



## รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์และจำลองผลการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงสำหรับการทดสอบ แบบไม่ทำลาย  
(Electrical breakdown analysis and simulation in high-voltage insulators for non-destructive testing)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์และจำลองผลการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงสำหรับการทดสอบ แบบไม่ทำลาย  
(Electrical breakdown analysis and simulation in high-voltage insulators for non-destructive testing)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถดำเนินการสำเร็จล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ร่วมงานทุกท่าน และหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



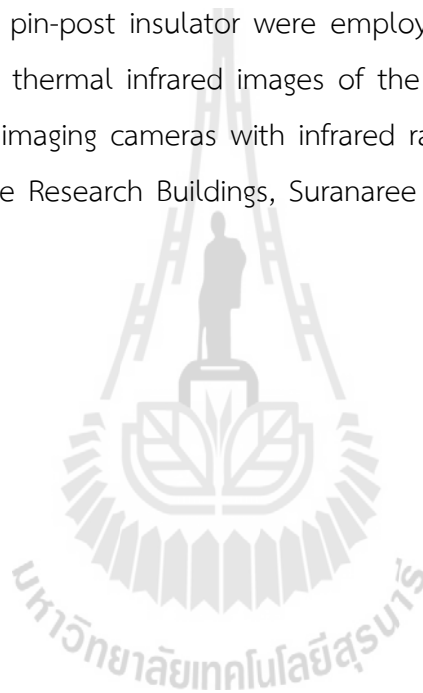
## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 3 เฟส เพื่อศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่เกิดกับฉนวนไฟฟ้า และได้ศึกษาการกระจายสนามไฟฟ้าของฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูงด้วย โดยระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟสเป็นระบบไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 230 kV การจำลองผลได้ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ สำหรับลูกถ้วยฉนวนได้ดำเนินการทดสอบโดยใช้ลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน ลูกถ้วยแห้ง ลูกถ้วยหลัก และลูกถ้วยแห้งก้านตรง การวิเคราะห์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้พิจารณาการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายอินฟราเรดเพื่อประเมินหาตำแหน่งร้อนของฉนวน การทดสอบใช้การตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด โดยใช้เบรกเกอร์ประธานของอาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นตัวอย่าง



## ABSTRACT

This research presents mathematical modeling and simulation of the electric field occurring within high-voltage power systems to study the effects of the electric field on the electrical insulation. In addition, this work also studied the electric field distribution within the various electrical insulators. The electric power transmission system used for test is a typical 230-kV transmission line. The simulation methods conducted in this research were the finite difference methods (FDM) and the finite element methods (FEM), in 2D. For insulator studies, glass suspension insulator, solid core suspension insulator, line-post insulator, post insulator, and pin-post insulator were employed for test. Furthermore, this research also considered the thermal infrared images of the electrical insulation. The test measurements with thermal imaging cameras with infrared radiation was investigated. The main breaker president of the Research Buildings, Suranaree University of Technology was used as a test example.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล.....	3
1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวคิด (Conceptual Framework).....	4
2.3 เทคนิคการคำนวณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	7
2.4 การตรวจวิเคราะห์สภาพความเป็นฉนวนด้วยภาพความร้อน.....	15
2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน (IR camera).....	21
2.6 สรุป.....	23
บทที่ 3 การจำลองผลและการทดสอบ	
3.1 กล่าวนำ.....	24
3.2 การจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของสายส่ง.....	24
3.3 การจำลองผลสนามไฟฟ้าของฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูง.....	37
3.4 การตรวจวัดอุณหภูมิขณะทำงานของบริเวณที่ไฟฟ้าด้วยภาพถ่ายอินฟราเรด.....	45
3.5 สรุป.....	47
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุป.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก ก. ผลผลิตจากงานวิจัย.....	51



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สรุปผลวิเคราะห์ภาพอินฟราเรด.....	47





## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดเบรกตาวอร์นของฉนวนไฟฟ้ารูปร่างมน.....	5
รูปที่ 2.2 การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาพตัดขวางแกนร่วมของ GIS.....	7
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกริด.....	7
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างปัญหาศักย์ไฟฟ้า 1.....	7
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างปัญหาศักย์ไฟฟ้า 2.....	7
รูปที่ 2.6 ผลรวมเชิงเส้นของเวกเตอร์ศักย์ที่ตำแหน่งรอบข้าง.....	9
รูปที่ 2.7 รูปร่างของอิลิเมนต์มูลฐานที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับ FEM.....	11
รูปที่ 2.8 การนิยามสมาชิกย่อยรูปสามเหลี่ยม.....	11
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างระบบ FEM.....	13
รูปที่ 2.10 การทดลองของวิลเลียม เฮอร์เชล.....	15
รูปที่ 2.11 The electromagnetic spectrum.....	16
รูปที่ 2.12 ลักษณะการนำความร้อน.....	17
รูปที่ 2.13 ลักษณะการพาความร้อน.....	17
รูปที่ 2.14 ลักษณะการแผ่รังสีความร้อน.....	18
รูปที่ 2.15 Blackbody radiation curves.....	19
รูปที่ 2.16 Wein displacement's law.....	19
รูปที่ 2.17 ปืนอินฟราเรดวัดอุณหภูมิ.....	21
รูปที่ 2.18 Thermal imaging Systems: Scanner.....	21
รูปที่ 2.19 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดแบบต่าง ๆ.....	22
รูปที่ 2.20 กล้องสำหรับ Military / Surveillance.....	22
รูปที่ 3.1 ระบบสายตัวนำเฟสเดียว.....	24
รูปที่ 3.2 การจัดวางตัวนำในแนวระดับ.....	25
รูปที่ 3.3 เสาไฟฟ้ารูปตัว H ในระบบ 69 kV.....	26
รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 69 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ.....	27
รูปที่ 3.5 เสาไฟฟ้ารูปตัว H ในระบบ 115 kV.....	27
รูปที่ 3.6 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 115 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ.....	28
รูปที่ 3.7 เสาไฟฟ้าในระบบ 230 kV.....	28
รูปที่ 3.8 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ.....	29

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 การจัดวางตัวนำในแนวดิ่ง.....	29
รูปที่ 3.10 ผลการประมาณค่าฟังก์ชัน $Y = \ln \sqrt{X}$ .....	30
รูปที่ 3.11 ระบบสายส่ง 115 kV จัดเรียงตัวนำในแนวดิ่ง.....	31
รูปที่ 3.12 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 1.....	31
รูปที่ 3.13 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 2.....	32
รูปที่ 3.14 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 3.....	32
รูปที่ 3.15 การจัดวางตัวนำแบบสมมาตร.....	32
รูปที่ 3.16 ระบบสายส่ง 115 kV จัดเรียงตัวนำแบบสมมาตร.....	33
รูปที่ 3.17 สนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 115 kV ที่มีการจัดวางตัวนำแบบสมมาตร.....	34
รูปที่ 3.18 ระบบทดสอบ 22 kV.....	34
รูปที่ 3.19 การแบ่งกริดของระบบทดสอบ 22 kV.....	35
รูปที่ 3.20 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าโดยใช้การคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ กัน.....	35
รูปที่ 3.21 ระบบทดสอบ 230 kV.....	36
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายส่ง 230 kV.....	36
รูปที่ 3.23 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าโดยใช้การคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ กัน.....	37
รูปที่ 3.24 ลูกถ้วยแขวน.....	38
รูปที่ 3.25 ลูกถ้วยแท่ง.....	38
รูปที่ 3.26 การใช้งานลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยแท่ง.....	38
รูปที่ 3.27 การใช้ลูกถ้วยแขวนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 3.28 การใช้ลูกถ้วยแท่งในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 3.29 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว.....	40
รูปที่ 3.30 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว.....	40
รูปที่ 3.31 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน.....	41
รูปที่ 3.32 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอดัน.....	41
รูปที่ 3.33 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่ง.....	42
รูปที่ 3.34 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่ง.....	42
รูปที่ 3.35 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยหลัก.....	43
รูปที่ 3.36 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยหลัก.....	43
รูปที่ 3.37 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่งก้านตรง.....	44
รูปที่ 3.38 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่งก้านตรง.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.39 กล้องอินฟราเรด DALI รุ่น DL-770A ที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
รูปที่ 3.40 เบรกเกอร์หลักในตู้ MDB อาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	46
รูปที่ 3.41 ฮีตโทรแกรมสำหรับ Area01.....	46
รูปที่ 3.42 ฮีตโทรแกรมสำหรับ Area02.....	46
รูปที่ 3.43 ฮีตโทรแกรมสำหรับ Line01.....	47



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างมนุษย์ สัตว์ วัตถุ หรือตัวนำใดๆ กับโครงโลหะหรือตัวนำของอุปกรณ์ที่ถูกหุ้มฉนวนไว้ ทำให้ไม่เกิดการลัดวงจรอันเนื่องมาจากการสัมผัสดังกล่าวเพื่อป้องกันอันตรายต่อชีวิต ทรัพย์สิน รวมถึงป้องกันการขัดจังหวะการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวอันเนื่องมาจากการเกิดลัดวงจรด้วย ไม่ว่าจะการลัดวงจรนั้นจะเกิดขึ้นแบบชั่วคราวหรือแบบถาวรก็ตาม อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ฉนวนจะช่วยป้องกันอันตรายดังกล่าวได้ แต่การใช้งานฉนวนไฟฟ้าเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ย่อมส่งผลให้คุณสมบัติของฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการใช้งานและตามสภาวะแวดล้อมอีกด้วย เช่น ฉนวนที่ถูกนำมาใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง มีการกัดกร่อนสูง มีฝุ่นหรือสภาวะแวดล้อมที่สกปรก นอกจากนี้ ฉนวนไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นมานั้นได้มาตรฐานหรือไม่ มีการทดสอบได้หลายแบบ และเพื่อการประหยัดต้นทุนในการผลิต ฉนวนไม่จำเป็นต้องถูกทดสอบทั้งหมด อาจจะใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่งมาทดสอบ ซึ่งการทดสอบบางอย่าง เช่น การเกิดเบรกดาว์นของฉนวนไฟฟ้าที่เป็นของแข็ง จะทำให้ฉนวนดังกล่าวถูกทำลาย ปัญหานี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาจากกระบวนการผลิตที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ การสุ่มทดสอบไม่ได้รับประกันฉนวนทุกชิ้นที่ผลิตได้ เมื่อฉนวนที่ไม่ได้มาตรฐานหลุดรอดจากกระบวนการควบคุมคุณภาพดังกล่าว ทำให้การใช้งานฉนวนไฟฟ้าไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับฉนวนดังกล่าวเกิดปัญหา เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้เกิดการวาบไฟบนผิวลูกถ้วย (flashover) ในขณะที่ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงชั่วขณะ ถ้าลูกถ้วยดังกล่าวไม่ได้มาตรฐานอาจทำให้เกิดการเจาะทะลุของลูกถ้วย แทนการวาบไฟที่ผิว ทำให้ลูกถ้วยเสียสภาพการเป็นฉนวน นอกจากนี้ ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ จะมีลักษณะที่คล้ายกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้การแสวงหาเทคนิคหรือกระบวนการตรวจสอบสภาพความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้งาน มีความจำเป็น นอกจากการทดสอบแบบทำลายแล้ว เทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง มีความเชื่อถือได้สูง ภายใต้ข้อมูลหรือพารามิเตอร์ของวัสดุที่ทราบค่าแน่นอน หรืออาจจะได้จากการทดสอบฉนวนอย่างง่ายโดยไม่เกิดการทำลาย

การวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและการจำลองผลด้วยการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาการตรวจสอบคุณสมบัติของฉนวนโดยไม่ทำลาย ความละเอียด ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของการจำลองผลจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรากฏในแบบจำลอง เช่น ขนาดของตัวนำหรือฉนวน ไม่ว่าจะเป็นความกว้าง ความยาว ความหนา รูปร่าง ตลอดจนคุณสมบัติของวัสดุ เช่น สภาพยอม (permittivity) หรือ สภาพซาบซึมแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุ นอกจากนี้ การจำลองผลสามารถทำนายคุณลักษณะสมบัติของฉนวนเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานานๆ ได้ ทำให้ทราบถึงระยะเวลาในการใช้งานฉนวนไฟฟ้าที่เหมาะสม และนำมาใช้วางแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาแบบจำลองและวิธีการจำลองผลการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงด้วยการโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.2 วิเคราะห์และแก้ปัญหาการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- 1.2.3 พัฒนาการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- 1.2.4 วางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (preventive maintenance) สำหรับฉนวนไฟฟ้าแรงสูงได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการฉนวนไฟฟ้าแรงสูงสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง 50Hz
- 1.3.2 ฉนวนมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอ
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อสภาพการเป็นฉนวนของวัสดุ
- 1.3.4 ไม่พิจารณาผลจากฝุ่น และความสกปรกบนพื้นผิวต่าง ๆ
- 1.3.5 ไม่พิจารณาผลจากกัศกร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- 1.4.2 ได้แบบจำลองของการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- 1.4.3 ได้เทคนิคการตรวจสอบคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ทำลาย (non-destructive investigation of high-voltage insulators)
- 1.4.4 บทความวิจัยเผยแพร่ต่อที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

### 1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite different method) หรือวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นต้น
- ศึกษาคุณสมบัติและลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและการทดสอบแบบไม่ทำลาย
- วิเคราะห์และจำลองการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า
- ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของค่าสภาพยอมของวัสดุฉนวนไฟฟ้า
- ศึกษาและวิเคราะห์การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ
- จำลองการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

### 1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1.6 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.6.1 ผลสำเร็จ

- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- ได้แบบจำลองของการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
- ได้เทคนิคการตรวจสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ทำลาย

### 1.6.2 ความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

มีความคุ้มค่าทางด้านรายได้แบบจำลองการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ที่จะช่วยในพัฒนาการออกแบบระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถใช้จำลองผลได้จริงกับฉนวนไฟฟ้าในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและสร้างความเชื่อถือให้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมทั้งการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบสภาพของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ทำลาย

