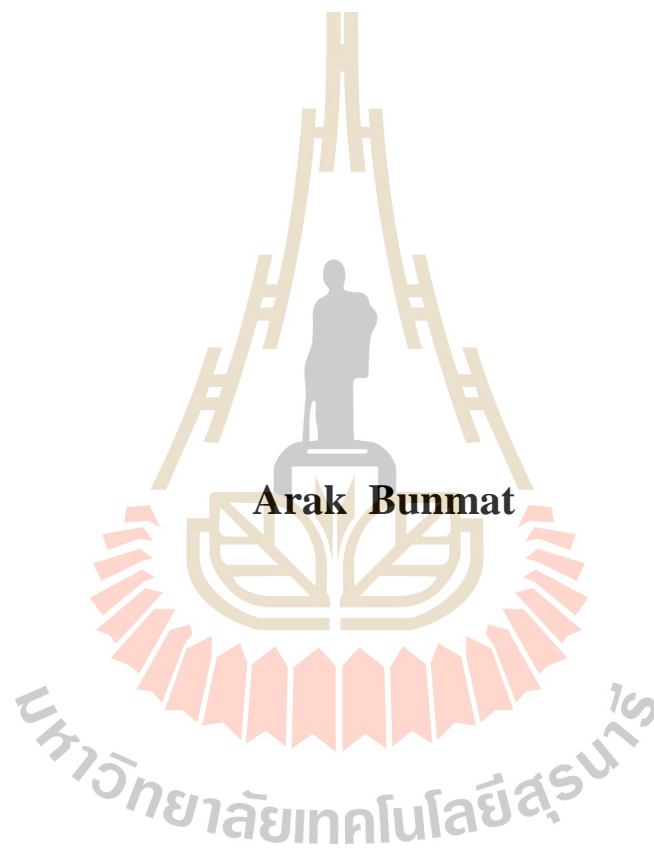


การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่
ทำงานใต้สายจำหน่ายไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**NEW ELECTROMAGNETIC FIELD SHIELDING
DEVICE FOR LINEMAN WORKING UNDERNEATH
DISTRIBUTION LINES**



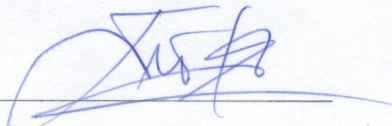
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2018

การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ทำงาน
ใต้สายจำหน่ายไฟฟ้า

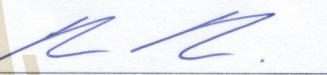
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณยบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



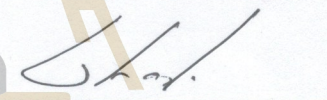
(รศ. ดร.ชัชชัย กุลวรรานิชพงษ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.เพด็จ เพ่าละออ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



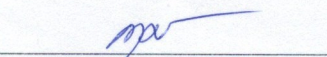
(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ



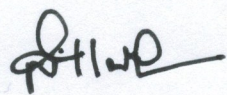
(รศ. ดร.มิตร์ติ ชัยะกุลคีรี)

กรรมการ



(อ. ดร.กัญญา สมสัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตร์ ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อารักษ์ บุญมาตย์ : การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับ
ผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานใต้สายจำหน่ายไฟฟ้า (NEW ELECTROMAGNETIC FIELD
SHIELDING DEVICE FOR LINEMAN WORKING UNDERNEATH DISTRIBUTION
LINES) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 128 หน้า

การตรวจสอบบำรุงรักษาและงานซ่อมแซมระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหน้าที่หลักของวิศวกร
ไฟฟ้ากำลังซึ่งต้องปฏิบัติงานดังกล่าวเป็นประจำทุกวัน สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในเขต
ภูมิภาคและพื้นที่ชนบท งานดังกล่าวจะอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)
ด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ ระบบสายส่งไฟฟ้าสองวงจรหรือมากกว่านั้นจะถูกติดตั้งอยู่บนเสา
ไฟฟ้าต้นเดียวกัน โดยปกติระบบที่มีแรงดันสูงกว่าจะอยู่ในส่วนบนสุดของเสา ซึ่งในทางปฏิบัติ
รูปแบบที่พบเห็นคือสายจำหน่าย 115 kV ถูกติดตั้งร่วมกับสายจำหน่าย 22 kV ในแง่ความปลอดภัย
ของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับระบบสายส่งในลักษณะดังกล่าวนี้ต้องใช้ความระมัดระวัง
เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงทุกรูปแบบที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะระบบสายส่งที่อยู่ร่วมกันสองวงจร
หรือมากกว่า แม้ว่าจะทำการตัดวงจรใดวงจรหนึ่งออกไปแล้วก็ตาม จำเป็นต้องมีการคำนึงถึงผล
ของการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรที่อยู่ใกล้เคียงด้วย งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้
ระเบียบวิธีไฟในทอติเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับจำลองสภาพ
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายจำหน่ายไฟฟ้า พร้อมศึกษาอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก
ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการลดผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งที่อยู่
ใกล้เคียง โดยได้ทำการศึกษาและรายงานผลโครงสร้างของอุปกรณ์ในการใช้วัสดุต่าง ๆ ที่มีผลต่อ
การลดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา A. J.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]

ARAK BUNMAT : NEW ELECTROMAGNETIC FIELD SHIELDING
DEVICE FOR LINEMAN WORKING UNDERNEATH DISTRIBUTION
LINES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PADEJ PAO-LA-OR,
Ph.D., 128 PP.

POWER TRANSMISSION LINE/FINITE ELEMENT METHOD/ COMPUTER
SIMULATION/ELECTROMAGNETIC FIELD/ SHEIDING

Monitoring, maintenance and repairing works of electric power transmission systems are main functions of power engineers in their daily schedule. Provincial Electric Authority of Thailand (PEA), state own organization in which regional power transmission systems and rural electric power distribution systems are its major services. For economic purposes, two or more circuits are normally hung on the same towers. Typically, a circuit of higher voltage is on the top of the tower. A practice of this configuration is a combination of a 115-kV power transmission line and a 22-kV distribution feeder. Safety of operators working in this circumstance depends on carefulness of all possible risks. Even when one circuit is disconnected from the supply source, electromagnetic induction becomes a serious issue where two or more circuits are located close enough to each other. In this thesis, three-dimensional finite element analysis is exploited as a tool for visualizing electromagnetic field distribution around a power transmission line. In addition, electromagnetic shielding devices are used to reduce the effect of induced electromagnetic fields generated by neighboring transmission lines. The study was conducted and reported on the structure of the equipment in the use of materials that affect the electromagnetic field

School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้าน

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ความรู้และสนับสนุน ทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณงานระบบไฟฟ้าและปรับอากาศ ส่วนอาคารสถานที่ ที่ให้การสนับสนุนรถกระเช้าที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุน สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณประยูร-คุณกนกพร พยู่ไพศาล และ คุณวิระชน-คุณมณฑนา ศรีวาง ที่ได้ ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา

อารักษ์ บุญมาตย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.3 สรุป	13
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
3.1 บทนำ	14
3.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน	14
3.3 ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	24
3.4.1 กลไกการกำบังด้วยการแบ่งฟลักซ์.....	25
3.4.2 กลไกการกำบังด้วยกระแสเหนี่ยวนำ.....	26
3.5 สรุป.....	28
4 การคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	29
4.1 บทนำ.....	29
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	30
4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	31
4.3.1 การแบ่งอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	32
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	35
4.3.3 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์.....	36
4.3.4 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	42
4.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย.....	43
4.4 สรุป.....	44
5 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและผลของการจำลองแบบ 3 มิติ.....	46
5.1 บทนำ.....	46
5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล.....	46
5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด.....	46
5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก.....	49
5.3 พารามิเตอร์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้จำลองผล.....	50
5.4 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติพร้อมวิเคราะห์ผล.....	52
5.5 สรุป.....	54
6 การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กด้วยการออกแบบ	
อุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	55
6.1 บทนำ.....	55
6.2 การปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 การออกแบบชุดป้องกันสนามแม่เหล็กพร้อมผลการจำลอง.....	63
6.4 การประมวลผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบผล.....	72
6.5 การวิเคราะห์ค่าความลึกเชิงผิว (Skin depth, δ).....	75
6.6 การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กและการทดสอบ.....	75
6.7 สรุป.....	91
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	93
7.1 สรุป.....	93
7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐานเพื่อใช้ ประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต.....	102
ภาคผนวก ข. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต.....	109
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	128



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์.....	18
3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ.....	18
4.1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของตัวนำ.....	44
5.1 พารามิเตอร์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	51
6.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้จำลองผลในระบบ.....	59
6.2 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรม.....	63
6.3 ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณา การป้องกันสนามแม่เหล็กบริเวณศีรษะเป็นทรงลูกบาศก์.....	73
6.4 ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณา การป้องกันสนามแม่เหล็กบริเวณศีรษะเป็นทรงกระบอก.....	73
6.5 ค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICINRP สำหรับระบบความถี่ 50 Hz.....	73
6.6 ระยะเวลาสัมผัสเชิงผิวเมื่อพิจารณาวัสดุต่างๆ.....	75
6.7 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณา การป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยอุปกรณ์หมวกกันน็อก.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด เมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า..... 17
3.2	การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า..... 19
3.3	ลักษณะกลไกการป้องกันสนามแม่เหล็กแบบการแบ่งฟลักซ์..... 26
3.4	ลักษณะกลไกการป้องกันสนามแม่เหล็กแบบกระแสเหนี่ยวนำ..... 27
4.1	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 32
4.2	รายละเอียดของบุคลากรที่ปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายไฟฟ้า..... 33
4.3	การแบ่งอิลลิเมนต์ของระบบไฟฟ้า 115 kV ที่พาดผ่านระบบไฟฟ้าขนาด 22 kV ในแบบ 3 มิติ..... 34
5.1	โครงสร้างแบบ 3 มิติ ของระบบที่ศึกษา..... 47
5.2	ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV 48
5.3	ภาพการขยายการแบ่งอิลลิเมนต์และการเชื่อมต่ออิลลิเมนต์บนบริเวณที่สำคัญ)..... 48
5.4	แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ..... 49
5.5	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..... 51
5.6	การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) แบบ 3 มิติ บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV..... 52
5.7	ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า..... 53
5.8	ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า..... 53
5.9	ภาพการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์..... 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 การปฏิบัติงานของบุคลากรทางไฟฟ้าด้วยการปีนเสาไฟฟ้า.....	56
6.2 บริเวณที่มีจำนวนหุ้มสายไฟฟ้าขณะปฏิบัติงาน.....	56
6.3 โครงสร้างชุดป้องกันสนามแม่เหล็กและตัวบุคลากรที่ใช้ในการจำลองผล.....	57
6.4 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองผลแบบ 3 มิติ.....	58
6.5 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า.....	59
6.6 ลักษณะการสร้างกริดภายในของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า.....	60
6.7 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า.....	60
6.8 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) แบบ 3 มิติบริเวณภายในของระบบ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า.....	61
6.9 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า.....	61
6.10 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า.....	62
6.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์.....	62
6.12 ขยายให้เห็นถึงการสร้างกริดแบบ 3 มิติเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงาน บนเสาไฟฟ้าที่มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	64
6.13 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์เมื่อบุคลากร ขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์.....	64
6.14 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์.....	65
6.15 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์เมื่อศรีษะเป็นทรงลูกบาศก์.....	65
6.16 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์เมื่อศรีษะเป็นทรงกระบอก.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์เมื่อบุคลากร ขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมูนิเนียม.....	66
6.18 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมูนิเนียม.....	67
6.19 การกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมูนิเนียมเมื่อศรีษะเป็นทรงลูกบาศก์.....	67
6.20 การกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมูนิเนียมเมื่อศรีษะเป็นทรงกระบอก.....	68
6.21 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์เมื่อบุคลากร ขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	68
6.22 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	69
6.23 การกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็กเมื่อศรีษะเป็นทรงลูกบาศก์.....	69
6.24 การกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็กเมื่อศรีษะเป็นทรงกระบอก.....	70
6.25 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์เมื่อบุคลากร ขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุไมวมทอล.....	70
6.26 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ ของระบบเมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุไมวมทอล.....	71
6.27 การกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกัน สนามแม่เหล็กด้วยวัสดุไมวมทอลเมื่อศรีษะเป็นทรงลูกบาศก์.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

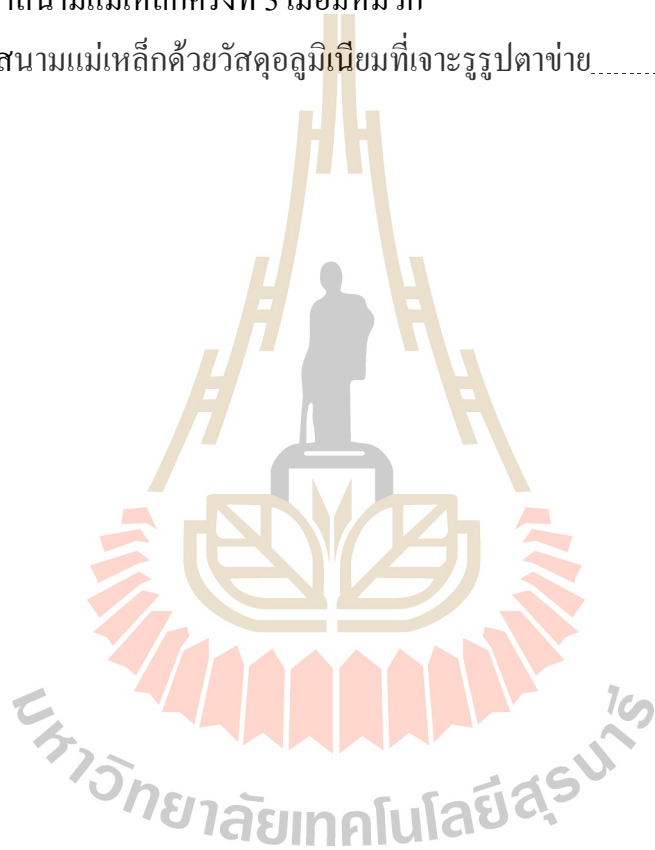
รูปที่	หน้า
6.28 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุไมเมทอลเมื่อศรัยะเป็นทรงกระบอก.....	72
6.29 อุปกรณ์ห่มวกต้นแบบในการป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	76
6.30 อุปกรณ์ห่มวกต้นแบบในการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	77
6.31 อุปกรณ์ห่มวกต้นแบบในการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	77
6.32 อุปกรณ์ห่มวกต้นแบบในการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียมที่เจาะรูเป็นรูปตาข่าย.....	78
6.33 เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก (Gaussmeter).....	78
6.34 ระบบทดสอบสนามแม่เหล็กบนสายจำหน่ายไฟฟ้าระบบ 22 kV.....	79
6.35 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ของระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อยังไม่มีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	79
6.36 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ของระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อยังมีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	80
6.37 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) ในร่างกายมนุษย์ของระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อยังมีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	80
6.38 การเตรียมวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระแสรัยถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	81
6.39 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระแสรัยถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อยังไม่มีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	81
6.40 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระแสรัยถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อมีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	82
6.41 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระแสรัยถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อยังไม่มีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	84
6.42 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 1 เมื่อยังไม่มีห่มวกป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.43 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 2 เมื่อยังไม่มีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	85
6.44 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 3 เมื่อยังไม่มีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็ก.....	85
6.45 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระเช้ารถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อมีหมวกป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	86
6.46 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 1 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	86
6.47 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 2 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	87
6.48 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 3 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเหล็ก.....	87
6.45 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระเช้ารถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อมีหมวกป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	88
6.50 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 1 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	88
6.51 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 2 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	89
6.52 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 3 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม.....	89
6.53 การวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยกระเช้ารถยกในระบบสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อมีหมวกป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียมที่เจาะรูรูปตาข่าย.....	90
6.54 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 1 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียมที่เจาะรูรูปตาข่าย.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.55 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 2 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมินิกที่เจาะรูรูปตาข่าย.....	91
6.56 การวัดค่าสนามแม่เหล็กครั้งที่ 3 เมื่อมีหมวก ป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุคูมินิกที่เจาะรูรูปตาข่าย.....	91



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบ บำรุง และซ่อมแซม สายส่งไฟฟ้าเป็นหน้าที่อย่างหนึ่งที่วิศวกรหรือบุคลากรทางด้านไฟฟ้าต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำ ซึ่งการทำงานในลักษณะเช่นนี้กับสายส่งในระบบจำหน่ายอย่างเช่นระบบ 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่มีสายส่งในระบบส่งจ่ายอย่างเช่นระบบ 115 kV พาดผ่านอยู่ด้านบนในเสาต้นเดียวกันนั้น โดยทั่วไปแล้วจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าเฉพาะของสายส่งในระบบจำหน่ายในช่วงที่ต้องการจะปฏิบัติงานออก โดยที่กระแสไฟฟ้าของสายส่งในระบบส่งจ่ายที่อยู่ด้านบนก็ยังคงไหลในสายเพื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป ซึ่งการดำเนินงานเช่นนี้ก็มักจะมีความปลอดภัยต่อบุคลากรที่จะปฏิบัติหน้าที่ แต่ในความเป็นจริงนั้นผลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายที่อยู่เหนือศีรษะของผู้ปฏิบัติงาน ได้มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่สายส่งในระบบจำหน่ายทั้งที่ได้หยุดการจ่ายไฟแล้วก็ตาม จึงส่งผลให้บุคลากรที่ปฏิบัติงานอยู่ในระบบจำหน่ายได้รับอันตราย

ปัญหาสนามแม่เหล็กในทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (Differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (Integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมทุกสาขา และเริ่มนำมาประยุกต์กับปัญหาสนามไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งระเบียบวิธีนี้ได้แบ่งพื้นที่

ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจาก โหนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Linear tetrahedral) เพื่อประมาณ โดเมนของปัญหา ได้ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธี FEM มาใช้ในการดำเนินการ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดกับบุคลากรที่ปฏิบัติงานที่ระบบจำหน่าย 22 kV และเนื่องจากปัญหาสนามแม่เหล็กนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ซึ่งยากในการหาผลเฉลย ดังนั้นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองผลเพื่อหาผลเฉลยในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- พัฒนาโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็ก
- สร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับป้องกันสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานได้สายจำหน่ายไฟฟ้าโดยเน้นที่บริเวณศรีษะเป็นหลัก

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- ความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระจายรอบๆ สายจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลในตัวนำแต่ละเฟส
- อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายจำหน่ายในระบบจำหน่าย 22 kV จะทำหน้าที่ลดทอนค่าสนามแม่เหล็กจากสายจำหน่ายในระบบส่งจ่าย 115 kV เมื่อบุคลากรปฏิบัติหน้าที่กับสายจำหน่ายในระบบจำหน่าย 22 kV โดยสายจำหน่ายในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- พื้นที่ในการทดสอบระบบเป็นพื้นที่โล่ง ปราศจากการกีดขวางของอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ

- สายตัวนำเป็นสายเปลือย (Bared wire) รูปทรงกระบอกตัน และมีผิวเรียบ
- สายตัวนำ 115 kV วงจรเดี่ยวพาดผ่านสายตัวนำ 22 kV วงจรเดี่ยว
- กำหนดให้แรงดันและกระแสในสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าแรงดันและกระแสคงที่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น
- กำหนดให้สภาพพื้นดินในระบบที่พิจารณาเป็นพื้นดินในสภาพทั่วไปปราศจากน้ำขังหรือความชื้นบนหน้าดินสูง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- พิจารณาสายจำหน่ายไฟฟ้าระบบ 115kV ที่พาดผ่านสายจำหน่ายไฟฟ้าระบบ 22 kV บนเสาต้นเดียวกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- วิเคราะห์ไฟไนท์ออลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กเป็นแบบ 3 มิติ
- พัฒนาโปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ดำเนินการคำนวณและพัฒนางานความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กในสายจำหน่ายระบบ 115 kV ที่พาดผ่านสายจำหน่ายในระบบ 22 kV เมื่อบุคลากรปฏิบัติหน้าที่กับสายจำหน่ายในระบบจำหน่าย 22 kV โดยสายจำหน่ายในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ
- สร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กโดยอาจจะเน้นที่บริเวณศรีษะเป็นหลัก

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาระบายตัวของสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์ออลิเมนต์ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในสายส่ง ตลอดจนสามารถนำไปใช้เพื่อประกอบการเรียนการสอนด้านสนามแม่เหล็กและสายส่งกำลังไฟฟ้า
- ได้ผลการออกแบบอุปกรณ์สำหรับป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และการป้องกันสนามแม่เหล็กต่าง ได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย **บทที่ 4** กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคก้างของกาลเลอร์กิน

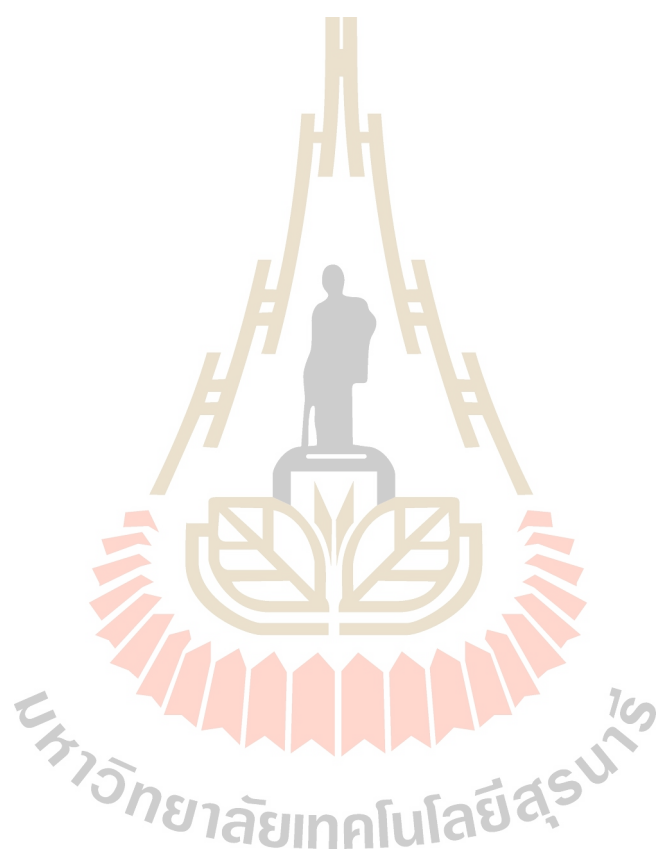
บทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงยิ่งขึ้น โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและผลกระทบของสนามแม่เหล็กต่อผู้ปฏิบัติงานด้วย

บทที่ 6 ได้อธิบายถึงการป้องกันสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่ายขนาด 22 kV เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออก ด้วยการปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า โดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กโดยเน้นไปที่การออกแบบชุดป้องกันสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมในการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก โดยได้ทำการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยทั้งก่อนและหลังที่มีการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับการวัดค่าสนามแม่เหล็กในระบบไฟฟ้า

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก. การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐานเพื่อใช้ประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต

ภาคผนวก ข. เป็นการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต
ภาคผนวก ค. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์
ในขณะดำเนินการศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบในการป้องกันอันตรายที่เกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวจากสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติมาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณษณ์นักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากเรื่องการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กบริเวณใกล้สายส่งที่เป็นผลจากการกำบัง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณษณ์ผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1985	Takuma, et al.	ได้ดำเนินการศึกษาการวิเคราะห์ผลของการกำบังสายไฟที่มีผลต่อสนามไฟฟ้า โดยศึกษาเฉพาะการจัดเรียงตัวในแบบ 3 มิติเมื่อสายไฟ มีการวางตัวพาดผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงตามแนวตั้งฉากหรือตามแนวทแยงมุม การวัดค่าสนามไฟฟ้าจะวัดที่สายส่งที่กำบัง ซึ่งได้วิเคราะห์ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขและการคำนวณแบบประมาณ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1992	Kaune and Zaffanella	ได้วิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสายส่ง โดยได้เปรียบเทียบระยะทางในตำแหน่งที่สนใจกับช่องว่างของตัวนำเฟสในสาย พร้อมทั้งออกแบบสายส่งไฟฟ้าเพื่อจำกัดระดับของสนามแม่เหล็กให้มีค่าน้อยกว่า $\pm 10\%$ ตรงบริเวณผิวของสายส่ง
1996	Pettersson	ได้ศึกษาสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีลำดับเฟสสูง 6 เฟส และ 12 เฟสซึ่งถูกใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้าและออกแบบตามทฤษฎี โดยทดสอบกับระบบที่เป็นสนามแม่เหล็กโดยกำหนดสนามแม่เหล็กจากสายส่งลำดับเฟส 6 เฟสเปรียบเทียบกับสายส่งลำดับเฟส 12 เฟสโดยนำข้อดีของลำดับเฟสสูงมาช่วยในการลดผลสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น
1998	Hernandez and Karady	ได้ศึกษาวิเคราะห์ถึงการกำบังแบบแอกทีฟเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 60 Hz ซึ่งเกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในห้องทำงานมีค่าลดลง โดยจำลองระบบเป็นห้องสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีการกำบังที่ผนังห้องตั้งวางไว้ตรงกึ่งกลางใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งการกำบังแบบแอกทีฟจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้มีการกระจายตัวในทิศทางตรงกันข้าม
1998	Karim, Vasondara, and Vijay	ได้ศึกษาถึงผลของรูปทรงและวัสดุป้องกันที่อยู่รอบ ๆ สายไฟฟ้า โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 2 มิติ เนื่องจากสายไฟฟ้ามีความยาวมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลที่ได้มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อมีและไม่มี การป้องกันรวมถึงค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันด้วย ตลอดจนศึกษาถึงการป้องกันแบบย่อยเพื่อออกแบบอุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1998	Lindberg	ได้ดำเนินการศึกษาการลดทอนสนามแม่เหล็กจากกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและลักษณะของการติดตั้งสายส่ง พบว่าในการแบ่งตัวของทุกเฟสนั้น ควรจะมีจุดร่วมตรงกลาง และระยะในแต่ละเฟสก็ควรมีความแตกต่างกัน
1999	Clairmont, and Lordan	ได้ดำเนินการศึกษาการคำนวณการป้องกันสนามแม่เหล็ก ได้ใช้แผ่นตะกั่วบางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงโดยมีรูปแบบคาบของเส้นใยลวดป้องกันเรื่อยๆ โดยใช้เทคนิคการจำลองผลแบบสามมิติในรูปเชิงซ้อน
1999	Farag, Dawoud, and Habiballah	ได้ดำเนินการศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กจากสายเคเบิลใต้ดิน โดยทำการกำบังด้วยวัสดุต่างๆที่แตกต่างกันไป พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุที่นำมาป้องกัน จากการศึกษาพบว่าสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายเคเบิลใต้ดินได้ถึง 98 %
2000	Zhang	ได้ศึกษาโดยใช้การหักล้างของฟลักซ์แม่เหล็กเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบ โครงสร้างในการกำบังสายเพื่อการลดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งกำลังไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย โดยอาศัยความสมมาตรของวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก กระแสที่มีขนาดเท่ากันไหลผ่านขดลวดแม่เหล็ก 2 ชุดในทิศทางตรงกันข้ามแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทั้งหมดจะเป็นศูนย์ แสดงว่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดทั้งสองมีการหักล้างกัน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2003	Marcello., Emiliano, and Maria	ได้ดำเนินการศึกษาสายส่งกำลังสามเฟสแบบแกนเดี่ยว โดยทำการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่มีการสร้างขึ้น ด้วยการนำวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าและแม่เหล็กสูงซึ่งประกอบด้วย เหล็ก และ อลูมิเนียม มาใช้ในการกำบังสนามแม่เหล็ก
2008	Peter Sergeant, Luc Dupre and Jan Melkebeek	ได้ศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยการเพิ่มแผ่นโลหะนำไฟฟ้าบนพื้นผิวบนของสายส่งกำลัง ซึ่งได้นำระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณและออกแบบการป้องกันสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
2011	Del Pino Lopez, Cruz Romero, and Dular	วิเคราะห์การป้องกันสนามแม่เหล็กจากสายเคเบิลใต้ดินโดยเน้นการกำบังแบบพาสซีฟ ได้ดำเนินการใช้รูปทรงของแผ่นกำบังที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมากำบัง โดยการป้องกันสนามแม่เหล็กนี้แบ่งการพิจารณาออกเป็นสองแบบคือการป้องกันแบบเปิดและแบบปิด พบว่าผลของการป้องกันแบบปิดทำให้ได้ประสิทธิภาพของการป้องกันได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการป้องกันแบบเปิด อีกทั้งยังเพิ่มขนาดของความหนาของวัสดุต่างๆที่นำมาใช้ในการกำบังด้วย
2014	Hyun Ho Park, Jong Hwa Kwon, Seungyoung Ahn	ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์การป้องกันด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นบนแผ่นเคลือบด้วยแผ่นเฟอร์ไรท์ ประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กจะถูกตรวจสอบในแง่ของค่าทางเรขาคณิตของรอยต่อบนแผ่นนำไฟฟ้าและแผ่นเฟอร์ไรท์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	A. H. Khawaja, Q. Huang	ศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้รับการประเมินโดยการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้ที่เสาไฟฟ้าและการวัดกระแสเฟสที่สถานีย่อย ได้จำลองการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่เล็ดลอดออกมาจากตัวนำระหว่างเฟส จากนั้นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสองตัวได้รับการออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่จำลองและวัดเพื่อตรวจจับและปรับปริมาณการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ลดลง
2016	S. Ren, S. Guo, X. Liu, Q. Liu	นำเสนอวิธีการคำนวณเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กบริเวณด้วยคลื่นเรเดียล วิธีการคำนวณนี้ใช้หลักการวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กและความถูกต้องดีกว่า 30% เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ของการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกัน นอกจากนี้เมื่อแม่เหล็กสองชั้นมีมิติภายนอกเช่นเดียวกับแม่เหล็กชั้นเดียวประสิทธิภาพการป้องกันด้วยการแผ่รังสีของแม่เหล็กสองชั้นมีค่าเป็นสองเท่าของชั้นเดียวขณะที่การใช้วัสดุเดียวกัน
2018	Yafeng Chen, Qi Huang, Arsalan Habib Khawaja	ในงานวิจัยนี้จึงมีการแบ่งโครงสร้างแบบสองชั้นที่แยกออกจากกัน โดยมีช่องว่างสำหรับการวัดค่าในปัจจุบันที่มีสัญญาณรบกวนจากสถานที่สุ่มพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ออกแบบได้รับการตรวจสอบและการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างได้รับการยืนยันโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีขนาดของกระแสที่วัดได้ตั้งแต่ 1000 A. จากวิธี FEA เมื่อการรบกวนเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยไม่มีสัญญาณรบกวนและมีค่าน้อยกว่า 0.13 ตรวจสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกัน

จะเห็นได้ว่าจากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่เน้นศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อมนุษย์ที่ทำงานบริเวณสายส่งกำลังไฟฟ้าที่พาดผ่านกันอยู่บนเสาต้นเดียวกันด้วยการพัฒนาวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่จะดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พอมองภาพออกอย่างกว้างได้ว่า มีคณะนักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงโดยย่อ ดังนี้

Kaune and Zaffanella (1992) ได้วิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยได้เปรียบเทียบระยะทางในตำแหน่งที่สนใจกับช่องว่างของตัวนำเฟสในสาย พร้อมทั้งออกแบบสายส่งไฟฟ้าเพื่อจำกัดระดับของสนามแม่เหล็กให้มีค่าน้อยกว่า $\pm 10\%$ ตรงบริเวณผิวของสายส่ง โดยการออกแบบได้คำนึงถึงระยะห่างระหว่างตัวนำเฟสด้วย งานวิจัยของ Lindberg (1998) ได้ดำเนินการศึกษาการลดทอนสนามแม่เหล็กจากกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและลักษณะของการติดตั้งสายส่ง พบว่าในการแบ่งตัวนำของทุกเฟสนั้น ควรจะมีจุดร่วมตรงกลาง และระยะในแต่ละเฟสก็ควรมีความแตกต่างกันเนื่องจากจุดร่วมตรงกลางจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้หักล้างกัน งานวิจัยของ Takuma, et al. (1985) ได้ดำเนินการศึกษาการวิเคราะห์ผลของสายไฟที่ถูกชีลด์ (Shielding) ที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าในระดับพื้นดิน โดยศึกษาการจัดเรียงตัวในแบบ 3 มิติเมื่อสายไฟมีการวางตัวพาดผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงตามแนวตั้งฉากหรือแนวทแยงมุม การวัดค่าสนามไฟฟ้าจะวัดที่สายส่งที่มีการชีลด์ซึ่งอยู่ใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงที่ทดสอบ ซึ่งได้วิเคราะห์ด้วยการคำนวณสนามไฟฟ้าเชิงตัวเลขและการคำนวณแบบประมาณ งานวิจัยของ Hernandez and Karady (1998) ได้ศึกษาวิเคราะห์ถึงการชีลด์แบบแอกทิฟเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กที่ความถี่ 60 Hz ซึ่งเกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในห้องทำงานมีค่าลดลง โดยจำลองระบบเป็นห้องสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีการชีลด์ที่ผนังห้องตั้งวางไว้ตรงกึ่งกลางใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการชีลด์แบบแอกทิฟจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้มีทิศทางตรงกันข้าม งานวิจัยของ Karim, Vasondara, and Vijay (1998) ได้ศึกษาถึงผลของรูปทรงและวัสดุป้องกันที่อยู่รอบ ๆ สายไฟ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติเนื่องจากสายส่งมีความยาวมากเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย ผลที่ได้มีความชัดเจนที่แตกต่างเมื่อมีและไม่มีกรป้องกันรวมถึงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกัน และศึกษาถึงการออกแบบอุปกรณ์การป้องกันให้เหมาะสมในการป้องกัน งานวิจัยของ Clairmont, and Lordan (1999) ได้ดำเนินการศึกษาการคำนวณการป้องกันสนามแม่เหล็ก ได้ใช้แผ่นตะกั่วบางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้า

ประสิทธิภาพสูงโดยมีรูปแบบตาข่ายของเส้นใยลวดป้องกันเรื่อยๆ โดยใช้เทคนิคการจำลองผลแบบสามมิติในรูปแบบเชิงซ้อน งานวิจัยของ Farag, Dawoud, and Habiballah (1999) ได้ดำเนินการศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กจากสายเคเบิลใต้ดิน โดยทำการกำบังด้วยวัสดุต่างๆที่แตกต่างกันไป พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุที่นำมาป้องกัน จากการศึกษาพบว่าสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายเคเบิลใต้ดินได้ถึง 98 % งานวิจัยของ Zhang (2000) ได้ศึกษาโดยใช้การหักล้างของฟลักซ์แม่เหล็กเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบ โครงสร้างในการชีลด์สายเพื่อการลดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งกำลังไฟฟ้า 1 เฟส 2 สายโดยอาศัยความสมมาตรของวัสดุที่เป็นแม่เหล็ก กระแสที่มีขนาดเท่ากันไหลผ่านขดลวดแม่เหล็ก 2 ชุดในทิศทางตรงกันข้าม แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทั้งหมดจะเป็นศูนย์ แสดงว่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดทั้งสองมีการหักล้างกันและงานวิจัยของ Marcello., Emiliano, and Maria (2003) ได้ดำเนินการศึกษาสายส่งกำลังสามเฟสแบบแกนเดี่ยว โดยทำการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่มีการสร้างขึ้น ด้วยการนำวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าและแม่เหล็กสูง ซึ่งประกอบด้วย เหล็ก และ อลูมิเนียม มาใช้ในการกำบังสนามแม่เหล็ก งานวิจัยของ Peter Sergeant, Luc Dupre and Jan Melkebeek (2008) ได้ศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยการเพิ่มแผ่นโลหะนำไฟฟ้าบนพื้นผิวบนของสายส่งกำลัง ซึ่งได้นำระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณและออกแบบการป้องกันสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง งานวิจัยของ Del Pino Lopez, Cruz Romero, and Dular (2011) วิเคราะห์การป้องกันสนามแม่เหล็กจากสายเคเบิลใต้ดินโดยเน้นการกำบังแบบพาสทิฟ ได้ดำเนินการใช้รูปทรงของแผ่นกำบังที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมากำบัง โดยการป้องกันสนามแม่เหล็กนี้แบ่งการพิจารณาออกเป็นสองแบบ คือ การป้องกันแบบเปิดและแบบปิด พบว่าผลของการป้องกันแบบปิดทำให้ได้ประสิทธิภาพของการป้องกัน ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการป้องกันแบบเปิด อีกทั้งยังเพิ่มขนาดของความหนาของวัสดุต่างๆที่นำมาใช้ในการกำบังด้วย งานวิจัยของ Hyun Ho Park, Jong Hwa Kwon, Seungyoung Ahn ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์การป้องกันด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นบนแผ่นเคลือบด้วยแผ่นเฟอร์ไรท์ ประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กจะถูกตรวจสอบในแง่ของค่าทางเรขาคณิตของรอยต่อบนแผ่นนำไฟฟ้าและแผ่นเฟอร์ไรท์ งานวิจัยของ A. H. Khawaja, Q. Huang ศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้ได้รับการประเมิน โดยการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้ที่เสาไฟฟ้าและการวัดกระแสเฟสที่สถานีย่อย ได้จำลองการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่เล็ดลอดออกมาจากตัวนำระหว่างเฟส จากนั้นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสองตัวได้รับการออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่จำลองและวัดเพื่อตรวจจับและปรับปริมาณการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ลดลง งานวิจัยของ S. Ren, S. Guo, X. Liu, Q. Liu นำเสนอวิธีการคำนวณเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กบริเวณด้วยคลื่นเรเดียล วิธีการคำนวณนี้ใช้หลักการวิเคราะห์ห้วงจรแม่เหล็กและความถูกต้องดีกว่า 30% เมื่อเทียบกับผลลัพธ์

ของการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกัน นอกจากนี้เมื่อแม่เหล็กสองชั้นมีมิติภายนอก เช่นเดียวกับแม่เหล็กชั้นเดียวประสิทธิภาพการป้องกันด้วยการแผ่รังสีของแม่เหล็กสองชั้นมีค่าเป็นสองเท่าของชั้นเดียวขณะที่การใช้วัสดุเดียวกัน งานวิจัยของ Yafeng Chen, Qi Huang, Arsalan Habib Khawaja ในงานวิจัยนี้จึงมีการแบ่งโครงสร้างแบบสองชั้นที่แยกออกจากกัน โดยมีช่องว่างสำหรับการวัดค่าในปัจจุบันที่มีสัญญาณรบกวนจากสถานที่สุ่ม พารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ออกแบบได้รับการตรวจสอบและการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างได้รับการยืนยันโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีขนาดของกระแสที่วัดได้ตั้งแต่ 1000 A. จากวิธี FEA เมื่อการรบกวนเกิดขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ ตัวนำ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยไม่มีสัญญาณรบกวนและมีค่าน้อยกว่า 0.13 ตรวจสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันนี้

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณบดีนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กต่อมนุษย์ที่ทำงานบริเวณสายส่งกำลังไฟฟ้าที่พาดผ่านกันอยู่บนเสาต้นเดียวกันด้วยการพัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อแสวงหาแนวทางการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อป้องกันอันตรายจากผลของสนามแม่เหล็กในสายส่งระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV เมื่อบุคลากรปฏิบัติหน้าที่กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV โดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นับว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน (2) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ (3) การป้องกันสนามแม่เหล็ก โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับ และชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน (พิทักษ์ ปิ่นอนงค์, 2545)

สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ขึ้นเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ B และถูกวัดออกมาในหน่วยของเวเบอร์ต่อตารางเมตร wb/m^2 หรือเทสลา (Tesla) สนามแม่เหล็กเป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทั้งขนาดและทิศทางเหมือนสนามไฟฟ้า สำหรับขนาดของสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงในการเคลื่อนตัวของประจุหรือเกิดจากค่าของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา ซึ่งจะมีค่าแปรผันกับกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้พิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) และระยะห่างจากสายไฟฟ้าไปยังจุดที่พิจารณา (R)

$$H = \frac{I}{2R} \quad (3.1)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง (Real part) และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ (Imaginary part) ดังนั้น $I = I_{real} + I_{imag}$ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายไฟเฟส a, b, c, \dots ณ จุด x, y ใดๆ (x_N, y_N) สามารถหาได้จาก

$$\mathbf{H}_x = \sum_{j=1}^n \frac{I_{real(j)}}{2} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} + j \sum_{j=1}^n \frac{I_{imag(j)}}{2} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{H}_y = \sum_{j=1}^n \frac{I_{real(j)}}{2} \frac{x_N - x_j}{R_{jN}^2} + j \sum_{j=1}^n \frac{I_{imag(j)}}{2} \frac{x_N - x_j}{R_{jN}^2} \quad (3.3)$$

$$R_{jN} = \sqrt{(x_N - x_j)^2 + (y_N - y_j)^2} \quad (3.4)$$

โดยที่ $\mathbf{H}_x = \sqrt{\mathbf{H}_{x,real}^2 + \mathbf{H}_{x,imag}^2}$ และ $= \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{H}_{x,imag}}{\mathbf{H}_{x,real}} \right)$

$\mathbf{H}_y = \sqrt{\mathbf{H}_{y,real}^2 + \mathbf{H}_{y,imag}^2}$ และ $= \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{H}_{y,imag}}{\mathbf{H}_{y,real}} \right)$

ค่าสนามแม่เหล็กรวม ณ จุด $x y$ ใด ๆ (x_N, y_N) คือ

$$H^2 = H_x^2 \cos^2(t + \alpha) + H_y^2 \cos^2(t + \beta) \quad (3.5)$$

ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ $\frac{dH^2}{dt} = 0$

$$\tan(2t) = -\frac{H_x^2 \sin 2\alpha + H_y^2 \sin 2\beta}{H_x^2 \cos 2\alpha + H_y^2 \cos 2\beta} \quad (3.6)$$

เมื่อ $t_1 = t + (m-1)\frac{\pi}{2}$; $m = 1, 2, 3, 4$

$$H_{max} = \sqrt{(H_x \cos(t_1 + \alpha))^2 + (H_y \cos(t_1 + \beta))^2} \quad (3.7)$$

$$\text{angle} = \tan^{-1} \left[\frac{H_y \cos(t_1 + \beta)}{H_x \cos(t_1 + \alpha)} \right] \quad (3.8)$$

และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) กับสนามแม่เหล็ก (B) จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการ $B = \mu H$

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

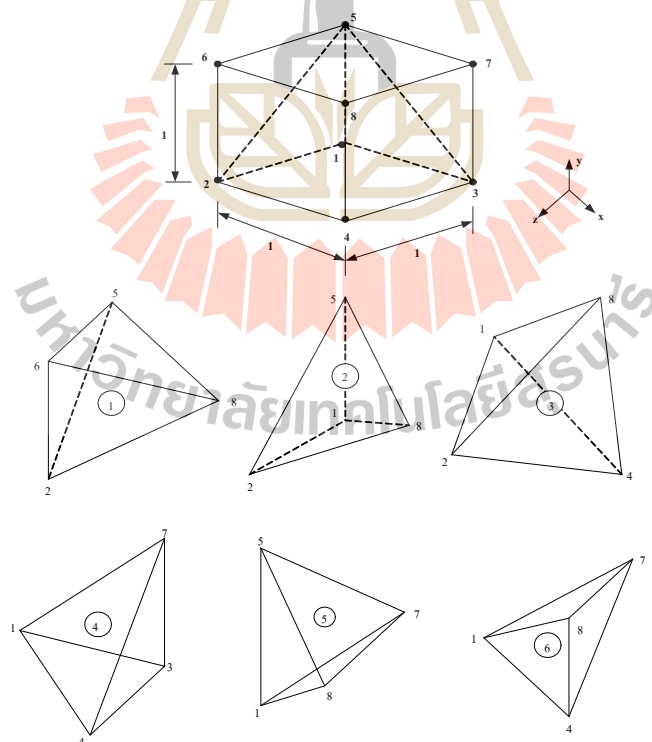
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง หากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องหาหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมีหลายประการเช่น ความสะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และเอลิเมนต์ต่างๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ ส่วนที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละเอลิเมนต์ ณ จุดที่เอลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งเอลิเมนต์ต่างๆนี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติอาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (hexahedron) รูปทรงแปด

หน้า (octahedron) หรือ รูปทรงพีระมิด (pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวน โหนดหรือจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้าสามารถประกอบกัน ได้เป็นรูปทรงอื่นๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอน (ปราโมทย์ เศษอำไพ, 2542)

1.แบ่งอิลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุก ๆ อิลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลิเมนต์และหมายเลขของ โหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละ โหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลิเมนต์ 8 โหนด เมื่อพิจารณาอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.1 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์

หมายเลข อิลลิเมนต์	หมายเลขโนด			
	โนด i	โนด j	โนด k	โนด l
1	2	8	5	6
2	1	2	8	5
3	1	2	4	8
4	1	3	4	7
5	1	7	8	5
6	1	8	4	7

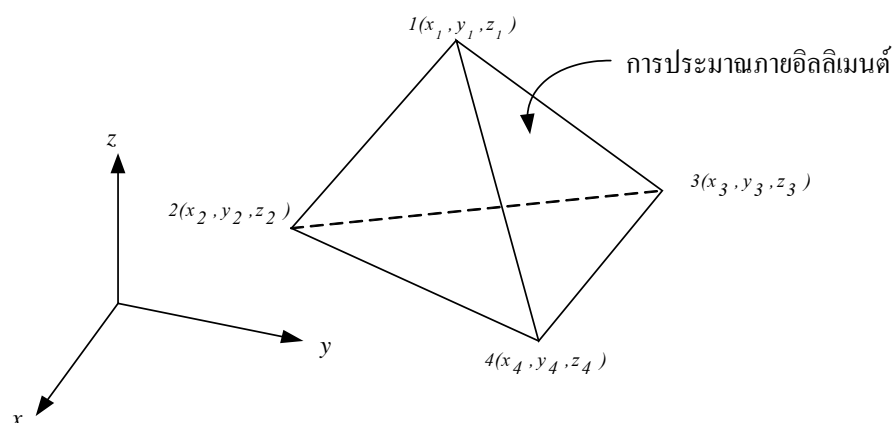
ตารางที่ 3.2 ลักษณะข้อมูลของจุดต่อ

หมายเลขโนด	พิกัดแกน x	พิกัดแกน y	พิกัดแกน z
1	0	0	0
2	0	0	1
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	1	1	1

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ อย่างในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 โหนดที่มีตัวห้อย 1 2 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายในอิลลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.2 ตำแหน่งของโนด (x_n, y_n, z_n) , $i = 1, 2, 3, 4$ เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า A_i โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์ $A(x, y, z)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$A_e(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (3.9)$$

โดยที่ a, b, c, d เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากโนดทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.2 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$A_e(x_1, y_1, z_1) = A_1 = a + bx_1 + cy_1 + dz_1$$

$$A_e(x_2, y_2, z_2) = A_2 = a + bx_2 + cy_2 + dz_2$$

$$A_e(x_3, y_3, z_3) = A_3 = a + bx_3 + cy_3 + dz_3$$

$$A_e(x_4, y_4, z_4) = A_4 = a + bx_4 + cy_4 + dz_4$$

นำค่า a b c d ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับไปในสมการที่ (3.9) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์เป็น

$$A_e(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (3.10)$$

ซึ่ง $N_i, i = 1, 2, 3, 4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3.11)$$

โดยที่ $a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมา มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3. สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \\ A_l \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \quad (3.13)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e[A]_e = [f]_e$ โดย $[A]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่ โหนด และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่า เป็นเมทริกซ์ระดับอีลิเมนต์ ซึ่งสมการของอีลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.13) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3.14)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{sys}[A]_{sys} = [F]_{sys}$ จากสมการที่ (3.14) เมทริกซ์ $[K]_{sys}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{sys} = [K]_{sys}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวน โหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบ จำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิลลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.1 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{sys}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิลลิเมนต์ต่าง ๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแฉวนอนและแฉวดิ่งของแต่ละอิลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.1 $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 2 8 5 และ 6 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 3 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 2 4 และ 8 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 4 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 3 4 และ 7 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 5 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 7 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 6 ซึ่งเป็นอิลลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1 8 4 และ 7 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (2) & (8) & (5) & (6) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (2) \\ (8) \\ (5) \\ (6) \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e2} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (1) & (2) & (8) & (5) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (8) \\ (5) \end{matrix} & \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ e_4 & f_4 & g_4 & h_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[K]_{e3} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (4) & (8) \\ (1) & i_1 & j_1 & k_1 & l_1 \\ (2) & i_2 & j_2 & k_2 & l_2 \\ (4) & i_3 & j_3 & k_3 & l_3 \\ (8) & i_4 & j_4 & k_4 & l_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e4} = \begin{bmatrix} (1) & (3) & (4) & (7) \\ (1) & m_1 & n_1 & o_1 & p_1 \\ (3) & m_2 & n_2 & o_2 & p_2 \\ (4) & m_3 & n_3 & o_3 & p_3 \\ (7) & m_4 & n_4 & o_4 & p_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e5} = \begin{bmatrix} (1) & (7) & (8) & (5) \\ (1) & q_1 & r_1 & s_1 & t_1 \\ (7) & q_2 & r_2 & s_2 & t_2 \\ (8) & q_3 & r_3 & s_3 & t_3 \\ (5) & q_4 & r_4 & s_4 & t_4 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{e6} = \begin{bmatrix} (1) & (8) & (4) & (7) \\ (1) & u_1 & v_1 & w_1 & x_1 \\ (8) & u_2 & v_2 & w_2 & x_2 \\ (4) & u_3 & v_3 & w_3 & x_3 \\ (7) & u_4 & v_4 & w_4 & x_4 \end{bmatrix}$$

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแฉวนอนและแฉวนตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{sys}$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แฉวนตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแฉวนอนที่ 5 แฉวนตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \\ (1) & e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ (2) & c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ (3) & m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ (4) & i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ (5) & e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ (6) & 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ (7) & m_4+q_2+u_4 & 0 & n_4 & o_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_2+x_4 & s_2+v_4 \\ (8) & c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_3+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_3+v_2 \end{bmatrix}$$

5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โนด

6. คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โนดต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.4 การป้องกันสนามแม่เหล็ก (ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล, 2544)

การลดผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าวิธีการหนึ่งคือการลดระดับความเข้มสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โครงสร้างของสายส่งไฟฟ้า และสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้า

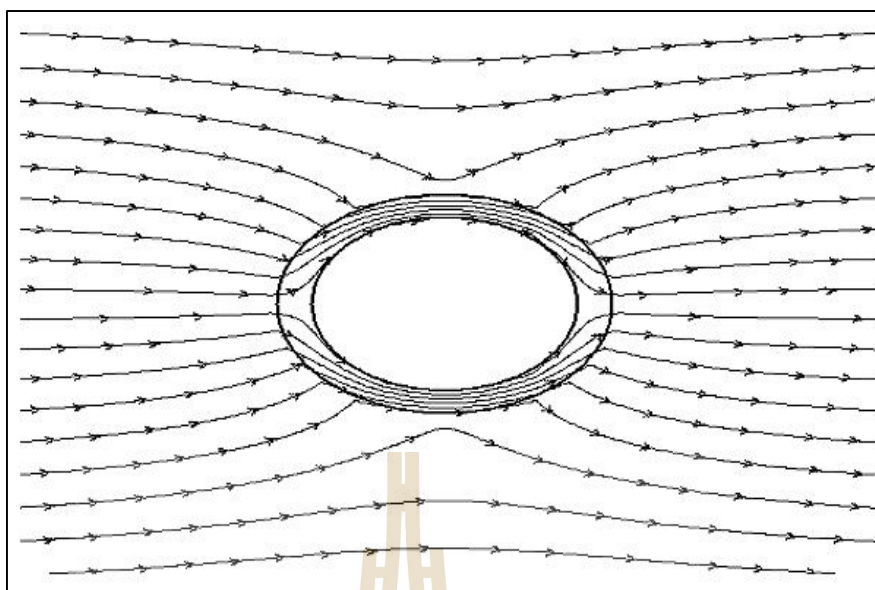
การลดระดับความเข้มสนามแม่เหล็กมีหลายวิธีเช่น การทำระบบกราวด์ให้กับวัตถุที่ได้รับผลกระทบเพื่อลดผลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การใช้โลหะที่มีคุณสมบัติของค่าซึมซาบของแม่เหล็กสูงเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็ก การเพิ่มความสูงของสายส่ง การจัดเรียงลำดับเฟส และการชิลด์ เป็นต้น

การชิลด์ (Shielding) โดยทั่วไปนิยมกระทำ ณ ตำแหน่งแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เช่น ตำแหน่งสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หรือกระทำที่ตำแหน่งอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก เช่น คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ การชิลด์ที่นิยมกระทำมี 2 วิธี คือ กลไกการ

กำบังด้วยการแบ่งฟลักซ์ (Flux shunting shielding mechanism) และ กลไกการกำบังด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (Induced current shielding mechanism)

3.4.1 กลไกการกำบังด้วยการแบ่งฟลักซ์

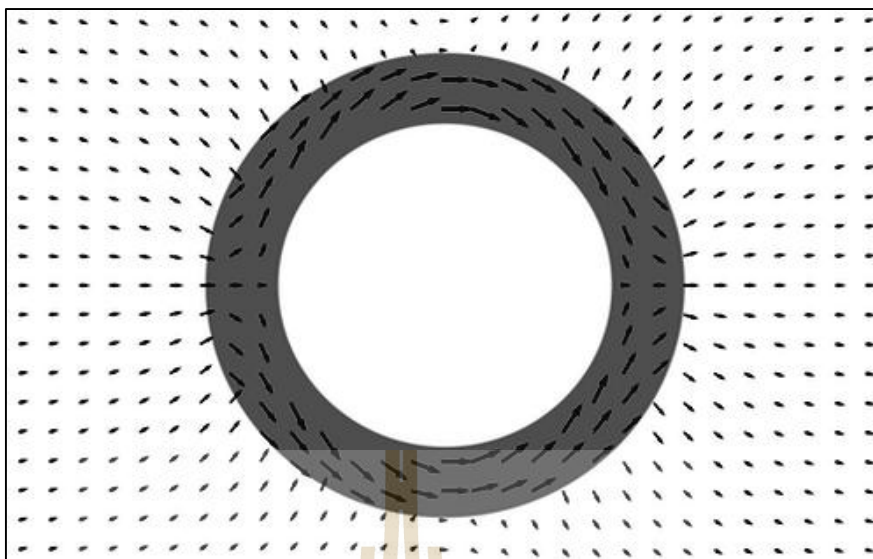
การลดสนามแม่เหล็กตามกลไกนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุแม่เหล็กหรือวัสดุที่มีความซึมซาบได้สูง (High permeability) อาทิเช่น นิกเกิล ($\mu_r = 600$) เหล็กอ่อน ($\mu_r = 2000$) เหล็ก ($\mu_r = 5000$) Silicon Iron ($\mu_r = 7000$) เป็นต้น เมื่อวางวัสดุแม่เหล็กลงในสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในบริเวณอวกาศว่างตามทฤษฎีสถานแม่เหล็ก พฤติกรรมความเข้มสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่บริเวณผิวของแม่เหล็กจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต 2 ประการดังนี้ คือ องค์ประกอบในทิศทางแนวสัมผัสของเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก H นั้นจำเป็นต้องต่อเนื่องกันตลอดวัสดุแม่เหล็กและในอากาศเพื่อที่ สอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) และองค์ประกอบในทิศทางแนวตั้งฉากของเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จำเป็นต้องต่อเนื่องกันตลอดในวัสดุแม่เหล็กและในอากาศเพื่อที่จะสอดคล้องกับกฎของเกาส์ (Gauss's law) เนื่องจากความแตกต่างของความซึมซาบได้ระหว่างวัสดุแม่เหล็กและ อากาศมีมากจึงเป็นสาเหตุให้ทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก H และทิศทางของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่บริเวณผิวรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเพื่อที่จะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต โดยทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ในวัสดุแม่เหล็กจะมีทิศทางในลักษณะถูกขนาบไปกับผิวรอยต่อขณะเดียวกันทิศทางของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ในอากาศจะมีทิศทางลักษณะตั้งฉากกับผิวรอยต่อดังรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะกลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กวัสดุที่มีความซึมซาบได้สูงและมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลม โดยพบว่าปริมาณฟลักซ์แม่เหล็ก B จะหนาแน่นมากในบริเวณผิววัสดุขณะเดียวกันฟลักซ์แม่เหล็ก B ในบริเวณอื่นก็จะลดลงจึงเป็นสาเหตุให้ความเข้มสนามแม่เหล็ก H ภายในทรงกระบอกกลมลดลง กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่สามารถลดความเข้มสนามแม่เหล็ก H ได้ โดยวัสดุที่มีความซึมซาบได้สูงจะมีชื่อเรียกว่า “the flux shunting shielding mechanism”



รูปที่ 3.3 ลักษณะกลไกการป้องกันสนามแม่เหล็กแบบการแบ่งฟลักซ์

3.4.2 กลไกการกำบังด้วยกระแสเหนี่ยวนำ

การปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กตามกลไกนี้เกิดขึ้นกับวัสดุตัวนำ หรือวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง อาทิเช่น เงิน ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อวางวัสดุตัวนำลงในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุตัวนำทั้งนี้ เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำนี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบนผิวตัวนำ กระแสเหนี่ยวนำนี้มีชื่อเรียกว่า กระแสไหลวน (Eddy current) กระแสไหลวนนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กเดิม ทำให้สนามแม่เหล็กภายในบริเวณนั้นมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยข้อดีการปิดกั้นสนามแม่เหล็กตามกลไกนี้ คือ ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กได้ดีกับวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก ส่วนข้อเสียการปิดกั้นสนามแม่เหล็กตามกลไกนี้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย (Schulz, Plantz, and Brush, 1998)



