimal Design of Corona Ring on HV Composite Insulator Using PSO Approach with Dynamic Population Size", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, pp. 1048-1057, 2016.
- [2] X. Yang, N. Li, Z. Peng, J. Liao, Q. Wang, "Potential Distribution Computation and Structure Optimization for Composite Cross-Arms in 750 kV AC Transmission Line", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, pp. 1660-1669, 2014.
- [3] R. Anbarasan, S. Usa, "Electrical Field Computation of Polymeric Insulator Using Reduced Dimension Modeling", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, pp. 739-746, 2015.
- [4] D. Stefanini, J .M. Seifert, M. Clemens, D. Weida, "Three Dimensional FEM Electrical Field Calculations for EHV Composite Insulator Strings". IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, 2010.
- [5] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi, M. Teguar, "Improvement of Electric Field Distribution by Integrating Composite Insulators in a 400 kV AC Double Circuit Line in Algeria", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, pp. 3549-3558, 2017.
- [6] S. Ilhan, A. Ozdemir, "380 kV Corona Ring Optimization for AC Voltages", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.18, pp. 408-417, 2011.
- [7] T. Doshi, R .S. Gorur, J. Hunt, "Electric Field Computation of Composite Line Insulators up to 1200 kV AC", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, pp. 861-867, 2011.
- [8] F. Aouabed, A. Bayadi, A. E. Rahmani, R. Boudissa, "Finite Element Modelling of Electric Field and Voltage Distribution on a Silicone Insulating Surface Covered with Water Droplets", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, pp. 413-420, 2018.

- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (Finite Element Method in Engineering). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560.
- [10] William H. Hayt, J.R., John A. Buck, "Engineering Electromagnetic", Ninth Edition. McGrawHill Education, 2017.
- [11] สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Finite Element Methods and Mesh Triangulation). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560.
- [12] E. Kuffle, W.S. Zaegl, "High Voltage Engineering Fundamentals", First Edition. Pergamon Press, 1984.
- [13] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)" Vol. 99, 2010.
- [14] Electric Power Research Institute (EPRI), "EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above", Third Edition, 2006.

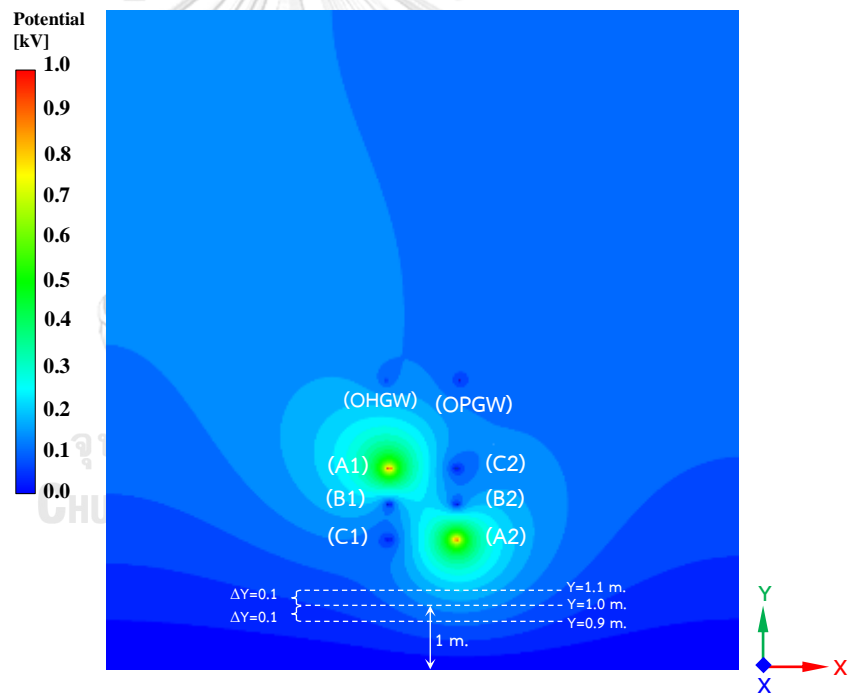


## ภาคผนวก ก

### ขั้นตอนนำค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรม ANSYS Electronics Desktop (Maxwell)<sup>®</sup>

ขั้นตอนการนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่เราต้องการทราบ ณ จุดใด ๆ ออกจากโปรแกรม ANSYS Electronics Desktop (Maxwell)<sup>®</sup> เพื่อนำไปคิดรวมแบบหลักการซ้อนทับในแต่ละรูปแบบสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

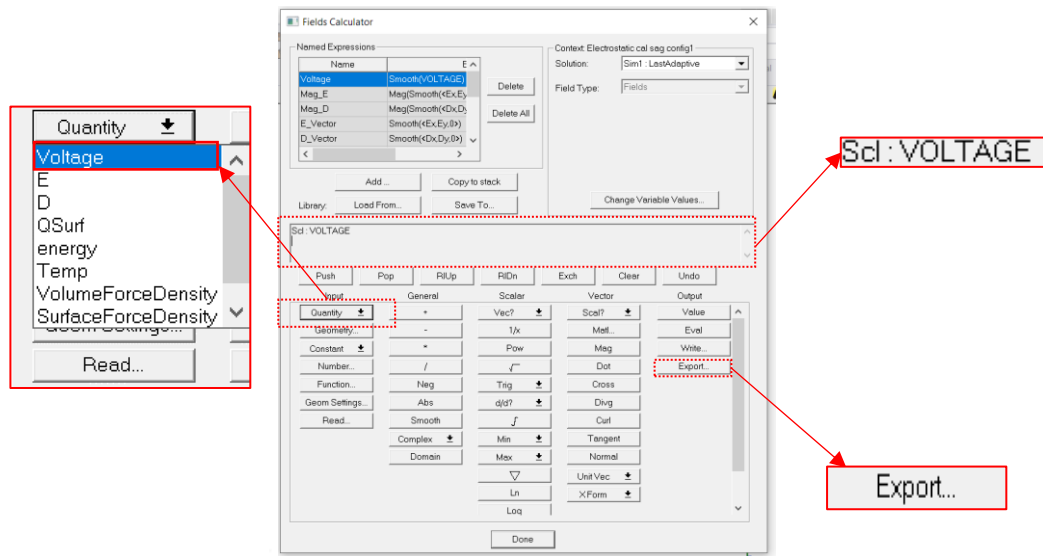
**ขั้นตอนที่ 1** เมื่อเราต้องการทราบค่าศักย์ไฟฟ้าทุกจุดในแนวแกน X และ Y ของแบบจำลองในรูปที่ ก.1. เราต้องทราบค่าในแนวแกน X ทั้งหมดของเส้น Y=1.1 Y=1.0 และ Y=0.9. จากนั้นเรานำค่าออกมาเป็นกริดเพื่อทำการหาผลต่างระหว่างศักย์สองจุดส่วนด้วยระยะห่างระหว่างจุด.



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการทราบค่า

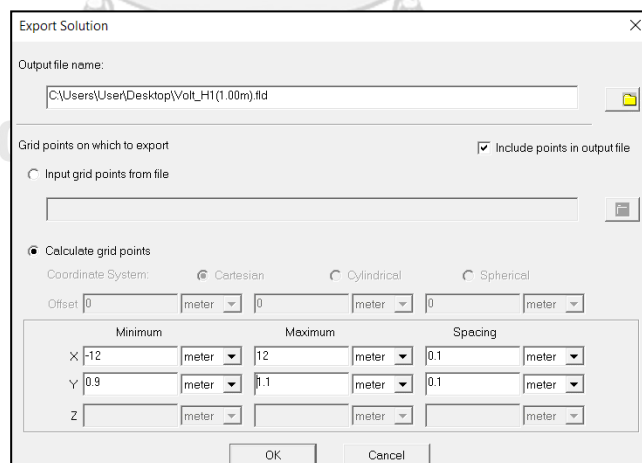
**ขั้นตอนที่ 2** ผู้วิจัยคลิกที่หน้าต่าง “GUI Fields Calculator” แสดงในรูปที่ ก.2. จากนั้นผู้วิจัยเลือกที่แถบ Quality และเลือกเป็น “Voltage”. จากนั้น เราสามารถเห็นคำสั่งขึ้นใน work space ว่า “Scl : VOLTAGE”. และ ผู้วิจัยเลือกที่ปุ่ม “Export” เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป.