### 1.6.3 หน่วยงานที่นำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์

สถาบันการศึกษาหรือสถาบันวิจัยทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

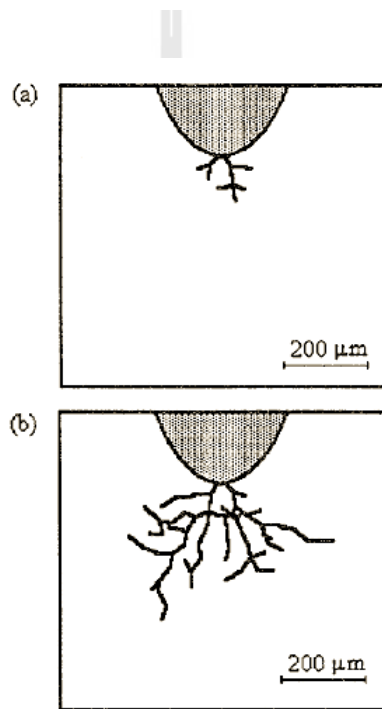
จากการทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์และจำลองการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยย่อได้ดังนี้ A.S.Malinonovski, M.D.Noskov และ M.Sack, A.J.Schwab ได้จำลองผลการเกิด partial discharge and electrical tree growth ในฉนวนไฟฟ้าแรงสูงภายใต้แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับในคลื่นรูปไซน์และรูปสามเหลี่ยม โดยพิจารณาการเกิด partial discharge and electrical tree growth จากผลของสนามไฟฟ้าและค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนไฟฟ้า งานวิจัยของ T.Seghir, A.Nouar, K.Lefkaier และ D.Mahi ได้อธิบายถึงผลของอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อ การเกิด partial discharge ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ยังศึกษา วิเคราะห์และจำลองผลการเกิด partial discharge ในสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและใช้ทฤษฎีของเกาส์ในการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าว โดยการพิจารณาผลของสนามไฟฟ้าและผลเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ส่วน D.Frey, J.L.Schanen และ J.L.Auge, O.Lesaint ได้อธิบายถึงการวิเคราะห์และจำลองผลของสนามไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวัดการเกิด partial discharge ได้อธิบายว่าเมื่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นก็จะมี การเหนี่ยวนำให้เกิด partial discharge และยังอธิบายถึงวิธีการจำลองผลด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วอธิบายเปรียบเทียบค่าของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมกับผลของการวัดจริง งานวิจัยของ S.M.Korobeynikov, Yu.N.Sinikh และ A.G.Tregubov ได้ศึกษาการเริ่มเกิดเบรกดาวน์ในของเหลว โดยการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อธิบายว่าเกิดเบรกดาวน์มีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา คือค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ความดัน อุณหภูมิและคุณสมบัติของวัสดุฉนวน เช่น สภาพยอม (permittivity) ส่วน Nung-Pyo Hang, Pil-Gyu Im, Deok-Jung Kim and Kyung-Soon Cho, Don-Chan Cho, Yong-Woo Lee, Jin-Woong Hong ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อเกิดเบรกดาวน์ โดยพิจารณาการเกิดเบรกดาวน์สองแบบ คือ อิมพัลส์เบรกดาวน์และ ดีซีเบรกดาวน์เนื่องจากผลของอุณหภูมิ พบว่าทั้งการเกิดอิมพัลส์เบรกดาวน์และดีซีเบรกดาวน์ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ

#### 2.2 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework)

จากการศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ประกอบไปด้วย สนามไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน และคุณสมบัติของวัสดุฉนวน เช่น ค่าสภาพ

ยอม (permittivity) หรือ ค่าสภาพซาบซึมแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุ ซึ่งสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

สนามไฟฟ้า (electric field) ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า สามารถพิจารณาจากการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยค่าสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากค่าเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดบนฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นการกระจายของสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า ผลของอุณหภูมิ และคุณสมบัติของวัสดุฉนวน ซึ่งลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจะเริ่มจากการเกิดเบรกดาวน์บางส่วนและเมื่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนฉนวนไฟฟ้าไม่สามารถทนได้ก็จะทำให้เกิดการเกิดเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์ (complete breakdown) ในที่สุด



รูปที่ 2.1 การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้ารูปร่างมน

อุณหภูมิ (temperature) การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือสถานะที่มีอุณหภูมิสูงสามารถเกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายกว่าในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยปกติค่าความต้านทานของฉนวนจะลดลงและค่าความนำไฟฟ้าของฉนวนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเกิดขึ้นได้ง่าย โดยค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบนฉนวนไฟฟ้าในแต่ละจุดยังขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุฉนวน เช่น ค่าสภาพยอม (permittivity) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (electric conductivity) ของฉนวนแต่ละชนิดด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายของสนามไฟฟ้าจะต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิด้วย



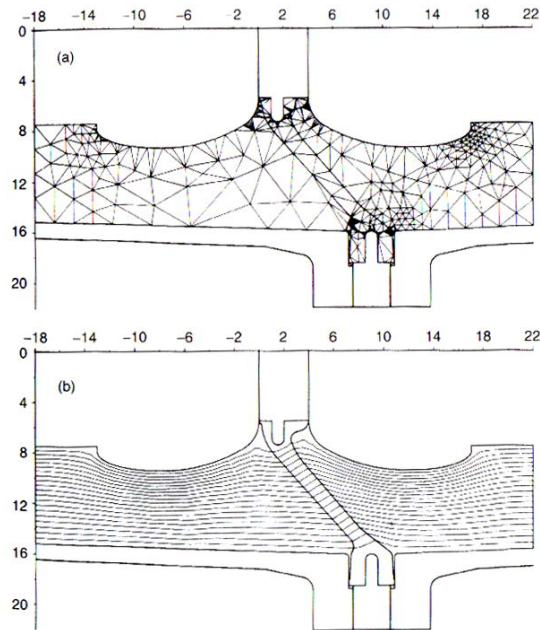
คุณสมบัติของวัสดุฉนวนไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) ค่าแรงดึงผิว ค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนมีผลต่อการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าสภาพยอม (permittivity) ของฉนวนแต่ละชนิดจะทำให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในฉนวนแตกต่างกันด้วย ส่งผลให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนไฟฟ้ามีลักษณะต่างกัน ดังนั้นวัสดุฉนวนแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกันทำให้ความสามารถของฉนวนในการทนต่อสนามไฟฟ้ามีความแตกต่างกันด้วย

วิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method: FDM) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือในการจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งสามารถพิจารณาจาก Laplace's equation หรือ Poisson's equation สำหรับสองมิติบนระนาบ  $x$  และ  $y$  ได้ดังสมการที่ 2.1

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (2.1)$$

โดยหลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมคือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการผลต่างสี่เหลี่ยมโดยการสร้างตารางสี่เหลี่ยมแล้วพิจารณาจุดต่อของสี่เหลี่ยมต่างๆ และสามารถจำกัดขอบเขตของการพิจารณาจากจำนวนของจุดต่อและการกำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) ข้อดีของวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยมคือเป็นวิธีที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ ส่วนข้อเสียคือ ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบและความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) เป็นวิธีการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณที่วิวัฒนาการมาจากวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนแบบใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจะคล้ายกับวิธีการผลต่างสี่เหลี่ยม คือเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำลังพิจารณา จากนั้นนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น มาประกอบกันเป็นระบบสมการใหญ่ซึ่งก็คือการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหา จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบลงในสมการชุดใหญ่แล้วทำการแก้สมการดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น



รูปที่ 2.2 การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ภาพตัดขวางแกนร่วมของ GIS

(a) เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสำหรับการการประมาณเชิงตัวเลข

(b) เส้นสมศักย์ (equipotential lines)

### 2.3 เทคนิคการคำนวณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติเป็นไปได้ยากที่จะสามารถหาผลเฉลยแบบแม่นยำตรง (exact solution) ได้ ผลเฉลยโดยประมาณได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสมรรถนะของคอมพิวเตอร์สูงขึ้น การคำนวณเชิงตัวเลขทำได้รวดเร็ว ในบทนี้ จะนำเสนอเทคนิคการคำนวณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และวิธีสมาชิกจำกัด เมื่อใดก็ตามที่ปัญหาหรือระบบมีความซับซ้อน ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะถูกนำมาใช้ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากง่ายในการทำความเข้าใจ FDM ถูกพัฒนาขึ้น โดย A. Thom [4] ประมาณปี 1920 ด้วยชื่อ ระเบียบวิธีสี่เหลี่ยม (method of squares) จากนั้นได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบัน ในขณะที่ FEM ถูกพัฒนาขึ้นโดย Courant [5] ในปี 1943 แต่การประยุกต์ FEM สำหรับปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เริ่มต้นขึ้นราว 1968

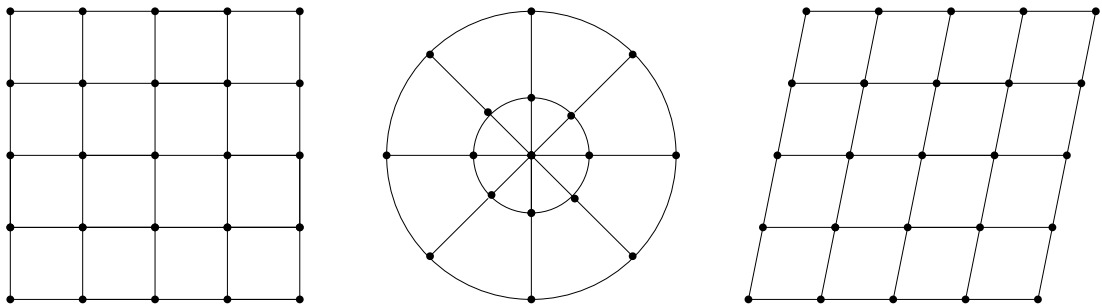
#### 2.3.1 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

การนำระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม มาใช้ประมาณผลเฉลยของปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เขียนอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย แบ่งการดำเนินการได้ 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. Discretization การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็น โหนด (node) และกริด (grid)

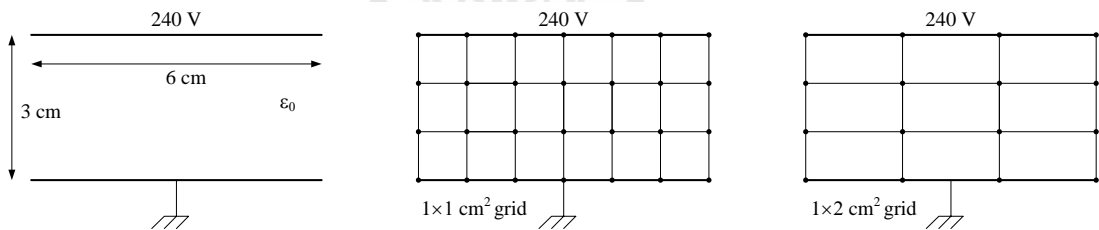
2. FDM formulation การสร้างสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อแทนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย
3. Solution method การแก้สมการของปัญหา ได้แก่ การแก้สมการเชิงเส้น

*Discreization* กระบวนการนี้จัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นโนดย่อยต่าง ๆ และเชื่อมโนดด้วยเส้นเชื่อมต่อกันเป็นกริด ไม่มีรูปแบบที่ตายตัวสำหรับการแบ่งโนดและการตึกกริด รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างคร่าว ๆ ให้เห็นรูปร่างของโนดและกริดเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษา

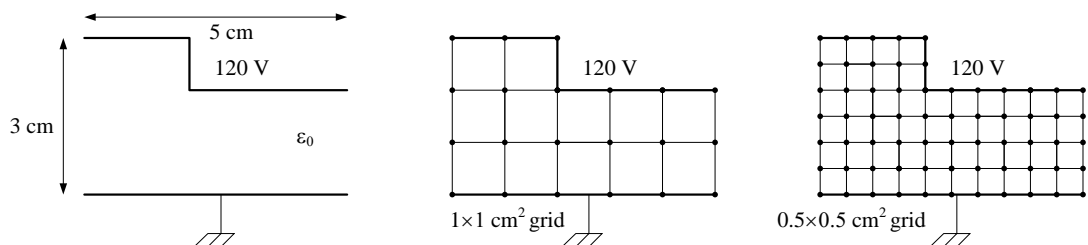


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกริด

กำหนดปัญหาสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่แผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 เป็นดังในรูป ให้ทดลองแบ่งกริดรูปสี่เหลี่ยมเพื่อเตรียมการแก้ปัญหาด้วย FDM



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างปัญหาศักย์ไฟฟ้า 1



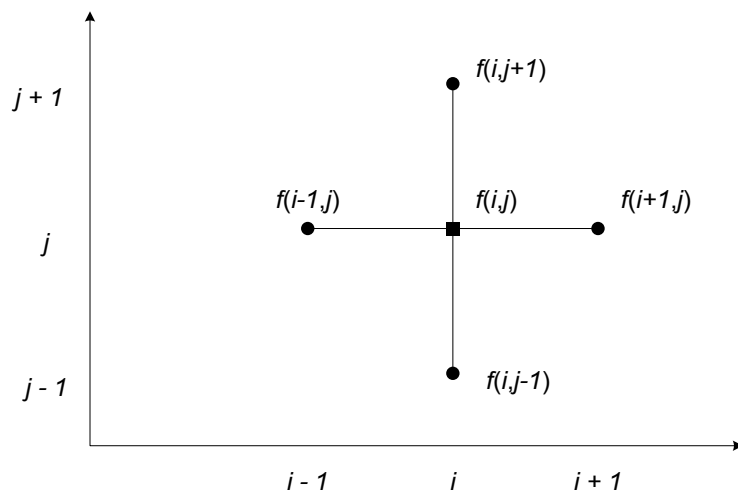
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างปัญหาศักย์ไฟฟ้า 2