รูปที่ 3.4 ลักษณะกลไกการป้องกันสนามแม่เหล็กแบบกระแสเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาลักษณะการป้องกันสนามแม่เหล็กในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นลักษณะกลไกการป้องกันฟลักซ์หรือสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงและมีลักษณะรูปร่างทรงเป็นกระบอกกลม อันเนื่องมาจากการเกิดกระแสไหลวนที่ผิวของวัสดุตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กเดิม จึงทำให้สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำมีค่าลดลงและเรียกกลไกการปิดกั้นนี้ว่า “the induce current shielding mechanism” ตามคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการป้องกันหรือลดทอน

การชีลด์ที่เหมาะสมจะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ณ บริเวณที่ชีลด์มีค่าลดลง ซึ่งประสิทธิภาพการชีลด์ (Shielding efficiency : SE) ซึ่งถูกกำหนดโดยอัตราส่วนการลดทอนของสนามแม่เหล็กขณะที่มีสนามแม่เหล็กแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยจะวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดใดจุดหนึ่งก่อน โดยยังไม่มีการนำวัสดุปิดกั้นสนามแม่เหล็กมาถึ้นในบริเวณนั้น จากนั้นนำวัสดุมาปิดกั้นแล้ววัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตเดิมอีกครั้งหนึ่ง จากนิยามข้างต้นเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SE = \frac{H_{unshield}}{H_{shield}} \quad (3.15)$$

หรือ

$$SE(dB) = 20 \log \left[\frac{H_{unshield}}{H_{shield}} \right] \quad (3.16)$$

จากนิยามของค่าประสิทธิภาพการชิลด์ จึงกล่าวได้ว่า ถ้าค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้มีค่าสูงหมายความว่า วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กสามารถทำหน้าที่ลดสนามแม่เหล็กได้ดี หรือสนามแม่เหล็กแพร่ผ่านวัตถุปิดกั้นไปได้น้อย ขณะเดียวกัน ถ้าค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้มีค่าน้อยหมายความว่า วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กสามารถทำหน้าที่ลดสนามแม่เหล็กได้ไม่ดี หรือสนามแม่เหล็กแพร่ผ่านวัตถุปิดกั้นไปได้มาก

3.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ ทฤษฎีการคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ และการป้องกันสนามแม่เหล็กโดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัลดังเช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหาโดยรวมของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระ อย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่ปรากฏขึ้นรอบตัวนำภายในสายส่ง 115 kV และค่าสนามแม่เหล็กที่ปรากฏรอบ ๆ บุคลากรที่ปฏิบัติหน้าที่ในสายส่งกำลังไฟฟ้า 22 kV ซึ่งพื้นที่บริเวณทั้งสองเป็นพื้นที่ขนาดเล็ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำได้ ในขณะที่บริเวณส่วนใหญ่เป็นอากาศและไม่มีความจำเป็นสำหรับการศึกษามากนัก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดปริมาณของกริดบริเวณที่ไม่จำเป็นเพื่อช่วยย่นระยะเวลาในการหาผลเฉลยแต่ยังสามารถรักษาความแม่นยำของผลเฉลยได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถจำลองผลระบบที่มีความแตกต่างกันทางด้านวัสดุได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของสายส่งกำลังไฟฟ้า และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวรอบสายส่งต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของสายส่งกำลังไฟฟ้า

สำหรับปัญหาค่าสนามแม่เหล็กใน 3 มิติในระบบพิกัดฉาก ระเบียบวิธีไฟไนต์ อิลลิเมนต์นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการที่ (4.1) โดยทำการ พิจารณาสถาณแม่เหล็กครบถ้วนทั้ง 3 แนวแกน x y z ดังนั้นจึงได้

$$D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - Gw + Q = 0 \quad (4.1)$$

โดยที่ w คือ ฟังก์ชันใด ๆ ที่ต้องการทราบค่า
 D_x D_y D_z G และ Q คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์

แบบจำลองของสนามแม่เหล็กที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 3 มิติ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (4.2)

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \frac{1}{\epsilon^2} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right) - \sim + \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) = 0 \quad (4.2)$$

โดยที่ \mathbf{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field)
 t คือ เวลา (Time)
 \sim คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability)
 ϵ คือ ความเร็วในการแพร่กระจาย (Propagation velocity)
 \dagger คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (Conductivity)

ความเร็วในการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างสภาพยอมทางไฟฟ้า () กับสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (\sim) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.15)

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{\sim v}} \quad (4.3)$$

โดยที่ $\sim = \sim_0 \sim_r$ และ $v = v_0 v_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพขาคซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ และ v_r คือสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\sim_0 = 4f \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $v_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆกับสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.2) จะได้

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2}\right) - \sim v \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}\right) - \sim \dagger \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}\right) = 0 \quad (4.4)$$

จากคุณสมบัติของระบบที่เป็น time-harmonic อย่างเช่นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะได้

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \approx j \mathring{S} H \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \approx -\mathring{S}^2 H \quad (4.6)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.4) เมื่อพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 3 มิติจึงได้

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}\right) - (j \sim \mathring{S} \dagger - \sim \mathring{S}^2 v) H = 0 \quad (4.7)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (4.1) กับ (4.7) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ D_x , D_y , D_z , G และ Q จะได้

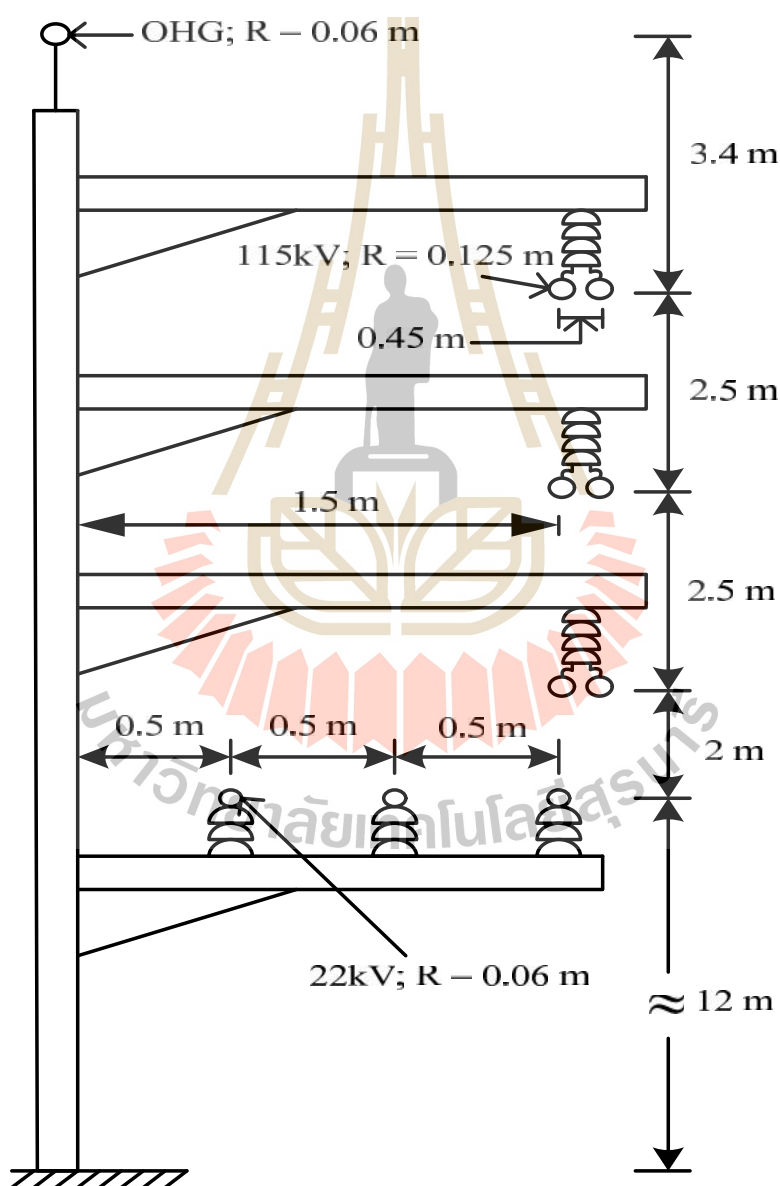
$$\begin{aligned} D_x &= D_y = D_z = 1 \\ G &= -\sim v \mathring{S}^2 + j \sim \dagger \mathring{S} \\ Q &= 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

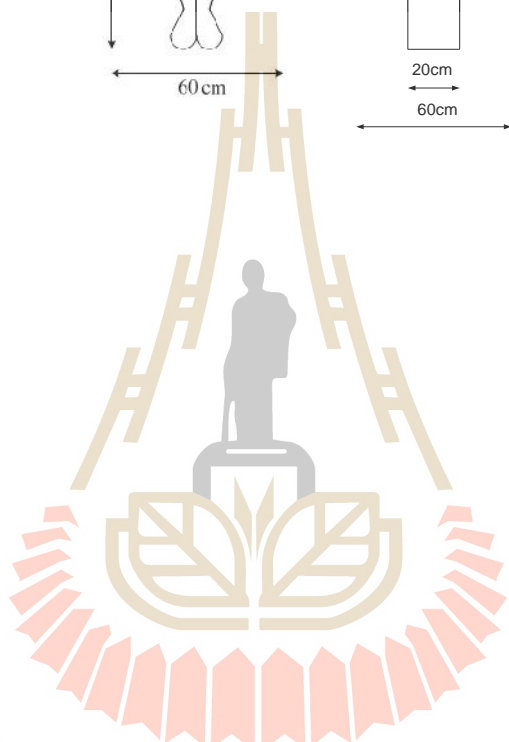
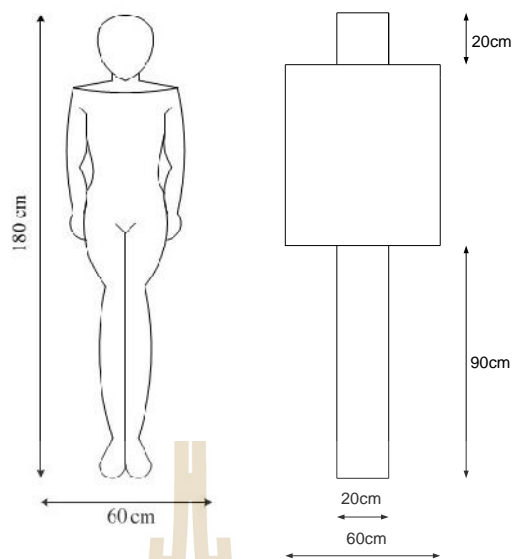
สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงในสมการที่ (4.7) สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิติค้นหาผลเฉลยแม่นยำได้ยากเพราะด้วยเหตุที่ติดอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยขนาด 3 มิติดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 การออกแบบอิลลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

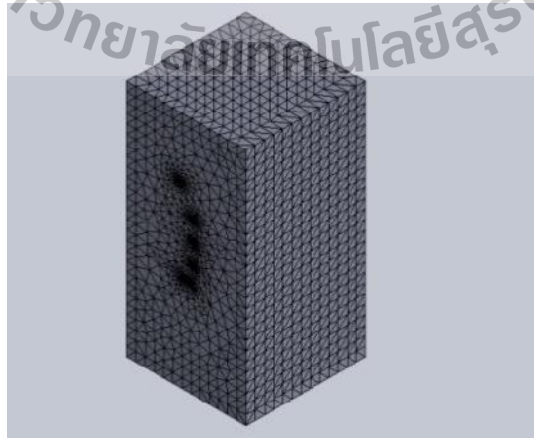
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและรายละเอียดของบุคลากรที่ปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายไฟฟ้ากำลังดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งในรูปแบบ 3 มิติ การออกแบบกริดให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่นั้นจะแปรเปลี่ยนตามความต้องการในการวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่สนใจภายในส่วนต่าง ๆ ของระบบ



รูปที่ 4.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

กรณีทีพิจารณาาระบบเป็น 3 มิติ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นจะได้

$$H(x, y, z) = H_1 N_1 + H_2 N_2 + H_3 N_3 + H_4 N_4 \quad (4.9)$$

โดยที่ $N_{n,n} = 1 \ 2 \ 3 \ 4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์และ $H_{n,n} = 1 \ 2 \ 3 \ 4$ คือผลลัพธ์ของค่าสนามแม่เหล็กในแต่ละ โหนด $1 \ 2 \ 3 \ 4$ ของอิลลิเมนต์ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad \text{เมื่อ } i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \quad (4.10)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3) \\ b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \\ c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \\ d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์หาได้จากดิเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4.11)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาของระบบ 3 มิติ ทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์จะต้องจัดสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ (4.7) ก่อนที่จะเข้าสู่การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ต่อไป (Larry, 1984)

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} \right) + (j\omega\epsilon - \gamma^2) \mathbf{H} = 0$$

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad (4.12)$$

ประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เพื่อหาระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighting functions) ดังสมการที่ (4.12) ในปัจจุบันการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างถือเป็นวิธีที่ถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกออกไปได้อีก เช่น วิธีของกาลอร์คิน (Galerkin) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตรจึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหาขนาดใหญ่ สำหรับกรณีระบบปัญหา 3 มิติการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้ คือ การแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4.7) จะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ หากแต่จะมีค่าเท่ากับ R แทนดังแสดงด้วยสมการที่ (4.13)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right) - (j\omega\epsilon - \gamma^2) \mathbf{H} = R \quad (4.13)$$

โดยที่ H คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าเที่ยงตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาลเลอร์กิน (Preston, Reece, and Sangha, 1988; Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function : W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad ; n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.14)$$

สำหรับอิลลิเมนต์รูปสามทรงสี่หน้า จุดที่ไม่ทราบค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (4.14) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่า บับ โนฟ-กาลเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.13) ลงในสมการที่ (4.14) จะได้

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) - (jS - t - \sim vS^2) H \right] dV = 0 \quad (4.15)$$

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] dV - \int_V N_n [(jS - t - \sim vS^2) H] dV = 0 \quad (4.16)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (4.16) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V u (\nabla \cdot \mathbf{V}) dV = \int_{\Gamma} u (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma - \int_V (\nabla u \cdot \mathbf{V}) dV \quad (4.17)$$

Γ คือขอบเขตของอิลลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.17) กับพจน์แรกของสมการที่ (4.16) จะได้

$$u = N_n$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \mathbf{k}$$

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอีลิเมนต์ Γ

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} n_y + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} n_z$$

$$u(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) = N_n \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} n_y + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} n_z \right)$$

$$\ddot{u} = \frac{\partial N_n}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\nabla u \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.16) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \right) n_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \right) n_y + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right) n_z \right] d\Gamma - \int_V \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} dV -$$

$$\int_V N_n \left[(j\ddot{S} - \dot{t} - \sim v\ddot{S}^2) \mathbf{H} \right] dV = 0 \quad (4.18)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4.18) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ โดยทำการประยุกต์เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) เมื่อกำหนดให้ $\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial n} = 0$ ดังนั้นจึงได้สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์แสดงดังนี้

$$\int_V \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} dV + \int_V N_n (j\tilde{S} - t - \sim v\tilde{S}^2) \mathbf{H} dV = 0 \quad (4.19)$$

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right) dV + \int_V [N]_{4 \times 1} (j\tilde{S} - t - \sim v\tilde{S}^2) \mathbf{H} dV = 0 \quad (4.20)$$

และจากสมการที่ (4.9) จึงได้ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็ก \mathbf{H} โดยประมาณแต่ละอิลลิเมนต์เป็น

$$H(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [H]_{4 \times 1}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [H]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial H}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [H]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial H}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [H]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์จึงกลายเป็น

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [H]_{4 \times 1} + \int_V [N]_{4 \times 1} (j\tilde{S} - t - \sim v\tilde{S}^2) [N]_{1 \times 4} dV [H]_{4 \times 1} = 0 \quad (4.21)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการดังนี้

$$[K + M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (4.22)$$

โดยที่ $[M]_{4 \times 4}$ = เมทริกซ์การนำไฟฟ้า

$[K]_{4 \times 4}$ = เมทริกซ์ความซาบซึ่มได้ของแม่เหล็ก

$\{F\}_{4 \times 1}$ = โหลดแวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง

เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า: $[M]_{4 \times 4}$

$$[M]_{4 \times 4} = \int_V [N]_{4 \times 1} (j\tilde{S} - \dagger - \sim v\tilde{S}^2) [N]_{1 \times 4} dV \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.10) ฟังก์ชันการประมาณภายในแสดงได้ดังนี้

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.24) และ $j\tilde{S} - \dagger - \sim v\tilde{S}^2$ มีค่าคงที่ดังนั้นสมการที่ (4.23) จึงกลายเป็น

$$[M]_{4 \times 4} = (j\tilde{S} - \dagger - \sim v\tilde{S}^2) \int_V [N]_{4 \times 1} [N]_{1 \times 4} dV \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.25)$$

สมการที่ (4.25) นี้สามารถคำนวณได้ง่ายโดยใช้สูตรการอินทิเกรตตลอดปริมาตรรูปทรงสี่หน้า (อานนท์ อิศรมงคลรักษ์, 2552) ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (4.26)

$$\int_V N_1^a N_2^b N_3^c N_4^d dV = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (4.26)$$

สมการที่ (4.25) สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ $N_n = N_m$ และ $N_n \neq N_m$ ในกรณีที่ $N_n = N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้าจึงได้ $a = 2, b = 0, c = 0, d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.26) จะได้

$$\int_V N_1^2 dV = \frac{2!0!0!0!}{(2+0+0+0+3)!} 6V = \frac{2V}{20}$$

ในกรณีที่ $N_n \neq N_m$ และยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 และ 2 จึงได้ $a = 1, b = 1, c = 0, d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.26) จะได้

$$\int_V N_1^1 N_2^1 dV = \frac{1!1!0!0!}{(1+1+0+0+3)!} 6V = \frac{V}{20}$$

ที่จุดต่ออื่นๆของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาในลักษณะนี้เช่นกันดังนั้นจากสมการที่ (4.26) จึงได้เมทริกซ์การนำทางไฟฟ้า $[M]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.27) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ จะมีค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิทธิพล

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{(j\tilde{S} - \tau - \tilde{v}\tilde{S}^2)V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

เมทริกซ์ความขบขันได้ของแม่เหล็ก: $[K]_{4 \times 4}$

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (4.28)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในในสมการที่ (4.24) จึงได้

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{b_n}{6V} \quad \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.29)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.29) ลงในสมการที่ (4.28) จะได้

$$\begin{aligned} [K]_{4 \times 4} &= \int \left(\frac{b_n}{6V} \frac{b_m}{6V} + \frac{c_n}{6V} \frac{c_m}{6V} + \frac{d_n}{6V} \frac{d_m}{6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.30) \\ &= \frac{1}{36V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz \\ &= \frac{1}{36V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \end{aligned}$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Sym

โพลกเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเอง: $\{F\}_{4 \times 1}$

$$\{F\}_{4 \times 1} = (0) \int_V [N]_{4 \times 1} dV \quad (4.32)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4.24) ดังนั้นสมการที่ (4.32) จึงกลายเป็น

$$\{F\}_{4 \times 1} = (0) \int_V N_n dV \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (4.33)$$

สมการที่ (4.33) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังสมการ (4.26) โดยยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้า จึงได้ $a = 1, b = 0, c = 0, d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.26) จะได้ว่า

$$\int_V N_1^1 dV = \frac{1!0!0!0!}{(1+0+0+0+3)!} 6V = \frac{V}{4}$$

ซึ่งจุดที่เหลือของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาเช่นเดียวกันนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4.33) จึงได้โพลกเวกเตอร์กระแสที่ผลิตขึ้นเองแสดงดังนี้

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{(0)V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4.3.4 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.3.1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$[K]_{n \times n} \{H\}_{n \times 1} = \{f\}_{n \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ H_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (4.35)$$

- เมื่อ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบรวม
 H คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ
 f คือ ค่าแรงภายนอกที่มากระทำ ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกันของเนื้อวัสดุที่มีอยู่ภายในระบบ เมื่อมีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุเกิดขึ้นนั้นหมายถึงสมการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดสำหรับงานวิจัยนี้มีวัสดุที่ต่างกันอยู่ เช่น อากาศ มนุษย์ เสา สายส่ง และเหล็ก เป็นต้น

4.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย

สำหรับขั้นตอนการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมดอยู่ 2 บริเวณที่กำหนดเงื่อนไขค่าขอบ คือ บริเวณขอบตัวนำของสายส่งและพื้นดิน ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับระบบบริเวณขอบของตัวนำสามารถคำนวณได้จากบทที่ 3 ที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยสิ่งที่ต้องทราบสำหรับใช้คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กบริเวณขอบของตัวนำ คือ ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ รัศมีตัวนำ ค่าความสูงระหว่างตัวนำกับพื้นดิน และค่าพิกัดที่ต้องการคำนวณ โดยค่าขอบเขตของสนามแม่เหล็กของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของตัวนำ

ตำแหน่งผิวของตัวนำ	ค่าสนามแม่เหล็ก (A/m)
115 kV เฟส A1	756.3658 \angle 86.2932 $^{\circ}$
115 kV เฟส A2	759.4136 \angle -86.6026 $^{\circ}$
115 kV เฟส B1	753.8164 \angle -74.0834 $^{\circ}$
115 kV เฟส B2	754.0570 \angle 85.7259 $^{\circ}$

ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของตัวนำ (ต่อ)

ตำแหน่งผิวของตัวนำ	ค่าสนามแม่เหล็ก (A/m)
115 kV เฟส C1	774.9093 \angle -84.0414 ^o
115 kV เฟส C2	747.4800 \angle -59.3928 ^o
22 kV เฟส A	184.6227 \angle -73.3329 ^o
22 kV เฟส B	184.4580 \angle 84.6545 ^o
22 kV เฟส C	196.0556 \angle 76.6961 ^o
Overhead Ground Wire (OHGW)	0 \angle 0 ^o
พื้นดิน	0 \angle 0 ^o

หลังจากประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตให้กับระบบแล้วจากสมการที่ (4.35) จะสามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ณ โหนดต่างๆ ได้ดังสมการที่ (4.36)

$$H = K^{-1} f$$

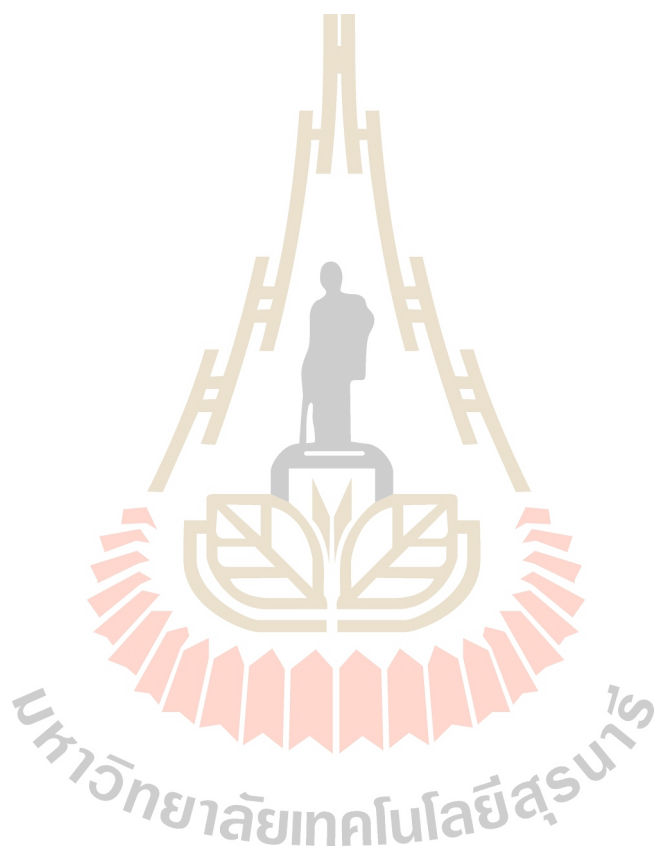
$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ H_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nm} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (4.36)$$

และสามารถหาค่าสนามแม่เหล็ก (B) ต่อได้จากความสัมพันธ์ $B = \mu H$

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ประกอบกับคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันในระบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วง

นำนักศึกษาค้นคว้าของกาเลอร์คิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบต่อไป



บทที่ 5

โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและผลการจำลองแบบ 3 มิติ

5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 นี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น โดยโปรแกรมการจำลองผลของสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นเอง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติจะใช้กริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ ดังนั้นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติจึงใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work การจำลองผลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละปริมาตรของสายส่งกำลังไฟฟ้าและผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นในบทที่ 5 นี้ จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

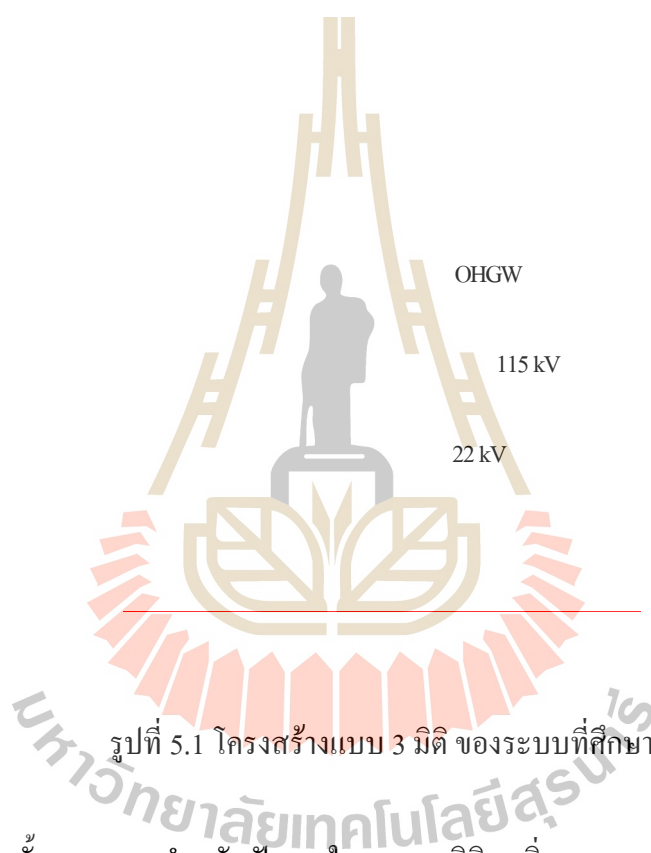
การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กภายใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของ โหนดและเอลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง โดยอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังนี้

5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด

โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหา 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ประโยชน์ของโปรแกรมสำเร็จรูปนี้จะใช้สำหรับเพียงเพื่อสร้างกริดเท่านั้น โดยโปรแกรม Solid Work นี้สามารถสร้างกริดในพิกัด 3 มิติ สำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Solid Work ที่จำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ได้แก่ ข้อมูลบอกระยะพิกัดในแนวแกน xy และ z ข้อมูลบอกหมายเลข โหนด ข้อมูลบอกหมายเลข โหนด ข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ และข้อมูลบอกหมายเลขของขอบเขตชิ้นงานเพื่อกำหนดเงื่อนไข ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ อันได้แก่ การสร้าง

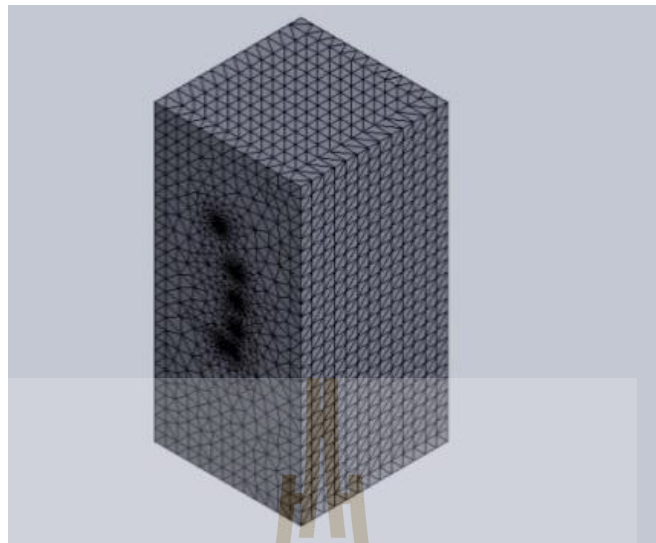
สมการของแต่ละอิเลิเมนต์ การสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตและการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการพัฒนาด้วย โปรแกรม MATLAB™ ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ใช้การวาดภาพและการตัดกริดของระบบที่ศึกษาแบบ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรม Solid work ทั้งนี้เพราะ โปรแกรม Solid work สามารถวาดภาพที่มีความซับซ้อนในรูปแบบ 3 มิติ ได้สะดวก ดังแสดงภาพรวมของระบบที่ศึกษาเป็นแบบ 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการแสดงสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV

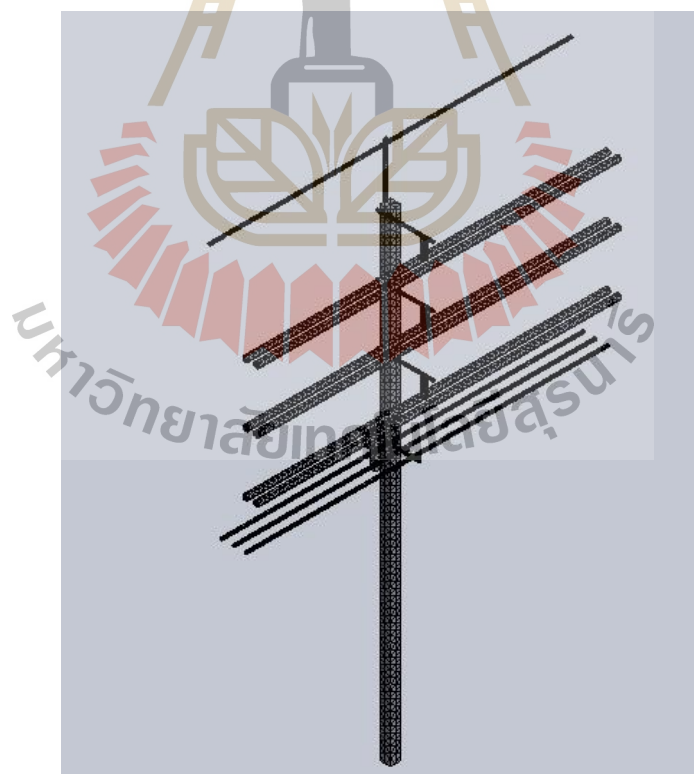


รูปที่ 5.1 โครงสร้างแบบ 3 มิติ ของระบบที่ศึกษา

ขั้นตอนแรกสำหรับปัญหาในแบบ 3 มิติจะเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของระบบสายส่งออกเป็นอิเลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral elements) การออกแบบกริดเป็นรูปอิเลิเมนต์ต่าง ๆ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solidwork โดยจะมีจำนวน โหนดและอิเลิเมนต์ที่ใช้ภายในระบบ ในขณะที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันติดตั้งอยู่เป็นจำนวน 58,841 โหนด และ 345,673 อิเลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.2 นอกจากนี้ภายในแต่ละรูปยังได้แสดงภาพขยาย เพื่อให้เห็นถึงความละเอียดในการออกแบบกริดและการเชื่อมต่อระหว่าง โหนดได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



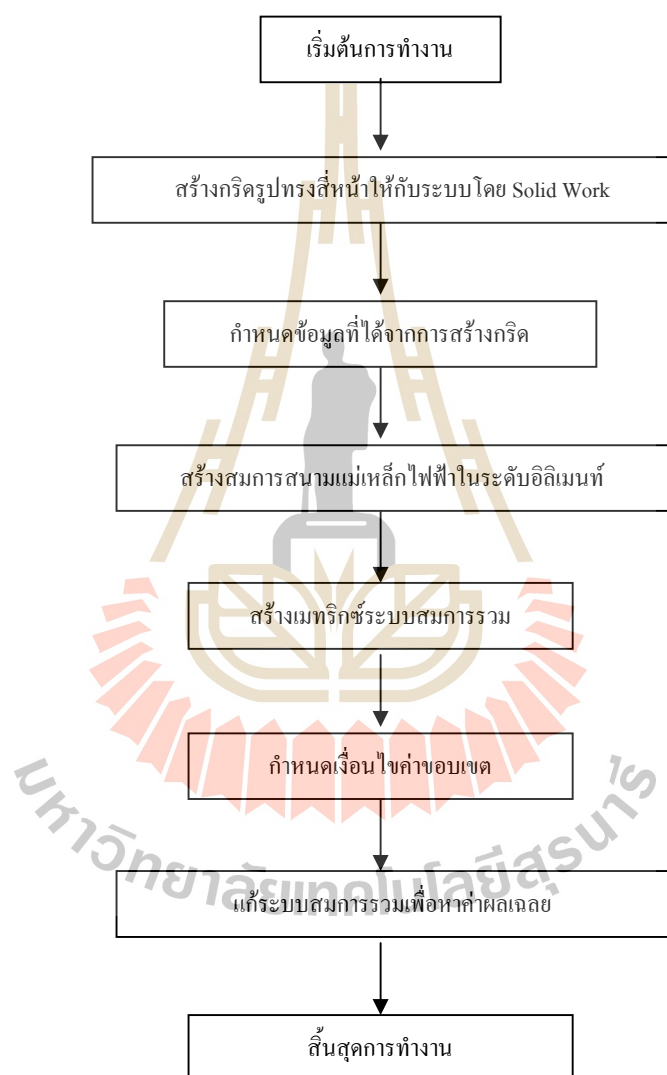
รูปที่ 5.2 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า 115 kV และ 22 kV



รูปที่ 5.3 ภาพการขยายการแบ่งอิลลิเมนต์และการเชื่อมต่ออิลลิเมนต์บนบริเวณที่สำคัญ

5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยข้อมูลที่จำเป็นในการประดิษฐ์โปรแกรมนั้นได้จากในหัวข้อ 5.2.1 ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบแบบ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของ โปรแกรมแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริด : ขั้นตอนนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของ โหนดและอิทธิพลจากโปรแกรมการสร้างกริด Solid Work ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของ โหนด หมายเลข โหนดที่ประกอบขึ้นเป็นอิทธิพล จำนวนและหมายเลขของอิทธิพล เป็นต้น

ขั้นตอนการสร้างสมการสนามแม่เหล็กในระดับอิทธิพล : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะสร้างสมการอิทธิพลเมทริกซ์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อเมื่อพิจารณาปัญหาแบบ 3 มิติ ของทุก ๆ อิทธิพล โดยการสร้างสมการอิทธิพลเมทริกซ์ของแต่ละอิทธิพลจะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่เกี่ยวข้องในแต่ละอิทธิพลนั้น ๆ ด้วย

ขั้นตอนการสร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิทธิพลเมทริกซ์ย่อยๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (4.35) โดยมีหลักการคือ หาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิทธิพลที่พิจารณาอยู่ แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลเมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 ของบทที่ 3 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิทธิพลย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

ขั้นตอนกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือ ดัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (4.35) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 4.1

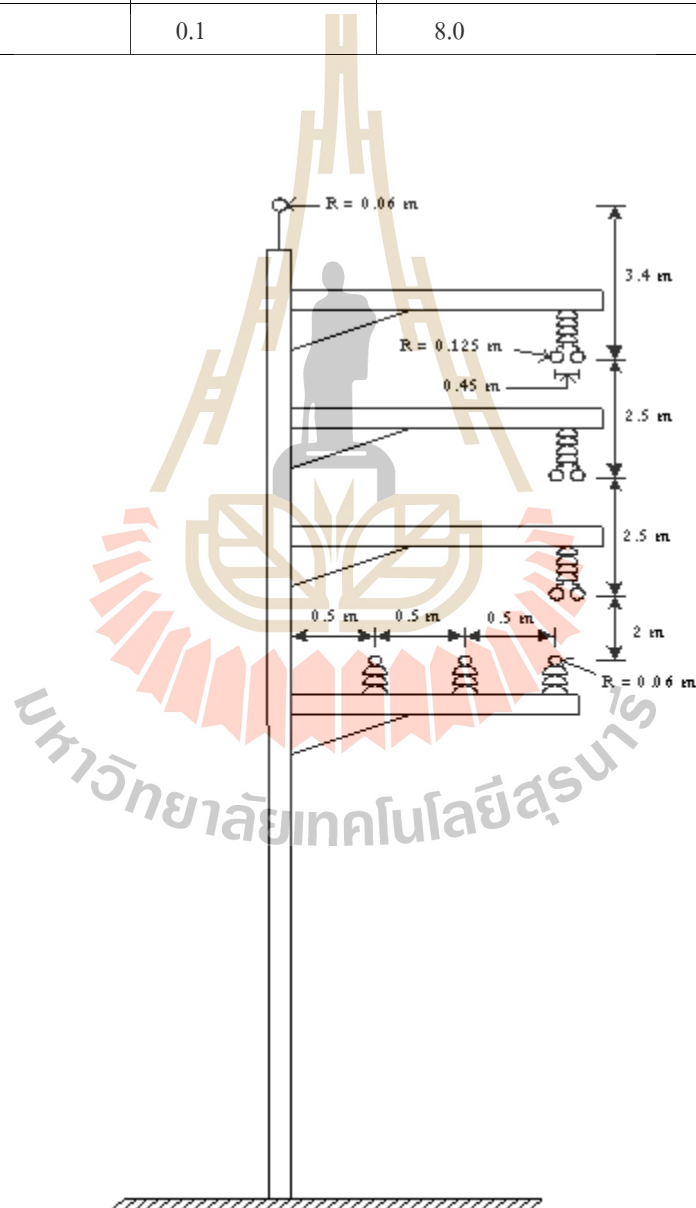
ขั้นตอนแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4.35) เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

5.3 พารามิเตอร์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้จำลองผล

การจำลองผลของสนามแม่เหล็กในขั้นตอนนี้ โดยพารามิเตอร์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้จำลองผลจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ส่วนรายละเอียดและพิกัดต่างๆของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

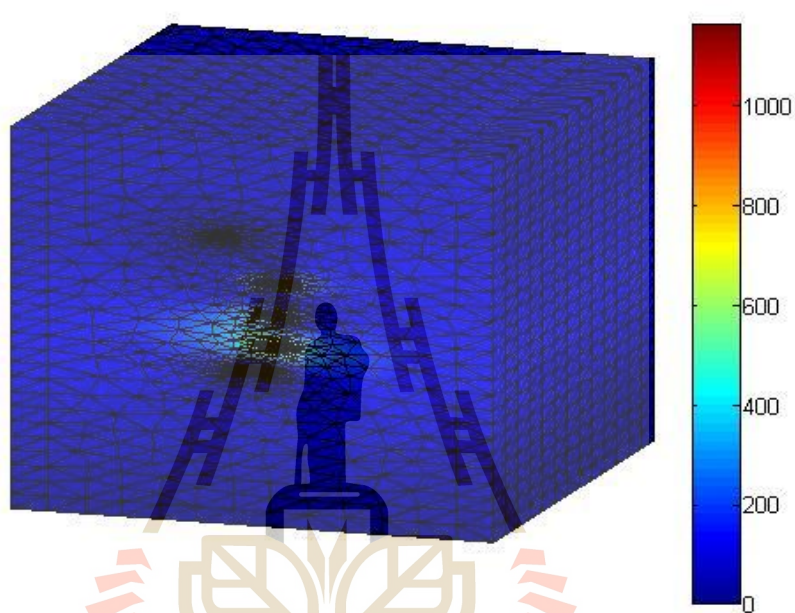
พารามิเตอร์	สภาพนำทางไฟฟ้า ($t, s/m$)	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก สัมพัทธ์ (\sim_r)	สภาพยอมทางไฟฟ้า สัมพัทธ์ (v_r)
สายส่งกำลังไฟฟ้า(ทองแดง)	3.8×10^7	1	3.5
มนุษย์	0.21	18.8	5.0
เหล็ก	0.8×10^7	300.0	3.5
อากาศ	0	1.0	1.0
เสาไฟฟ้า (ซีเมนต์)	1.0	1.0	1.0
ลูกถ้วย	0.1	8.0	1.17



รูปที่ 5.5 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

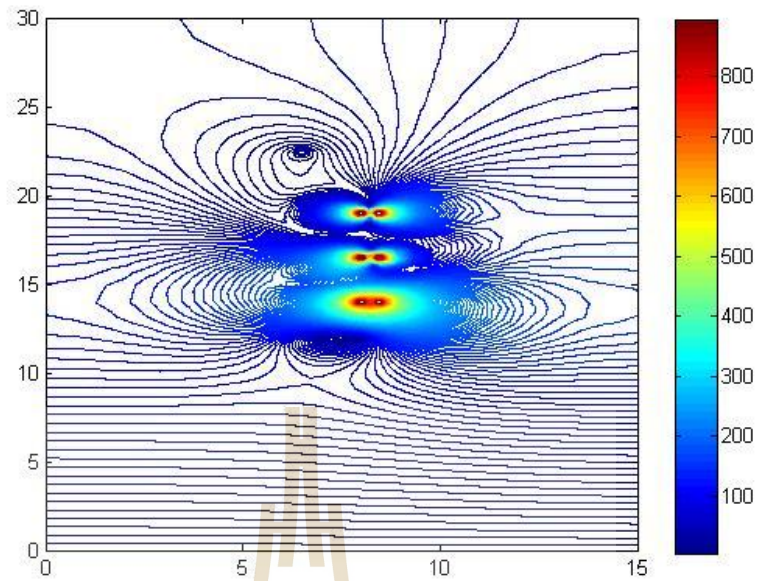
5.4 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติพร้อมวิเคราะห์ผล

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กของระบบสายส่งไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะทำการจำลองระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยสามารถแสดงผลทางกราฟิกได้ดังรูปที่ 5.6-5.8

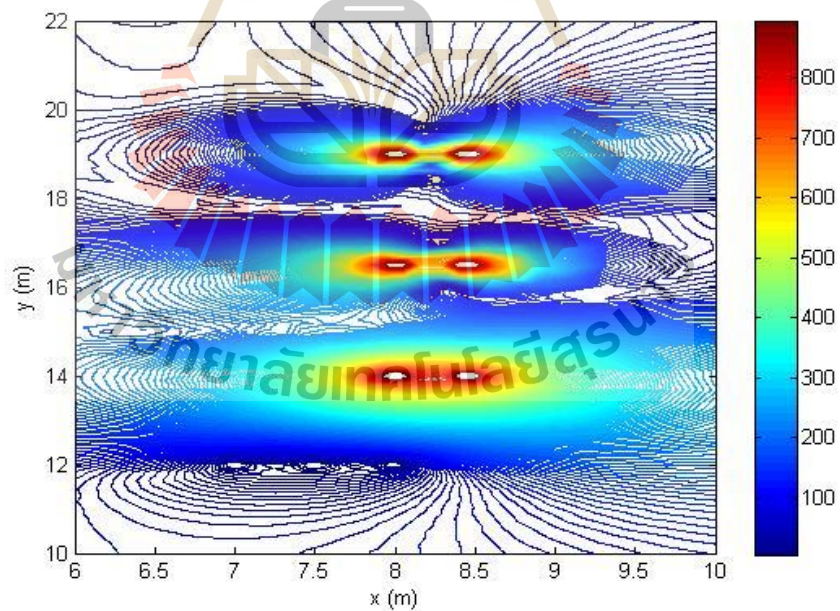


รูปที่ 5.6 การกระจายสนามแม่เหล็ก (~T) แบบ 3 มิติ บริเวณขอบของระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV

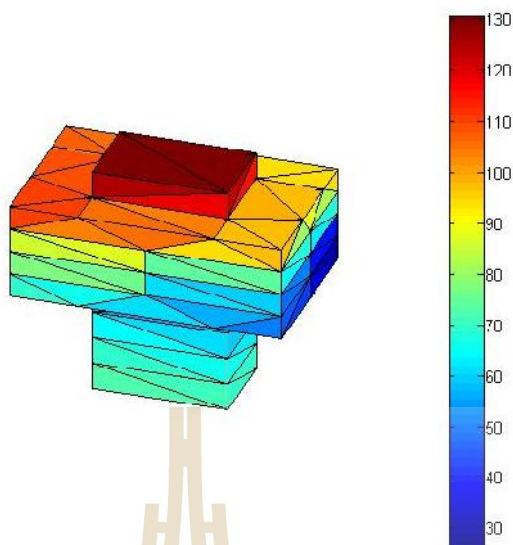
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.7 ภาพตัดขวางการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า



รูปที่ 5.8 ภาพขยายการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ที่ระยะความลึกตรงกึ่งกลางมนุษย์ของระบบ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 ภาพการกระจายสนามแม่เหล็ก ($\sim T$) ในร่างกายมนุษย์

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกดังแสดงด้วยรูปที่ 5.6-5.9 ค่าสนามแม่เหล็กจะมีปริมาณสูงที่ตำแหน่งสายส่งตัวนำและจะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างจากสายส่งตัวนำมีค่ามากขึ้นโดยจะมีค่าน้อยสุดที่บริเวณพื้นดิน และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางที่ช่วงความลึกใด ๆ ค่าสนามแม่เหล็กจะกระจายตัวในลักษณะคล้ายคลึงกันในทุก ๆ ช่วงความลึก ทั้งนี้เพราะลักษณะของปัญหามีรูปแบบเดียวกันตลอดช่วงความลึกและจากผลการจำลองผลทางกราฟิกจะพบว่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานมีค่าเท่ากับ $130.46 \sim T$ และ $70.92 \sim T$ ตามลำดับ โดยจะมีค่าสูงบริเวณศีรษะของผู้ปฏิบัติงาน

5.5 สรุปผล

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลพร้อมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 5.4 พร้อมทั้งคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานที่ปฏิบัติงานบนสายส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV โดยจะพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงบริเวณศีรษะของผู้ปฏิบัติงาน

บทที่ 6

การป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กด้วยการออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน สนามแม่เหล็ก

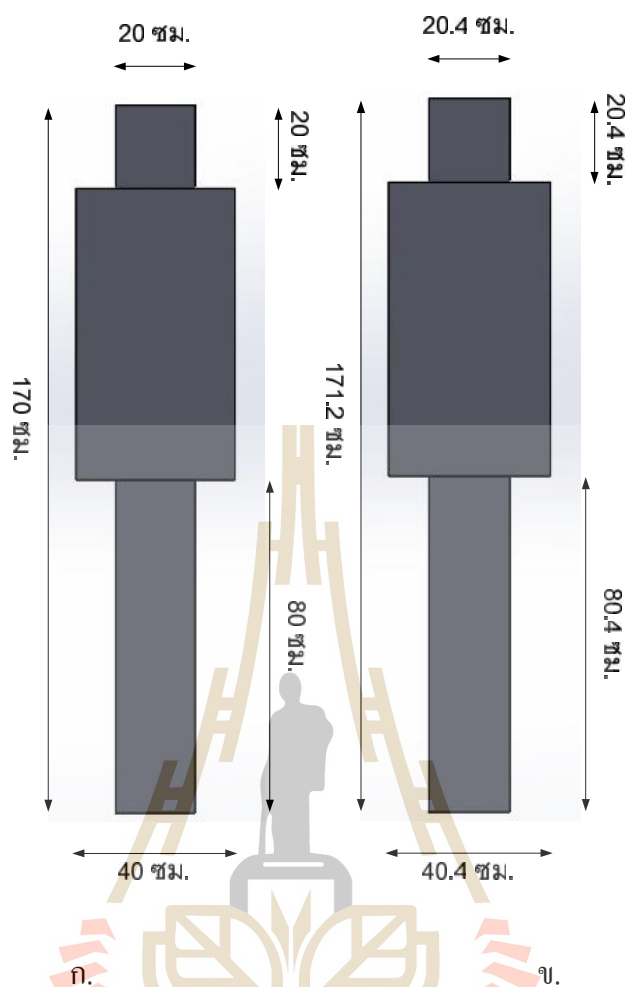
6.1 บทนำ

ในบทที่ 5 ที่ผ่านมาเป็นการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อ
ได้ความสมจริงของระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วน
ภูมิภาค พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องเพื่อแสดงความเชื่อถือได้ของโปรแกรม โดยผลการจำลองในบท
ที่ 5 นั้น เป็นการจำลองในสถานะทั่วไปที่บุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงาน โดยยังไม่มีอุปกรณ์ในการป้องกัน
สนามแม่เหล็ก สำหรับในบทที่ 6 นี้เป็นการป้องกันสนามแม่เหล็กในระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาด
ผ่านระบบจำหน่ายขนาด 22 kV เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัด
ไฟออก ด้วยการปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า โดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้
ตามปกติ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันอันตรายจากสนามแม่เหล็กโดย
เน้นไปที่การออกแบบชุดป้องกันสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมในการลดทอนค่าสนามแม่เหล็ก โดยได้ทำการ
จำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยทั้งก่อน
และหลังที่มีการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กในระบบไฟฟ้า

6.2 การปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

การดำเนินการตรวจสอบ ซ่อมแซม และบำรุงสายส่งกำลังไฟฟ้าของบุคลากรทางไฟฟ้าที่
ปฏิบัติงานในการเข้าถึงสายส่งกำลังไฟฟ้ามีอยู่หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่นิยมปฏิบัติคือการขึ้นไปปฏิบัติงาน
บนเสาไฟฟ้า ณ ตำแหน่งสายส่งกำลังไฟฟ้าดังแสดงด้วยรูปที่ 6.1 ซึ่งการปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟ
ลักษณะนี้ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้คำนึงถึงอันตรายของสนามแม่เหล็กที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นที่อาจเกิดขึ้นต่อ
ผู้ปฏิบัติงานที่อยู่บนเสาไฟนั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปีนเสาไฟจะคำนึงถึงแต่ความอันตรายที่เกิดจาก
กระแสไฟฟ้าเท่านั้นจึงมีการป้องกันเพียงการหุ้มฉนวนสายไฟฟ้า ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2 ทั้งนี้เพื่อให้
สามารถทนต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ แต่ยังไม่มีการรายงานถึงความสามารถในการลดทอนค่า
สนามแม่เหล็ก งานวิจัยนี้จึงได้ทำการจำลองหาค่าสนามแม่เหล็กกับระบบของบทที่ 5 ที่ผ่านมาเมื่อ
บุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานด้วยการปีนเสาไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถ
แสดงภาพโดยเน้นให้เห็นถึงโครงสร้างของชุดป้องกันสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองในระบบ โดยการ

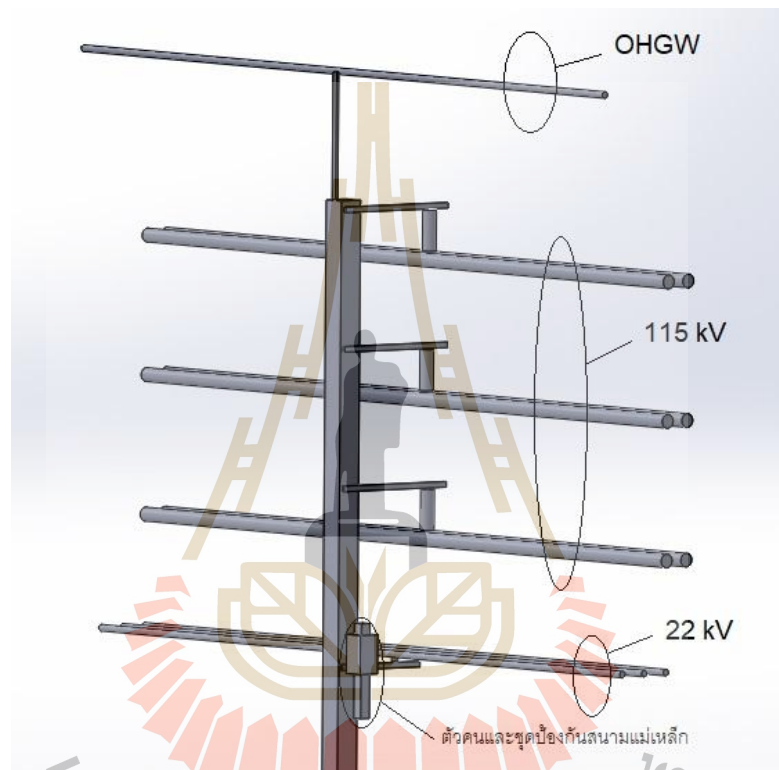




รูปที่ 6.3 โครงสร้างชุดป้องกันสนามแม่เหล็กและตัวบุคลากรที่ใช้ในการจำลองผล
 ก. โครงสร้างของตัวคน ข. โครงสร้างตัวคนรวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 6.3 ซึ่งเน้นให้เห็นถึง โครงสร้างของชุดป้องกันสนามแม่เหล็กและตัวบุคลากรที่ใช้จำลองในระบบจะเห็นว่า ระบบประกอบด้วย

- ชุดป้องกันสนามแม่เหล็กในส่วนหัวที่มีขนาดความกว้าง 20.4 cm สูง 20.4 cm และ ยาว 20.4 cm ในส่วนลำตัวมีขนาดความกว้าง 40.4 cm สูง 70.4 cm และ ยาว 40.4 cm และในส่วนขา มีขนาดความกว้าง 20.4 cm สูง 80.4 cm และ ยาว 20.4 cm โดยที่ชุดป้องกันสนามแม่เหล็กหนา 2 mm โดยวางตัวตามแนวลึทห่างจากเสาไฟเข้าไปตามแนวแกน z ถึงตรงกลางชุดป้องกันสนามแม่เหล็กเป็นระยะ 10.5 m และตัวชุดป้องกันสนามแม่เหล็กมีระยะความสูงจากพื้นดินเท่ากับ 12 m ซึ่งตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของตัวนำสายส่งระบบจำหน่าย 22 kV พอดีดังแสดงในรูป โดยที่มีระยะห่างจากสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV 0.5 m



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

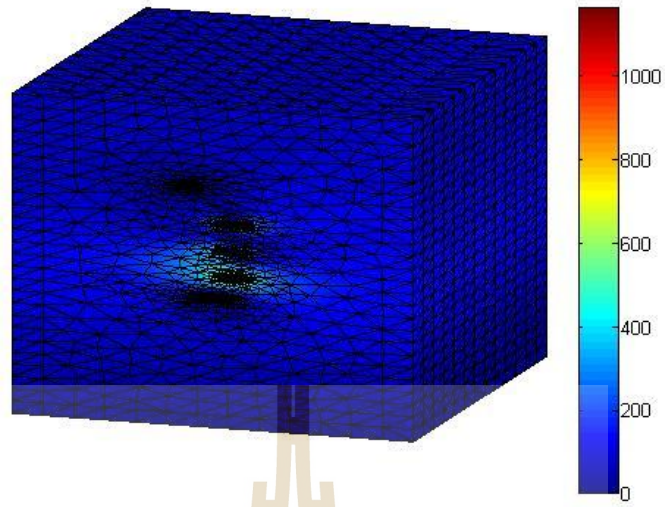
พารามิเตอร์	สภาพนำทาง ไฟฟ้า ($t, s/m$)	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก สัมพัทธ์ (\sim_r)	สภาพยอมทางไฟฟ้า สัมพัทธ์ (v_r)
สายส่งกำลังไฟฟ้า(ทองแดง)	3.8×10^7	1	3.5
มนุษย์	0.21	18.8	5.0
เหล็ก	0.8×10^7	300.0	3.5
อากาศ	0	1.0	1.0

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้จำลองผลในระบบ (ต่อ)

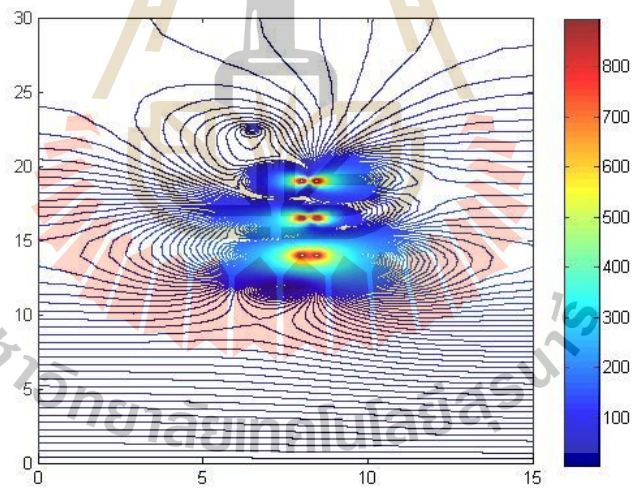
พารามิเตอร์	สภาพนำทาง ไฟฟ้า ($t, s/m$)	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก สัมพัทธ์ (\sim_r)	สภาพยอมทางไฟฟ้า สัมพัทธ์ (v_r)
เสาไฟฟ้า (ซีเมนต์)	1.0	1.0	1.0
ลูกถ้วย	0.1	8.0	1.17
เฟอรัไรซ์	2.0	10000.0	45.44
อลูมิเนียม	3.8×10^7	1	2.2
เหล็กดำ	1×10^7	500	3.5
มิวเมทอล	1.64×10^6	15120	20