รูปที่ ก.2 หน้าต่าง GUI Fields Calculator

ขั้นตอนที่ 3 ในรูปที่ ก.3 แสดงหน้าต่าง “Export Solution”. จากนั้น เราตั้งชื่อไฟล์ที่ต้องการเก็บข้อมูลในสกุล (.fld) เป็น txt.file. เราเลือกที่ “Calculate grid point” เพื่อนำค่าศักย์ออกมาตามจุดกริดที่ต้องการทราบค่า. ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการทราบค่าศักย์ในแนวแกน X ตั้งแต่ -12 ม. ถึง 12 ม. ที่ความสูง Y = 0.9 ถึง Y = 1.1. เราต้องกรอกค่า X ในช่อง Minimum และ Maximum เท่ากับ -12 และ 12. ผู้วิจัยกำหนดระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ 0.1 m. ที่ช่อง Spacing.



รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Export solution สำหรับนำค่าศักย์ไฟฟ้าออกมาคำนวณ

**ขั้นตอนที่ 4** ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ถูกดึงค่าออกมาแล้วไฟล์ที่ได้มีสกุลเป็น txt.file ที่ค่า X และ Y จะห่างทีละ 0.1m. รูปที่ ก.4 ประกอบด้วยชื่อคอลัมน์พิกัด X, Y, Z ใน 3 คอลัมน์แรก และค่า ศักย์ไฟฟ้าชื่อ Scalar data "VOLTAGE" ในคอลัมน์สุดท้ายในหน่วย V.

```

Volt_H1(1.00m) - Notepad
File Edit Format View Help
Grid Output Min: [-12meter 0.9meter 0meter] Max: [12meter 1.1meter 0meter] Grid Size: [0.1meter 0.1meter 0meter]
X, Y, Z, Scalar data "VOLTAGE"
+1.2000000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.2402358501052202e+00
-1.2000000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.1547441940457546e+00
-1.2000000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0068903627437653e+01
-1.1900000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.2714227982512494e+00
-1.1900000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.1893326402973923e+00
-1.1900000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0106902575256592e+01
-1.1800000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.3026713249868061e+00
-1.1800000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.2242339476306389e+00
-1.1800000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0145284881197004e+01
-1.1699999999999999e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.336434451181480e+00
-1.1699999999999999e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.2595502091581370e+00
-1.1699999999999999e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0184106885502656e+01
-1.1600000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.3668036392046385e+00
-1.1600000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.2352729301925459e+00
-1.1600000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0223370496142657e+01
-1.1500000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.3993789072583578e+00
-1.1500000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.3314017251941817e+00
-1.1500000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0263075170117011e+01
-1.1400000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.4322997594506859e+00
-1.1400000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.3679326295158312e+00
-1.1400000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0303222530425728e+01
-1.1300000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.4654811519538935e+00
-1.1300000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.4048182312023716e+00
-1.1300000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0343804958383508e+01
-1.1199999999999999e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.4990892950110926e+00
-1.1199999999999999e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.442178874467771e+00
-1.1199999999999999e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0384851700259919e+01
-1.1100000000000000e+01 9.0000000000000000e-01 0.0000000000000000e+00 8.5330701497477612e+00
-1.1100000000000000e+01 1.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 9.4799180363059037e+00
-1.1100000000000000e+01 1.1000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 1.0423233333333333e+01
Ln 11, Col 94 100% Unix (LF) UTF-8

```

รูปที่ ก.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ถูกดึงค่าออกมาจากโปรแกรม

## ภาคผนวก ข

## ผลค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ผู้วิจัยคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง 2 มิติ, แบบจำลอง 3 มิติ, ค่าคำนวณด้วยวิธีเงาประจุ, และค่าผลสนามไฟฟ้าจากทางกฟผ. ค่าสนามไฟฟ้าถูกคำนวณตามตำแหน่งในแนวแกน X ห่างออกจากกึ่งกลางเสาข้างละ 12 m (ระยะขอบเขตเดินระบบโครงข่ายระบบไฟฟ้าเท่ากับ 24 m). ตารางที่ ข.1 ถึง ข.4 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าบนแนวขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ความสูง  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  และ  $H_4$  ตามลำดับ.

ตารางที่ ข.1 ค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ความสูง  $H_1 = 1$  m

Laterals distance from center [m]	Electric field [ $kV_{rms}/m$ ]			
	2D	3D	Image charge	EGAT
-12	0.69	0.70	0.81	0.80
-11	0.76	0.75	0.86	0.88
-10	0.82	0.82	0.92	0.95
-9	0.87	0.90	0.96	1.02
-8	0.90	0.91	0.98	1.06
-7	0.93	0.92	0.97	1.09
-6	0.93	0.93	0.95	1.10
-5	0.92	0.93	0.89	1.08
-4	0.90	0.90	0.85	1.04
-3	0.86	0.86	0.80	0.99
-2	0.82	0.83	0.77	0.94
-1	0.79	0.79	0.72	0.89
0	0.78	0.78	0.70	0.88
+1	0.79	0.78	0.72	0.89
+2	0.82	0.81	0.77	0.94
+3	0.86	0.83	0.80	0.99
+4	0.90	0.88	0.85	1.04
+5	0.92	0.91	0.89	1.08
+6	0.94	0.93	0.95	1.10
+7	0.93	0.92	0.97	1.09
+8	0.91	0.90	0.98	1.06
+9	0.87	0.85	0.96	1.02
+10	0.82	0.82	0.92	0.95
+11	0.76	0.76	0.86	0.88
+12	0.69	0.69	0.80	0.80

ตารางที่ ข.2 ค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ความสูง  $H_2 = 16.57$  m

Laterals distance from center [m]	Electric field [ $kV_{rms}/m$ ]			
	2D	3D	Image charge	EGAT
-12	1.72	1.71	2.10	1.96
-11	2.20	2.18	2.68	2.52
-10	2.87	2.90	3.48	3.30
-9	3.86	3.90	4.66	4.42
-8	5.41	5.43	6.46	6.18
-7	8.07	8.12	9.46	9.21
-6	13.04	13.20	14.92	14.91
-5	21.71	21.78	24.50	24.41
-4	30.08	30.92	34.14	31.85
-3	26.13	26.11	29.56	26.19
-2	16.65	16.77	19.06	16.19
-1	10.71	10.86	12.83	10.00
0	8.56	8.69	11.00	7.56
+1	10.71	10.69	12.83	10.00
+2	16.65	16.69	19.06	16.19
+3	26.12	26.26	29.56	26.19
+4	30.08	30.36	34.14	31.85
+5	21.71	21.83	24.50	24.41
+6	13.04	13.11	14.92	14.91
+7	8.07	8.07	9.46	9.21
+8	5.41	5.46	6.46	6.17
+9	3.86	3.88	4.66	4.42
+10	2.87	2.90	3.48	3.29
+11	2.19	2.20	2.68	2.52
+12	1.71	1.70	2.10	1.96

ตารางที่ ข.3 ค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ความสูง  $H_3 = 20.57$  m

Laterals distance from center [m]	Electric field [ $kV_{rms}/m$ ]			
	2D	3D	Image charge	EGAT
-12	1.73	1.84	1.98	1.95
-11	2.22	2.43	2.54	2.51
-10	2.90	3.09	3.30	3.29
-9	3.87	4.12	4.37	4.42
-8	5.34	5.57	5.95	6.19
-7	7.88	7.86	8.54	9.25
-6	12.78	12.78	13.43	14.97
-5	21.50	21.64	22.29	24.46
-4	29.70	30.06	30.97	31.89
-3	25.14	25.28	25.93	26.24
-2	15.04	15.16	15.31	16.24
-1	8.68	8.74	8.65	10.05
0	6.48	6.81	6.19	7.60
+1	8.68	9.38	8.65	10.05
+2	15.04	15.37	15.31	16.23
+3	25.14	25.37	25.93	26.23
+4	29.70	31.08	30.97	31.89
+5	21.49	23.17	22.29	24.46
+6	12.77	14.02	13.43	14.96
+7	7.87	8.41	8.54	9.25
+8	5.34	5.49	5.95	6.19
+9	3.87	3.83	4.37	4.42
+10	2.90	2.81	3.30	3.29
+11	2.22	2.18	2.54	2.51
+12	1.73	1.67	1.98	1.95