*FDM formulation* กระบวนการนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ประมาณค่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยสมการเชิงเส้น ดังนั้น การประมาณค่าอนุพันธ์จะถูกนำมาใช้ ในที่นี้ จะนำเสนอสูตรผลต่างกลาง (central difference formulae) ในการประมาณค่าอนุพันธ์ทั้งอันดับ 1 และอันดับ 2 ดังนี้

$$f'(x_0) = \nabla_x f(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (2.2)$$

$$f''(x_0) = \nabla_x^2 f(x_0) \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (2.3)$$

สำหรับปัญหา 2 มิติ จะได้ว่า ค่าเวกเตอร์ศักร์ที่ตำแหน่งใด ๆ จะเป็นผลรวมเชิงเส้นของเวกเตอร์ศักร์ที่ตำแหน่งรอบข้าง



รูปที่ 2.6 ผลรวมเชิงเส้นของเวกเตอร์ศักร์ที่ตำแหน่งรอบข้าง

นั่นคือ

$$\nabla_x f(i, j) = \frac{f(i+1, j) - f(i-1, j)}{2\Delta x}$$

$$\nabla_y f(i, j) = \frac{f(i, j+1) - f(i, j-1)}{2\Delta y}$$

$$\nabla_{xx} f(i, j) = \frac{f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j)}{(\Delta x)^2}$$

$$\nabla_{yy} f(i, j) = \frac{f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1)}{(\Delta y)^2}$$

พิจารณาสมการ Laplace:  $\nabla^2 f = 0$

$$\nabla^2 f = \nabla_{xx} f(i, j) + \nabla_{yy} f(i, j) = 0$$

$$\frac{f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j)}{(\Delta x)^2} + \frac{f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\frac{f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j)}{(\Delta x)^2} + \frac{f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1)}{(\Delta y)^2} = 0$$

$$r_y f(i, j+1) + r_x f(i-1, j) - 2(r_x + r_y) f(i, j) + r_x f(i+1, j) + r_y f(i, j-1) = 0$$

โดยที่

$$r_x = \frac{1}{(\Delta x)^2}; r_y = \frac{1}{(\Delta y)^2}$$

*Solution Method* กระบวนการนี้เน้นการแก้ปัญหาด้วยระบบสมการเชิงเส้น เนื่องจากตัวแปรของปัญหาในสถานะคงตัวแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า และตัวแปรที่ขอบของปัญหาซึ่งถูกกำหนดค่าหรือทราบค่าแล้วว่ามีค่าเท่าใด ดังนั้น สมการที่กำกับกับโนดใด ๆ อาจจะแบ่งออกได้ดังนี้

$$c_{k1} f_1 + c_{k2} f_2 + \dots + c_{kn} f_n = g_k$$

$$\sum_{i \in \Gamma} c_{ki} f_i + \sum_{j \in \Lambda} c_{kj} f_j = g_k$$

$$\sum_{i \in \Gamma} c_{ki} f_i = g_k - \sum_{j \in \Lambda} c_{kj} f_j \Rightarrow \sum_{i=1}^m a_{ki} \phi_i = b_k$$

เมื่อ

$\Gamma$  แทนเซตของเวกเตอร์ศักร์ ณ ตำแหน่งโนดที่ไม่ทราบค่า

$\Lambda$  แทนเซตของเวกเตอร์ศักร์ ณ ตำแหน่งโนดที่ทราบค่า ปกติได้แก่โนดที่ขอบของปัญหา

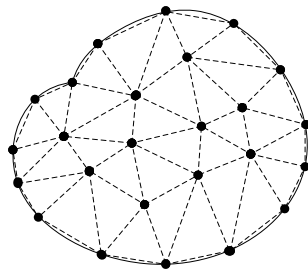
นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \Rightarrow [A][\phi] = [b] \quad (2.4)$$

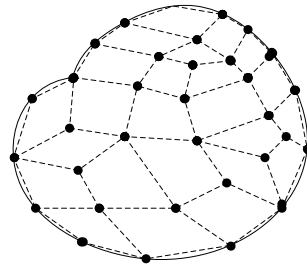
### 2.3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ถึงแม้ว่าวิธีผลต่างอันตะมีหลักการที่คล้ายคลึงกันและง่ายกว่าวิธีสมาชิกจำกัดมาก แต่ข้อด้อยของ FDM อยู่ที่ปัญหาไม่เชิงเส้นและรูปร่างโดเมนที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.7 การใช้ FEM จะช่วยให้ปัญหาดังกล่าวหมดไป โดยมีขั้นตอนทั้งสิ้น 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกับ FDM ดังนี้

1. Discretization การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็น โหนด (node) และกริด (grid)
2. FEM formulation การสร้างสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อแทนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย
3. Solution method การแก้สมการของปัญหา ซึ่งได้แก่การแก้สมการเชิงเส้น



Linear triangular element

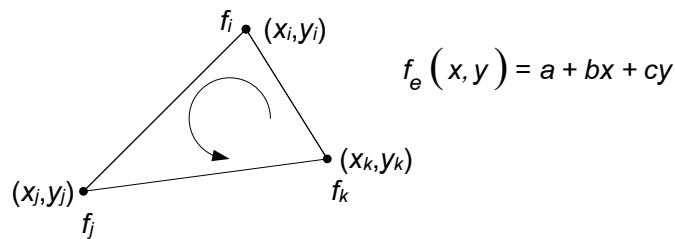


Bilinear rectangular element

รูปที่ 2.7 รูปร่างของอีลิเมนต์มูลฐานที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับ FEM

*Discretization* กระบวนการนี้จัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อย (element) ที่ประกอบขึ้นจากจุดยอด (vertices) และเส้นเชื่อม (edges) สำหรับ FEM แบบสองมิติ นิยมใช้ linear triangle และ bilinear rectangle เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา สำหรับการศึกษาระดับนี้ จะนำเสนอเฉพาะชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมเท่านั้น

กำหนดชิ้นส่วนย่อยใด ๆ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การนิยามสมาชิกย่อยรูปสามเหลี่ยม

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์กลับสู่สมการประมาณค่า จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$f(x, y) = \sum_{h=i}^k \alpha_h(x, y) f_h \quad (2.6)$$

โดยที่ เรียก  $\alpha$  ว่า element shape function

$$\alpha_i = \frac{1}{2A} \left\{ (x_j y_k - x_k y_j) + (y_j - y_k)x + (x_j - x_k)y \right\}$$

$$\alpha_j = \frac{1}{2A} \left\{ (x_k y_i - x_i y_k) + (y_k - y_i)x + (x_k - x_i)y \right\}$$

$$\alpha_k = \frac{1}{2A} \left\{ (x_i y_j - x_j y_i) + (y_i - y_j)x + (x_i - x_j)y \right\}$$

$$A = \frac{1}{2} \left\{ (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i) \right\}$$

*FEM formulation* กระบวนการนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ประมาณค่าสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ด้วยสมการเชิงเส้น เนื่องจากการแก้ปัญหาด้วยวิธีสมาชิกจำกัดนี้มีได้หลายแนวทาง สืบเนื่องมาจาก รูปแบบการประมาณค่าซึ่งใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีการแปรผัน (variation methods) ได้แก่ วิธี weighted residual เช่น Collocation method, Subdomain method, Galerkin's method และ Least squares method อย่างไรก็ตาม การสร้างสมการตามวิธีดังกล่าวในปัญหาหลายประเภท อาจจะมีคามยุ่งยากและซับซ้อน ในขั้นนี้ จะใช้การแก้ปัญหาด้วยหลักการพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) กำหนดได้ดังนี้

$$E = -\nabla V = -ba_x - ca_y \quad (2.7)$$

เนื่องจาก ศักย์ไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งจึงสามารถนำหลักการนี้มาใช้งานได้ นั่นคือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla V|^2 dS \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์ศักย์  $f$  แทนศักย์ไฟฟ้าซึ่งก็คือ

$$\nabla f = \sum_{h=i}^k f_h \nabla \alpha_h \quad (2.9)$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla f|^2 dS = \frac{1}{2} \sum_{h=i}^k \sum_{g=i}^k \varepsilon f_h \left[ \int \nabla \alpha_h \cdot \nabla \alpha_g dS \right] f_g \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon \begin{bmatrix} f_i & f_j & f_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ij} & C_{ik} \\ C_{ji} & C_{jj} & C_{jk} \\ C_{ki} & C_{kj} & C_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \varepsilon [f_e]^T [C_e] [f_e] \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$C_{ii} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_j - y_k)^2 + (x_j - x_k)^2 \right\}$$

$$C_{jj} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_k - y_i)^2 + (x_k - x_i)^2 \right\}$$

$$C_{kk} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2 \right\}$$

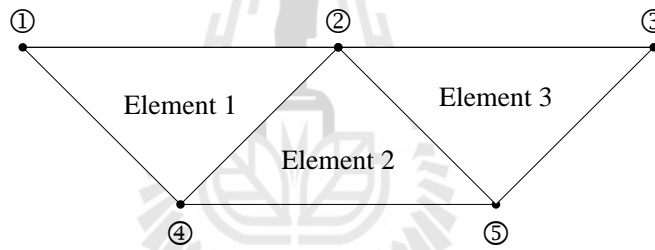
$$C_{ij} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_j - y_k)(y_k - y_i) + (x_j - x_k)(x_k - x_i) \right\} = C_{ji}$$

$$C_{ik} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_i - y_j)(y_j - y_k) + (x_i - x_j)(x_j - x_k) \right\} = C_{ki}$$

$$C_{jk} = \frac{I}{4A} \left\{ (y_k - y_i)(y_i - y_j) + (x_k - x_i)(x_i - x_j) \right\} = C_{kj}$$

- การประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน (assembling of all elements)

ขั้นตอนนี้เป็นารรวมชิ้นส่วนย่อย ๆ เข้าเป็นระบบซึ่งแทนได้ด้วยเมตริกซ์ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างระบบ FEM

จากรูปของระบบที่กำหนดประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย 3 ชิ้น แต่ละชิ้นสามารถสร้างเมตริกซ์

สัมประสิทธิ์  $[C_e]$  ขนาด  $3 \times 3$

สำหรับชิ้นส่วนที่ 1 (element 1) ประกอบด้วยจุดยอด  $i, j, k$  เป็น 1, 4, 2

สำหรับชิ้นส่วนที่ 2 (element 2) ประกอบด้วยจุดยอด  $i, j, k$  เป็น 2, 4, 5

สำหรับชิ้นส่วนที่ 3 (element 3) ประกอบด้วยจุดยอด  $i, j, k$  เป็น 2, 5, 3

นั่นคือ

$$[C]_{element 1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{14} & C_{12} \\ C_{41} & C_{44} & C_{42} \\ C_{21} & C_{24} & C_{22} \end{bmatrix}^{(1)}$$



$$[C]_{element\ 2} = \begin{bmatrix} C_{22} & C_{24} & C_{25} \\ C_{42} & C_{44} & C_{45} \\ C_{52} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix}^{(2)}$$

$$[C]_{element\ 3} = \begin{bmatrix} C_{22} & C_{25} & C_{23} \\ C_{52} & C_{55} & C_{53} \\ C_{32} & C_{35} & C_{33} \end{bmatrix}^{(3)}$$

จะได้เมทริกซ์รวมของระบบดังนี้

$$[C]_{sys} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$C_{24} = C_{24}^{(1)} + C_{24}^{(2)}$$

$$C_{22} = C_{22}^{(1)} + C_{22}^{(2)} + C_{22}^{(3)}$$

*Solution Method* กระบวนการนี้เน้นการแก้ปัญหาด้วยระบบสมการเชิงเส้น เนื่องจากตัวแปรของปัญหาในสถานะคงตัวแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า และตัวแปรที่ขอบของปัญหาซึ่งถูกกำหนดค่าหรือทราบค่าแล้วว่ามีค่าเท่าใด ดังนั้น สมการที่กำกับระบบอาจจะแบ่งออกได้ดังนี้

$$c_{k1}f_1 + c_{k2}f_2 + \dots + c_{kn}f_n = 0$$

$$\sum_{i \in \Gamma} c_{ki}f_i + \sum_{j \in \Lambda} c_{kj}f_j = 0$$

$$\sum_{i \in \Gamma} c_{ki}f_i = - \sum_{j \in \Lambda} c_{kj}f_j \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^m a_{ki}\phi_i = b_k$$

เมื่อ

$\Gamma$  แทนเซตของเวกเตอร์ศักร์ ณ ตำแหน่งโนดที่ไม่ทราบค่า

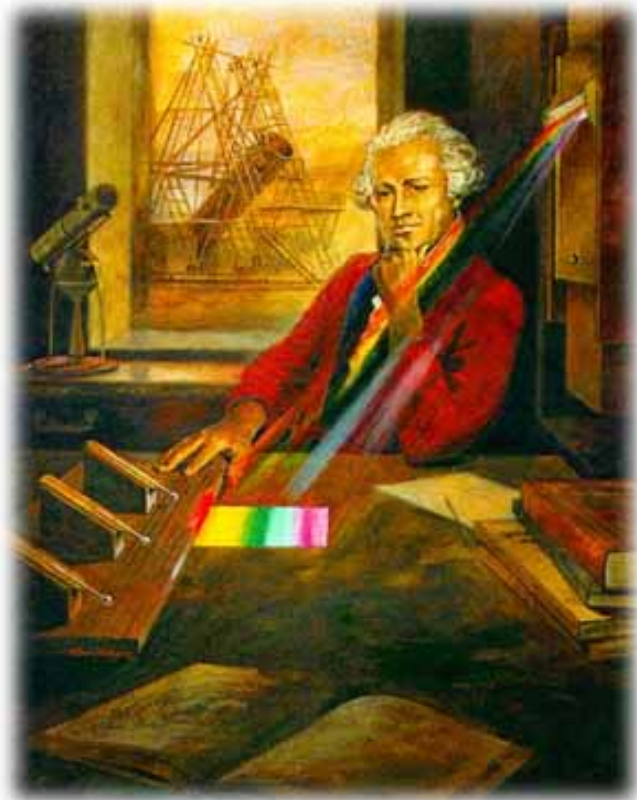
$\Lambda$  แทนเซตของเวกเตอร์ศักร์ ณ ตำแหน่งโนดที่ทราบค่า ได้แก่ โหนดที่ขอบของปัญหา

นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \Rightarrow [A][\phi] = [b] \quad (2.11)$$

#### 2.4 การตรวจวิเคราะห์สภาพความเป็นฉนวนด้วยภาพความร้อน

ในปี ค.ศ. 1800 วิลเลียม เฮอร์เชล นักดาราศาสตร์ของกษัตริย์อังกฤษ ได้ทำการทดลองการเป็นสื่อนำแสงโดยใช้ปริซึม (prism) กับแสงอาทิตย์ ซึ่งปริซึมจะแพร่กระจายรังสีของแสงอาทิตย์ออกมาเป็นสเปกตรัมจากสีม่วงถึงสีแดงดังรูปที่ 2.11



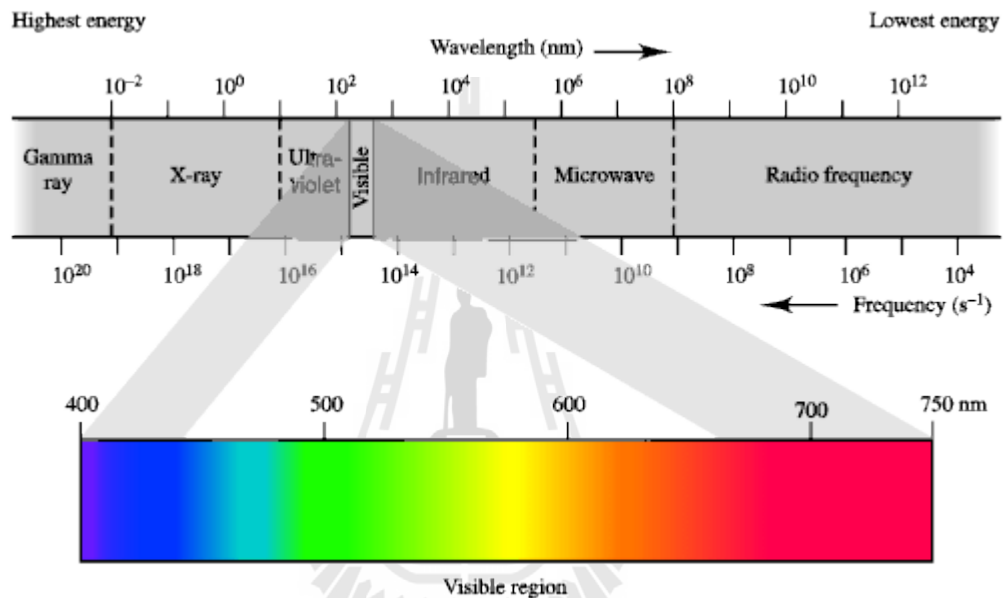
รูปที่ 2.11 การทดลองของวิลเลียม เฮอร์เชล

เฮอร์เชลได้นำเทอร์โมมิเตอร์มาวางในตำแหน่งที่เป็นสีม่วงแล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิไว้ จากนั้นเคลื่อนตำแหน่งของเทอร์โมมิเตอร์วัดจนหมดทุกสี โดยเริ่มจากสีน้ำเงินจนถึงสีแดงและสังเกตพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เขาได้ทดลองเคลื่อนเทอร์โมมิเตอร์ไปยังตำแหน่งที่ไกลออกไปจากสีแดง ในย่านที่ตามองเห็น และอุณหภูมิยังเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ดังนั้น เขาจึงหาพลังงานที่ไกล

ออกไปจากสีแดง พลังงานนี้คือ รังสีอินฟราเรด (infrared) และ เฮอร์ชเชลยังได้พิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความยาวคลื่น

#### 2.4.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดลองนี้คือการทดลองในขอบเขตที่จำกัดบางส่วนของทั้งหมดของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ อัลตราไวโอเล็ต แสงที่มนุษย์มองเห็น รังสีอินฟราเรด ไมโครเวฟ และ คลื่นวิทยุ รังสีทั้งหมดมีการรวมกันอยู่ 2 คุณสมบัติ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 The electromagnetic spectrum

จากรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ช่วงความยาวคลื่นจะมีรังสีต่าง ๆ ทั้งที่ตามเรามองเห็นและไม่สามารถมองเห็น โดยมีความยาวคลื่น (wavelength) เริ่มจาก 0.1 nm ถึง 10<sup>12</sup> nm และความถี่ที่ 10<sup>20</sup> s<sup>-1</sup> ลงไปจนถึง 10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup> แสงที่เราสามารถมองเห็น (visible light) มีช่วงความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ 400 – 750 nm โดยมีแสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง เรียงกันไป ช่วงของรังสีอินฟราเรด (Infrared) จะอยู่ถัดจากแสงสีแดงในช่วงที่ตามเรามองเห็น โดยมีความยาวคลื่น 750 – 150000 nm รังสีอินฟราเรดหรือแสงอินฟราเรดเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งการทดลองสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เราทราบว่ารังสีอินฟราเรดอยู่ วัตถุเกือบทุกชนิดบนโลกและบางอย่างอยู่นอกโลกจะมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา มักจะอยู่ในรูปของความร้อน ดังนั้นจึงมีการคิดเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับความร้อนโดยใช้อินฟราเรด และมีการคิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอินฟราเรดมาใช้ในการทำเครื่องมือวัดอุณหภูมิ กล้องถ่ายภาพความร้อน และอุปกรณ์อื่นในปัจจุบัน

#### 2.4.2 ทฤษฎีและหลักการของภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด

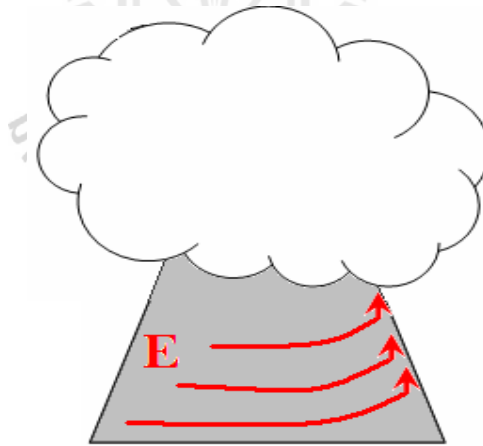
รูปแบบการถ่ายโอนความร้อน (mode of Heat Transfer) มีอยู่ 3 แบบ คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation) ดังนี้

- **การนำความร้อน** เป็นการทำให้ความร้อนมีการถ่ายโอนไปโดยการสัมผัส ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุที่เป็นของแข็ง ดังรูปที่ 2.13



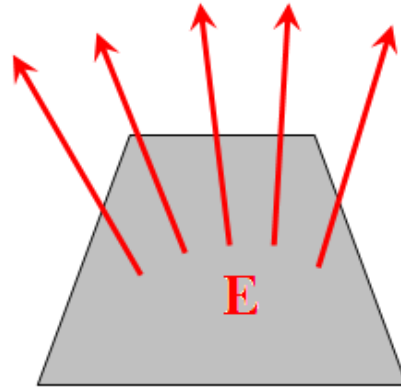
รูปที่ 2.13 ลักษณะการนำความร้อน

- **การพาความร้อน** เป็นการทำให้ความร้อนถ่ายโอนโดยการถูกพาไป ซึ่งจะมีตัวกลางพาความร้อนออกไปจะเกิดขึ้นกับก๊าซและวัสดุอื่น ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะการพาความร้อน

- **การแผ่รังสีความร้อน** เป็นการทำให้ความร้อนถ่ายโอนโดยที่เกิดจากวัตถุมีการแผ่รังสีออกมา โดยสิ่งที่แผ่ออกมาคือ รังสีอินฟราเรด ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะการแผ่รังสีความร้อน

ปรากฏการณ์การแผ่รังสีจะเป็นไปตามกฎการแผ่รังสีของพลังค์ (Planck's Radiation Law: maxima of radiation) ซึ่งเกิดจากการศึกษาการแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody) ดังสมการต่อไปนี้

$$M(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \text{ (W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}) \quad (2.12)$$

โดยที่

$\lambda$  = ความยาวคลื่น  $\mu\text{m}$

$C_1 = 2\pi^5 h^6 C^2 = 3.7428 \times 10^{-12} \text{ W cm}^2$

$C_2 = \frac{Ch}{k} = 1.4387 \text{ cm K}$

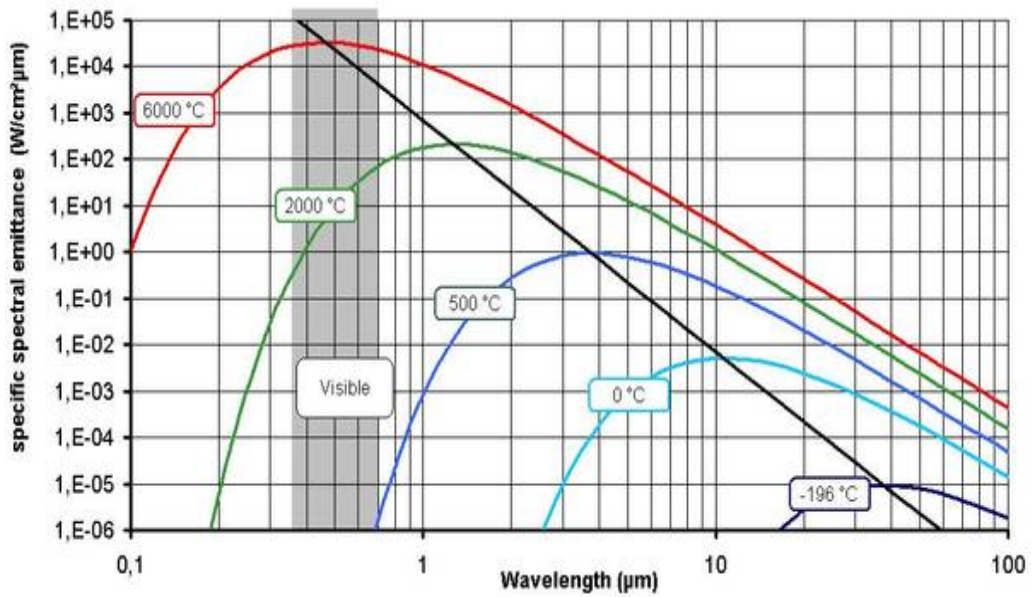
$T$  = absolute temperature,  $K$

$C$  = ความเร็วแสง (velocity of light) =  $3 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$

$h$  = Planck's constant =  $6.626 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$

$k$  = Boltzmann's constant =  $1.3807 \times 10^{-23} \text{ W s K}^{-1}$

จากรูปที่ 2.16 แสดงเส้นโค้งการแผ่รังสีของวัตถุดำ เป็นเส้นโค้งความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความยาวคลื่นกับอุณหภูมิ สังเกตที่เส้นที่วาดเชื่อมต่อที่จุดสูงของแต่ละกราฟเป็นเส้นตรงในการพล็อตแบบ log-log



รูปที่ 2.16 Blackbody radiation curves

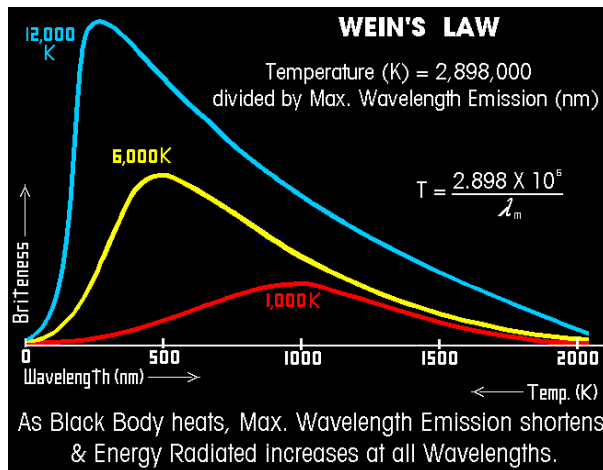
พลังก์นำเสนอว่าโฟตอนทั้งหมดเหมือนกับควมยาวคลื่นเรียงตัวกันเป็นพลังงานดังสมการต่อไปนี

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.13}$$

โดยที่

$\nu$  = frequency,  $H_z$

ต่อมา เวนส์ (Wein) ได้พัฒนา displacement's law โดยใช้การใชฟิสิกส์แบบดั้งเดิม ดังกราฟในรูปที่ 2.17 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.14



รูปที่ 2.17 Wein displacement's law

$$\lambda_{max}T = \text{ค่าคงที่} = 2897 \mu\text{m K} \quad (2.14)$$

โดยมีค่าอุณหภูมิและการแผ่รังสีสูงสุดที่พื้นผิวแบบต่าง ๆ ดังนี้

Surface	temperature	maximum of radiation
Frozen food	-18 °C	11.4 $\mu\text{m}$
Skin	32 °C	9.5 $\mu\text{m}$
Boiling water	100 °C	7.8 $\mu\text{m}$
Iron, red heat	600 °C	3.3 $\mu\text{m}$
Iron, white heat	1200 °C	2.0 $\mu\text{m}$
Surface of sun	6000 °C	0.6 $\mu\text{m}$

สิ่งที่ปล่อยพลังงานความร้อนออกมาจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิตั้ง Stefan-Boltzmann's Law ดังสมการนี้

$$Q = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \quad (2.15)$$

โดยที่

$Q$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายโอน

$\sigma$  = Stefan-Boltzmann Constant =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$\varepsilon$  = ความสามารถของวัตถุในการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา (emissivity)

$T$  = ค่าอุณหภูมิ (absolute temperature)

จากทฤษฎีและกฎต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้มีการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือวัดความร้อน ใช้กันในปัจจุบัน นอกจากนี้มีการยังพัฒนาเทคโนโลยีอินฟราเรดเพื่องานอื่น ๆ เช่น ทาง การแพทย์ หรือการทหาร เป็นต้น พารามิเตอร์ของการแผ่รังสีของวัตถุชนิดต่าง ๆ ได้มีการทดสอบ และสรุปไว้เป็นคุณสมบัติของสสารเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนี้