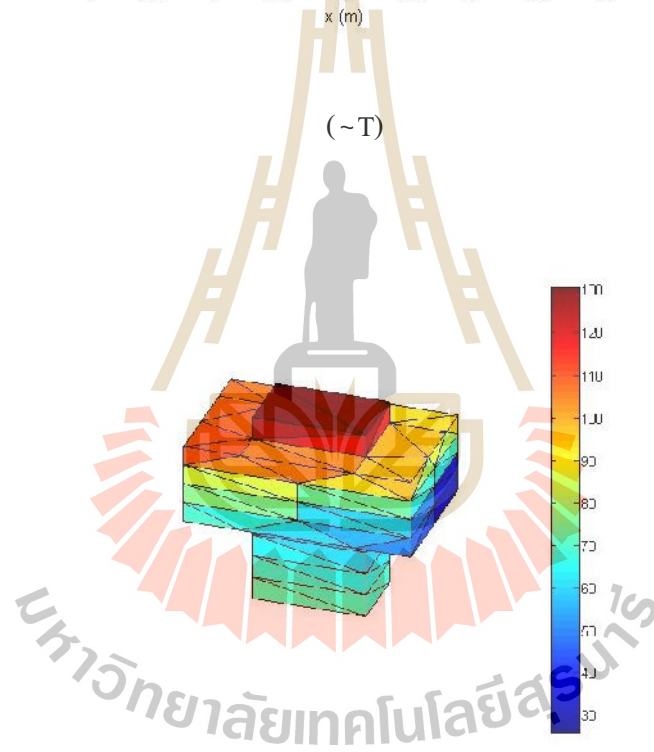
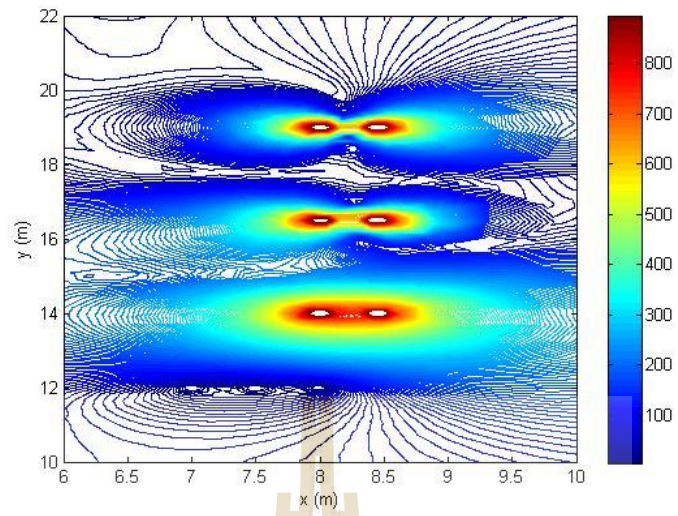




(~T)



(~T)



(~T)

~T

~T

ไฟฟ้าสูงจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำเกิดการเหนี่ยวนำหักล้างกับสนามแม่เหล็กเดิม ส่งผลให้ความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณที่มีการหักล้างเบาบางลงได้ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ ต้นแบบโดยเน้นไปที่การออกแบบชุดป้องกันสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมเพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธี ไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

6.3 การออกแบบชุดป้องกันสนามแม่เหล็กพร้อมผลการจำลอง

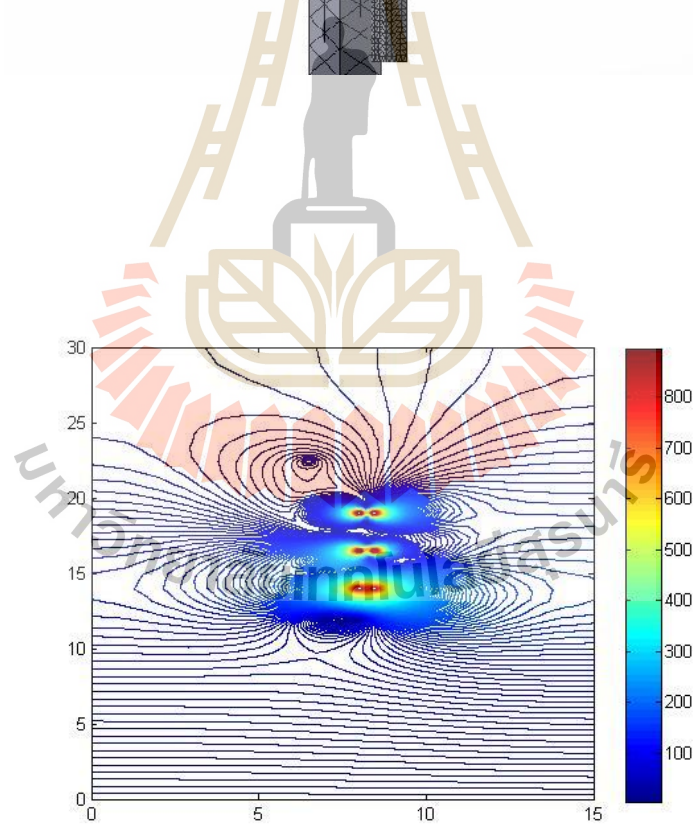
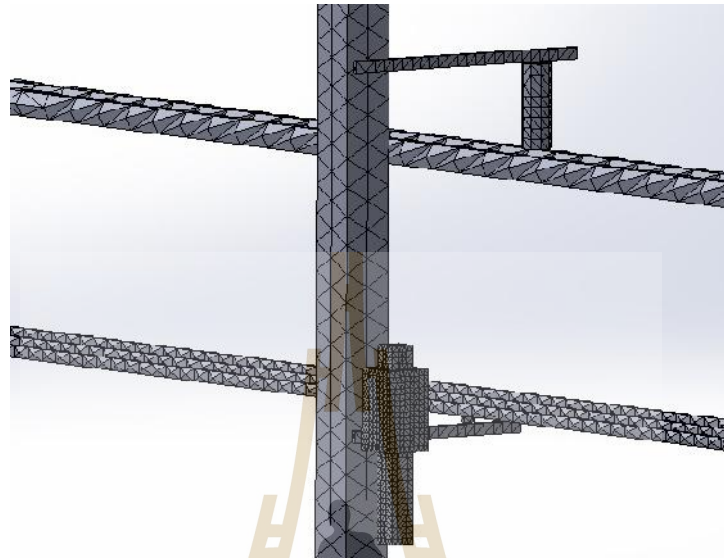
วัสดุวิศวกรรมที่นิยมใช้กำบังเพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กได้แก่ เฟอร์ไรต์ (Ferrite) อลูมิเนียม (Aluminum) เหล็ก (Steel) และมิวเมทัล (80% Ni-Fe μ -metal) (Lopez, D and Dular, P., 2003) โดยวัสดุ วิศวกรรมเหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งได้แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ วัสดุวิศวกรรมแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรม

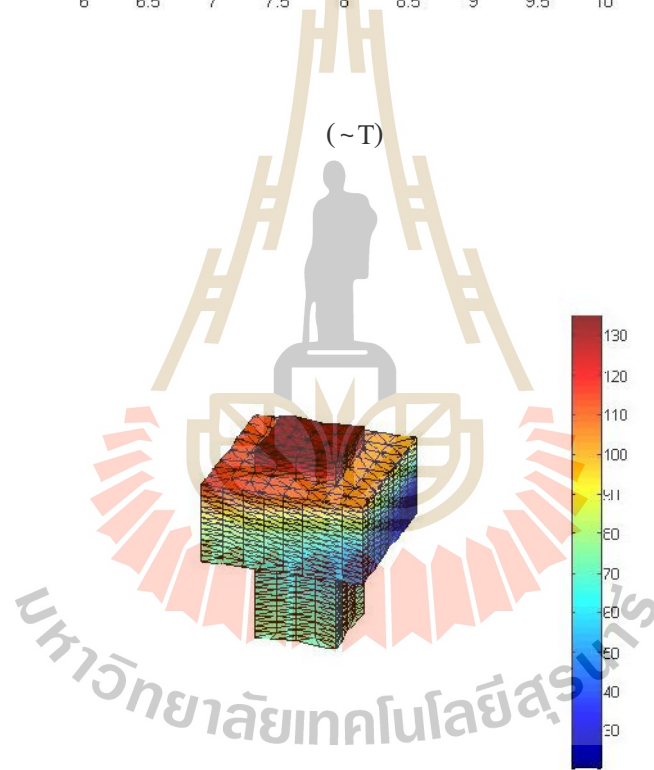
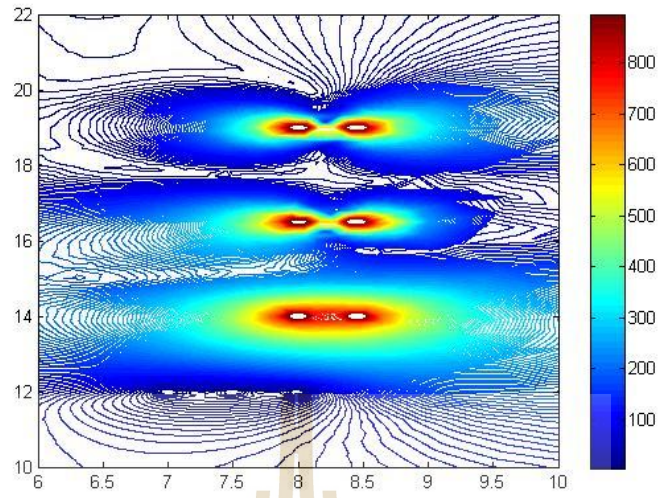
วัสดุวิศวกรรม	สภาพนำทางไฟฟ้า ($t, s/m$)	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก สัมพัทธ์ (\sim_r)	สภาพยอมทางไฟฟ้า สัมพัทธ์ (v_r)
เฟอร์ไรต์	2.0	10000.0	45.44
อลูมิเนียม	3.8×10^7	1	2.2
เหล็กดำ	1×10^7	500	3.5
มิวเมทัล	1.64×10^6	15120	20

จากทฤษฎีการป้องกันสนามแม่เหล็กที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ที่ผ่านมา วัสดุที่มีคุณสมบัติการ นำไฟฟ้าได้สูงและสภาพซาบซึมทางแม่เหล็กที่สูงจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ดังนั้นจากข้อมูลที่ ได้ในตารางที่ 6.2 ทำให้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วัสดุวิศวกรรมทั้ง 4 ชนิดคือ เฟอร์ไรต์ อลูมิเนียม เหล็ก และ มิวเมทัล เนื่องจากในตารางที่ 6.2 วัสดุทั้ง 4 ชนิดเป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าสูง และความซาบซึมแม่เหล็กสูงมาใช้ในการจำลองผล และได้มีการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก บริเวณศรีษะออกเป็น 2 รูปทรงได้แก่ ทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก

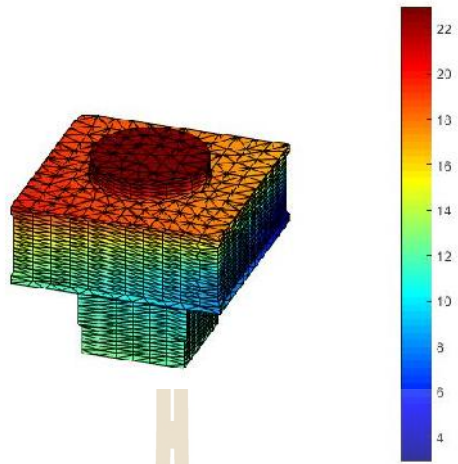
โดยสามารถแสดงภาพขยายการสร้างกริดและผลการจำลองเชิงกราฟิกด้วยระเบียบวิธี ไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่บนเสาไฟฟ้าด้วยการปีนเสาไฟฟ้ากับสายส่ง ในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออกโดยที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ได้ดังรูปที่ 6.12-6.28 โดยเมื่อพิจารณากรณีการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์แสดงผลได้ดังรูป ที่ 6.13-6.16 เมื่อพิจารณากรณีการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียมแสดงผลได้ดังรูปที่ 6.17-



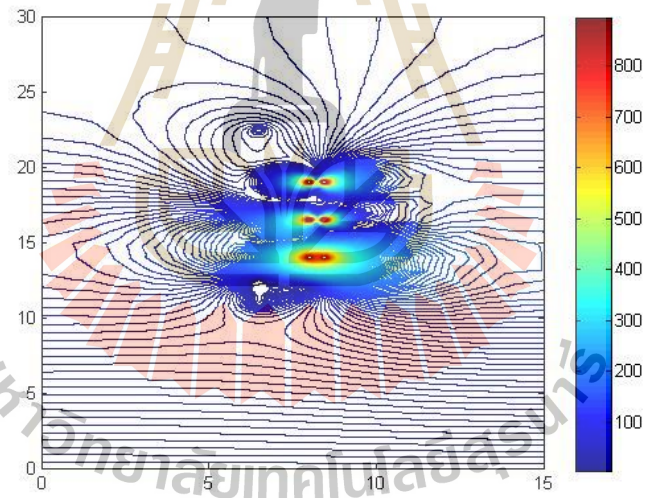
(~T)



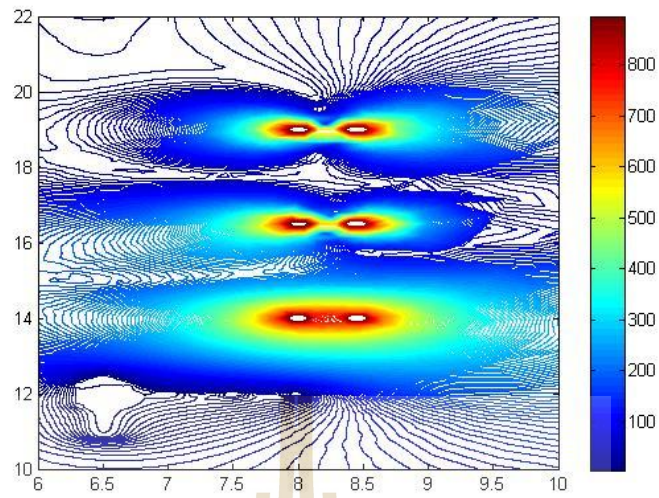
(~T)



(~T)



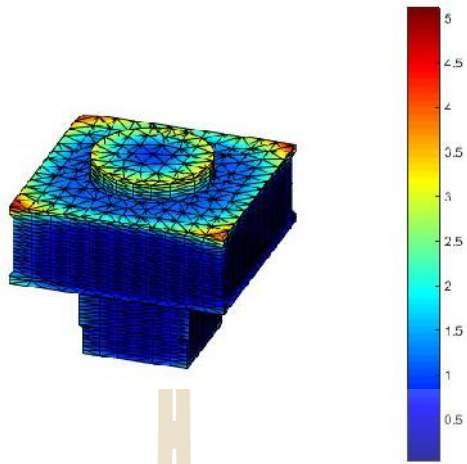
(~T)



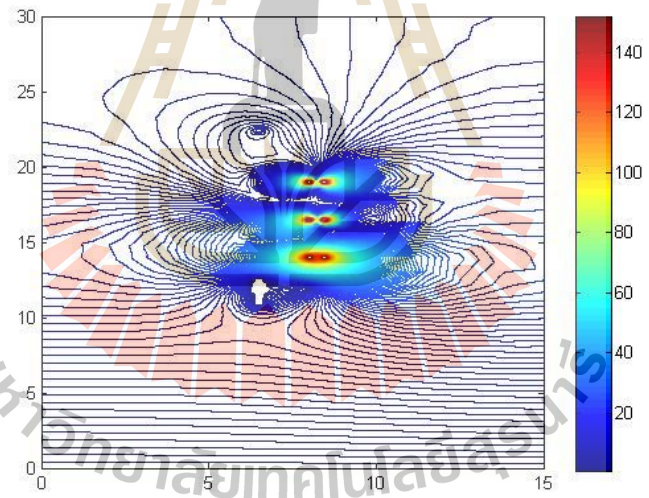
(~T)



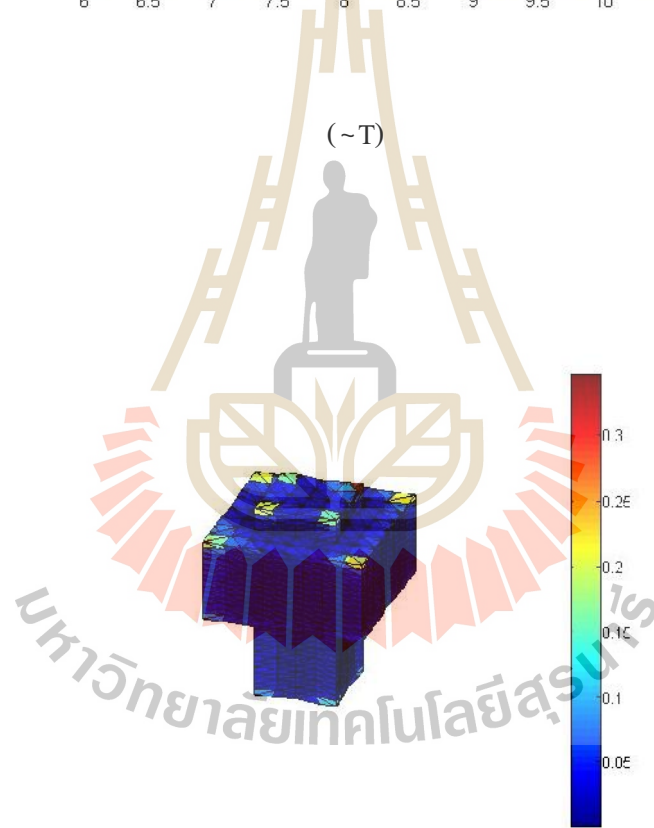
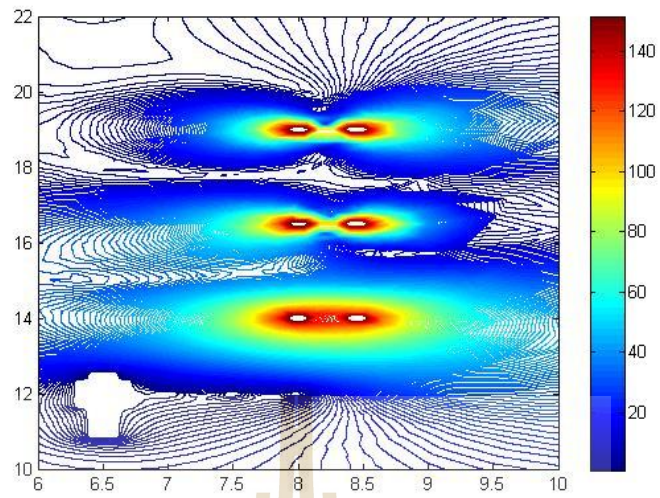
(~T)



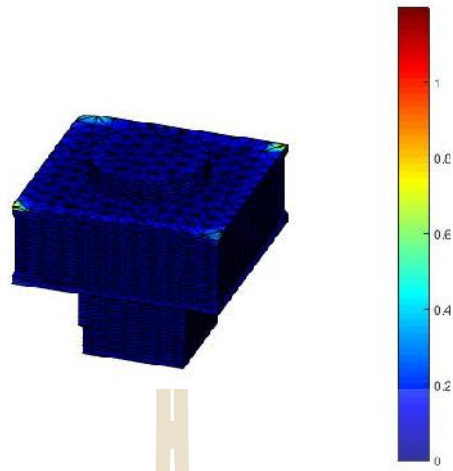
(~T)



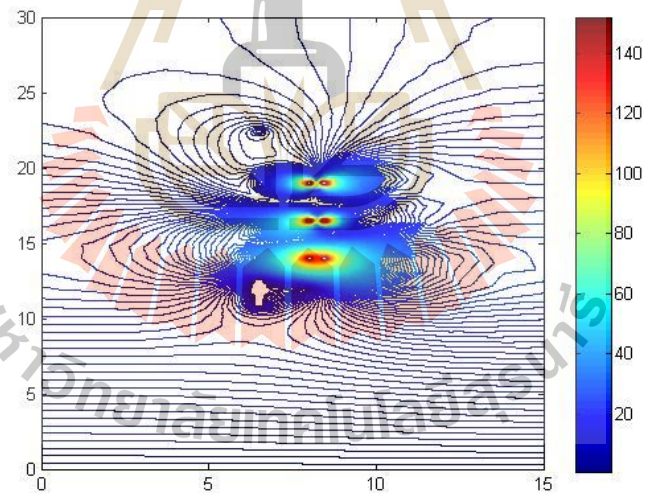
(~T)



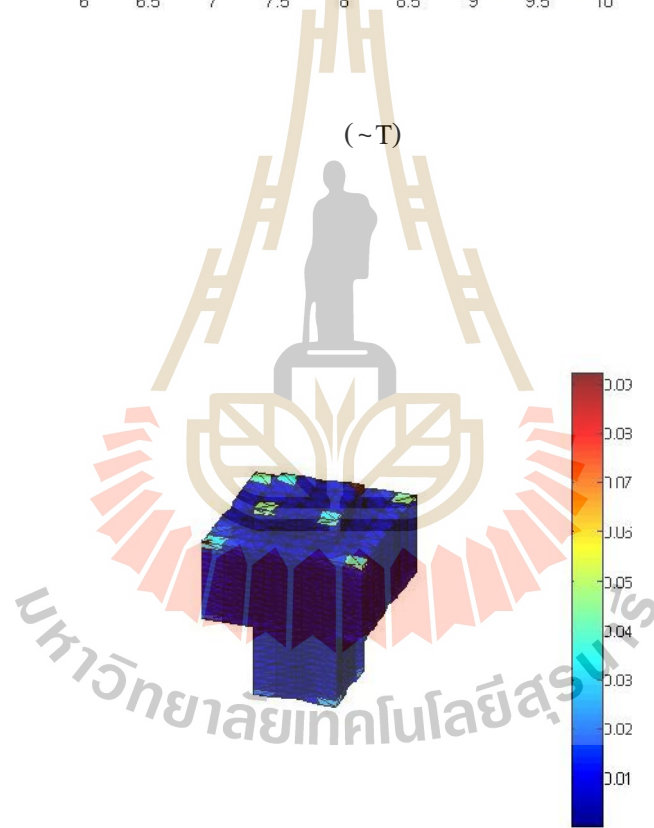
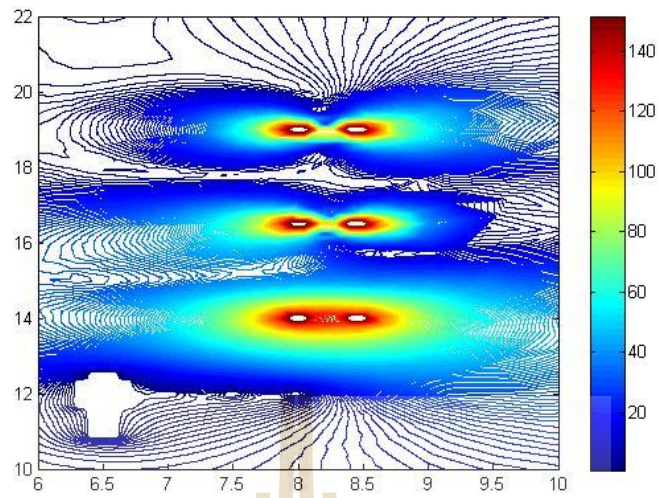
(~T)



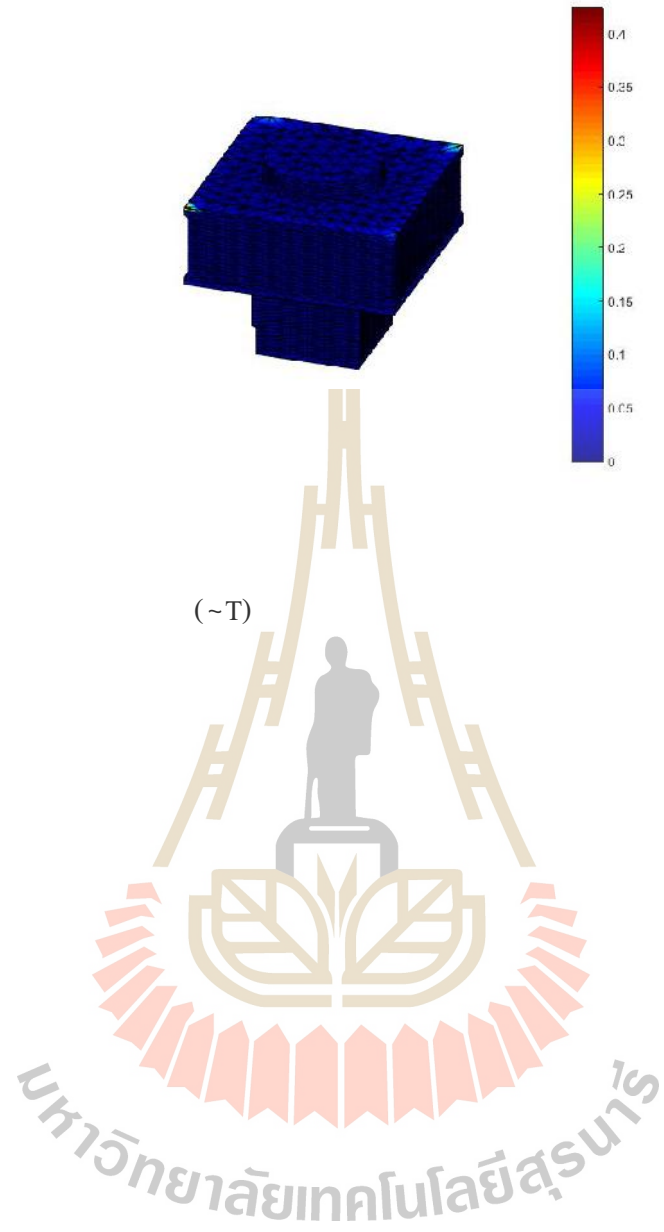
(~T)



(~T)



(~T)



ตารางที่ 6.3 ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณาการป้องกัน
สนามแม่เหล็กบริเวณศรีษะเป็นทรงลูกบาศก์

วัสดุป้องกันสนามแม่เหล็ก	สนามแม่เหล็กสูงสุด (~T)	สนามแม่เหล็กเฉลี่ย (~T)	ประสิทธิภาพการชดเชย
ไม่มีการป้องกัน	130.46	70.92	0
เฟอร์ไรต์	130.2254	70.3268	0.07
อลูมิเนียม	27.9704	4.2522	24.44
เหล็ก	0.3464	0.0105	76.59
มิวเมทอล	0.0920	0.0021	90.57

ตารางที่ 6.4 ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณาการป้องกัน
สนามแม่เหล็กบริเวณศรีษะเป็นทรงกระบอก

วัสดุป้องกันสนามแม่เหล็ก	สนามแม่เหล็กสูงสุด (~T)	สนามแม่เหล็กเฉลี่ย (~T)	ประสิทธิภาพการชดเชย
ไม่มีการป้องกัน	130.46	70.92	0
เฟอร์ไรต์	22.91	12.20	15.25
อลูมิเนียม	5.115	0.6457	40.81
เหล็ก	1.198	0.0073	79.75
มิวเมทอล	0.4233	0.0014	94.09

ตารางที่ 6.5 ค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICNIRP สำหรับระบบความถี่ 50 Hz

	สนามแม่เหล็ก (~T)
สถานประกอบการ	
ตลอดทั้งวัน	500 ~T
ช่วงเวลาสั้น (2 ชม./วัน)	5000 ~T
สถานที่สาธารณะ	
ตลอดทั้งวัน	100 ~T
2-3 ชม./วัน	1000 ~T

หมายเหตุ : ICNIRP คือ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

จากตารางที่ 6.3 จะสังเกตเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวของมนุษย์เมื่อพิจารณาการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กสำหรับบริเวณศีรษะเป็นทรงลูกบาศก์ด้วยวัสดุเมทอล จะสามารถกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กได้มากที่สุด ในขณะที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรซ์ จะกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กได้น้อยที่สุด แต่ถึงอย่างไรก็ตามการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุใดก็ตาม ก็จะกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบนตัวของมนุษย์ได้ และเมื่อพิจารณาผลการกับบ้างจะเห็นว่า การสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กจะกับบ้างผลของสนามแม่เหล็กได้โดยเปรียบเทียบผลกับหัวข้อที่ 6.2 ที่ผ่านมา ซึ่งเมื่อยังไม่มีการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตัวมนุษย์จะมีค่าถึง $130.46 \sim T$ และ $70.92 \sim T$ ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการชิลด์ (Shielding efficiency : SE) เมื่อพิจารณาการกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กด้วยการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเมทอลมีค่า $SE_B = 20\log(130.46/0.092) = 63.038 \text{ dB}$ สำหรับค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด และมีค่า $SE_B = 20\log(70.92/0.0021) = 90.5710 \text{ dB}$ สำหรับค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ย ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า เมื่อมีการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กจะช่วยในการกับบ้างสนามแม่เหล็กได้จริง จากตารางที่ 6.4 จะสังเกตเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและเฉลี่ยที่ตกกระทบบนตัวของมนุษย์เมื่อพิจารณาการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กสำหรับบริเวณศีรษะเป็นทรงกระบอกด้วยวัสดุเมทอล จะสามารถกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กได้มากที่สุด ในขณะที่สวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุเฟอร์ไรซ์ จะกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กได้น้อยที่สุด โดยประสิทธิภาพการชิลด์ (Shielding efficiency : SE) เมื่อพิจารณาการกับบ้างค่าสนามแม่เหล็กด้วยการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กสำหรับบริเวณศีรษะเป็นทรงกระบอกด้วยวัสดุเมทอลมีค่า $SE_B = 20\log(130.46/0.4233) = 49.7766 \text{ dB}$ สำหรับค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด และมีค่า $SE_B = 20\log(70.92/0.0014) = 94.09 \text{ dB}$ สำหรับค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ย ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะรูปทรงอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็กเมื่อบริเวณศีรษะเป็นทรงลูกบาศก์กับทรงกระบอกพบว่า ลักษณะอุปกรณ์ป้องกันที่เป็นทรงกระบอกจะสามารถกับบ้างสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าอันเป็นผลมาจากความโค้งมนของรูปทรงทำให้มีการสร้างสนามแม่เหล็กมาหักล้างสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อได้ดีกว่า ตามลำดับและเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.5 จะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายจากสายส่งกำลังไฟฟ้านั้นไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดด้วย ICNIRP ในบางกรณี ส่วนค่าสนามแม่เหล็กจะมีความปลอดภัยกับมนุษย์เมื่อทำงานในสถานประกอบการไม่เกิน 2 ชั่วโมงต่อวัน