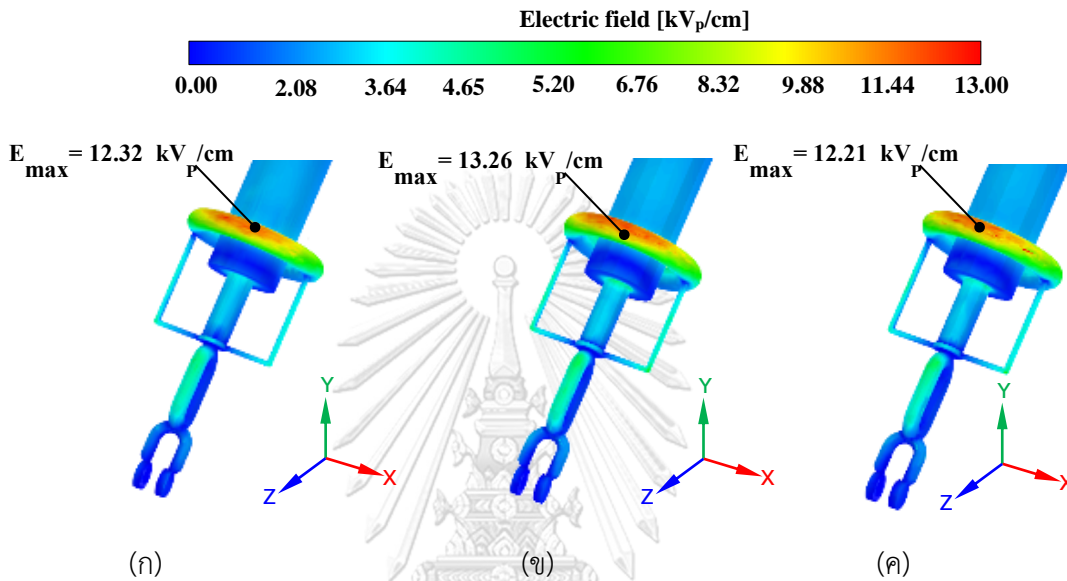
ตารางที่ ข.4 ค่าสนามไฟฟ้าบนขอบเขตเดินระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ความสูง  $H_4 = 24.57$  m

Laterals distance from center [m]	Electric field [ $kV_{rms}/m$ ]			
	2D	3D	Image charge	EGAT
-12	1.42	1.39	1.56	1.58
-11	1.79	1.87	1.94	1.98
-10	2.29	2.43	2.47	2.52
-9	3.02	3.30	3.22	3.28
-8	4.08	4.71	4.31	4.37
-7	5.72	6.84	5.99	5.97
-6	8.35	10.46	8.69	8.35
-5	12.45	16.15	13.01	11.54
-4	16.59	18.95	17.67	14.16
-3	16.16	13.74	17.23	13.89
-2	13.09	10.78	13.97	12.01
-1	11.00	9.87	11.83	10.59
0	10.33	9.84	11.14	10.10
+1	11.00	10.83	11.83	10.59
+2	13.09	13.36	13.97	12.02
+3	16.17	16.81	17.23	13.89
+4	16.60	16.37	17.67	14.17
+5	12.46	12.33	13.01	11.55
+6	8.36	8.24	8.69	8.35
+7	5.73	5.76	5.99	5.97
+8	4.08	4.24	4.31	4.37
+9	3.02	3.20	3.22	3.28
+10	2.29	2.49	2.47	2.52
+11	1.79	1.96	1.94	1.97
+12	1.41	1.60	1.55	1.58

ภาคผนวก ค

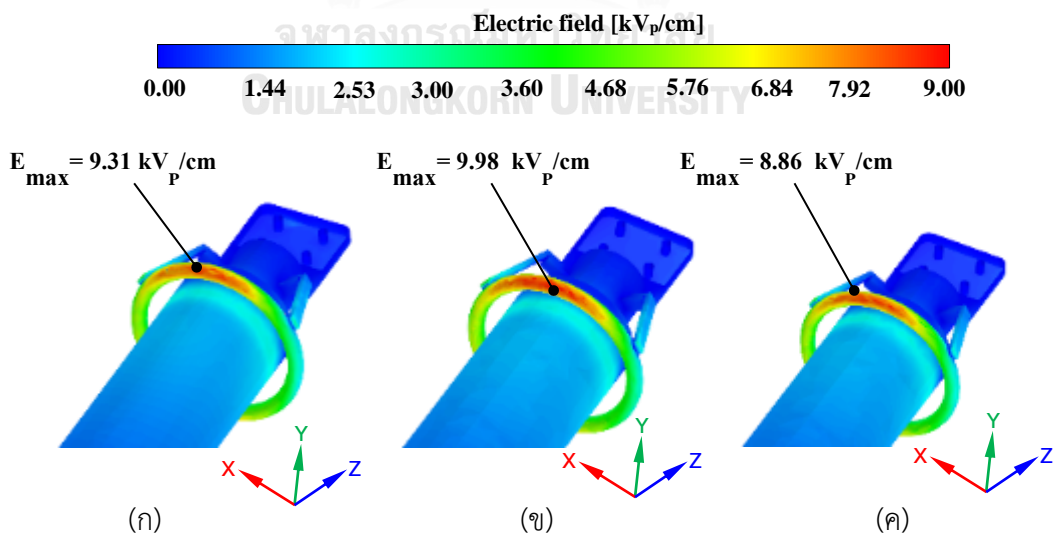
ค่าสนามไฟฟ้าของวงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้า และวงแหวนโคโรนาเฟส A, B, C

รูปที่ ค.1 ถึง ค.4 แสดงค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าของฉนวนทั้งสองชนิด และวงแหวนโคโรนา ณ เฟส A, B, และ C ตามลำดับ.



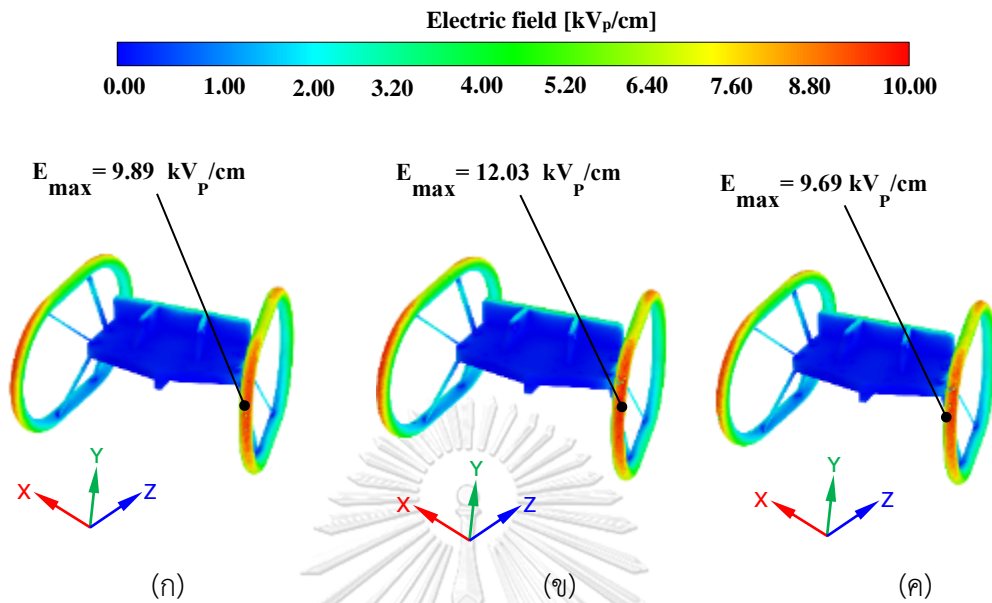
รูปที่ ค.1 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดรับแรงดึง

(ก) เฟส A                      (ข) เฟส B                      (ค) เฟส C



รูปที่ ค.2 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนเกลี่ยสนามไฟฟ้าชนิดแบ่ง