Emissivity $\varepsilon$	ความสามารถของวัตถุในการแผ่รังสีอินฟราเรดออกจากพื้นผิว
Absorption $\alpha$	ความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดออก
Transmissivity $\tau$	พลังงานของรังสีอินฟราเรดในการทะลุผ่าน
Reflectivity $\rho$	ผลกระทบจากรังสีอินฟราเรด

คุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการทั่วไปของการแผ่รังสีดังสมการที่ 2.16

$$\varepsilon_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.16)$$

## 2.5 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด (IR camera)

กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดเป็นเครื่องวัดชนิดหนึ่งซึ่งใช้วัดความร้อนอุณหภูมิจากวัตถุต่างๆ ซึ่งโดยวัตถุเกือบทุกชิ้นจะมีการแผ่รังสีอินฟราเรด นอกจากกล้องถ่ายภาพยังมีเครื่องมือวัดอื่น ๆ ที่ใช้อินฟราเรดเป็นตัวตรวจจับหรือเป็นสื่อ นำ มีหลายชนิดดังนี้

### 2.5.1 ชนิดปืนยิงเฉพาะจุด (spot measuring system)

ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิเป็นจุดตามต้องการ โดยใช้ตัวตรวจจับ sensor เพียงตัวเดียวเท่านั้น การแสดงผลจะออกมาในรูปแบบของตัวเลขแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปปืนอินฟราเรดวัดอุณหภูมิ

### 2.5.2 ชนิดกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด (Thermal imaging Systems)

ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิหรือไม่ต้องการวัดอุณหภูมิก็ได้ มีหลายแบบดังนี้

- Thermal imaging Systems: Scanner มีลักษณะคล้ายกับแบบ spot measuring system การใช้งานนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะมีตัวตรวจจับเพียง 1 ตัว ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 Thermal imaging Systems: Scanner



- Thermal imaging Systems: FPA for industrial use ใช้ในการถ่ายภาพวัตถุเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ บางรุ่นจะมีรูปแบบการทำงานที่หลากหลาย เช่น สามารถถ่ายภาพเคลื่อนไหวได้ ปรับความคมชัดโดยอัตโนมัติและรูปแบบอื่น ๆ การใช้งานนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมหรืองานไฟฟ้า โดยจะมีตัวตรวจจับหลายตัวมาต่อเรียงกัน จะแสดงผลออกมาเป็นภาพพร้อมกับค่าอุณหภูมิทุกจุดของตัวตรวจจับ จะใช้คู่กับ software เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และทำรายงาน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดแบบต่าง ๆ

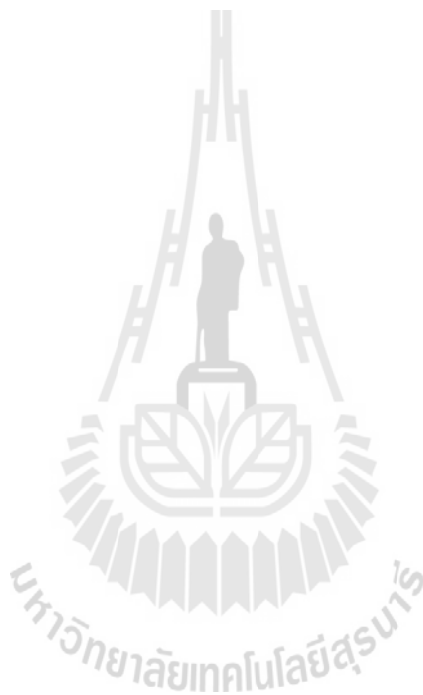
- Thermal imaging Systems: for Military/Surveillance ใช้ถ่ายภาพเคลื่อนไหว โดยไม่ต้องการค่าอุณหภูมิ การใช้งานมักใช้ในงานรักษาความปลอดภัยและงานทางทหาร ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กล้องสำหรับ Military / Surveillance

## 2.6 สรุป

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ 1) การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 2) การวิเคราะห์ความร้อนจากภาพถ่ายอินฟราเรด เพื่อนำรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุมาดำเนินการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งที่มีความเสี่ยงต่อการบกพร่องของฉนวน ซึ่งจะได้นำเสนอผลการศึกษาในบทที่ 3 ต่อไป



## บทที่ 3

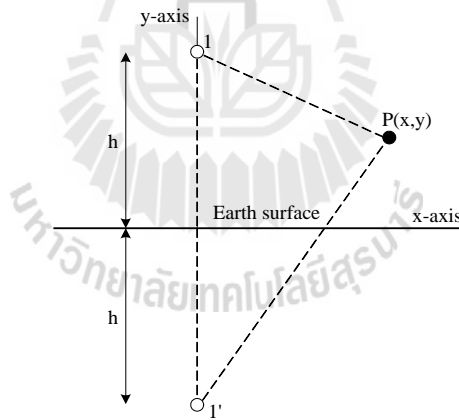
### การจำลองผลและการทดสอบ

#### 3.1 กล่าวนำ

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิของฉนวนดำเนินการผ่านการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในฉนวน การศึกษาจะนำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส และการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในฉนวนลูกถ้วย (insulator) นอกจากนี้ได้เพิ่มเติมการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนเพื่อตรวจสอบความเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด

#### 3.2 การจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของสายส่ง

พิจารณาระบบตัวนำเฟสเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่มีจุด 1 และ 1' เป็นตัวนำ และตัวนำเสมือนที่มีศักย์ไฟฟ้า  $V$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ระบบสายตัวนำเฟสเดียว

จากสมการแมกเวลล์ กรณีประจุเชิงเส้นวางใกล้ตัวนำค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุด  $P(x, y)$  ใด ๆ สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 3.1

$$V_P = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{\sqrt{x^2 + (h+y)^2}}{\sqrt{x^2 + (h-y)^2}} \right) \quad (3.1)$$

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวนำจะได้

$$V_{int} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_P$  และ  $V_S$  ได้ดังสมการที่ 3.3

$$V_P = \frac{V}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + (h+y)^2}}{\sqrt{x^2 + (h-y)^2}}\right) \quad (3.3)$$

จาก  $E = -\nabla V$  สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าจากสมการที่ 3.3 โดยจะคิดเฉพาะขนาดของค่าสนามไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขค่าขอบให้กับตัวนำสายส่งใน FDM ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 3.4

$$|E| = \sqrt{\left|\frac{\partial V_P}{\partial x}\right|^2 + \left|\frac{\partial V_P}{\partial y}\right|^2} \quad (3.4)$$

โดยที่  $r$  คือ รัศมีตัวนำในสายส่ง (m)

$h$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในสายส่งกับพื้นดิน (m)

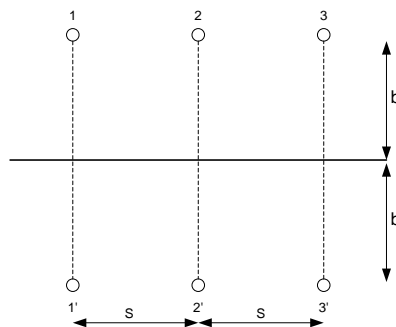
$V_{int}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าภายในตัวนำ (V)

$\lambda$  คือ ความหนาแน่นประจุเชิงเส้น

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของที่ว่าง

กรณีของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแบบการจัดวางตัวนำ ในที่นี้จะนำเสนอการจัดวางตัวนำ 3 รูปแบบ ดังนี้

- แบบที่ 1 การจัดวางตัวนำในแนวระดับ



รูปที่ 3.2 การจัดวางตัวนำในแนวระดับ

จากรูปกำหนดให้ค่า  $b_1 = b_2 = b_3 = b$

สำหรับในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าจะอาศัยสมการที่ 3.5 3.6 และ 3.7 ในการคำนวณตามลำดับ

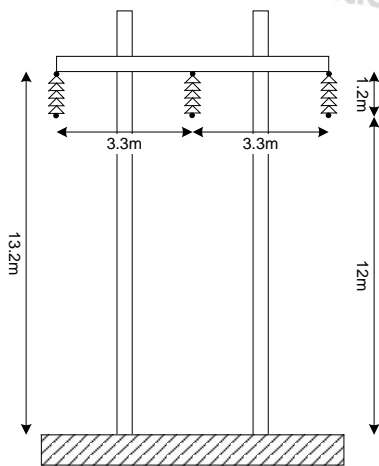
$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{U_1}{\sqrt{3}(n_{11} - n_{12})} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{x+S}{(x+S)^2 + (b_1 + y)^2} - \frac{x+S}{(x+S)^2 + (b_1 - y)^2} \right] \\ & + (0.5 + j0.866) \left[ \frac{x}{x^2 + (b_2 - y)^2} - \frac{x}{x^2 + (b_2 + y)^2} \right] \\ & + (0.5 - j0.866) \left[ \frac{x-S}{(x-S)^2 + (b_3 - y)^2} - \frac{x-S}{(x-S)^2 + (b_3 + y)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{U_1}{\sqrt{3}(n_{11} - n_{12})} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{b_1 + y}{(x+S)^2 + (b_1 + y)^2} - \frac{b_1 - y}{(x+S)^2 + (b_1 - y)^2} \right] \\ & - (0.5 + j0.866) \left[ \frac{b_2 - y}{x^2 + (b_2 - y)^2} - \frac{b_2 + y}{x^2 + (b_2 + y)^2} \right] \\ & - (0.5 - j0.866) \left[ \frac{b_3 - y}{(x-S)^2 + (b_3 - y)^2} - \frac{b_3 + y}{(x-S)^2 + (b_3 + y)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

$$E = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2} \quad (3.7)$$

ผลการทดสอบ

1. ระบบสายส่ง 69 kV H-frame tower



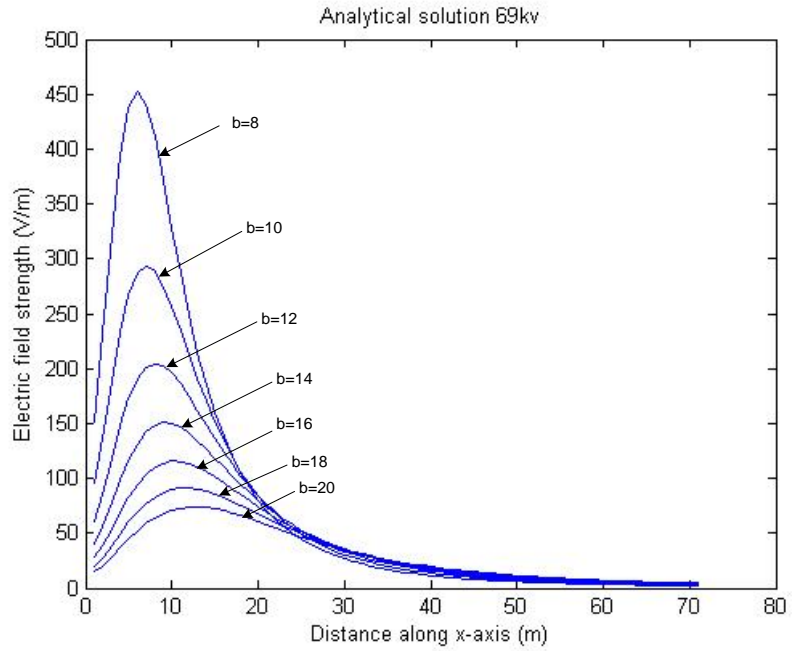
จากรูปที่ 3.3 กำหนดให้

$$S = 3.3 \text{ m}$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = 12 \text{ m}$$

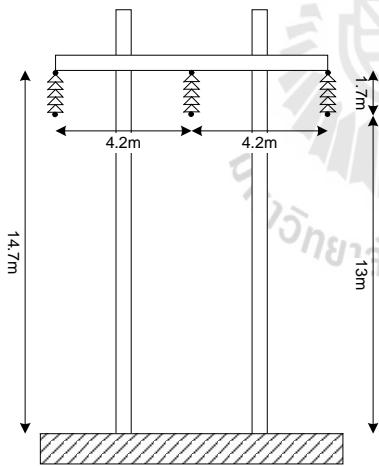
สำหรับการคำนวณจะคำนวณในระดับความสูง 1.7 เมตร ณ การเปลี่ยนแปลงค่า  $b$  ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.3 เสาไฟฟ้ารูปตัว H ในระบบ 69 kV



รูปที่ 3.4 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 69 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ

2. ระบบสายส่ง 115 kV H-frame tower



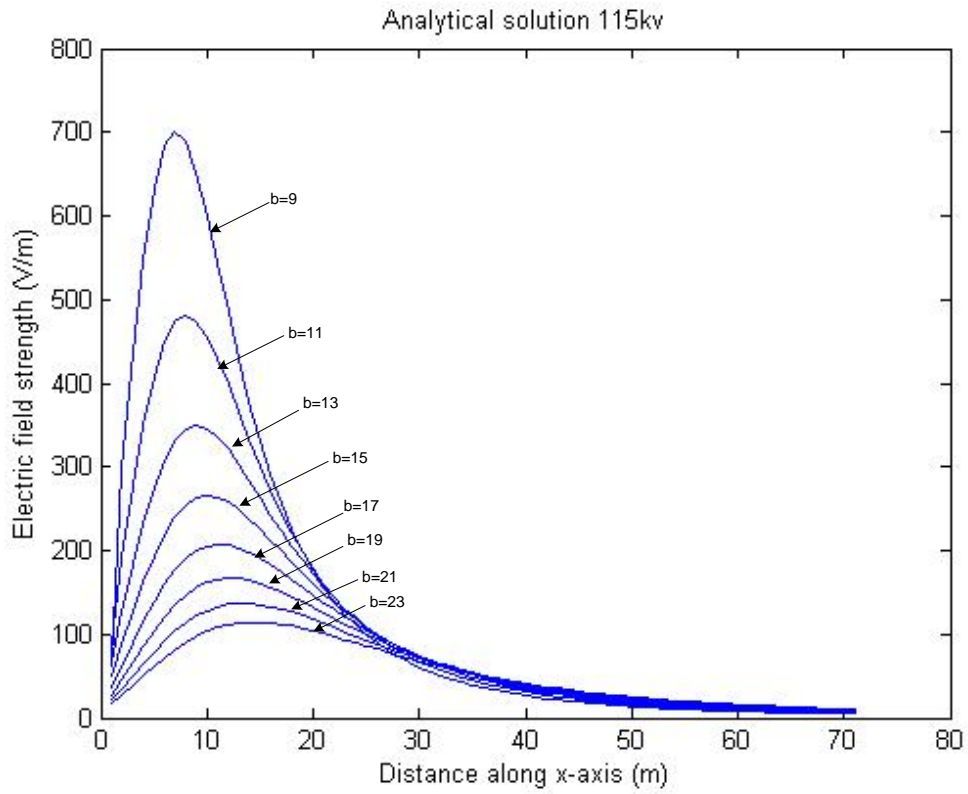
จากรูปที่ 3.5 จะได้

$$S = 4.2 \text{ m}$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = 13 \text{ m}$$