6.5 การวิเคราะห์ค่าความลึกเชิงผิว (Skin depth, δ)

ต่อจากนี้ไป เราจะทำการวิเคราะห์หาค่าระยะความลึกเชิงผิว (Skin depth, δ) เมื่อคลื่นระนาบเดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุที่มีความยาวคลื่นสั้น พารามิเตอร์ตัวนี้มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์อันตรายที่รบกวนระหว่างคลื่นไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริก

ระยะความลึกเชิงผิว (Skin depth) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะที่สนามแม่เหล็กสามารถแทรกผ่านเข้าภายในวัสดุ ซึ่งนิยามอยู่ในรูปความลึกซึ่งขนาดของสนามมีค่าลดลงเท่ากับ $1/e$ เท่าของสนามแม่เหล็กที่ผิววัสดุนั้น สำหรับคลื่นระนาบที่ตกกระทบบนวัสดุกึ่งอนันต์ตั้งนั้นค่าระยะความลึกเชิงผิว แสดงได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$u = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}} \quad (6.1)$$

สำหรับวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าและสภาพซาบซึมแม่เหล็กสูงจะมีค่าระยะความลึกเชิงผิวต่ำ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเลือกใช้วัสดุทางวิศวกรรมในการลดทอนสนามแม่เหล็ก 4 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ไรต์ อลูมิเนียม เหล็ก และมิวเมทัล โดยวัสดุวิศวกรรมเหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งผลของระยะความลึกเชิงผิวแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 ซึ่งจากผลระยะความลึกเชิงผิวนี้จะสามารถนำไปใช้ออกแบบระยะความหนาของวัสดุได้ดังหัวข้อต่อไป

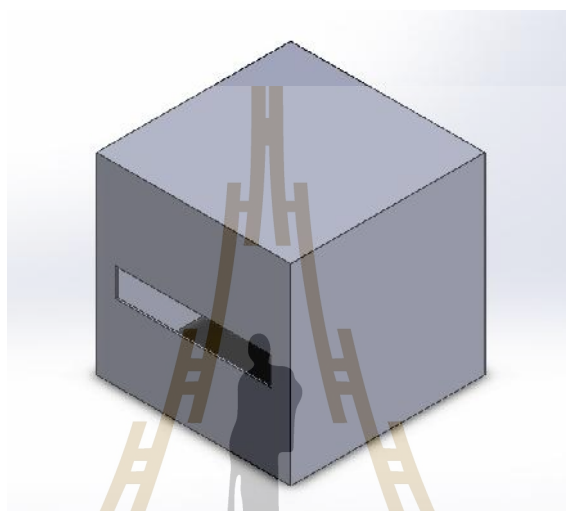
ตารางที่ 6.6 ระยะความลึกเชิงผิวเมื่อพิจารณาวัสดุต่าง ๆ

วัสดุป้องกันสนามแม่เหล็ก	ระยะความลึกเชิงผิว (m)
เฟอร์ไรต์	0.503
อลูมิเนียม	1.15×10^{-2}
เหล็ก	1×10^{-3}
มิวเมทัล	4.52×10^{-4}

6.6 การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กและการทดสอบ

วัสดุวิศวกรรมที่นิยมใช้กำบังเพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กได้แก่ เฟอร์ไรต์ (Ferrite) อลูมิเนียม (Aluminum) เหล็ก (Steel) และมิวเมทัล (80% Ni-Fe μ -metal) (Lopez, D and Dular, P., 2003) โดยวัสดุวิศวกรรมเหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งได้แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุวิศวกรรมแต่ละชนิดได้ดังหัวข้อที่ 6.2 ดังที่กล่าวไว้แล้ว

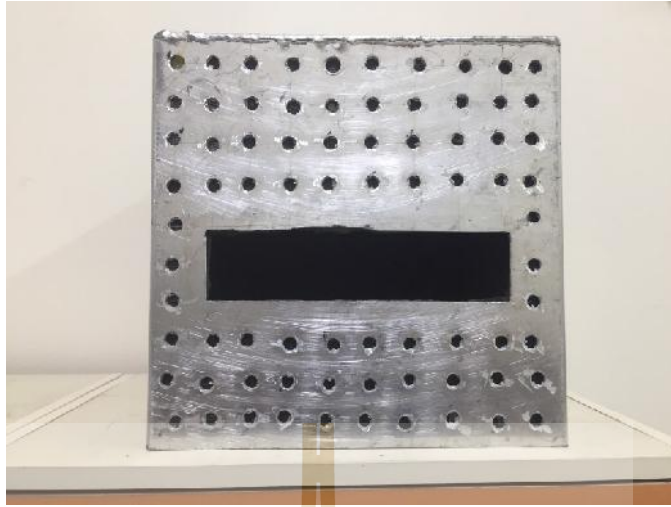
จากทฤษฎีการป้องกันสนามแม่เหล็กที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ที่ผ่านมา วัสดุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้สูงและสภาพซาบซึมทางแม่เหล็กที่สูงจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 6.2 ทำให้นักวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วัสดุวิศวกรรมทั้ง 4 ชนิดคือ เฟอร์ไรต์ อลูมิเนียม เหล็ก และ มิวเมทัล เนื่องจากในตารางที่ 6.2 วัสดุทั้ง 4 ชนิดเป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าสูง

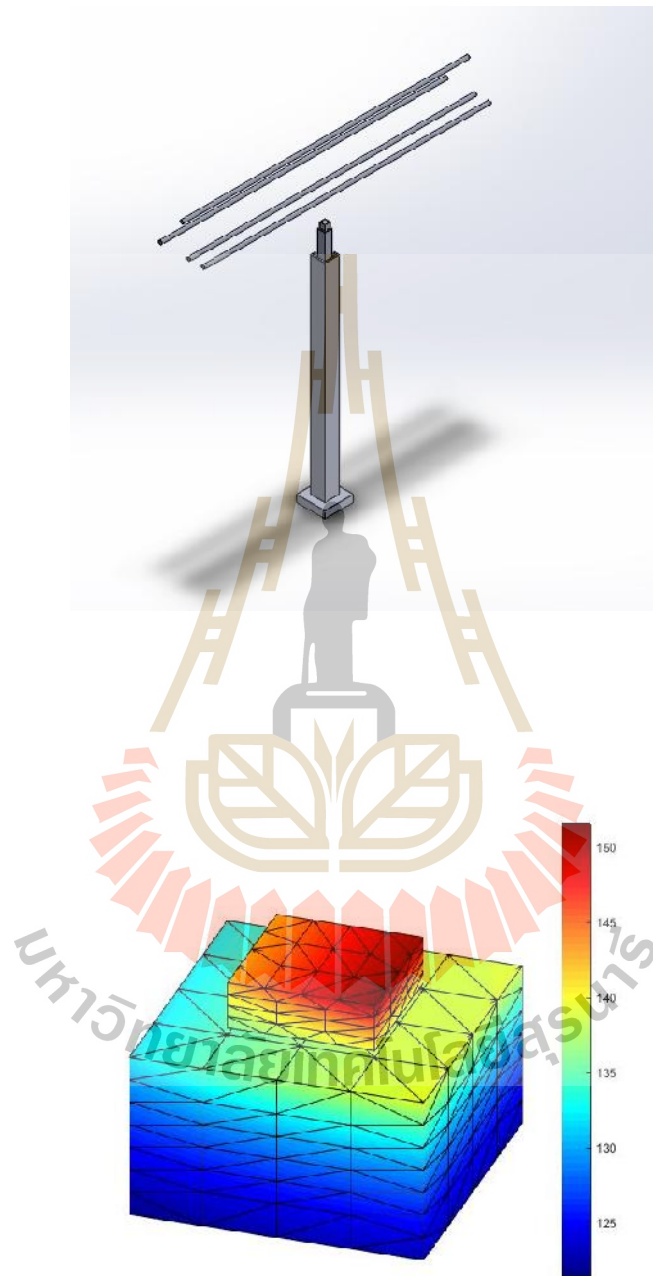


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

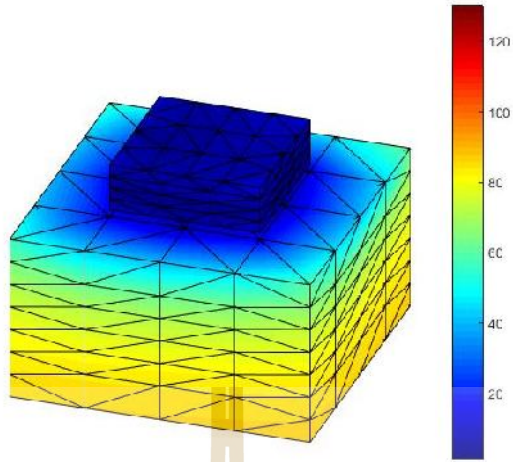


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

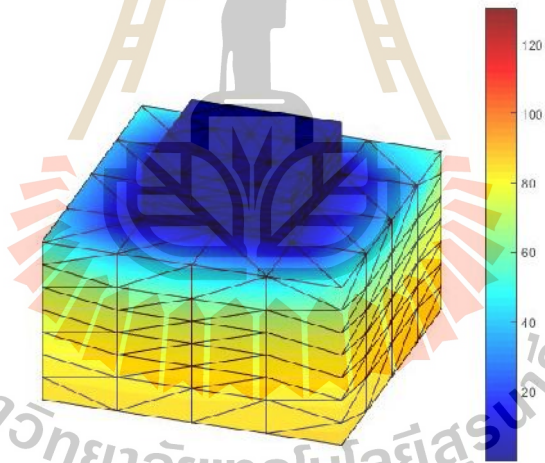




(~T)



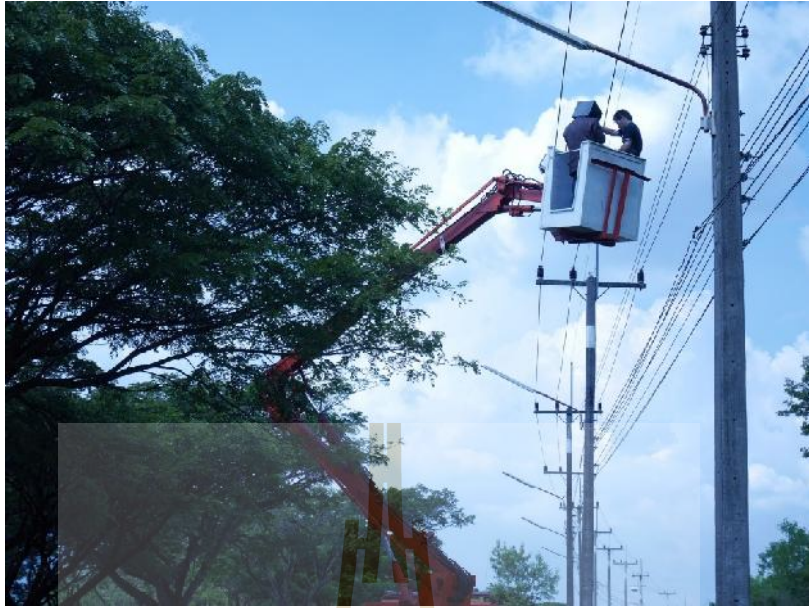
(~T)



(~T)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





ตารางที่ 6.7 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์เมื่อพิจารณาการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยอุปกรณ์หมวกต้นแบบ

อุปกรณ์หมวกต้นแบบ	การวัดค่าสนามแม่เหล็ก (~T)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
เมื่อไม่สวมอุปกรณ์	160	160	140	153.33
เหล็ก	10	10	0	6.67
อลูมิเนียม	30	30	40	33.33
อลูมิเนียมเจาะรูรูปตาข่าย	30	40	40	36.67

หมายเหตุ 1 T = 10,000 G

การจำลองผลในหัวข้อที่ 6.3 เมื่อพิจารณาการป้องกันสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุทางวิศวกรรม ทั้ง 4 ชนิด ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนวัสดุที่นำมาใช้ในการป้องกันสนามแม่เหล็ก อันประกอบด้วย เฟอร์ไรต์ (Ferrite) อลูมิเนียม (Aluminum) เหล็ก (Steel) และนิวมเมทัล (80% Ni-Fe μ -metal) โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางในบริเวณที่มีบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้าจะเห็นซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุที่มีการกำบังสนามแม่เหล็กได้ดีเรียงลำดับดังนี้คือ นิวมเมทัล เหล็ก อลูมิเนียม และเฟอร์ไรต์ ตามลำดับ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือก เหล็ก และ อลูมิเนียมมาสร้างอุปกรณ์หมวกต้นแบบเพื่อลดทอนสนามแม่เหล็กที่กระทบต่อร่างกายมนุษย์ที่ขึ้นไปปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้า จากตารางที่ 6.7 เมื่อเปรียบเทียบการกำบังสนามแม่เหล็กระหว่างวัสดุเหล็กกับวัสดุอลูมิเนียม พบว่าเหล็กมีการกำบังสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าอลูมิเนียม โดยผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่กระทบต่อร่างกายมนุษย์เมื่อขึ้นไปปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของเหล็กและอลูมิเนียมมีค่า 6.67 (~T) และ 33.33 (~T) ตามลำดับซึ่งก็มีแนวโน้มสอดคล้องกับการจำลองผลเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบการกำบังสนามแม่เหล็กระหว่างวัสดุอลูมิเนียมแบบทึบกับวัสดุอลูมิเนียมเจาะรูรูปตาข่าย พบว่าการกำบังสนามแม่เหล็กไม่ได้มีความแตกต่างกันมาก โดยผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่กระทบต่อร่างกายมนุษย์เมื่อขึ้นไปปฏิบัติงานบนสายจำหน่ายกำลังไฟฟ้าของอลูมิเนียมแบบทึบกับวัสดุอลูมิเนียมเจาะรูรูปตาข่าย มีค่า 33.33 (~T) และ 36.67 (~T) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ้าวัสดุเดียวกันถึงแม้จะมีการเจาะรูที่เนื้อของวัสดุก็แทบไม่มีผลต่อการกำบังสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้จึงสามารถเลือกใช้วัสดุที่มีการเจาะรูรูปตาข่ายเชื่อมถึงกันได้เพื่อทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีน้ำหนักเบาขึ้น และจากการสร้างอุปกรณ์หมวกต้นแบบในการลดทอนสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถลดทอนสนามแม่เหล็กได้ทั้ง 2 วัสดุซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการจำลองผล



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

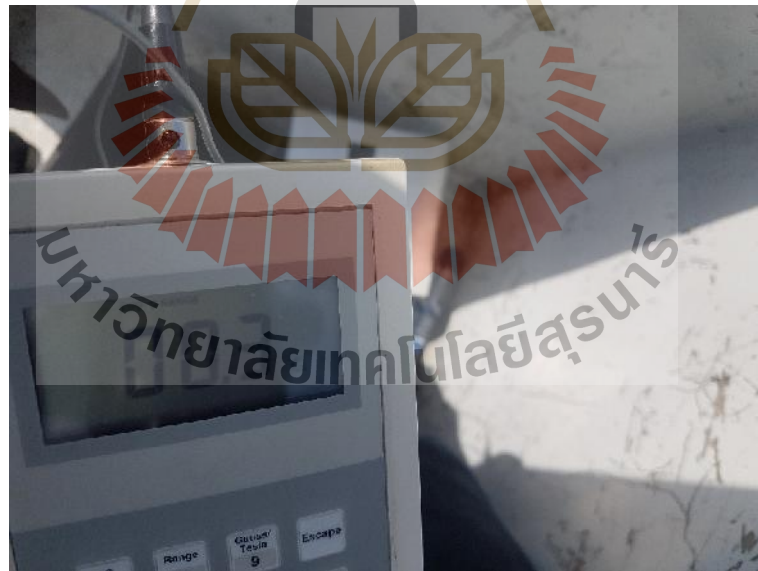
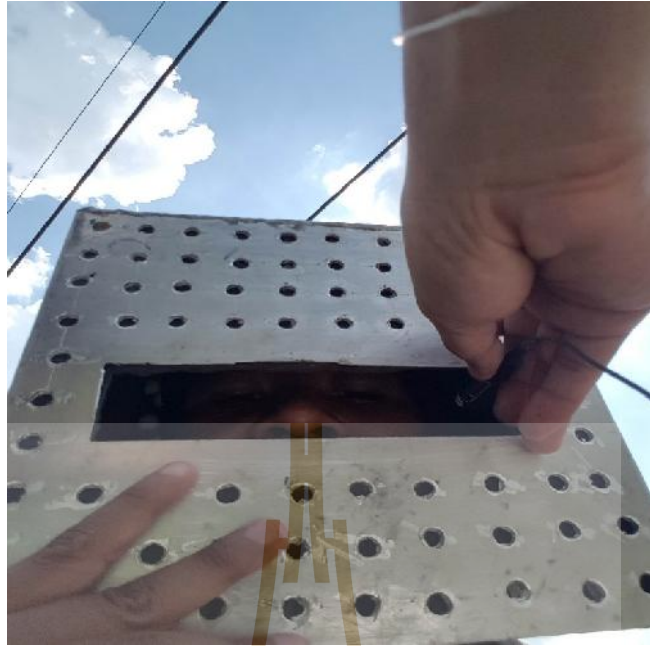














ระบบจำหน่าย 22 kV ถูกตัดไฟออก ในขณะที่สายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ซึ่งการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กจะช่วยก่อบังค้ำสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์ได้ โดยการออกแบบวัสดุทางวิศวกรรมทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ไรต์ อลูมิเนียม เหล็ก และ มีวเมทอล ซึ่งจากการจำลองวัสดุมีวเมทอลจะมีการก่อบังค้ำสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุด และจากการสร้างอุปกรณ์หมวกกันนวมด้วย เหล็กและอลูมิเนียมผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กพบว่าเหล็กมีการก่อบังค้ำสนามแม่เหล็กได้ดีกว่า อลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องเช่นเดียวกับการจำลองผล



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยและการจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อพิจารณาผลกระทบของค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับบุคลากรที่ปฏิบัติงาน การจำลองผลใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLABTM ที่พัฒนาขึ้นเองพร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ป้องกันสำหรับป้องกันค่าสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อบุคลากรที่ขึ้นไปปฏิบัติงานบนสายส่งกำลังระบบจำหน่าย 22 kV ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายตัวออกจากระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ซึ่งตัดไฟออกแล้วในขณะที่บุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่บนระบบจำหน่าย 22 kV

การสำรวจประสิทธิภาพกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย การศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 3 ทั้งเรื่อง การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเสถียรค้ำของกาลอ์คิน ในบทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid Work ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกแสดงผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและผลกระทบของสนามแม่เหล็กต่อผู้ปฏิบัติงานด้วย ในบทที่ 6 ได้อธิบายถึงการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายขนาด 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่ายขนาด 22 kV เมื่อบุคลากรขึ้นไปปฏิบัติหน้าที่

กับสายส่งในระบบจำหน่าย 22 kV ที่ตัดไฟออก ด้วยการปฏิบัติงานบนเสาไฟฟ้า โดยสายส่งในระบบส่งจ่าย 115 kV ยังคงมีกระแสไหลได้ตามปกติ ซึ่งการสวมชุดป้องกันสนามแม่เหล็กจะช่วยกำบังค่าสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบนตัวมนุษย์ได้โดยการออกแบบวัสดุทางวิศวกรรมทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ไรต์ อลูมิเนียม เหล็ก และ มิวเมทอล ซึ่งจากผลการจำลองวัสดุมิวเมทอลจะมีการกำบังสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุด และจากการสร้างอุปกรณ์หมวกกันน็อกแบบด้วย เหล็กและอลูมิเนียมผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กพบว่าเหล็กมีการกำบังสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าอลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องเช่นเดียวกับการจำลองผล

7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบในการกำบังสนามแม่เหล็กให้นำไปสู่การใช้งานได้อย่างเหมาะสมในทางปฏิบัติ
2. หาความหนาที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการกำบังสนามแม่เหล็ก



รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). **ทฤษฎีสานามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก** (พิมพ์ครั้งที่4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- ชวลิต คำรงค์รัตน์. (2533). **การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล. (2544). **การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ชนเสกฐ์ ทศศิกรพัฒน์. (2556). **การออกแบบระบบป้องกันสนามแม่เหล็กสำหรับการบำบัดรักษา มะเร็งด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ**. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- นิรันดร์ คำประเสริฐ. (2545). **วิศวกรรมแม่เหล็กและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่ม2**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- นุชิต ทิพย์เจริญ, พิทักษ์ ปิ่นอนงค์, และศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. (2546). **การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า ระหว่างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ บริเวณใกล้ สายส่งไฟฟ้าแรงสูง**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่26.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2542). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2544). **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). **การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. (2545). **การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร.

- อานนท์ อิศรมงคลรักษ์. (2552). การออกแบบอุปกรณ์กำลังสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- A. H. Khawaja, Q. Huang (2016). Characteristic estimation of high voltage transmission line conductors with simultaneous magnetic field and current measurements. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**. pp. 1-6.
- Bickford, W. B. (1994). **A first course in the finite element method**. (2nd ed.). USA: IRWIN.
- Bo, Z., et al. (2006). Numerical analysis of electric field distribution around composite insulator and head of transmission tower. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 21(2): 959-965.
- Chari, M. V. K., and Silvester, P. P. (1980). **Finite elements in electrical and magnetic field problems**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, Z., Ney, M. M., and Hoefer, W. J. R. (1991). A new finite-difference time-domain formulation and its equivalence with the TLM symmetrical condense node. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 39(12): 2160-2169.
- Christopoulos, C., (1995). **The transmission-line modeling method: TLM**. USA: IEEE Press.
- Christophe, G and Jean, F. R. (2008). **Gmesh** [On-line]. Available: <http://geuz.org/gmsh>.
- Clairmont B.A., Lordan R.J. (1999). 3-D Modeling of Thin Conductive Sheets for Magnetic Field Shielding: Calculations and Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 14, No. 4, pp. 1382-1393.
- Clayton R. P. (2004). **Electromagnetics for engineers**. (2nd ed.). United State of America: John Wiley & Sons, Inc
- Daniele, D., Massimo, G., and Enrico, P. (2004). MV line electric field evaluation near a concrete pole. **IEEE Transactions on Magnetics**. 40(2): 718-721.
- Del Pino Lopez J. C., Cruz Romero P., and Dular P.(2011). Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. **IEEE Trans. on Power Delivery**, Vol. 26, No. 4, 2659-2667.
- Del Pino J. C., Cruz P., and Serrano-Iribarnegaray L.(2013). Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables, **Progress In Electromagnetics Research**, Vol. 135, 601-625.

- Dragan, P. (2007). **Advanced modeling in computational electromagnetic compatibility**. (1st ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- El, S. T. E. D. (2005). A probabilistic approach to exposure assessment of power lines electric field. **IEEE Transactions on power delivery**. 20(2): 887-893.
- Elhribawy, M. A., Jennings, L. S., Al Dhalaan, S. M., and Keerthipala, W. W. L. (2003). Practical results and finite difference method to analyze the electric and magnetic field coupling between power transmission line and pipeline. **ISCAS'03, Proceeding of the International Symposium, IEEE**. 3: 431-434.
- Elhribawy, M. A., Jennings, L. S., and Keerthipala, W. W. L. (2002). Variable step size for calculation of electromagnetic fields of power transmission line using finite difference techniques. **Proceeding of IEEE, TENCON'02**. 1830-1833.
- Elhribawy, M. A., Nguyen, T. T., Jennings, L., and Keerthipala, W. W. L. (2002). Calculation of electromagnetic fields established by power transmission line using finite difference techniques. **Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering**. 311-316.
- Fagan, M. J. (1992). **Finite element analysis theory and practice**. Singapore: Longman Singapore publishers.
- Farag M., Dawoud M.M., Habiballah I.O.(1999). Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables. **Electric Power Systems Research**. 48 : 193–209
- Farzaneh, M., Volat, C. (2000). Electric Field Modelling Around and Ice-covered Insulator Using Boundary Element Method. **Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. : 349-355.
- Frazier, M. J., and Dabkowski, J. (1985). Magnetic coupled longitudinal electric field measurements on two transmission lines. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**. 104(4): 933-940.
- Gao, Y., and Yu, L. (1998, October 22-24). Determination of Dangerous Region of the Electromagnetic Pollution Caused by the Electric Fields around Power Line. **1998 International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT'98**. 4(1): 787-791.

- George, A., and Liu, J. W. (1981). **Computer solution of large sparse linear positive definite Systems**. Prentice-Hall.
- Haber, F. (1974). The magnetic field in the vicinity of parallel and twisted three wire cable carrying balanced three-phased current. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. 16(2): 76-82.
- Hadi, S. (1999). **Power System Analysis. Senior Consulting Edition**. (3rd ed.). New York: McGraw Hill
- Hagel, R., Gong, L., and Unbehauen, R. (1994). On the magnetic field of an infinitely long helical line current. **IEEE Transactions on Magnetics**. 30(1): 80-84.
- Hernandez, R. M., and Karady., G. G. (1998). Attenuation of low frequency magnetic fields using active shielding. **Electric Power System Research**. 45: 57-63.
- Hossam-Eldin, A. A. (2001). Effect of electromagnetic fields from power lines on living organisms. **International Conference on Solid Dielectrics, IEEE**. 438-441.
- Huebner, K. H., Dewhurst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineer**. (4th ed.). USA: John Wiley & Sons Inc.
- Hyun Ho Park, Jong Hwa Kwon, Seungyoung Ahn (2014). Magnetic Shielding Analysis of a Slit on a Conducting Plate Coated With a Ferrite Sheet: Transverse Incidence. **Magnetics IEEE Transactions on**. vol. 50, no. 9, pp. 1-6.
- Janischewskyj, G. G. (1979). Finite element solution for electric fields of coronating DC transmission lines. **IEEE Transactions on PAS**. 98(3): 1000-1012.
- Jinliang, H., et al. (2004). Electromagnetic environment analysis of a software park near transmission lines. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 40(4): 995-1002.
- Kaune, W. T., and Zaffanella, L. E. (1992). Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 7(4): 2082-2091.
- Karim.,W., Vasundara, V. V., and Vijay, K. V. (1998). Magnetic field shielding concepts for power transmission lines. **IEEE Transection on Magnetics**. 34(3): 649-654.
- Kay, H., Ronny, M., and Ronnie B. (1995). Numerical method to evaluate the electromagnetic field below overhead transmission lines and their measurement. **Proceedings of the 1995 First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems**: 32-36.

- Keikko, T., Kuusiluoma, S., Sauramaki, T., and Korpinen, L. (2002). Comparison of electric and magnetic fields near 400 kV electric substation with exposure recommendations of the european union. **Transmission and Distribution Conference, Asia Pacific, IEEE/PES**. 1230-1234.
- Kirawanich, P., Gleason, D., Cornell, A., and Islam, N. E. (2005). Analysis of field through apertures by applying transmission line matrix method to electromagnetic topology simulations. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. 883-887.
- Kothari, N. (2003). **Modern Power System Analysis**. (3rd ed.). New Delhi: Mc-Graw Hill.
- Krajewski, W. (1997). BEM analysis of electric field excited by overhead HV lines erected in built- up areas. **IEE Proceedings Sci, Meas, Technol**. 144(2): 81-86.
- Kuusiluoma, S., Keikko, T., Hovila, and Korpinen, L. (2000). Comparison of electric and magnetic fields from electric power systems with exposure recommendations of the european union. **IEEE Proceeding International Conference**. 843-848.
- Kwon, Y. W., and Bang H. (2000). **The finite element method using MATLAB**. (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Larry, J. S. (1984). **Applied finite element analysis**. (2nd ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Lin, Z. (2000). The Electromagnetic Radiant and Environment Effect Evaluation of The High Voltage Transmission Line. **Electric Environment Protection**, 16(1): 35-38.
- Lindberg, L. (1998). Reduction of magnetic fields from electric power and installation lines. **IEE Proceeding Sci, Meas, Technol**. 145(5): 215-221.
- Lopez, D, and Dular, P. (2003). Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. **International conference on renewable energies and power quality**. 326-333.
- Marcello D.A., Emiliano M., and Maria S. S. (2003). Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. pp. 203-208.
- Maruvada, P. S. (1993). Characterization of power frequency magnetic fields in different environments. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 8(2): 598-606.
- Masashi, O., and Tatsuya, F. (2000). Numerical electric field analysis of simulated human brain. **IEEE Transactions on Magnetics**. 36(4): 712-716.