(ก) เฟส A                      (ข) เฟส B                      (ค) เฟส C



รูปที่ ค.3 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิววงแหวนโคโรนา

(ก) เฟส A

(ข) เฟส B

(ค) เฟส C

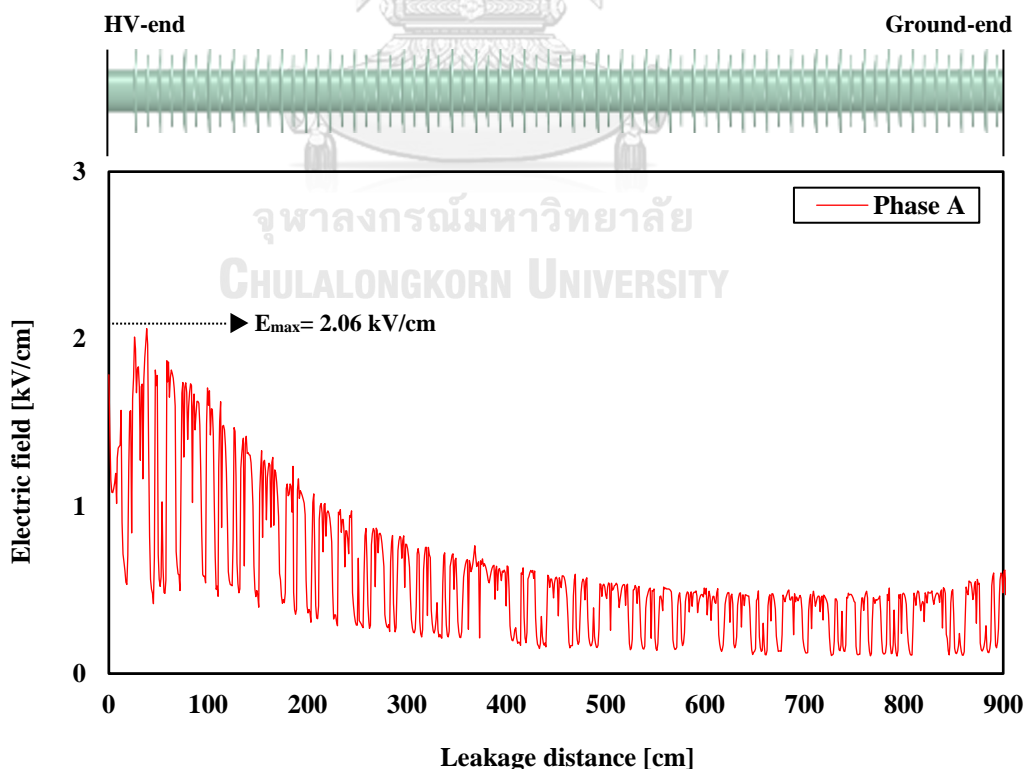


## ภาคผนวก ง

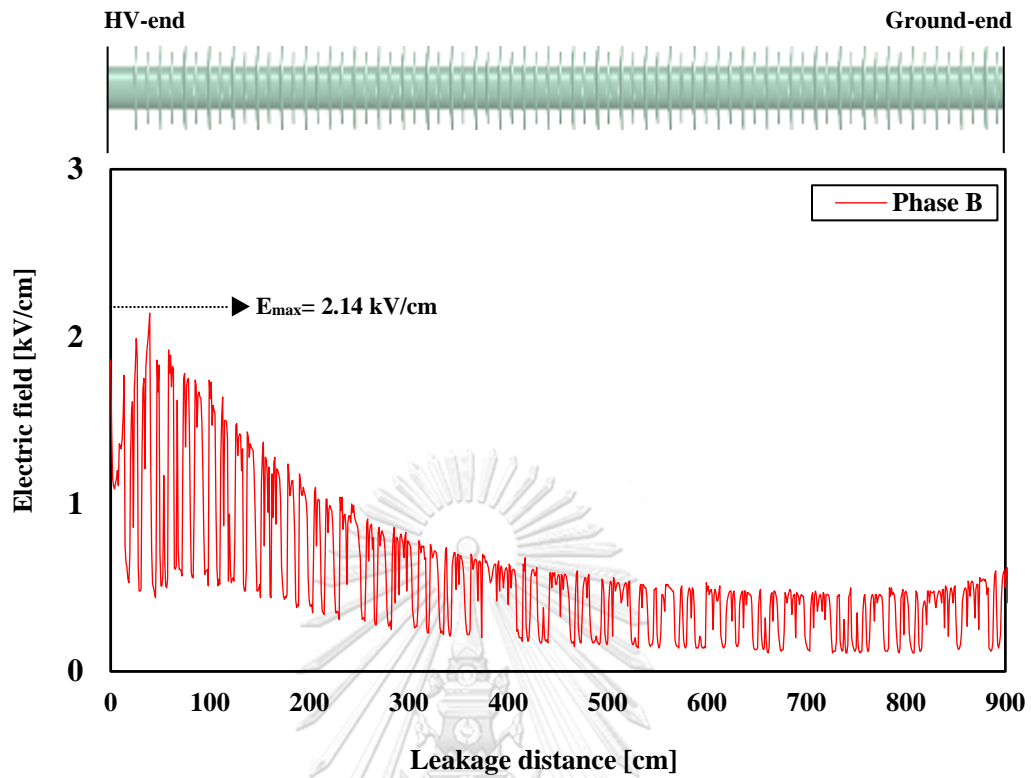
## ค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนพอลิเมอร์เฟส A, B, C

ผู้วิจัยวัดค่าสนามไฟฟ้าตามแนวระยะรั้วของฉนวน (Leakage distance) ทั้ง 2 ชนิด โดยวัดที่บริเวณอากาศเหนือฉนวนขึ้นมา 0.5 mm. สถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้า (Electric power research institute หรือ EPRI) ระบุว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ฉนวนชนิดพอลิเมอร์ควรมีค่าไม่เกิน  $4.5 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{cm}$  ( $6.4 \text{ kV}_p/\text{cm}$ ) [12].

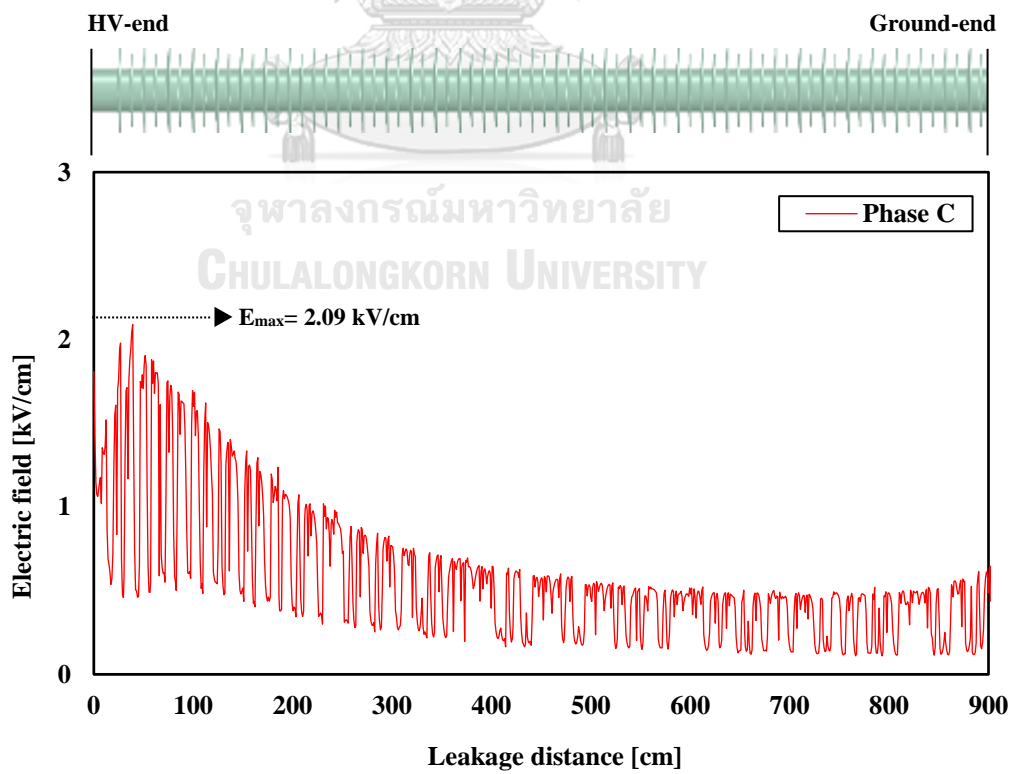
รูปที่ ง.1 ถึง ง.3 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าตามแนวระยะรั้วของฉนวนชนิดแท่งเฟส A, B และ C ตามลำดับ. รูปที่ ง.4 ถึง ง.6 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าตามแนวระยะรั้วของฉนวนชนิดรับแรงดึงเฟส A, B และ C. จากรูป เราสามารถเห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าระหว่างเฟส A, B, C ของฉนวนไม่มีความแตกต่างกันมากนัก. แต่ในกรณีที่เรารเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าระหว่างฉนวนทั้ง 2 ชนิด เราพบว่าค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้แรงสูงของฉนวนชนิดรับแรงดึงมีค่าสูงกว่าฉนวนชนิดแท่งอยู่ประมาณ 30%. เป็นผลมาจากขนาดดวงแหวนป้องกันโคโรนาของลูกถ้วยทั้งสองที่มีขนาดต่างกัน รวมทั้งจำนวนครีบของฉนวนอีกด้วย.