สำหรับการคำนวณจะคำนวณในระดับความสูง 1.7 เมตร ณ การเปลี่ยนแปลงค่า b ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.5 เสาไฟฟ้ารูปตัว H ในระบบ 115 kV



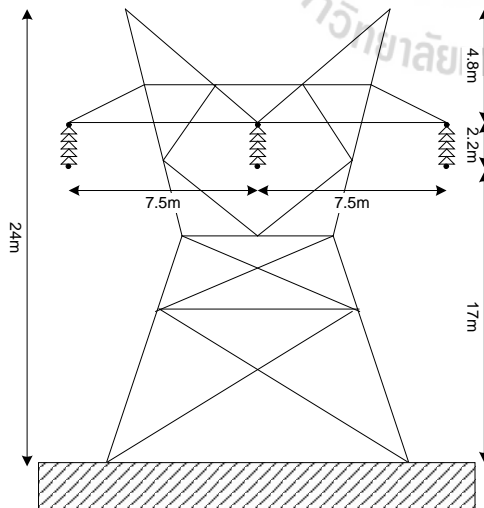
รูปที่ 3.6 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 115 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ

3. ระบบสายส่ง 230 kV

จากรูปที่ 3.7 จะได้

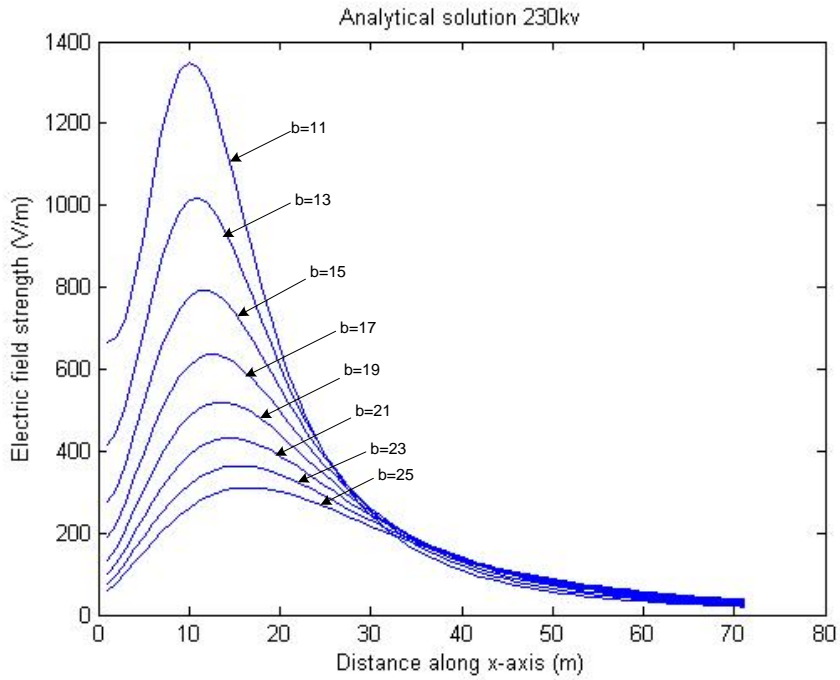
$$S = 7.5 \text{ m}$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = 17 \text{ m}$$



สำหรับการคำนวณจะคำนวณในระดับความสูง 1.7 เมตร ณ การเปลี่ยนแปลงค่า b ต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

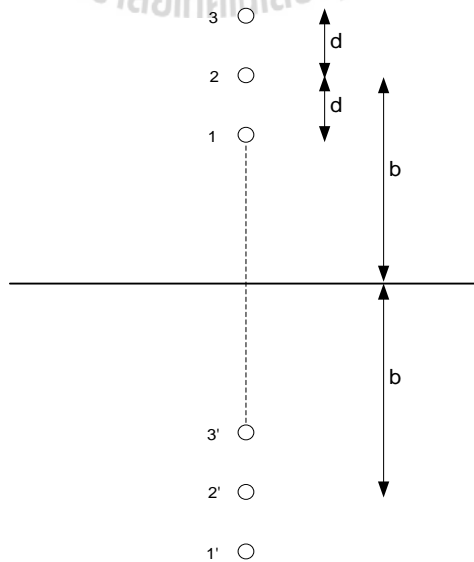
รูปที่ 3.7 เสาไฟฟ้าในระบบ 230 kV



รูปที่ 3.8 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 230 kV ที่ใช้การจัดวางตัวนำในแนวระดับ

• แบบที่ 2 การจัดวางตัวนำในแนวตั้ง

จากรูปที่ 3.9 จะได้ค่า  $b_1 = b-d$ ,  $b_2 = b$ ,  $b_3 = b+d$  และ  $S = 0$  และในกรณีที่  $S = 0$  จะทำให้ค่าของ  $n_{12}$  มีค่าเข้าใกล้อนันต์ ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอบ ๆ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอการประมาณค่าของ  $n_{12}$  ได้ 3 รูปแบบ คือ



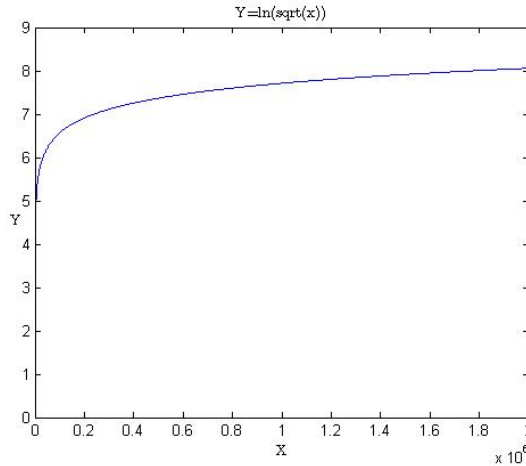
รูปที่ 3.9 การจัดวางตัวนำในแนวตั้ง



แบบที่ 1: ประมาณค่าโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$n_{12} = \ln \sqrt{1 + \frac{4b^2}{S^2}} \quad (3.8)$$

ถ้ากำหนดให้  $n_{12}$  ประมาณเป็นฟังก์ชัน  $Y = \ln \sqrt{X}$  จะสามารถแสดงค่าของฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผลการประมาณค่าฟังก์ชัน  $Y = \ln \sqrt{X}$

จากรูปที่ 3.10 เมื่อค่าของ  $x$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเข้าใกล้อนันต์จะได้ว่าค่าของ  $Y$  มีค่าประมาณ 8 ดังนั้นจะได้ค่า  $n_{12} = 8$  และนำค่าดังกล่าวไปคำนวณ

แบบที่ 2: ประมาณ  $n_{12} = 0$  โดยกำหนดค่าฟังก์ชันของสมการที่ 8.18 ให้มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

แบบที่ 3: กำหนดให้  $s$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ( $s = 0.01$  m) เพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณหาค่า  $n_{12}$  ไม่ได้ เนื่องจาก  $s = 0$

จากการประมาณค่าทั้ง 3 แบบ จะทำการทดสอบในระบบสายส่งแรงสูงขนาด 115 kV ดังรูปที่ 3.11

ผลการทดสอบ

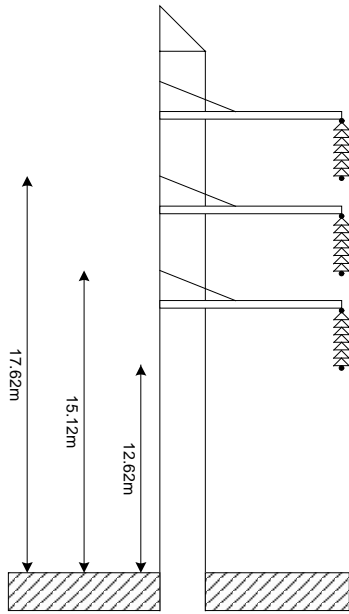
จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้

$$S = 0 \text{ m}$$

$$b_1 = 12.62 \text{ m}$$

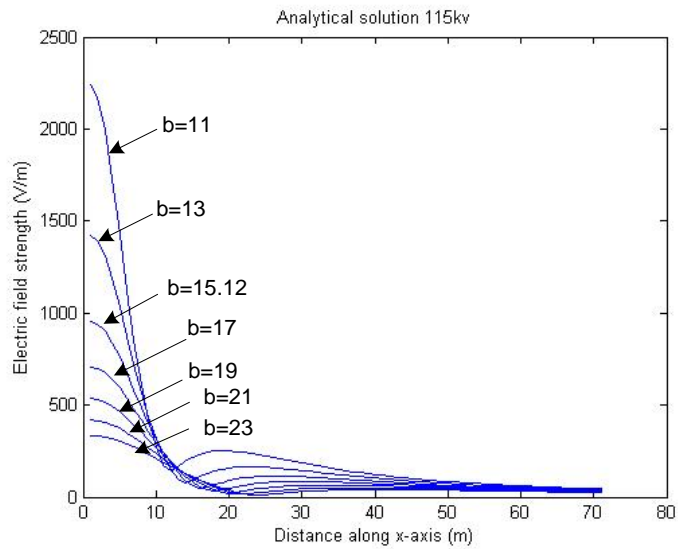
$$b_2 = 15.12 \text{ m}$$

$$b_3 = 17.62 \text{ m}$$

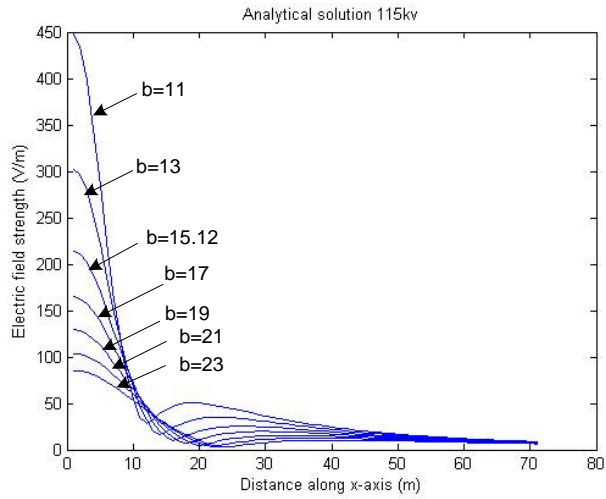


สำหรับการคำนวณจะคำนวณในระดับความสูง 1.7 เมตร ณ การเปลี่ยนแปลงค่า  $b$  ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงการประมาณค่า  $n_{12}$  ตามแบบที่ 1 แบบที่ 2 และ แบบที่ 3 ได้ดังรูปที่ 3.12 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

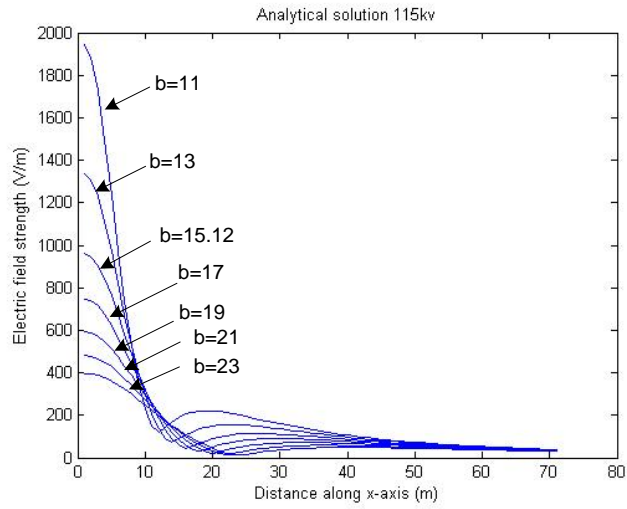
รูปที่ 3.11 ระบบสายส่ง 115 kV จัดเรียงตัวนำในแนวดิ่ง



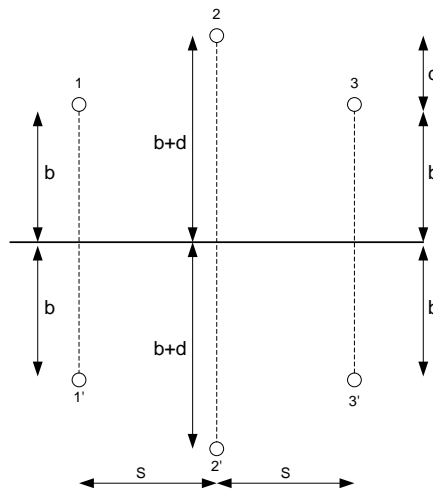
รูปที่ 3.12 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 1



รูปที่ 3.13 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 2



รูปที่ 3.14 ผลการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าแบบที่ 3



รูปที่ 3.15 การจัดวางตัวนำแบบสมมาตร

● แบบที่ 3 การจัดวางตัวนำแบบสมมาตร

จากรูปที่ 3.15 กำหนดให้ค่า  $b_1 = b_3$  และ  $b_2 = b + d$  สำหรับระบบที่ใช้ทดสอบไม่ได้มีรูปแบบจำลองเหมือนกับรูปที่ 3.4 แต่จากรูปที่ 3.16 สามารถกำหนดให้  $b_1 = b - d$ ,  $b_2 = b$ ,  $b_3 = b + d$

ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 3.16 กำหนดให้

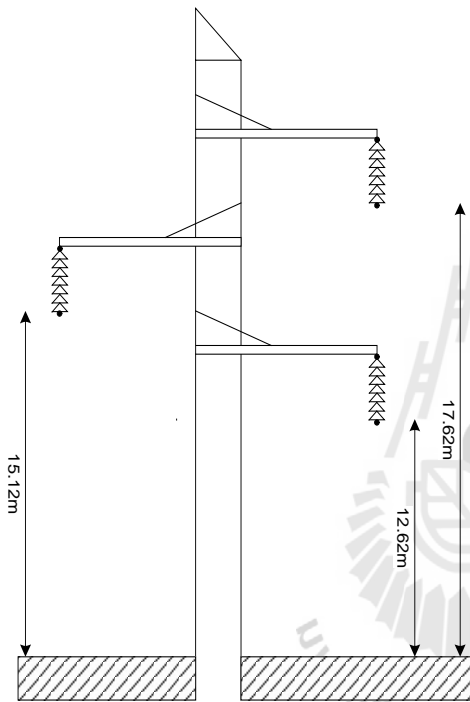
$$S = 0 \text{ m}$$

$$b_1 = 12.62 \text{ m}$$

$$b_2 = 15.12 \text{ m}$$

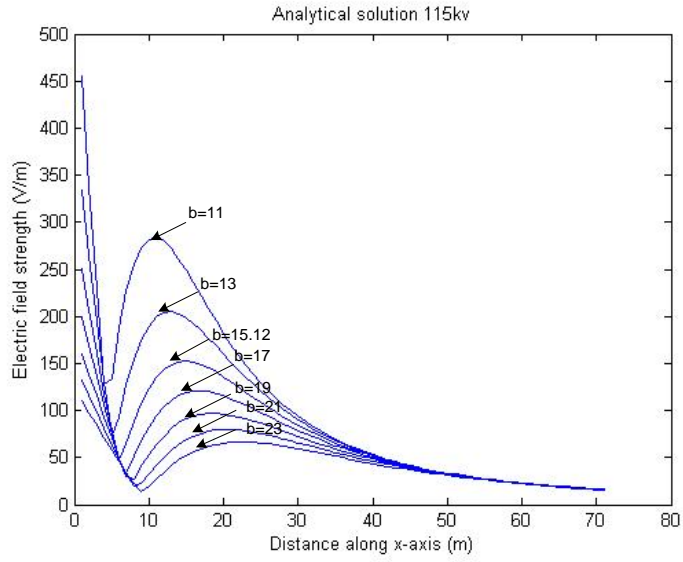
$$b_3 = 17.62 \text{ m}$$

$$S = 3 \text{ m}$$



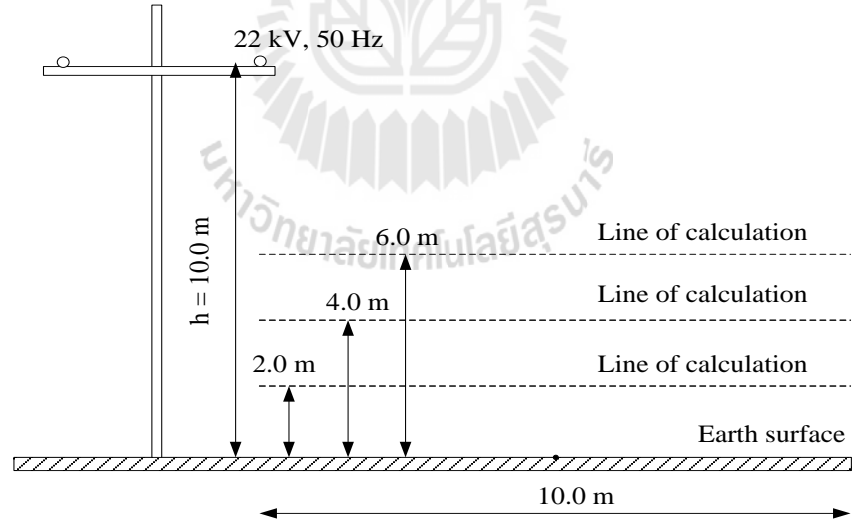
สำหรับการคำนวณจะคำนวณในระดับความสูง 1.7 เมตร ณ การเปลี่ยนแปลงค่า  $b$  ต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.16 ระบบสายส่ง 115 kV จัดเรียงตัวนำแบบสมมาตร

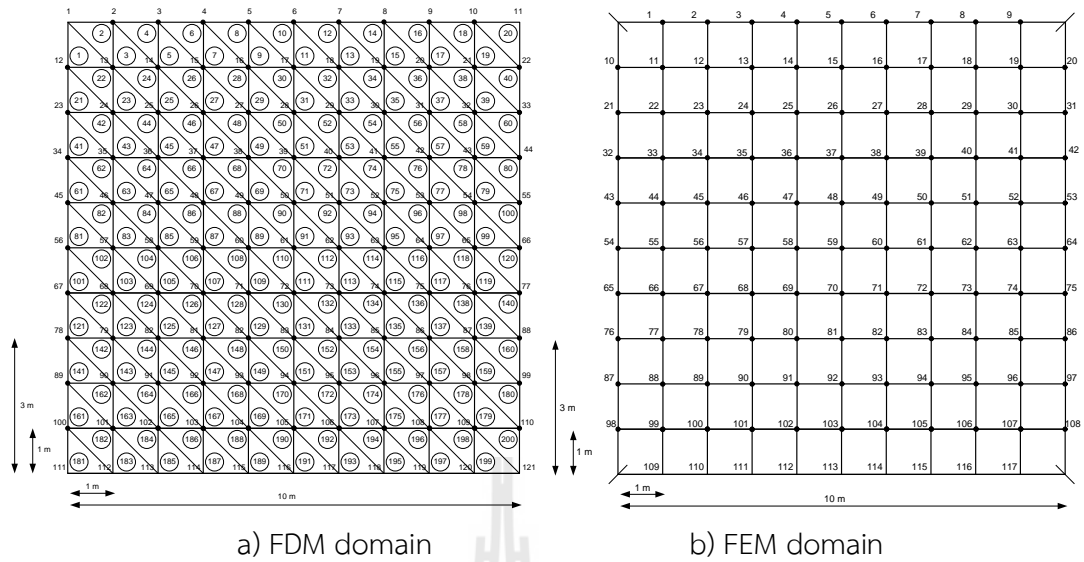


รูปที่ 3.17 สนามไฟฟ้าในระบบสายส่ง 115 kV ที่มีการจัดวางตัวนำแบบสมมาตร

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในที่นี้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขทั้ง FDM และ FEM และวิธีเชิงวิเคราะห์กับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า 22 kV ดังแสดงในรูปที่ 3.18

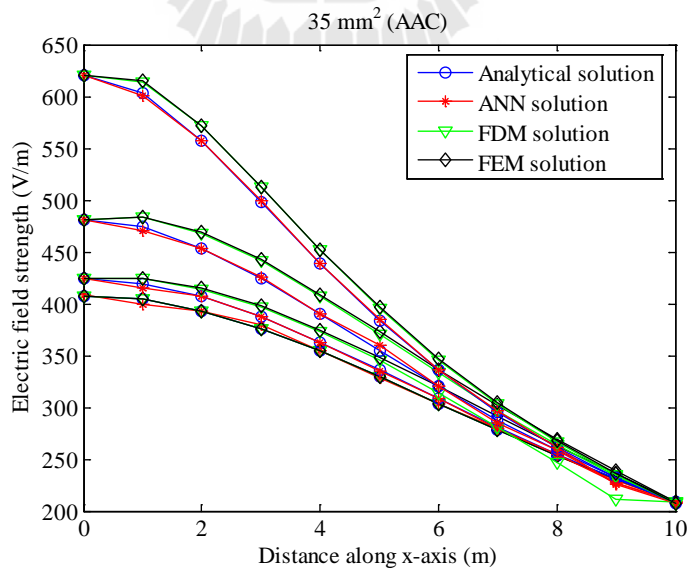


รูปที่ 3.18 ระบบทดสอบ 22 kV



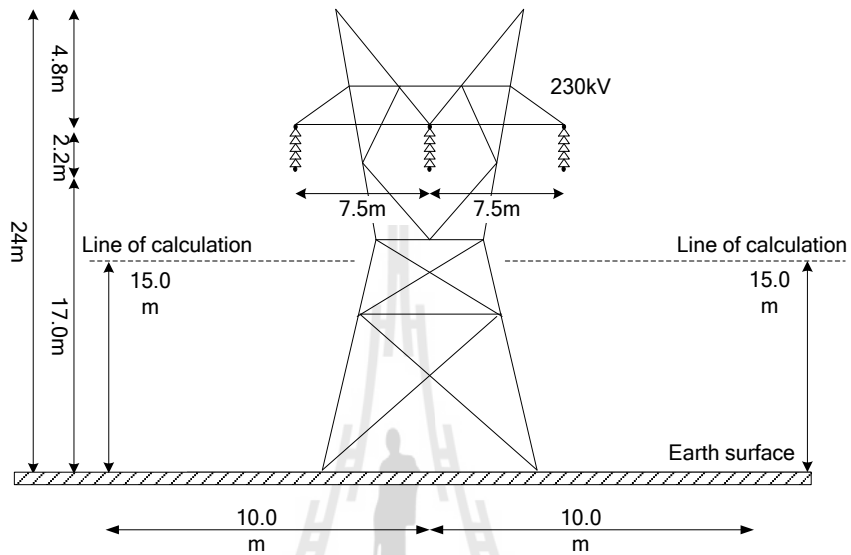
รูปที่ 3.19 การแบ่งกริดของระบบทดสอบ 22 kV

โดยการแบ่งกริดเพื่อใช้คำนวณด้วยวิธี FDM และ FEM ดังรูปที่ 3.19 ทำให้สามารถนำวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขดังกล่าวมาใช้ประมาณค่าสนามไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ ในผลการวิจัยได้นำวิธีการประมาณค่าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network: ANN) อีกด้วย แต่เนื่องจากวิธีการนี้เป็นรูปแบบการคำนวณที่นอกเหนือขอบเขตที่นำเสนอ ดังนั้นในที่นี้จะนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบโดยไม่กล่าวถึงรายละเอียดการคำนวณ ดังการเปรียบเทียบในรูปที่ 3.20

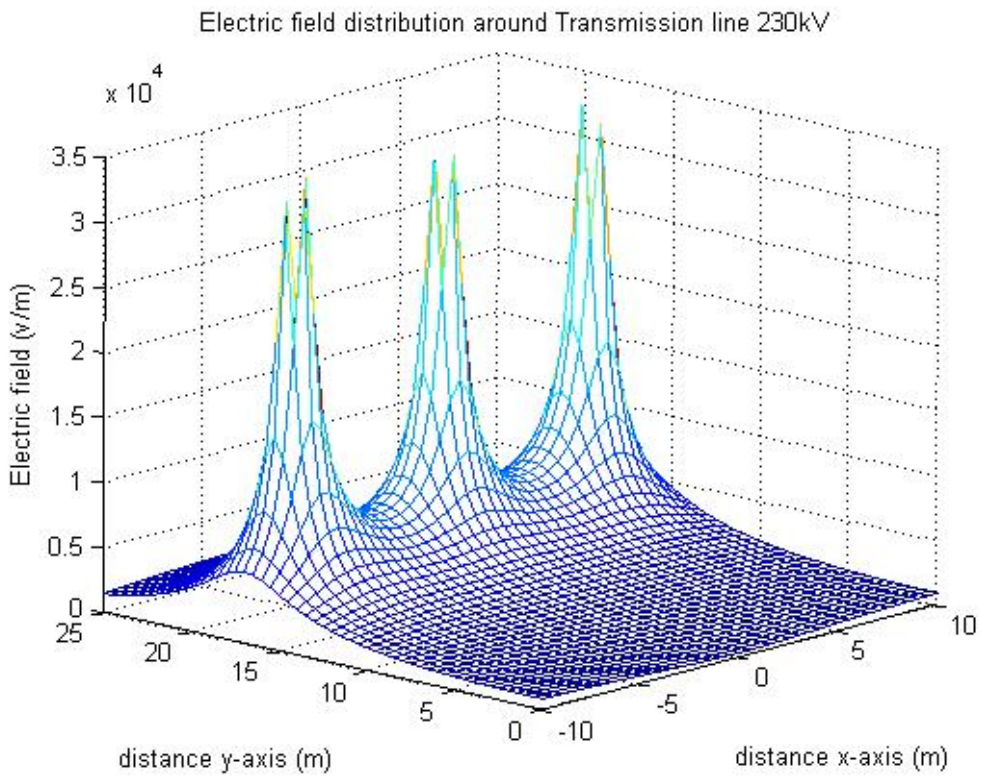


รูปที่ 3.20 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าโดยใช้การคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ กัน

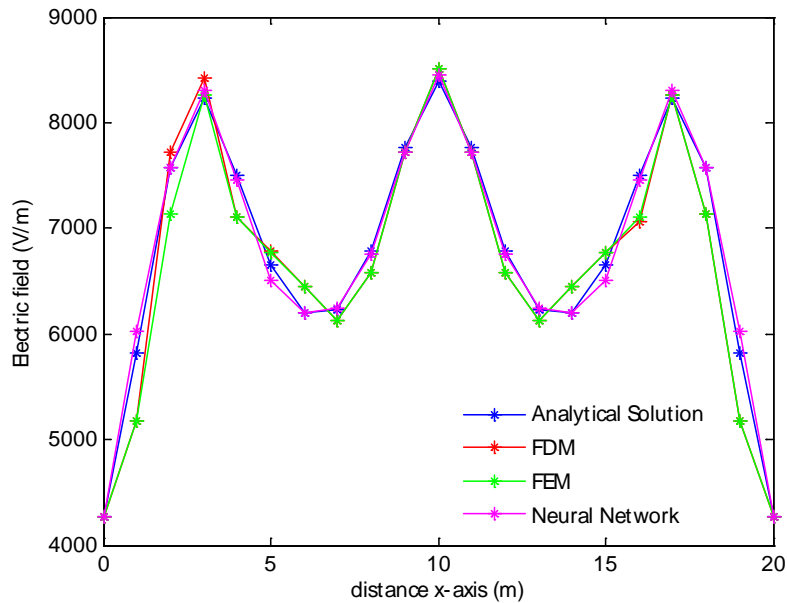
เมื่อพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงขึ้น ได้แก่ 230 kV ดังแสดงในรูปที่ 3.21 จะพบว่า การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีลักษณะดังรูปที่ 3.22 และผลการเปรียบเทียบการคำนวณ (นำเสนอในรูปที่ 3.7 และ 3.8) แสดงไว้ในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.21 ระบบทดสอบ 230 kV