- Moser, J. R., and Spencer, R. F., JR. (1968). Predicting the magnetic fields from a twisted-pair cable. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. 10(3): 324-329.
- Olsen, R. G., Deno, D., and Baishiki, R. S. (1998). Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 3: 2127-2136.
- Peter S., Luc D., and Jan M. (2008). Magnetic shielding of buried high-voltage (HV) cables by conductive metal plates. **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, Vol. 27, No. 1, pp. 170-180.
- Pettersson, P. (1996). Principles in transmission line magnetic field reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(3): 1587-1593.
- Qiong, W., et al. (2000). Electromagnetic environment of the overhead transmission line and electromagnetic pollution. **High Voltage Engineering**. 26(5): 24-26.
- Ren S., Guo S., Liu X., Liu Q (2016). Shielding Effectiveness of Double-Layer Magnetic Shield of Current Comparator Under Radial Disturbing Magnetic Field, **IEEE Transactions on Magnetics**. vol. 52, pp. 1-7.
- Sadiku, M. N. O., and Peterson, A. F. (1990). A comparison of numerical methods for computing electromagnetic fields. **Southeastcon'90 proceeding, IEEE**. 42-47.
- Salvatore C., and Marcello D. A. (1996). Magnetic Field Attenuation of Nonlinear Shields. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. VOL. 38, NO. 3, pp. 318-325.
- Selim, S. S., Gokhan, A., and Cigden, G. C. (2003). Electric field measurements of different mobile handsets in near zone. **2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**: 411-414.
- Shenfeld, S. (1969). Magnetic fields of twisted-wire pairs. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. 11(4): 164-169.
- Shen, L. C., and Kong, J. A. (1995). **Applied electromagnetism**. (3rd ed.). Boston: PWS Publishing Company.
- Silvester, P. P., and Ferrari, R. L. (1996). **Finite elements for electrical engineers**. (3rd ed.). New York: Cambridge University Press.
- Singiresu, S. R. (2005). **The finite element method in engineering**. (4th ed). Butterworth Heinemann

- Takuma, T., Kawamoto, T., Yasui, M., Morooka, M., and Katoh, J. (1985). Analysis of effect of shield wires on electrostatic induction by ac transmission line. **IEEE Transactions on Power Apparatus and System**. 104(9): 2612-2618.
- Tirupathi, R. C., and Ashok, D. B. (2002). **Introduction to finite elements in engineering**. (3rd ed).New Jersey:Prentice Hall.
- Tomotaka, S. (1995). Calculation of large ion densities under HVDC transmission lines by the finite difference method. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 10(4): 3562-3565.
- Voelker, R. H., and Lomax, R. J. (1990). A finite-difference transmission line matrix method incorporating a nonlinear device model. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 38(3): 302-312.
- Weiner, M., (2001). **Electromagnetic analysis using transmission line variables**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Wikipedia., (2009). **Relative permittivity** [On-line]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permittivity.
- William, H. H., Jr. (1989). **Engineering electromagnetics**. (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill
- Yafeng Chen, Qi Huang, Arsalan Habib Khawaja (2018). Separated Double-Layer Magnetic Shielding With Magnetic Sensor For Large Current Measurement. **Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia) 2018 IEEE**. pp. 306-311.
- Yang, X., and Xu, X. (1996). Interference of nonlinear ferromagnetic pipeline on magnetic field produced by power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(2): 644-649.
- Zhang, D., (2000). Flux-canceling effect and its application to shielding magnetic field from power transmission lines. **IEEE International symposium electromagnetic compatibility**. (2): 681-684.
- Zhao, T., Sebo, S. A., and Kasten D.G. (1996). Calculation of single phase AC and monopolar DC hybrid corona effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(3): 1454-14

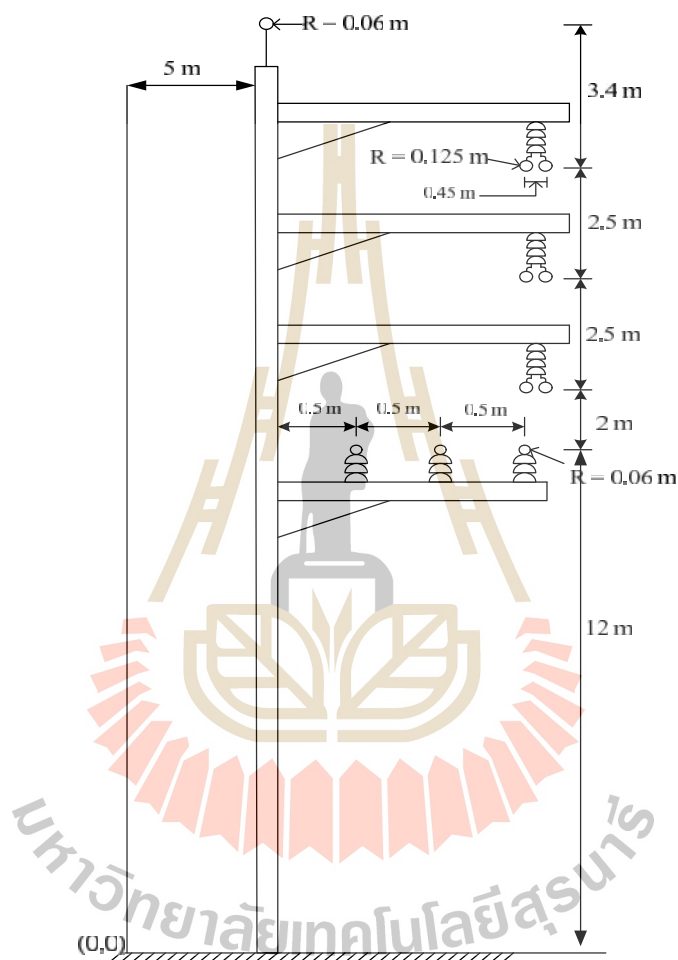


ภาคผนวก ก

การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐาน
เพื่อใช้ประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐานนี้ ได้พิจารณาระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังแสดงด้วยรูปที่ ก.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปนี้ประกอบด้วย ระบบส่งจ่าย 115 kV แบบสายควบตัวนำ 2 เส้น จำนวน 3 เฟสพาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV จำนวน 3 เฟส พร้อมสายดินเหนือศีรษะจำนวน 1 เส้น



รูปที่ ก.1 ระบบส่งจ่าย 115 kV ที่พาดผ่านระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธีพื้นฐานจำเป็นต้องทราบถึงข้อมูลพิกัดของตัวนำในระบบรวมทั้งกระแสที่ไหลในระบบ โดยสามารถแสดงตำแหน่งพิกัดของตัวนำและกระแสที่ไหลในตัวนำได้ดังตารางที่ ก.1 และ ก.2 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 พิกัดของตัวนำในระบบที่ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก

ข้อมูลตัวนำ	x (m)	y (m)
115 kV เฟส A1	6.50	19.00
115 kV เฟส A2	6.95	19.00
115 kV เฟส B1	6.50	16.50
115 kV เฟส B2	6.95	16.50
115 kV เฟส C1	6.50	14.00
115 kV เฟส C2	6.95	14.00
22 kV เฟส A	5.50	12.00
22 kV เฟส B	6.00	12.00
22 kV เฟส C	6.50	12.00
สายดินเหนือศีรษะ	5.00	22.40

ตารางที่ ก.2 กระแสของสายจำหน่ายไฟฟ้า

ข้อมูลตัวนำ	ขนาด (A)	มุม (Deg)
115 kV เฟส A1	855.0	0
115 kV เฟส A2	855.0	0
115 kV เฟส B1	855.0	120
115 kV เฟส B2	855.0	120
115 kV เฟส C1	855.0	-120
115 kV เฟส C2	855.0	-120
22 kV เฟส A	520.0	0
22 kV เฟส B	520.0	120
22 kV เฟส C	520.0	-120
สายดินเหนือศีรษะ	0	0

ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กจะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าของสายจำหน่ายในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ โดยค่ากระแสไฟฟ้าของสายจำหน่ายในแต่ละตัวนำมีค่าดังนี้

$$I_{r1} = [855] \cos(0) = 855 \text{ A}$$

$$I_{i1} = [855] \sin(0) = 0 \text{ A}$$

$$I_{r2} = [855] \cos(120) = -427.50 \text{ A}$$

$$I_{i2} = [855] \sin(120) = 740.45 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 I_{r3} &= [855] \cos(-120) = -427.50 \text{ A} & I_{i3} &= [855] \sin(-120) = -740.45 \text{ A} \\
 I_{r4} &= [520] \cos(0) = 520 \text{ A} & I_{i4} &= [520] \sin(0) = 0 \text{ A} \\
 I_{r5} &= [520] \cos(120) = -260.0 \text{ A} & I_{i5} &= [520] \sin(120) = 450.33 \text{ A} \\
 I_{r6} &= [520] \cos(-120) = -260.0 \text{ A} & I_{i6} &= [520] \sin(-120) = -450.33 \text{ A} \\
 I_{r7} &= [0] \cos(0) = 0 \text{ A} & I_{i7} &= [0] \sin(0) = 0 \text{ A}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้พิกัดที่ต้องการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กคือ (6.5, 19) ดังนั้นสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน x ที่เกิดจากสายจำหน่ายตัวนำและสายดินเหนือศีรษะทั้งระบบ ณ จุดที่พิจารณา (x_N, y_N) ได้ดังสมการที่ (ก.5)

$$\mathbf{H}_x = \sum_{j=1}^n \frac{I_{real(j)}}{2} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} + j \sum_{j=1}^n \frac{I_{imag(j)}}{2} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2}$$

โดยที่
$$R_{jN} = \sqrt{(x_N - x_j)^2 + (y_N - y_j)^2}$$

$$\mathbf{H}_{x,1} = \frac{(855)(19-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-19)^2 \right]} + j \frac{(0)(19-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-19)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,1} = 0 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{x,2} = \frac{(-427.50)(16.5-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-16.5)^2 \right]} + j \frac{(740.45)(16.5-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-16.5)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,2} = 26.9968 - j46.7598 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{x,3} = \frac{(-427.50)(14-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-14)^2 \right]} + j \frac{(-740.45)(14-19)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-14)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,3} = 13.5802 + j23.5216 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{x,4} = \frac{(520.0)(12-19)}{2f \left[(6.5-5.5)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(0)(12-19)}{2f \left[(6.5-5.5)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,4} = -11.5865 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{x,5} = \frac{(-260.0)(12-19)}{2f \left[(6.5-6)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(450.33)(12-19)}{2f \left[(6.5-6)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,5} = 5.8815 - j10.1869 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{x,6} = \frac{(-260.0)(12-19)}{2f \left[(6.5-6.5)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(-450.33)(12-19)}{2f \left[(6.5-6.5)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{x,6} = 5.9115 + j10.2314 \text{ A/m}$$

และสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน y ที่เกิดจากสายจำหน่ายตัวนำและสายดินเหนือศีรษะทั้งระบบ ณ จุดที่พิจารณา (x_N, y_N) ได้ดังสมการที่ (ก.6)

$$\mathbf{H}_y = \sum_{j=1}^n \frac{I_{real(j)}}{2} \frac{x_N - x_j}{R_{jN}^2} + j \sum_{j=1}^n \frac{I_{imag(j)}}{2} \frac{x_N - x_j}{R_{jN}^2}$$

$$\mathbf{H}_{y,1} = \frac{(855)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-19)^2 \right]} + j \frac{(0)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-19)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,1} = -604.7888 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{y,2} = \frac{(-427.50)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-16.5)^2 \right]} + j \frac{(740.45)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-16.5)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,2} = 2.4297 - j4.2084 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{y,3} = \frac{(-427.50)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-14)^2 \right]} + j \frac{(-740.45)(6.5-6.725)}{2f \left[(6.5-6.725)^2 + (19-14)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,3} = 0.6111 + j1.0585 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{y,4} = \frac{(520.0)(6.5-5.5)}{2f \left[(6.5-5.5)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(0)(6.5-5.5)}{2f \left[(6.5-5.5)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,4} = 1.6552 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{y,5} = \frac{(-260.0)(6.5-6)}{2f \left[(6.5-6)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(450.33)(6.5-6)}{2f \left[(6.5-6)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,5} = -0.4201 + j0.7276 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_{y,6} = \frac{(-260.0)(6.5-6.5)}{2f \left[(6.5-6.5)^2 + (19-12)^2 \right]} + j \frac{(-450.33)(6.5-6.5)}{2f \left[(6.5-6.5)^2 + (19-12)^2 \right]}$$

$$\mathbf{H}_{y,6} = 0 \text{ A/m}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mathbf{H}_x = \mathbf{H}_{x,1} + \mathbf{H}_{x,2} + \mathbf{H}_{x,3} + \mathbf{H}_{x,4} + \mathbf{H}_{x,5} + \mathbf{H}_{x,6}$$

$$\mathbf{H}_x = 51.0152 - j33.4251 \text{ A/m}$$

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{H}_{y,1} + \mathbf{H}_{y,2} + \mathbf{H}_{y,3} + \mathbf{H}_{y,4} + \mathbf{H}_{y,5} + \mathbf{H}_{y,6}$$

$$\mathbf{H}_y = -600.5129 - j2.4223 \text{ A/m}$$

โดยที่ $H_x = \sqrt{\mathbf{H}_{x,real}^2 + \mathbf{H}_{x,imag}^2}$

$$H_x = \sqrt{(51.0152)^2 + (-33.4251)^2}$$

$$H_x = 60.9901 \text{ A/m}$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{H}_{x,imag}}{\mathbf{H}_{x,real}} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{-33.4251}{51.0152} \right)$$

$$= -33.23^\circ$$

$$H_y = \sqrt{\mathbf{H}_{y,real}^2 + \mathbf{H}_{y,imag}^2}$$

$$H_y = \sqrt{(-600.5129)^2 + (-2.4233)^2}$$

$$H_y = 600.5178 \text{ A/m}$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{H}_{y,imag}}{\mathbf{H}_{y,real}} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{-2.4233}{-600.5129} \right)$$

$$= -179.77^\circ$$

จาก $\tan(2t) = -\frac{H_x^2 \sin 2t + H_y^2 \sin 2t}{H_x^2 \cos 2t + H_y^2 \cos 2t}$

$$t = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{H_x^2 \sin 2t + H_y^2 \sin 2t}{H_x^2 \cos 2t + H_y^2 \cos 2t} \right)$$

$$t = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{(60.9901)^2 \sin(2(-33.23)) + (600.5178)^2 \sin(2(-179.77))}{(60.9901)^2 \cos(2(-33.23)) + (600.5178)^2 \cos(2(-179.77))} \right)$$

$$t = 0.041^\circ$$

เมื่อ $t_1 = t + (m-1)\frac{\pi}{2}; m = 1, 2, 3, 4$

$$t_1 = 0.041^\circ, 90.041^\circ, 180.041^\circ, 270.041^\circ$$

สามารถหาค่าความเข้มนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดจาก t_1 ที่ทำให้ได้ค่าสูงสุดที่พิกัด (6.5, 19) ได้ดังนี้

$$H_{max} = \sqrt{(H_x \cos(t_1 + \dots))^2 + (H_y \cos(t_1 + \dots))^2}$$

$$H_{max} = 616.6532 \text{ A/m}$$

และสามารถหามุมของความเข้มนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\text{angle} = \tan^{-1} \left[\frac{H_y \cos(t_1 + \dots)}{H_x \cos(t_1 + \dots)} \right]$$

$$\text{angle} = 85.14^\circ$$

และความเข้มนามแม่เหล็ก (H) กับสนามแม่เหล็ก (B) จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$B = \mu H$$



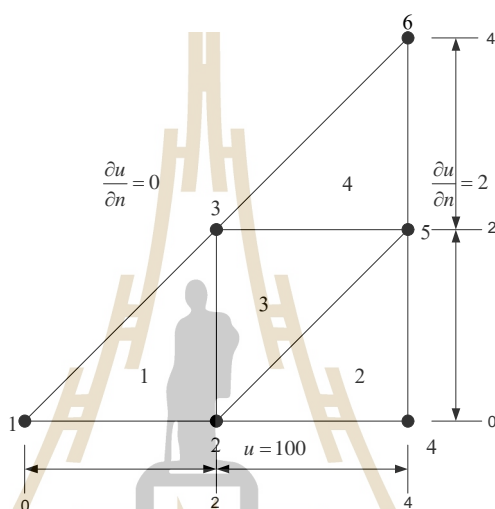


ภาคผนวก ข

การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตเป็นส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งในขั้นตอนการจำลองผล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขค่าขอบเขตอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์ (Neumann) และการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริคเลต (Dirichlet) ซึ่งจะทำให้การยกตัวอย่างระบบขนาดเล็กเพื่อให้เห็นภาพการประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตทั้ง 2 แบบ โดยสามารถแสดงกริดของปัญหา รวมทั้งการระบุขอบเขตของปัญหาทั้งแบบนอยมันน์และดิริคเลต ได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างปัญหาสำหรับประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

กำหนดให้เมทริกซ์ $[K_{sys}]$ ของสมการเชิงเส้นระบบรวม $[K_{sys}]\{u\} = \{f_{sys}\}$ เป็นดังสมการที่ (ข.1)

$$[K_{sys}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.1})$$

กำหนดให้โหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์เมื่ออิลลิเมนต์นั้นไม่มีขอบใดเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ข.2) และเมื่ออิลลิเมนต์นั้นมีขอบเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Q\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.2})$$

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Qh_{mn}d\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่ Q คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งในที่นี้สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1
 h_{mn} คือ ระยะห่างระหว่างโนด m และ n
 d คือ ค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์
 Δ_e คือ พื้นที่ประจำอิลลิเมนต์
 i, j, k คือ ค่าประจำโนดของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อโนดนั้นเป็นโนดที่ติดกับขอบแบบนอยมันน์ที่พิจารณาและมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ติดกับขอบแบบนอยมันน์

เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์จะมีความสัมพันธ์กับโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์ในแต่ละอิลลิเมนต์ก่อนที่จะทำการสร้างสมการโหนดเวกเตอร์ระบบรวมแล้วจึงกำหนดเงื่อนไขแบบคิริเคิลเพื่อทำการแก้ระบบสมการเชิงเส้นต่อไป

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์จะกระทำกับอิลลิเมนต์ที่อยู่บริเวณขอบของเงื่อนไขซึ่งจากรูปที่ ข.1 ประกอบกับจากสมการที่ (ข.2) และ (ข.3) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์สามารถเขียนเป็นสมการโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์ได้ดังนี้ (เมื่อสมมติให้ $Q = 1$)

$$\{f^{(1)}\} = \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(2)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(3)}\} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.67 \\ 0.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(4)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

จากโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลลิเมนต์สามารถเขียนเป็นโหนดเวกเตอร์ระบบรวมได้ดังนี้

$$\{f_{sys}\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้สมการระบบรวมสำหรับปัญหาในรูปที่ ข.1 ดังสมการที่ (ข.4)

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

(ข.4)

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล

หลังจากได้สมการระบบรวมตั้งสมการที่ (ข-4) แล้ว จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล โดยจากรูปที่ ข.1 ทราบค่าคำตอบที่โนด 1, 2 และ 4 มีค่าเป็น 100 ดังนั้นเมื่อทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิลจึงได้ตั้งสมการที่ (ข.5)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 6 & 5 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 0.67 - 6(100) - 5(100) - 2(100) \\ 100 \\ 6.01 - 2(100) - 3(100) - 1(100) \\ 2.67 - 3(100) - 6(100) - 2(100) \end{bmatrix} \quad (\text{ข.5})$$

จากสมการที่ (ข.5) สามารถนำไปแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยได้ในขั้นตอนถัดไป



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

A.Bunmat, P. Pao-la-or (2015). Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method. **The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems**. 25-28 October 2015, Pattaya, Thailand.

P. Pao-la-or, A.Bunmat (2018). Shielding of Magnetic Field Effects on Operators Working a Power Transmission Lines Using 3-D FEM. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**.



Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method

A. Bunmat, P. Pao-la-or

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
E-mail: arak.bunmat@gmail.com, padej@sut.ac.th

Abstract — The power transmission line is crucial to the energy system in the country. There is a strong emphasis on industry sectors. Engineers have a duty to protect and maintain power transmission lines systems. This research has brought the power transmission system of the Electricity Authority of Thailand to analyze the simulation results, proposes a set of mathematical models presenting magnetic fields caused by 115 kV power transmission line hung over a 22 kV for the operators working on the transmission 22 kV systems by using a set of second-order of PDE. The simulate conduct here in is based on the 3-D FEM in the time harmonic mode, MATLAB programming to show the effects of magnetic fields around power transmission lines and magnetic field distribution in staff to perform work. An investigate the magnetic fields acting on a human in comparative with ICNIRP standard.

I. INTRODUCTION

Analysis the Power line requires accurate prediction of the Transmission line behaviors, e.g. magnetic field, electric field, etc. These are based on magnetic field distribution through the volume of the transmission line. To analyze of the transmission line, there are two main methods of magnetic field calculation: i) permeance wave theory and ii) numerical approximation methods (e.g. finite difference: FD or finite element methods: FEM) [1]. The FEM is applicable to a broad range of solving electromagnetic problems due to its flexibility, and accuracy. Application of the FEM to analyze power transmission line is inclusive. In addition, this method is more efficient than the FD method due to flexibility and accuracy, and it can gain several advantages when it is applied to transmission line. In this paper, a time-harmonic system in power line is used for test. The time harmonic be the case that the system has only a single frequency. This results in a set of partial differential equations (PDE).

A 115-kV power transmission line hung over a 22-kV power distribution line on the same tower is selected for test. The domain of study with the 3-D FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. The simulation conducted here in is based on the FEM in the time harmonic mode, MATLAB Programming can display the distribution of magnetic field around power transmission lines, and effects the operation on the 22 kV transmission line system. [2]-[3]. All the programming instructions are coded in MATLAB program environment. Moreover, due to excessive magnetic fields that might be harmful to people or livestock living nearby, careful investigation of the magnetic phenomena is taken into account. According to the standard of International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), the satisfactory simulation results are also complied with the ICNIRP standard.

II. MODELING OF MAGNETIC FIELD FOR A POWER TRANSMISSION LINE

In magnetic field calculations, the magnetic field intensity (\mathbf{H}) carries a bundle of information consisting of magnetic field (\mathbf{B}) in which $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$. Utilizing the wave equation (Helmholtz's equation) as in (1) [4]. When the supply frequency is 50 Hz, magnetic field modeling that follows the Ampere's circuital law is defined.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

where, μ is the magnetic permeability, σ is the conductivity, and ϵ is the constant dielectric permittivity.

Consider the time-harmonic system by representing $\mathbf{H} = H e^{j\omega t}$ [5], therefore

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 H \quad \text{and} \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = j\omega H$$

where ω is the angular frequency

Therefore, refer to (1) can be rewritten into the following equation.

$$\nabla^2 H - j\omega\sigma\mu H + \omega^2\epsilon\mu H = 0$$

Consider the problem in three dimensional (x, y, z) plane, then

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) H = 0 \quad (2)$$

Analytically, there is no simple exact solution of the above equation. Therefore, in this paper the 3-D FEM is chosen to be a potential tool for finding approximate magnetic field solutions for the partial differential equation described as in (2)

III. FEM FOR THE POWER TRANSMISSION LINE

A. Discretization

This paper conducts the simulation study by considering the 115-kV Provincial Electric Authority of Thailand (PEA) power line system in Nakhon Ratchasima province, Thailand. This type of power line systems is common in rural areas in Thailand. The selected test system consists of 2-bundle

conductors configuring in vertical conductor arrangement as shown in Fig. 1. Also, depicts the detail of the power transmission lines. Fig. 2 the detail of the human. Fig. 3 a 115 kV power transmission line hung over a 22 kV.

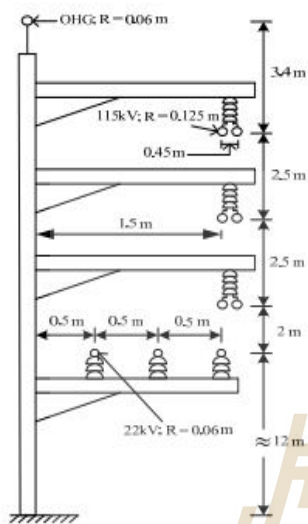


Fig.1 Detail of the power transmission lines

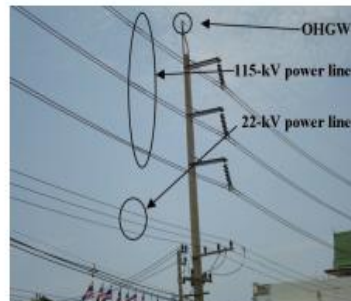


Fig.3 Power lines in Nakhon Ratchasima province

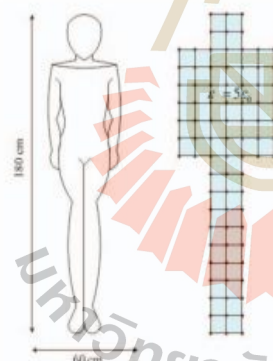


Fig.2 Detail of the human

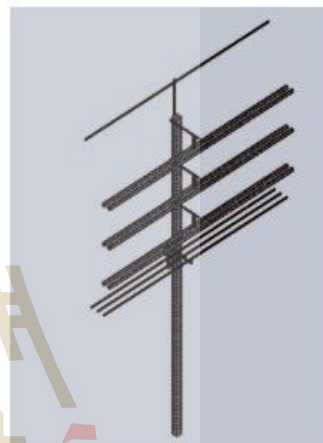


Fig.4 Discretization of the transmission line

B. FEM formulation

An equation governing each element is derived from the Maxwell's equations directly by using Galerkin approach, which is the particular weighted residual method for which the weighting functions are the same as the shape functions [6]. According to the method, the magnetic field intensity is expressed as follows

$$H(x, y, z) = H_i N_i + H_j N_j + H_k N_k + H_l N_l \quad (3)$$

where $H_n, n = i, j, k, l$ is approximation of the magnetic field intensity and the $N_n, n = i, j, k, l$ is the element shape function at each node (i, j, k, l) of the elements.

$$N_e = \frac{1}{6V} (a_e + b_e x + c_e y + d_e z) \quad (4)$$

The domain of study with the 3D-FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. This can be accomplished by using Solid Work for 3D mesh generation. Fig. 4 displays mesh representation of the test system. The region domain consists of 345,673 elements and 58,841 nodes.

where V is the volume of the tetrahedron element and,

$$\begin{aligned} a_i &= x_j(y_k z_l - y_l z_k) + x_k(y_l z_j - y_j z_l) + x_l(y_k z_i - y_i z_k) \\ a_j &= x_i(y_k z_l - y_l z_k) + x_k(y_l z_i - y_i z_l) + x_l(y_j z_k - y_k z_j) \\ a_k &= x_i(y_j z_l - y_l z_j) + x_j(y_l z_i - y_i z_l) + x_l(y_j z_i - y_i z_j) \\ a_l &= x_k(y_j z_i - y_i z_j) + x_j(y_l z_k - y_k z_l) + x_l(y_k z_j - y_j z_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_i &= y_j(z_k - z_l) + y_k(z_l - z_i) + y_l(z_i - z_k) \\ b_j &= y_i(z_k - z_l) + y_k(z_l - z_i) + y_l(z_i - z_k) \\ b_k &= y_i(z_l - z_j) + y_j(z_j - z_i) + y_i(z_i - z_j) \\ b_l &= y_k(z_i - z_j) + y_j(z_j - z_k) + y_l(z_k - z_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_i &= x_j(z_l - z_k) + x_k(z_k - z_l) + x_l(z_l - z_i) \\ c_j &= x_i(z_k - z_l) + x_k(z_l - z_i) + x_l(z_i - z_k) \\ c_k &= x_i(z_l - z_j) + x_j(z_j - z_i) + x_l(z_i - z_j) \\ c_l &= x_k(z_j - z_i) + x_j(z_i - z_k) + x_l(z_k - z_j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_i &= x_j(y_k - y_l) + x_k(y_l - y_i) + x_l(y_i - y_k) \\ d_j &= x_i(y_l - y_k) + x_k(y_k - y_i) + x_l(y_i - y_j) \\ d_k &= x_i(y_j - y_l) + x_j(y_l - y_i) + x_l(y_i - y_j) \\ d_l &= x_k(y_j - y_i) + x_j(y_i - y_k) + x_l(y_k - y_j) \end{aligned}$$

The method of the weighted residual with Galerkin approach is then applied to the differential equation, refer to (2), where the integrations are performed over the volume domain V .

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right) dV - \int_V N_n (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) H dV = 0$$

or in the compact matrix form

$$[M + K]\{H\} = 0 \tag{5}$$

$$M = (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \int_V N_n N_n dV$$

$$= \frac{(j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$K = \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_m}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial N_m}{\partial z} \right) dV$$

$$= \frac{1}{30^3} \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 + d_i^2 & b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j & b_i b_k + c_i c_k + d_i d_k & b_i b_l + c_i c_l + d_i d_l \\ b_j^2 + c_j^2 + d_j^2 & b_j b_i + c_j c_i + d_j d_i & b_j b_k + c_j c_k + d_j d_k & b_j b_l + c_j c_l + d_j d_l \\ b_k^2 + c_k^2 + d_k^2 & b_k b_i + c_k c_i + d_k d_i & b_k b_j + c_k c_j + d_k d_j & b_k b_l + c_k c_l + d_k d_l \\ b_l^2 + c_l^2 + d_l^2 & b_l b_i + c_l c_i + d_l d_i & b_l b_j + c_l c_j + d_l d_j & b_l b_k + c_l c_k + d_l d_k \end{bmatrix} \tag{7}$$

For one volume containing 4 nodes, the expression of the FEM 3-D approximation is a 4x4 matrix. With the account of all volume in the system of m nodes, the system equation is sizable as an $m \times m$ matrix.