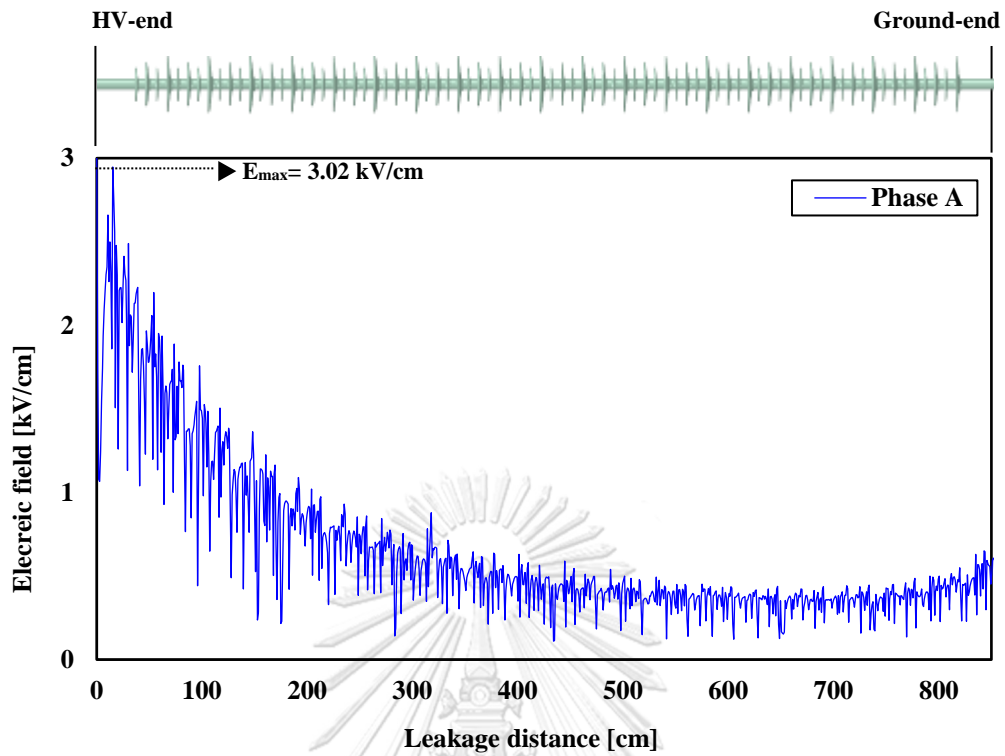
รูปที่ ง.1 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนฉนวนชนิดแท่งจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส A



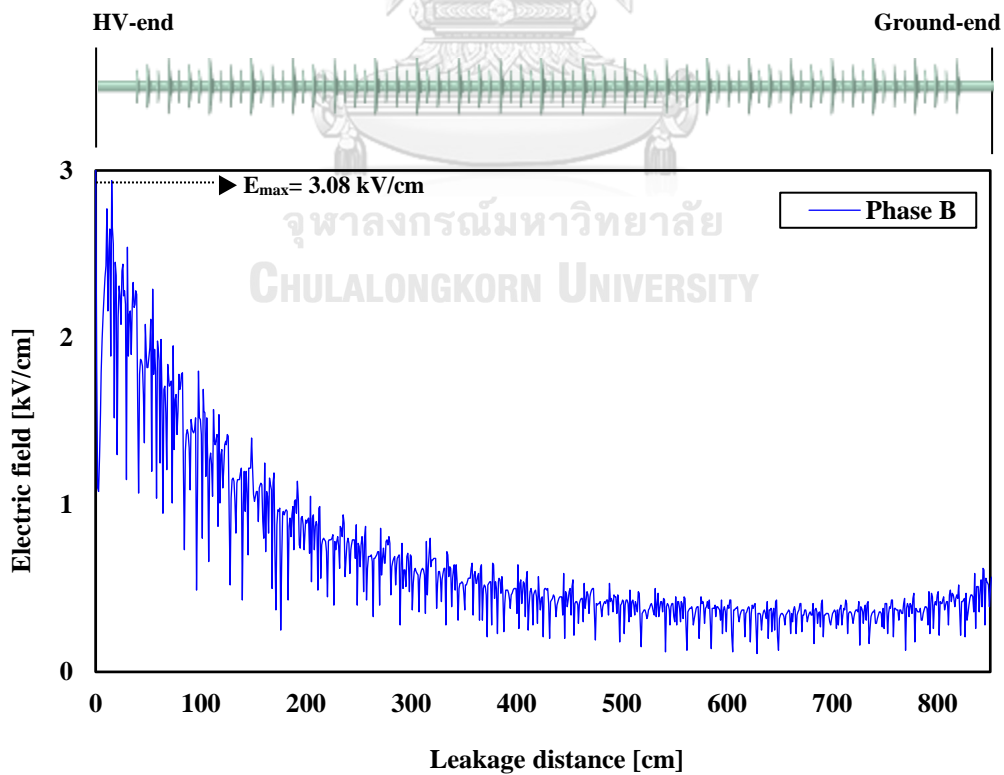
รูปที่ ๓.2 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนพิวฉนวนชนิดแห้งจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B



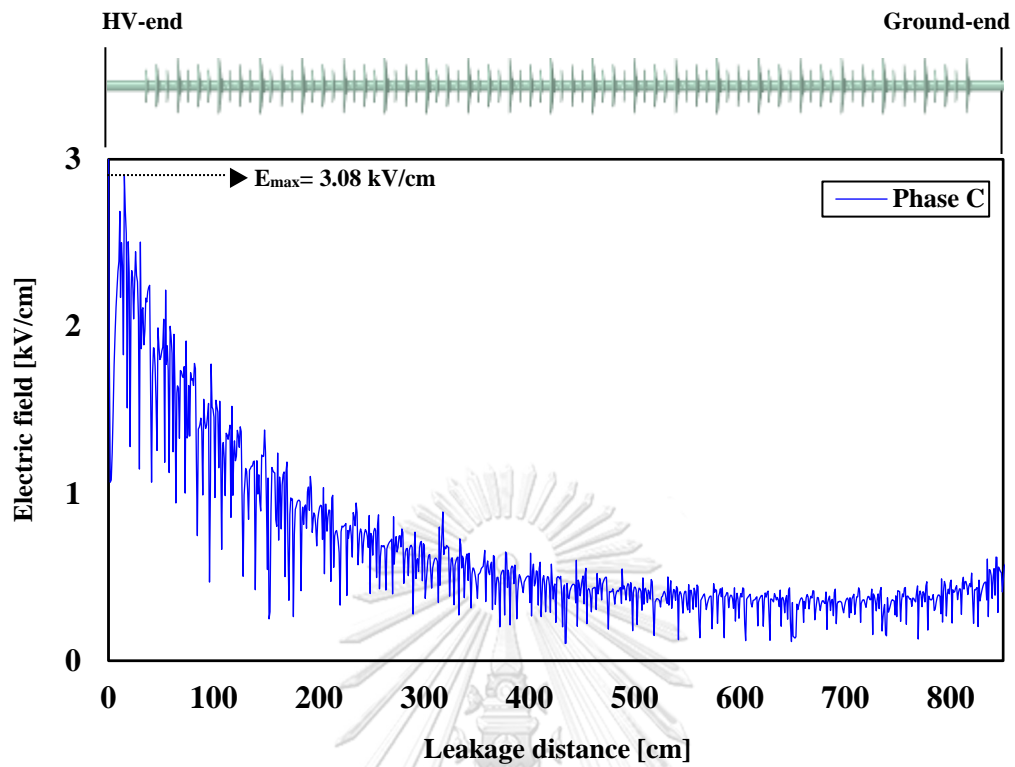
รูปที่ ๓.3 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนพิวฉนวนชนิดแห้งจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส C



รูปที่ ๔.4 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส A



รูปที่ ๔.5 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส B

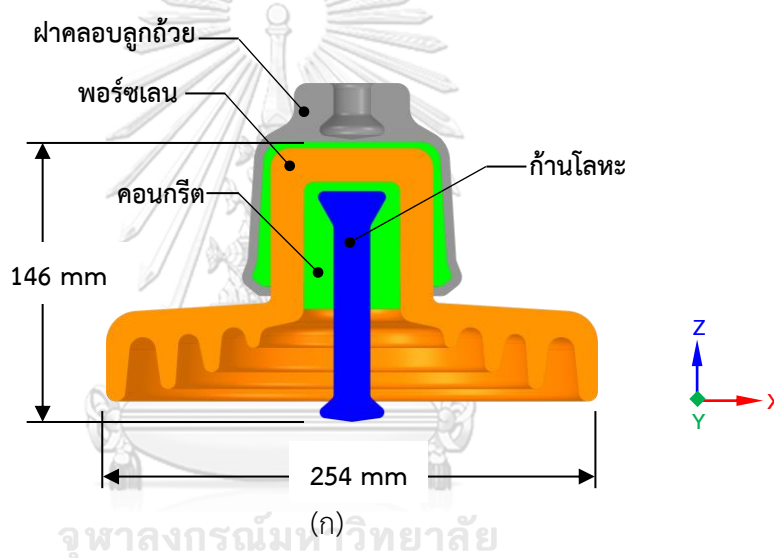


รูปที่ ง.6 ค่าสนามไฟฟ้าตามระยะรั้วบนผิวฉนวนชนิดรับแรงดึงจากปลายฝั่งแรงสูงถึงกราวด์เฟส C

## ภาคผนวก จ

## ผลค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่ง 115 kV

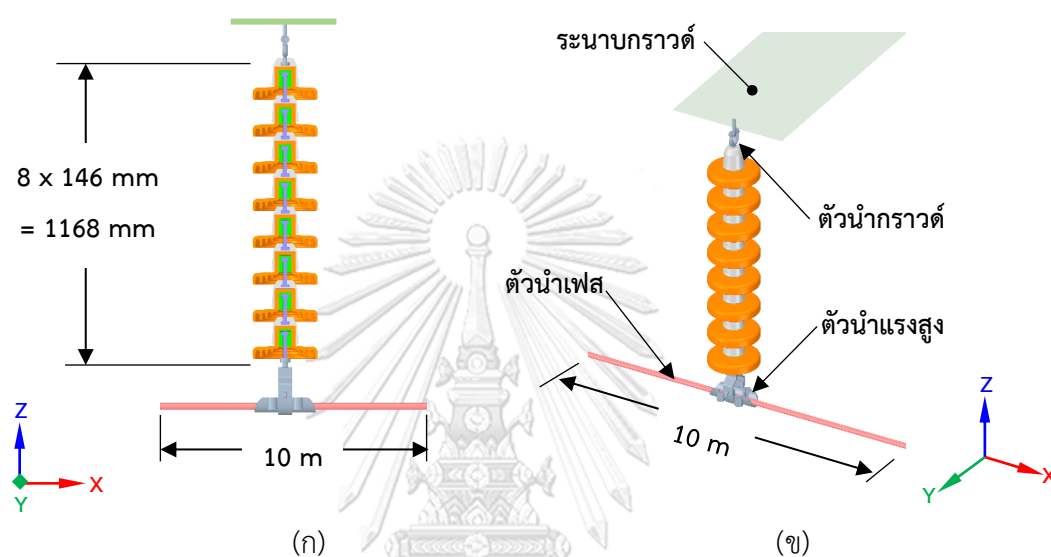
เนื่องจาก กฟผ. ยกกระต๊บแรงดันจากระบบเดิม 115 kV เป็น 230 kV ทำให้พารามิเตอร์ของเสาส่งไฟฟ้า อาทิเช่น ความสูงเสาส่ง, จำนวนตัวนำ, และลูกถ้วยฉนวนเปลี่ยนไป. ผู้วิจัยจึงคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในระบบ 115 kV เพื่อเป็นการเปรียบเทียบว่าเมื่อปรับระดับแรงดันเพิ่มขึ้นแล้วค่าสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปจากระบบเดิมเท่าใด. รูปที่ ง.1 แสดงรายละเอียดเรขาคณิตที่จำลองจากลูกถ้วยแขวนชนิดพอร์ชเลน ANSI 52-3 ที่ใช้ในระบบ 115 kV. ขนาดความกว้างของพอร์ชเลนเท่ากับ 254 mm. ระยะความสูงระหว่างขาทำนโลหะถึงช่องเสียบขาทำนโลหะเท่ากับ 146 mm.



(ข)

รูปที่ จ.1 (ก) เรขาคณิตของลูกถ้วย ANSI 52-3 (ข) ภาคตัดขวางของลูกถ้วยจริง

รูปที่ จ.2(ก) แสดงเรขาคณิตของพวงลูกถ้วยพอร์ชเลนที่นำมาประกอบกันจำนวน 8 ลูก. ระยะของลูกถ้วยเมื่อนำมาประกอบกันแล้วมีความยาวของพวงเท่ากับ 1168 mm. รูปที่ จ.2(ข) แสดงส่วนประกอบแบบจำลองลูกถ้วยที่ใช้คำนวณในโปรแกรม ANSYS Electronics Desktop (Maxwell)<sup>®</sup>. ความยาวของตัวนำเฟสเท่ากับ 10 m (ระยะเดียวกับระบบ 230 kV). ผู้วิจัยกำหนดให้ระนาบกราวด์แทนโครงสร้างเหล็กของเสา เพื่อลดรูปเรขาคณิตที่ใช้คำนวณ.