C. Boundary Conditions and Simulation

The boundary conditions applied here are zero magnetic fields at the OHGW, and the ground. For the boundary conditions at outer perimeters of 115-kV power lines, 22-kV power lines is given in Table I. Properties of materials used for this simulation is given in Table II [7]. It notes that the permittivity of free space (ϵ_0) = 8.854x10⁻¹² F/m and the permeability of free space (μ_0) = 4πx10⁻⁷ H/m.

TABLE I
THE BOUNDARY CONDITION FOR 115 KV

The surface of the conductor	Magnetic Field (μT)
115 kV phase A1	102.2829 ∠ 86.4787°
115 kV phase A2	102.2829 ∠ -86.4787°
115 kV phase B1	101.7424 ∠ -81.9398°
115 kV phase B2	101.7424 ∠ 81.9398°
115 kV phase C2	102.2830 ∠ 77.2734°
22 kV phase A	6.2588 ∠ 49.2607°
22 kV phase B	6.9940 ∠ -0.4702°
22 kV phase C	7.4435 ∠ 6.7152°
Overhead Ground Wire (OHGW)	0 ∠ 0°
ground	0 ∠ 0°

TABLE II
PROPERTIES OF MATERIALS FOR SIMULATION

Description	Electrical Conductivity (σ S/m)	Relative Permeability (μ)	Relative Permittivity (ε)
Power Lines(copper)	3.8x10 ⁷	1	3.5
Human	0.21	18.8	5.0
Steel	0.8x10 ⁷	300.0	3.5
Air	0	1.0	1.0
Tower(cement)	1.0	1.0	1.0
Insulators(polyester)	0.1	8.0	1.17

IV. RESULT AND DISCUSSION

The FEM-based simulation conducted in this paper is coded with MATLAB programming for calculation of magnetic field dispersion. To utilize a graphical feature of MATLAB, the graphical representation for magnetic field strength, contour of magnetic field distribution through the cross-sectional area of the working domain, graphical representation for magnetic field strength in human for the transmission systems are presented in Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7, respectively. When the human body model of 180 cm height exposed to the 50 Hz overhead power transmission line. The height of the power line and human is 12 m above ground.

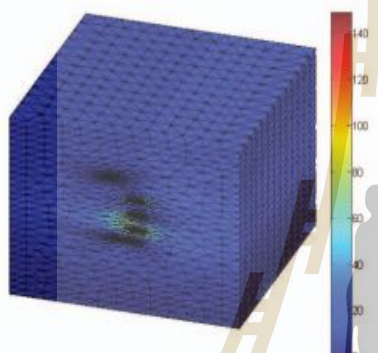


Fig.5 Magnetic field distribution (μT)

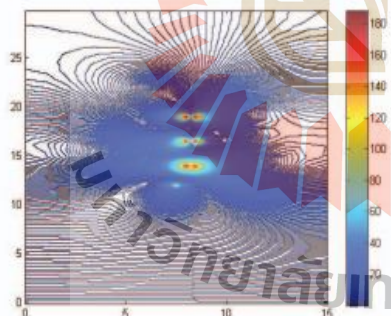


Fig.6 Contour of magnetic field (μT) at a cutaway position of the center of the operator body

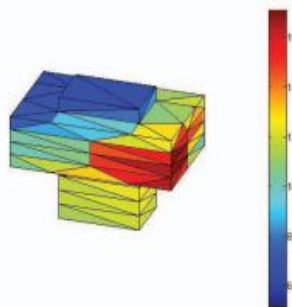


Fig.7 Magnetic field distribution in human (μT)

From Fig.5 – Fig.6 distribution of the magnetic field in the power transmission lines. Fig.7 shows the effect of the distribution of the magnetic field in human. An average of magnetic field of human is $10.7 \mu T$, which is less than magnetic field level that hazard to human. It is regulated by International Commission of Non Ionizing Radiation Protection [8], which the level of magnetic field safe to human for general public up to 24 hours/day must not greater than $100 \mu T$ and for occupation whole working day must not over $500 \mu T$.

V. CONCLUSION

This paper has studied the magnetic field distribution caused by 22 kV power transmission line hung below a 115 kV power distribution line on the same tower is selected for test. The domain of study with the 3-D FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. The simulation conducted here in is based on the 3-D FEM in the time harmonic mode with appropriate graphical representation of magnetic fields is conducted. As a result, The magnetic field effects the operator working remains with the ICNIRP standard.

VI. REFERENCES

- [1] Demerdash N.A., and Gillett D.H., A new approach for determination of eddy current and flux penetration in nonlinear ferromagnetic materials, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.74, pp. 682-685, 1974.
- [2] Isaramongkolrak, A., Kulworawanichpong, T., and Pao-la-or, P. (2008). Influence of an Overhead Ground Wire on Electric Fields Around the HV Power Transmission Line. The 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, Venice, Italy.: 128-132.
- [3] Pao-la-or P., Isaramongkolrak A., and Kulworawanichpong T., Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems, Engineering Letters, 18:1, EL_18_1_01.2010.
- [4] Weiner M., Electromagnetic Analysis Using Transmission Line Variables, World Scientific Publishing, Singapore, 2001.
- [5] Christopoulos, C., The Transmission-Line Modeling Method: TLM, IEEE Press, USA, 1995.

Shielding of Magnetic Field Effects on Operators Working a Power Transmission Lines Using 3-D FEM

Padej Pao-la-or and Arak Bunmat

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
Email: padej@sut.ac.th; arak.bunmat@gmail.com

Abstract— Inspection, maintenance, and repair of electric power transmission line systems is a core function of the electrical engineer, who does such work on a daily basis for electrical power distribution systems in all regions. In Thailand, this task is the responsibility of the Provincial Electricity Authority (PEA). This article proposes a mathematical model of the magnetic field around a 115 kV power transmission line hung over another 22 kV line on which the staff are performing work. This was modelled using a 3-dimensional finite element model. It is to be used as a diagnostic tool for predicting the magnetic fields around power distribution cables. This study focused on shielding magnetic devices from electricity to reduce the negative effects of magnetic induction on workers maintaining 22 kV transmission lines. The current study reports the results of decreased use of magnetic materials to reduce the magnetic field and the effects of magnetic fields on human beings according to ICNIRP standards.

Index Terms— transmission line, 3-D finite element method (3-D FEM), magnetic field, material shielding

I. INTRODUCTION

Inspection, maintenance, and repair of electric transmission lines are the regular duties of engineers and electrical personnel. A 115kV power transmission line of the Provincial Electricity Authority (PEA) hung over a 22 kV power distribution line on the same tower was selected as a test stand in Nakhon Ratchasima province, Thailand. Generally, a transmission line will be disconnected while it is repaired and the current in the top transmission line continues to flow. This should be safe for personnel to perform duties. But in reality, there is an effect of the current and voltage of the transmission system overhead upon the operator. Magnetic fields are induced in the lower transmission line even though power is not being supplied to this line. As a result, personnel working in the distribution system can be harmed. Therefore, this article demonstrates how to reduce the magnetic field affecting the operator of the power transmission line with materials that reduce magnetic field problems and their associated hazards.

Normally this phenomenon can be explained in the form of a differential equation or integral equation where is difficult to find an exact solution. Therefore, it is necessary to use an approximate numerical solution. Numerical computations can quickly solve these partial differential equations [1]. The most effective and popular methods today include finite element methods. This research, in particular, requires the use of a 3-D finite element method. Finite element methods are numerical methods that are used to calculate the approximate solution of a problem in the form of a partial differential equation by dividing the scope of the problem into small elements.

We then construct the equations of each element in accordance with the differential equations, and the elements are connected by their adjacent nodes, which are the positions where the solutions are calculated. For the finite element method in this research, the 3-dimensional calculation of the finite element method was done by dividing the volume of the problem into many regions, the so-called elements. The displacement and force within each element at the boundaries shared with adjacent elements must be compatible and balanced. These shape and size of these elements depend on the resolution of each task, how much the shape needs to resemble the original. This elements, if considered in 3-D, may be tetrahedral hexahedrons, octahedrons, or pyramids, in which tetrahedra are used. This is because these shapes have the fewest nodes or junctions. Also, the tetrahedra can be assembled to form any other shape. The accuracy of the solution will depend on the size and number of elements used to solve the problem [2]-[5]. All the programming instructions were coded in the MATLAB environment. Moreover, due to excessive magnetic fields that might be harmful to people or livestock living nearby, careful investigation of the magnetic phenomena was done. According to the standards of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), satisfactory simulation results also comply with the ICNIRP standard.

II. MAGNETIC FIELD MODELING FOR A POWER TRANSMISSION

Mathematical models of magnetic fields (**B**) generated by high currents are expressed in terms of the intensity of the magnetic field (**H**) in which $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$. The

Footnotes: 8-point Times New Roman font;
Manuscript received July 1, 2012; revised August 1, 2012; accepted September 1, 2012.
Copyright credit, project number, corresponding author, etc.

Helmholtz equation is shown as (1) [6]-[7]. The magnetic field modeling follows Ampere's circuital law as follows:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

where \mathbf{H} is the intensity of a magnetic field, ϵ is the constant dielectric permittivity, t is the time, μ is the magnetic permeability, and σ is the conductivity. This paper considered the time-harmonic system by representing $\mathbf{H} = H e^{j\omega t}$ [8], therefore

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = j\omega H \quad \text{and} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 H$$

where ω is the angular frequency. Therefore, (1) can be rewritten as:

$$\nabla^2 H - j\omega\sigma\mu H + \omega^2\epsilon\mu H = 0$$

Considering the problem in three dimensional (x,y,z) space, then

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\omega^2\epsilon) H = 0 \quad (2)$$

As can be seen, to obtain an exact solution of (2) is difficult. In this paper, the FEM was employed to find an approximate solution to these equations.

III. FEM FOR THE TRANSMISSION LINE

A. Discretization

In this study, a 115 kV power transmission system was installed over the transmission line of a 22 kV distribution system of the Provincial Electricity Authority in Nakhon Ratchasima, as shown in Fig. 1. The modelling of this study was conducted in 3-D. The sizing was varied according to the need to analyze areas of interest within different parts of the system. Fig. 2 shows a 115 kV transmission line over a 22 kV system. Fig. 3 shows a human form.

The 3D-FEM domain of study can be discretized using linear tetrahedral elements. A tetrahedron consist of a single volume with 4 nodes, which can be done using SolidWorks 3 -D in the grid generation mode. Fig. 4 displays the grid representation of the test system with 58,841 nodes and 345,673 elements used to model a 22 kV power line.

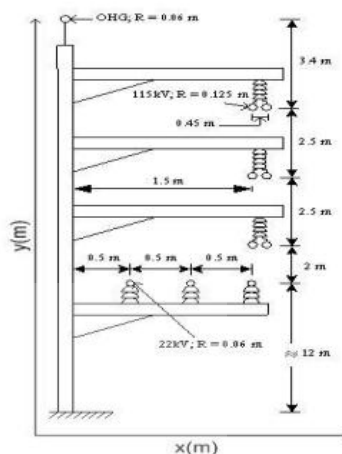


Figure 1. Details of the power lines



Figure 2. Power lines in Nakhon Ratchasima province modelled in the current study

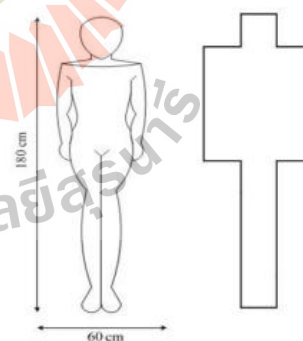


Figure 3. Detail of the human form

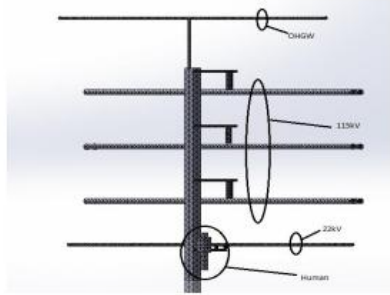


Figure 4. Mesh of power transmission line with a person working on a 22 kV line.

B. Finite element formulation

Equations of each component were derived directly from Maxwell's equations using a weighted residual method, where the weighting function was the same as the shape function. [9] - [10] According to this method, the magnetic field is shown as

$$H(x, y, z) = H_1 N_1 + H_2 N_2 + H_3 N_3 + H_4 N_4 \quad (3)$$

where N_n , $n = 1, 2, 3, 4$ is the element shape function and the H_n , $n = 1, 2, 3, 4$ is an approximation of the magnetic field intensity at each node (1, 2, 3, 4) of the elements, which is

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (4)$$

where V is the volume of the tetrahedral elements and,

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3) \\ b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_4 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \\ c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \\ d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

The method used weighted residuals in the Galerkin approach and was then applied to the differential equation, (2), where the integrations were performed over the element domain V .

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right) dV - \int_V N_n (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) H dV = 0$$

In the compact matrix form, they are:

$$[M + K]\{H\} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M &= (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \int_V N_n N_m dV \\ &= \frac{(j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K &= \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_m}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial N_m}{\partial z} \right) dV \\ &= \frac{1}{360} \begin{bmatrix} 4b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 + d_2 d_1 & 4b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 + d_3 d_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 + d_3 d_2 & 4b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_1 + c_4 c_1 + d_4 d_1 & b_4 b_2 + c_4 c_2 + d_4 d_2 & b_4 b_3 + c_4 c_3 + d_4 d_3 & 4b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

For one element containing 4 nodes, the FEM approximation is a 4×4 matrix. With n nodes, the system is an $n \times n$ matrix.

C. Boundary conditions and simulation

The boundary conditions applied included a zero intensity magnetic field at the OHGW, 22-kV power lines, and the ground. For the boundary conditions at the outer perimeters of 115-kV power lines are given in TABLE I and the current in the line was 855 A [11]. The properties of materials used in this simulation are given in TABLE II [12]. The permittivity of free space (ϵ_0) is 8.854×10^{-12} F/m and the permeability of free space (μ_0) is $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

TABLE I THE BOUNDARY CONDITIONS FOR THE 115 kV CABLE

The surface of the conductor	Magnetic Field (μT)
115 kV phase A1	601.8967 \angle 86.2935°
115 kV phase A2	604.3222 \angle - 86.6029°
115 kV phase B1	599.8715 \angle - 74.0822°
115 kV phase B2	600.0587 \angle 85.7260°
115 kV phase C1	602.2586 \angle - 84.0437°
115 kV phase C2	600.2544 \angle 85.3268°

TABLE II. PROPERTIES OF MATERIALS IN THE SIMULATION

Description	Electrical Conductivity (σ , S/m)	Relative Permittivity (ϵ_r)	Relative Permeability (μ_r)
Power Lines (copper)	3.8×10^7	3.5	1
Human Body	0.21	5.0	18.8
Steel	0.8×10^7	3.5	300.0
Air	0	1.0	1.0
Tower (cement)	1.0	1.0	1.0
Insulators (polyester)	0.1	1.17	8.0

D. Shielding the magnetic field

Shielding is generally done at the origin of the magnetic field. For example, this may be on high voltage transmission lines or at the location of devices affected by electromagnetic fields, such as computers or electronic devices. Two popular shielding methods are available, a flux shunting mechanism, and an induced current shielding mechanism [13-14]. This work focuses on magnetic protection using an induced current shielding mechanism since the blocking or reduction of magnetic fields by this mechanism uses highly conductive materials such as silver, copper, and aluminum, among others. This mechanism occurs when the conductor material is placed in a changing electromagnetic field. The result is an induction of an electric field in the conductor material according to Faraday's law. The electric field formed in this conductor material causes an electric current that flows on the conductor's surface. This induced current is called an eddy current, which creates a magnetic field to counteract the original magnetic field. The magnetic field in this area is reduced as shown schematically in Fig. 5. The advantage of blocking the magnetic field using this mechanism is that it can be accomplished using a small magnetic object. The disadvantage of using this mechanism is that the reflection coefficient and electromagnetic absorption are low.

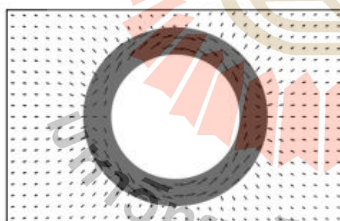


Figure 5. Induced current shielding mechanism

Proper shielding will reduce the intensity of the magnetic field in the shielded area. Shielding efficiency (SE), which is determined by the attenuation ratio of a magnetic field, when a magnetic field is emitted from a magnetic field source, measures the magnetic field strength at one point. If there are no magnetic objects in the area, then the object is blocked and the magnetic field intensity measured at the same point of observation.

Again, the above definition is written as a mathematical equation.

$$SE(dB) = 20 \log \left[\frac{H_{unshield}}{H_{shield}} \right] \quad (8)$$

Materials that attenuate the magnetic field will depend on the skin depth (δ) as in (9).

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (9)$$

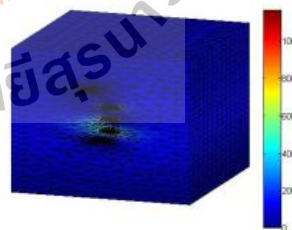
In this study, we introduce four types of materials for shielding magnetic fields, aluminum, steel, 80% Ni-Fe μ -metal, and Fair Rite - Type 76 Ferrite. Electrical conductivity and magnetic permeability values are shown in the TABLE III [15-16], where the entire body is covered to a depth of 5 mm.

TABLE III. PROPERTIES OF SHIELDING MATERIALS

Material	Conductivity (σ) S/m	Relative Permeability (μ_r)	Skin Depth (δ) m
Ferrite	2	10,000	0.503
Aluminum	3.8×10^7	1	1.15×10^{-2}
Steel	1×10^7	500	1×10^{-1}
80% Ni-Fe μ -metal	1.64×10^6	15,120	4.52×10^{-1}

IV. RESULT AND DISCUSSION

Finite element simulation was done using MATLAB for calculation of magnetic field dispersion. MATLAB was used due the simplicity of its approach to the simulation. The simulation results included contour zooms of magnetic field distribution through the cross-sectional volume of the working domain, graphical representation of magnetic field strength, and graphical representation of the magnetic field strength in a human body near the transmission system. These are presented in Figs. 6, 7 and 8, respectively. In the simulation, a model of a 180 cm tall human body was exposed to the magnetic effects of a 50 Hz overhead power transmission line. The power line and human were 12 m above the ground.

Figure 6. Magnetic field distribution (μT)

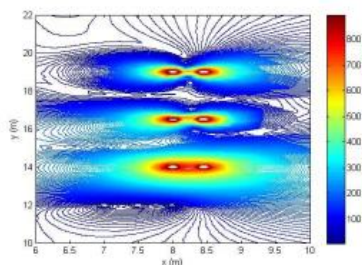


Figure 7. Magnetic field contours zoom (μT) at a cutaway position of the center of the operator body

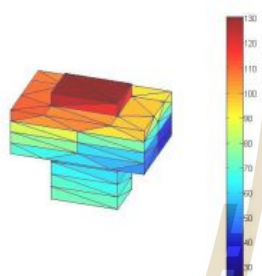


Figure 8. Magnetic field distribution in a human body (μT)

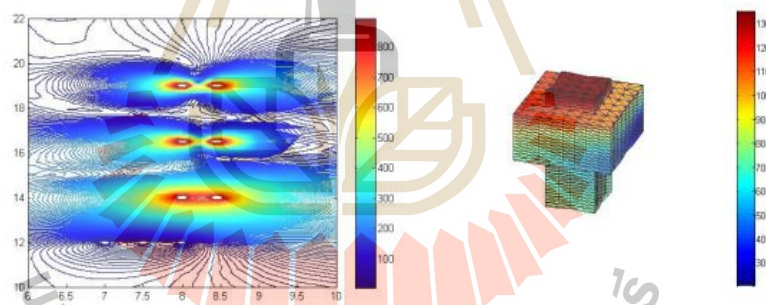


Figure 9. Magnetic field contours and distribution at the center of a human body (μT) using ferrite materials for shielding

In Figs. 6 and 7, show the distribution of the magnetic field in the power transmission lines. It can be seen that the magnetic field is very strong near the surface of the 115 kV conductor. Fig. 8 shows the effect of the magnetic field on the human body. Average and maximum values of the magnetic field of a human were 70.92 μT , and 130.46 μT , respectively. It was found that the magnetic field was strongest at the head of the human body because it is nearer to the conductor. This value exceeds acceptable safety limits and is hazardous to humans. The International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection [17], set the level of magnetic field safe to the general public as not greater than 100 μT over a 24 hours period, and it must not exceed 500 μT for a work day. Therefore, human beings must be protected against the effects of magnetic fields near transmission lines. The results of the simulation of magnetic protection are shown in Figs. 9-12. The simulation results of magnetic field protection and SE values are shown in TABLE IV. Figs. 9-12, show magnetic field contours and their distribution in the human body (μT) at a cutaway position of the center of the operator body when ferrite, aluminium, steel, and 80% Ni-Fe μ -metal materials are used for protection, respectively. At the bottom left, the shape of a human body is depicted. The magnetic field is less prominent because of the shielding materials used.

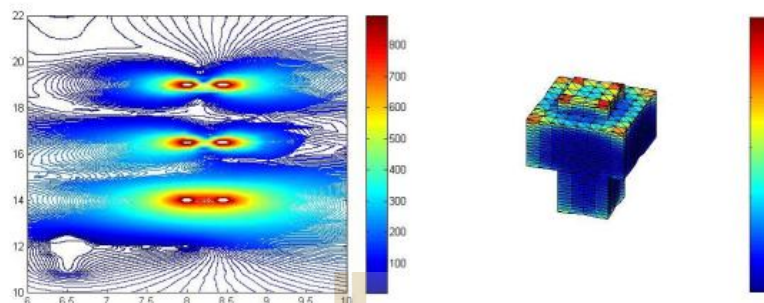


Figure 10. Magnetic field contours and distribution at the center of a human body (μT) using aluminum materials for shielding

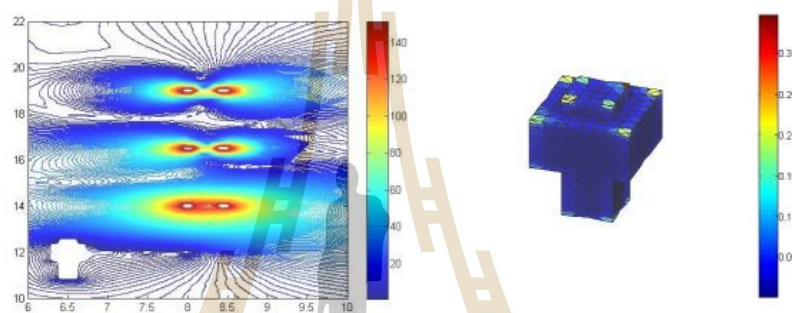


Figure 11. Magnetic field contours and distribution at the center of a human body (μT) using steel materials for shielding

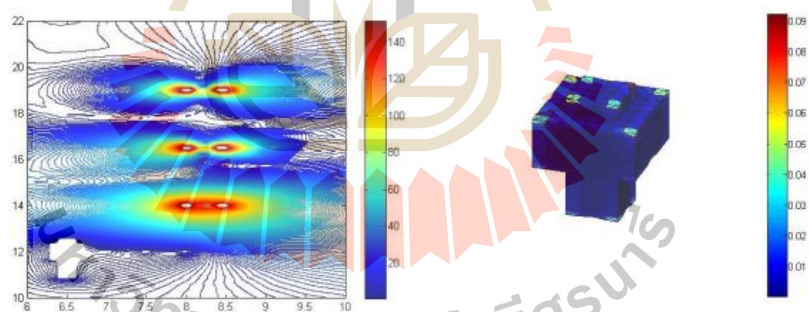


Figure 12. Magnetic field contours and distribution at the center of a human body (μT) using 80% Ni-Fe μ metal materials for shielding

TABLE IV. MAGNETIC FIELD IN A HUMAN BODY

Shielding materials	Maximum magnetic field in human (μT)	Average magnetic field in human (μT)	Shielding efficiency (SE, dB)
No shield	130.46	70.92	0
Ferrite	130.2254	70.3268	0.07
Aluminium	27.9704	4.2522	24.44
Steel	0.3464	0.0105	76.59
80% Ni-Fe μ -metal	0.0920	0.0021	90.57

This work shows the distribution of a magnetic field that affects the operator of a 22 kV transmission line. Its power is cut, but it is affected by a nearby 115 kV transmission line, resulting in an internal magnetic field. It is necessary to reduce this magnetic field using ferrite, aluminium, steel, 80% Ni-Fe μ -metal as shown in Figs. 9-12, with an induced current shielding mechanism. TABLE IV shows the maximum and average magnetic fields in a human body, and the shielding efficiency (SE) obtained with materials that affect magnetic attenuation such as aluminium, steel, and 80% Ni-Fe μ -metal. The results comply with the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), and the 80% Ni-Fe μ -metal yielded the best protection. Its high conductivity and magnetic permeability reduce the magnetic field as a function of its skin depth as is shown in (9).

V. CONCLUSION

This work studied the magnetic field distribution caused by a 115 kV power transmission line hung over a 22 kV line on the same tower. Computer simulation based on a FEM in the time-harmonic mode with the appropriate graphical representations of magnetic fields was conducted. The shield was based on the induced current shielding mechanism. Four materials were used to shield the magnetic field: ferrite, aluminium, steel, 80% Ni-Fe μ -metal. Simulation results showed that the 80% Ni-Fe μ -metal offers the best magnetic protection.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] N.A. Demerdash, D.H. Gillott, "A new approach for determination of eddy current and flux penetration in nonlinear ferromagnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 74, pp. 682-685, 1974.
- [2] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, and T. Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV," *Power Transmission Systems Engineering Letters*, No. 1, vol. 18, pp. 1-9, 2010.
- [3] P. Pao-la-or, "Study of Magnetic Field Shielding Roof of Cabin Electricity Authority Resulting in Operators Working," *WSEAS Transaction on Power System*, vol. 10, no. 6, pp. 163172, 2011.
- [4] A. Bunmat, and P. Pao-la-or, "Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method," *18th International Conference on Electrical Machine and System (ICEMS)*, Oct. 25-28, Pattaya City, Thailand, 2015, 1187-1191.
- [5] S. Vacharakup, M. Peerasaksophol, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or, "Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method," *Applied Mechanics and Materials*, vols. 110-116, 2012, pp. 61-66.
- [6] M.V.K. Chari, and S.J. Salon, "Numerical Methods in Electromagnetism," *Academic Press*, USA, 2000.
- [7] M. Weiner, "Electromagnetic Analysis Using Transmission Line Variables," *World Scientific Publishing*, Singapore, 2001.
- [8] C. Christopoulos, "The Transmission-Line Modeling Method: TLM," *IEEE Press*, USA, 1995.
- [9] T.W. Preston, A.B.J. Keece, and P.S. Sangha, "Induction Motor Analysis by Time-Stepping Techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, 1988, pp. 471-474.
- [10] B.T. Kim, B.I. Kwon, and S.C. Park, "Reduction of Electromagnetic Force Harmonics in Asynchronous Traction Motor by Adapting the Rotor Slot Number," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, 1999, pp. 3742-3744.
- [11] P. Pin-anong, "The Electromagnetic Field Effects Analysis which Interfere to Environment near the Overhead Transmission Lines and Case Study of Effects Reduction," [M.Eng. thesis], School of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2002.
- [12] A. Cipollone, A. Fabbri, and E. Zandri, "Techniques for shielding underground power lines to minimize the exposure to elf magnetic field in residential areas," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Sorrento, Sept. 2002.
- [13] H. Uetake, N. Hirota, Y. Ikezoe, and K. Kitazawa, "Magnetic-field simulation for shielding from high magnetic fields," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, 2002, pp. 6991-6993.
- [14] K. Wassef, V. Varadan, and K. Varadan, "Magnetic Field Shielding Concepts for Power Transmission Lines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 3, 1998, pp. 649-654.
- [15] S. Shahsavari, and H. Sarfi, "Study of The System Characteristics on The Performance of The Sheet Metal Electromagnetic Forming," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 6, No. 1, 2017, pp. 1-11.
- [16] M. D'Amore, E. Menghi, and M.S. Sarto, "Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines," in *Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, 2003, pp. 203-08.
- [17] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Phys.*, vol. 74, no. 4, 1998, pp.494-522.

Padej Pao-la-or received his B. Eng. (1998), M. Eng. (2002) and D. Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand.

He is an Associate Professor in the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, finite analysis, optimization and artificial intelligence, electromagnetic field, electrical machinery and energy conversion. He joined the school in

December 2005 and is currently a member in Power System Research, Suranaree University of Technology.



Arak Bunmat is pursuing a doctoral degree in the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



He received his B.Eng. (2009) and M. Eng. (2013) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields of research interest include a broad range of power systems, electrical drives, FEM simulation and artificial intelligence techniques.



ประวัติผู้เขียน

นายอารักษ์ บุญมาตย์ เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ.2529 เกิดที่อำเภอเวียงน้อย จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) และปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2551 และ พ.ศ.2556 ตามลำดับ และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2556 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกได้เป็นผู้สอนในวิชาปฏิบัติการต่างๆของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ก