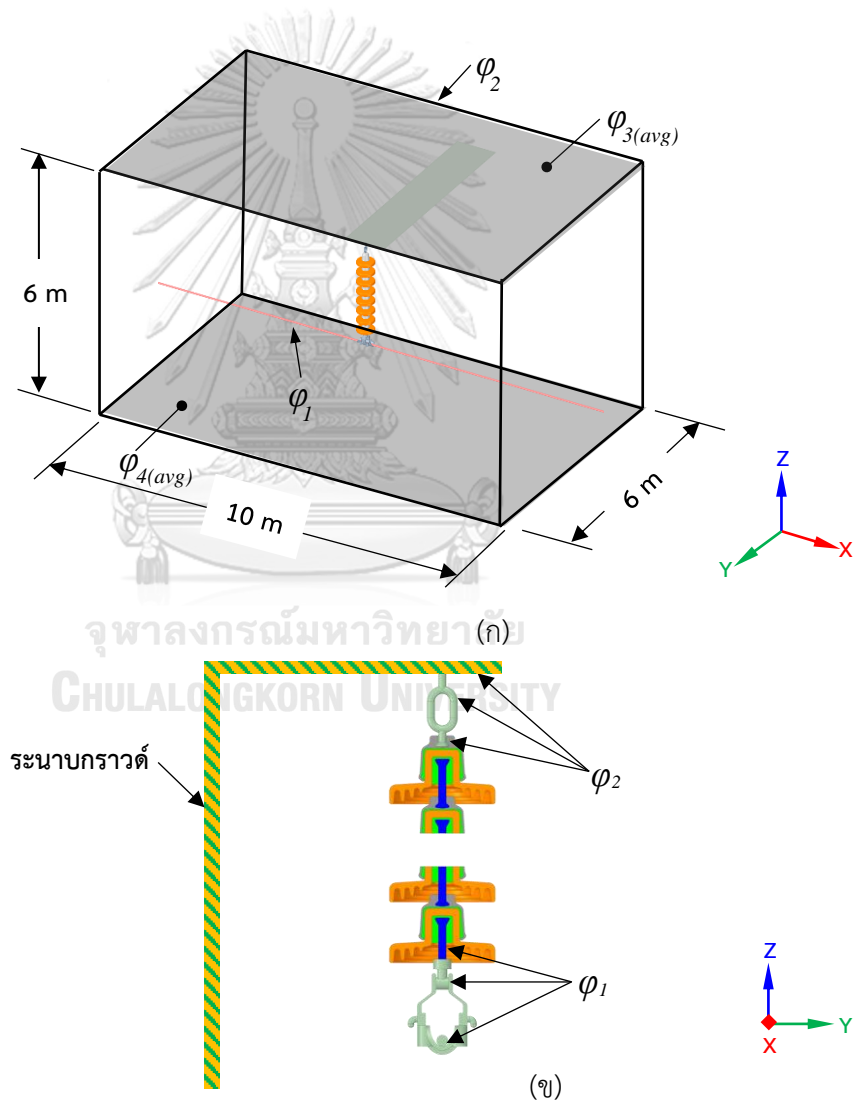


รูปที่ จ.2 (ก) เรขาคณิตของลูกถ้วยแบบพวง  
(ข) ส่วนประกอบของแบบจำลอง

ตารางที่ จ.1 แสดงชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ. รูปที่ จ.3(ก) แสดงขนาดของโดเมนการคำนวณ. ผู้วิจัยกำหนดให้ขนาดของโดเมนการคำนวณเท่ากับ  $6 \times 6 \times 10 \text{ m}^3$  แบบจำลอง 3 มิติถูกคำนวณแยกเฟสกันเช่นเดียวกับการคำนวณของแขนเสาส่งฉนวนระบบ 230 kV. รูปที่ จ.3(ข) แสดงเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณต่างๆ ของแบบจำลอง. บริเวณตัวนำแรงสูง อาทิ เช่น ตัวนำเฟส, ก้านโลหะลูกถ้วย (เฉพาะลูกถ้วยติดกับฝั่งแรงสูง) และที่แขวนสายเฟส ถูกกำหนดให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น  $\varphi_1 = 93.89 \text{ kV}$  ( $115 \text{ kV} \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$ ). บริเวณตัวนำกราวด์ และกราวด์ระนาบถูกกำหนดให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น  $\varphi_2 = 0 \text{ kV}$ . ค่าศักย์ไฟฟ้า  $\varphi_{3(avg)}$  และ  $\varphi_{4(avg)}$  ของโดเมนการคำนวณถูกแสดงในตารางที่ จ.2.

ตารางที่ จ.1 ชนิดของวัสดุและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง

บริเวณ	วัสดุ	สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ )	สภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ , S/m)
ตัวนำไฟฟ้า	อลูมิเนียม	-	$3.77 \times 10^7$
โดเมนการคำนวณ	อากาศ	1.0	-
ก้านโลหะ, ฝาครอบลูกถ้วย, กราวด์	เหล็ก	-	$1.03 \times 10^7$
คอนกรีต	คอนกรีต	4.5	-
ลูกถ้วยฉนวน	พอร์ซเลน	6.0	$1.00 \times 10^{-14}$



รูปที่ จ.3 (ก) ขนาดของโดเมนการคำนวณ

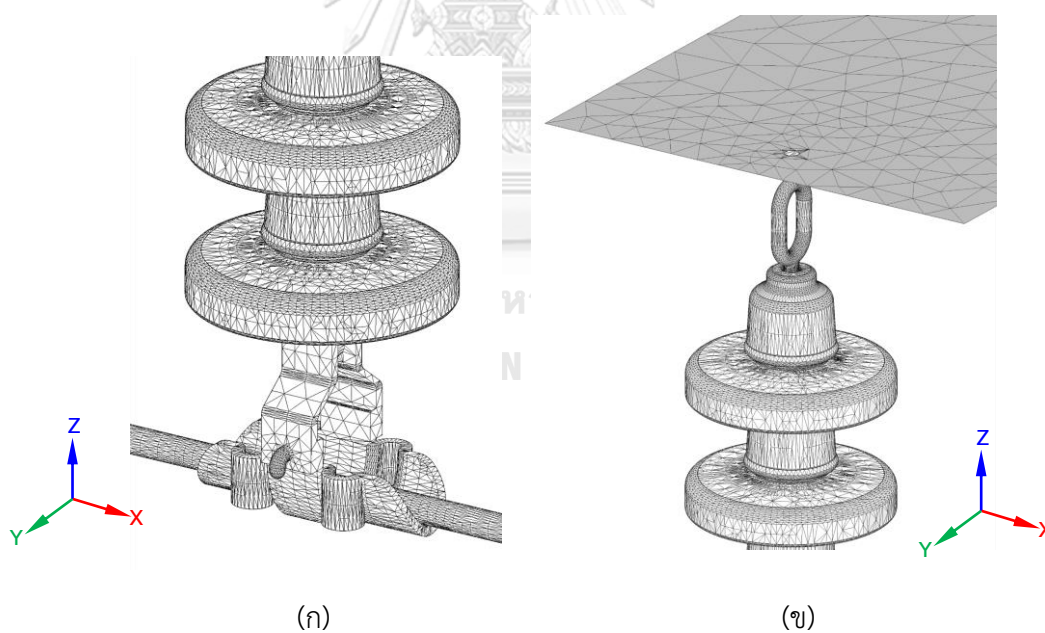
(ข) เงื่อนไขขอบเขต

ตารางที่ จ.2 เงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง 3 มิติ

บริเวณ	ศักย์ไฟฟ้า [kV]	เฟส A	เฟส B	เฟส C
ตัวนำไฟฟ้า	$\varphi_1$	93.89		
กราวด์	$\varphi_2$	0		
ระนาบด้านบน	$\varphi_{3(avg)}$	26.19*	35.86*	38.31*
ระนาบด้านล่าง	$\varphi_{4(avg)}$	37.34*	38.11*	33.42*

เพิ่มเติม ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง 3 มิติคำนวณได้มาจากแบบจำลอง 2 มิติที่คิดแยกเฟสกัน และนำค่าเหล่านั้นมาคูณแรงดันเฟส

ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral) อันดับหนึ่งในการประมาณผิวของแบบจำลองในโดเมนอากาศทั้งหมดจำนวน 2,501,401 เอลิเมนต์. รูปที่ จ.4(ก) และ จ.4(ข) แสดงความละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการประมาณลูกถ้วยพอร์ซเลน และโลหะฝังแรงสูงและฝังกราวด์. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเฉลี่ยแต่ละเฟสประมาณ 1 ชั่วโมง 5 นาที.



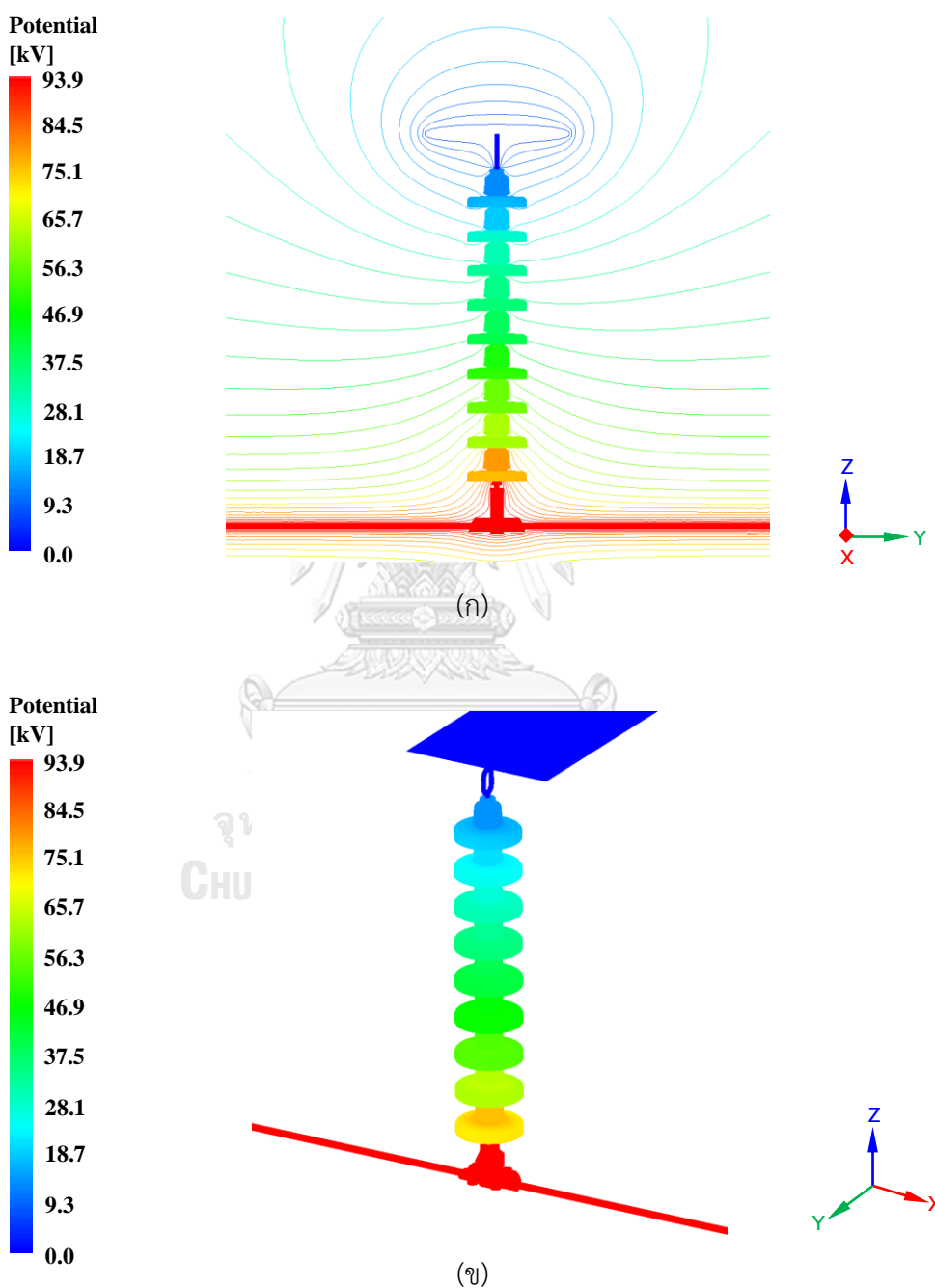
รูปที่ จ.4 ความละเอียดของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่ใช้ในการประมาณบริเวณ

(ก) ตัวนำแรงสูง และฉนวน

(ข) ตัวนำกราวด์ และฉนวน

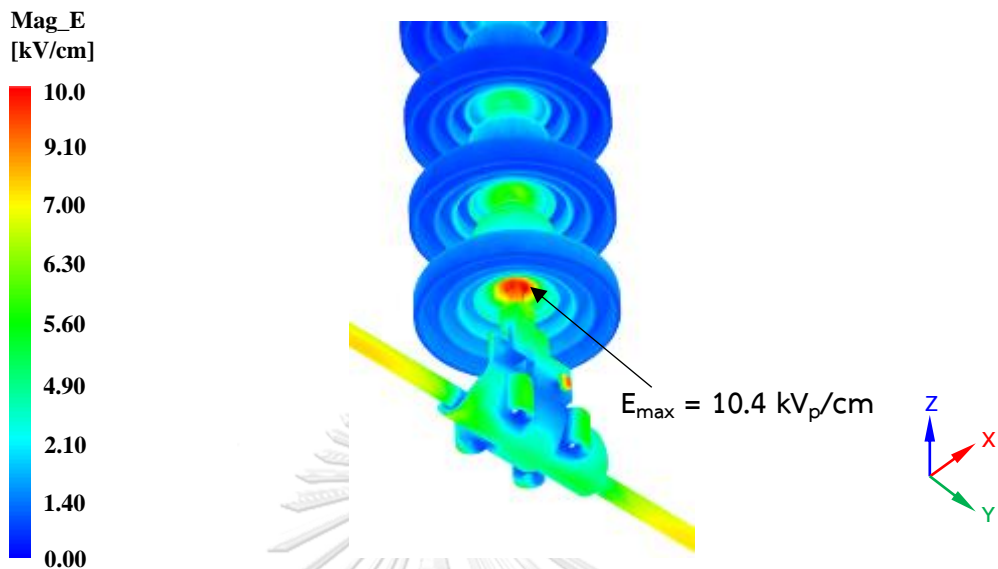


รูปที่ จ.5 แสดงผลการกระจายศักย์ไฟฟ้าเฉพาะเฟส A. รูปที่ จ.6 แสดงผลค่าสนามไฟฟ้าเฉพาะเฟส A. จากผลการจำลอง ผู้วิจัยพบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่บริเวณก้านโลหะของลูกถ้วย ไกลฝั่งแรงสูงมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $10 \text{ kV/cm}$ . ค่าสนามไฟฟ้าส่วนที่เป็นผิวฉนวนพอร์ซเลนมีค่าประมาณ  $6 \text{ kV/cm}$ .

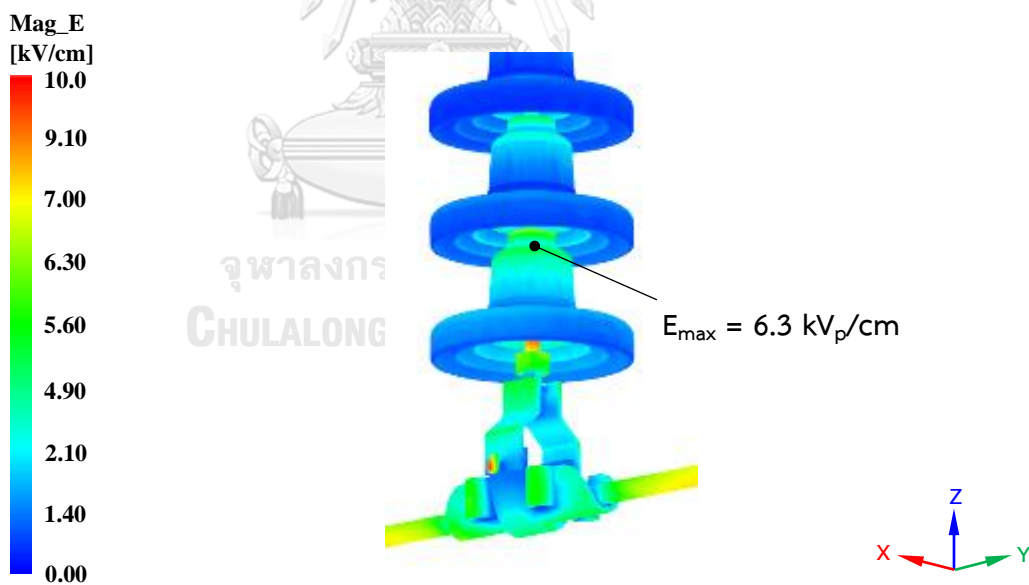


รูปที่ จ.5 (ก) เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในระนาบ ZY

(ข) การกระจายศักย์ไฟฟ้าผิวลูกถ้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ จ.6 (ก) ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำแรงสูง

(ข) ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวน

## ภาคผนวก ฉ

## กรณีการจำลอง และค่าสนามไฟฟ้าในโมดูล Design of experiment

ตารางที่ ฉ.1 กรณีของการจำลอง  $3^k$  ( $k=3$ ) และผลการจำลองแต่ละกรณีในโมดูล Design of experiment

Run No.	Parameters			Code factor			Response
	H , [m]	r , [mm]	R , [mm]	$x_1$	$x_2$	$x_3$	E-field, [kV/cm]
1	0	15	160	-1	-1	-1	28.30
2	0	25	160	-1	0	-1	21.69
3	0	35	160	-1	+1	-1	18.53
4	0	15	170	-1	-1	0	28.45
5	0	25	170	-1	0	0	21.34
6	0	35	170	-1	+1	0	17.91
7	0	15	180	-1	-1	+1	27.91
8	0	25	180	-1	0	+1	21.01
9	0	35	180	-1	+1	+1	17.61
10	1.3	15	160	0	-1	+1	34.64
11	1.3	25	160	0	0	+1	24.66
12	1.3	35	160	0	+1	+1	20.06
13	1.3	15	170	0	-1	0	36.35
14	1.3	25	170	0	0	0	24.17
15	1.3	35	170	0	+1	0	19.65
16	1.3	15	180	0	-1	+1	32.98
17	1.3	25	180	0	0	+1	23.71
18	1.3	35	180	0	+1	+1	19.28
19	2.6	15	160	+1	-1	-1	51.50
20	2.6	25	160	+1	0	-1	38.41
21	2.6	35	160	+1	+1	-1	32.41
22	2.6	15	170	+1	-1	0	48.38
23	2.6	25	170	+1	0	0	36.14
24	2.6	35	170	+1	+1	0	31.67
25	2.6	15	180	+1	-1	+1	47.61
26	2.6	25	180	+1	0	+1	35.56

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภาคภูมิ ขนุนก้อน
วัน เดือน ปี เกิด	17 สิงหาคม 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพระนั่งเกล้า
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 71/1 หมู่ 1 ตำบลบางรักใหญ่ ถนนรัตนานิเบศร์ อำเภอบางบัว ทอง จังหวัดนนทบุรี ไปรษณีย์ 11110
ผลงานตีพิมพ์	P. Kranoongon, B. Techaumnat, "Electric Field Analysis of the 230 kV AC Transmission Line System for an Limited Area", The 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2020), pp.308-311, 2020