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายส่ง 230 kV



รูปที่ 3.23 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าโดยใช้การคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ กัน

### 3.3 การจำลองผลสนามไฟฟ้าของฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูง

ลูกถ้วยที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังมีหลายชนิด ทำจากวัสดุเซรามิกหรือพอลิเมอร์ แต่ละชนิดมีหน้าที่หลักที่คล้ายกัน คือ ทำหน้าที่รองรับการเชื่อมต่อและจับยึดสายไฟหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ให้อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง ลูกถ้วยเป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์ต่าง ๆ หลายชนิด ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะชนิดที่ติดตั้งเพื่อรองรับสายพาดอากาศในระบบส่งจ่ายหรือระบบจำหน่าย โดยมีใช้กันแพร่หลาย 2 ชนิด ได้แก่

- **ลูกถ้วยแขวน (suspension insulators)** มีลักษณะตามรูปที่ 3.24 นำมาติดตั้งโดยการแขวนต่อกันเป็นพวง (insulator string) มีจำนวนตามขนาดของแรงดันใช้งาน นิยมใช้กับระบบแรงดันตั้งแต่ 69 kV เป็นต้นไป ในระบบจำหน่าย 11 – 33 kV จะใช้ติดตั้งเฉพาะที่ เช่น ที่เสาต้นแรกหรือต้นสุดท้ายของสายส่ง (dead-end) เท่านั้น
- **ลูกถ้วยแท่ง (post insulators)** มี 2 ประเภท ได้แก่ ลูกถ้วยแท่งทางนอน (horizontal line post insulators) นิยมใช้กับระบบสายส่ง 69 kV ขึ้นไป และลูกถ้วยแท่งทางตั้ง (vertical line post insulators) สำหรับลูกถ้วยแท่งทางตั้งนี้ นิยมใช้ในประเทศไทยด้วยกันทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ ลูกถ้วยแท่ง (line post insulators) ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (pin-post insulators) และลูกถ้วยก้านตรง (pin insulators) นิยมใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง 22 – 33 kV พิจารณาได้จากรูปที่ 3.25 – 3.28





รูปที่ 3.24 ลูกถ้วยแขวน



รูปที่ 3.25 ลูกถ้วยแท่ง



รูปที่ 3.26 การใช้งานลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยแท่ง

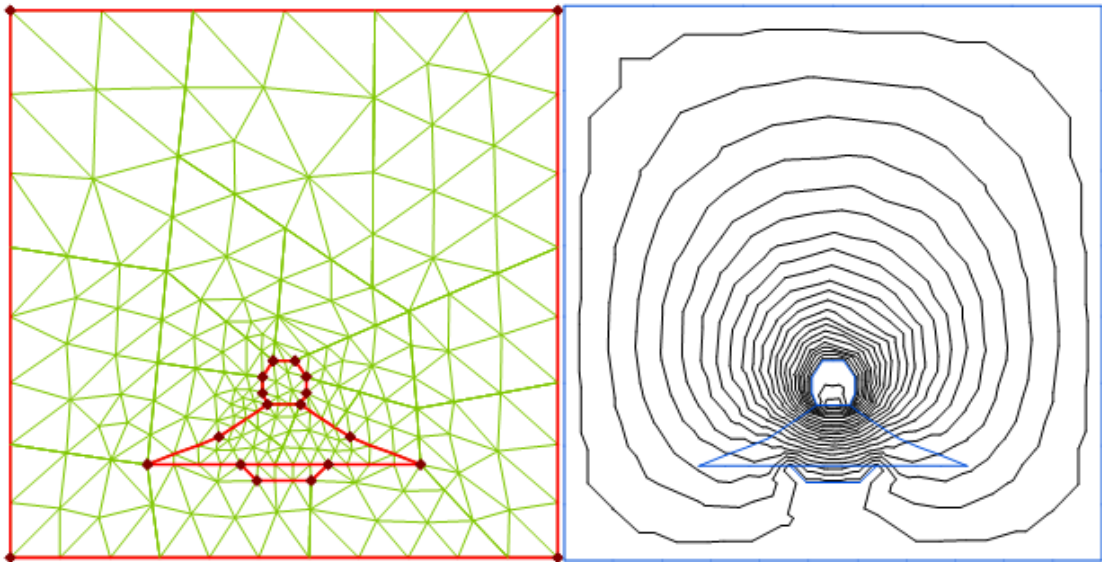


รูปที่ 3.27 การใช้ลูกถ้วยแขวนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

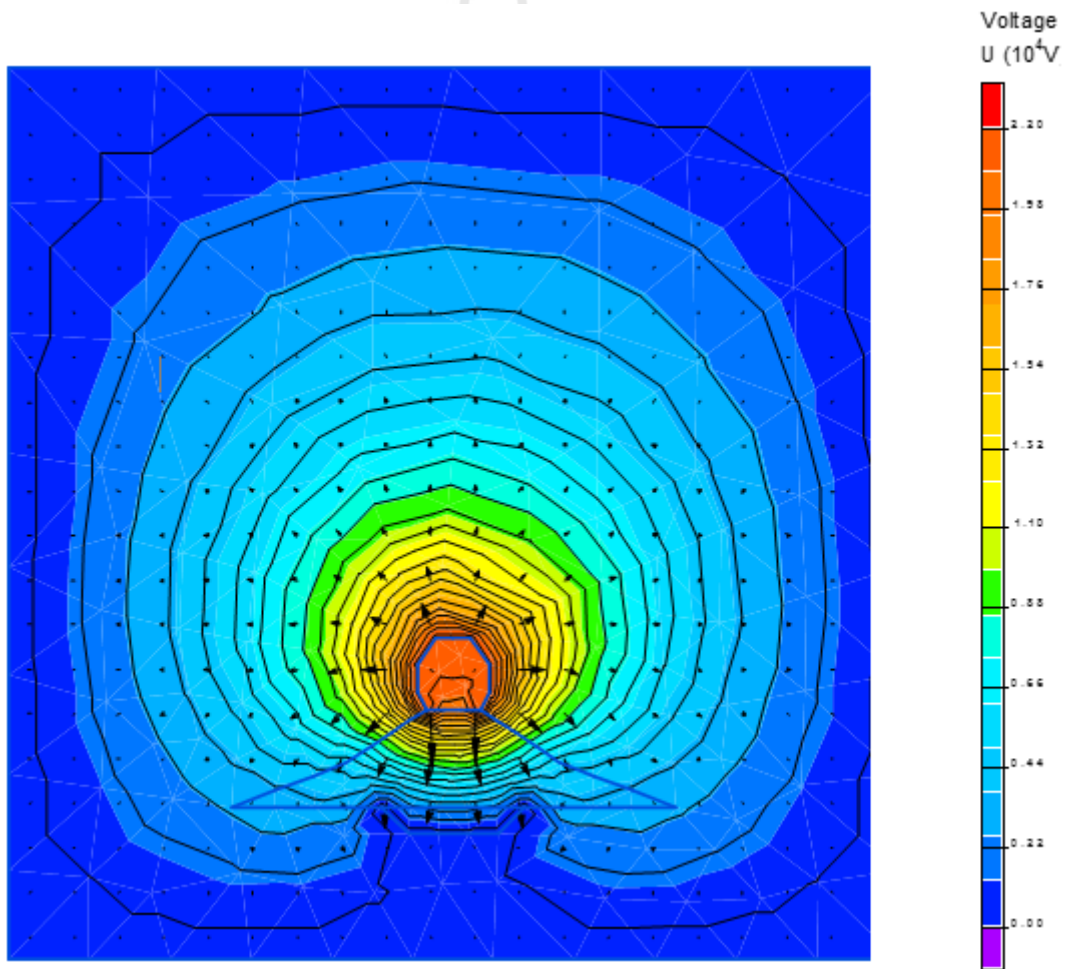


รูปที่ 3.28 การใช้ลูกถ้วยแท่งในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

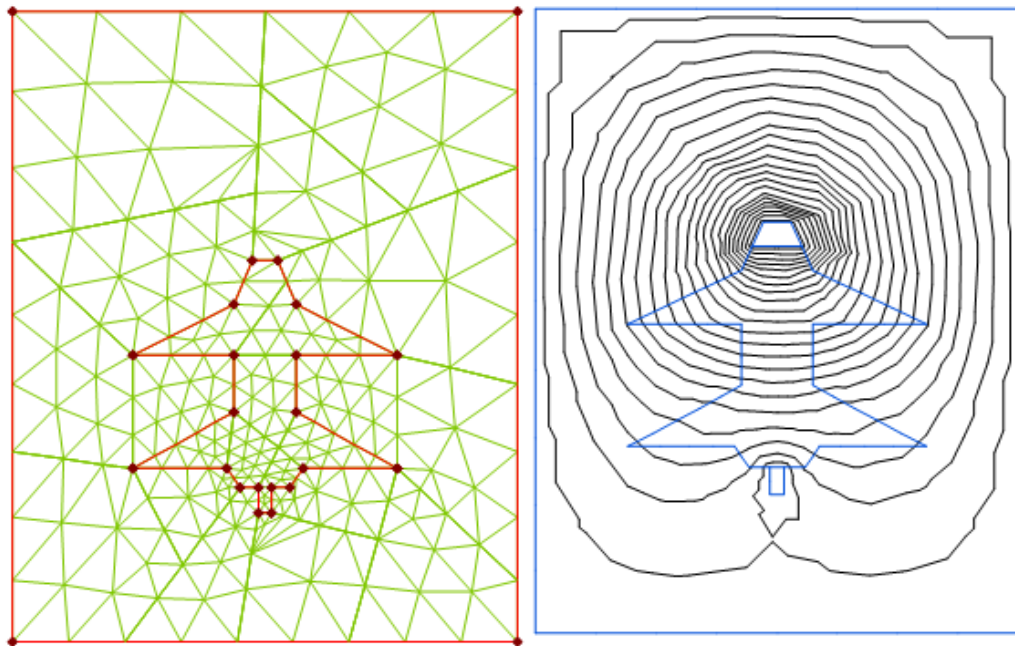
การจำลองผลสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้ลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว (glass suspension insulator) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.29 – 3.30 ลูกถ้วยแขวนคู่คอตตัน (solid core suspension insulator) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.31 – 3.32 ลูกถ้วยแท่ง (line-post insulator) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.33 – 3.34 ลูกถ้วยหลัก (post insulator) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.35 – 3.36 ลูกถ้วยแท่งก้านตรง (pin-post insulator) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.37 – 3.38



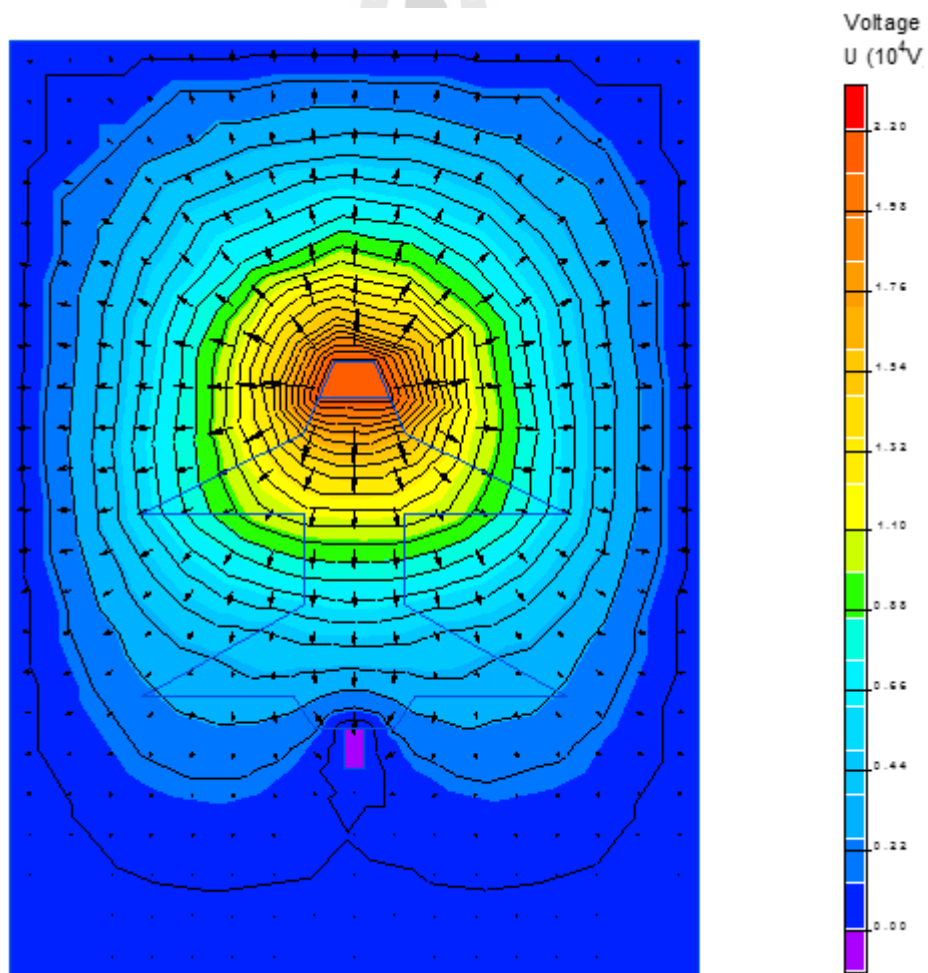
รูปที่ 3.29 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว



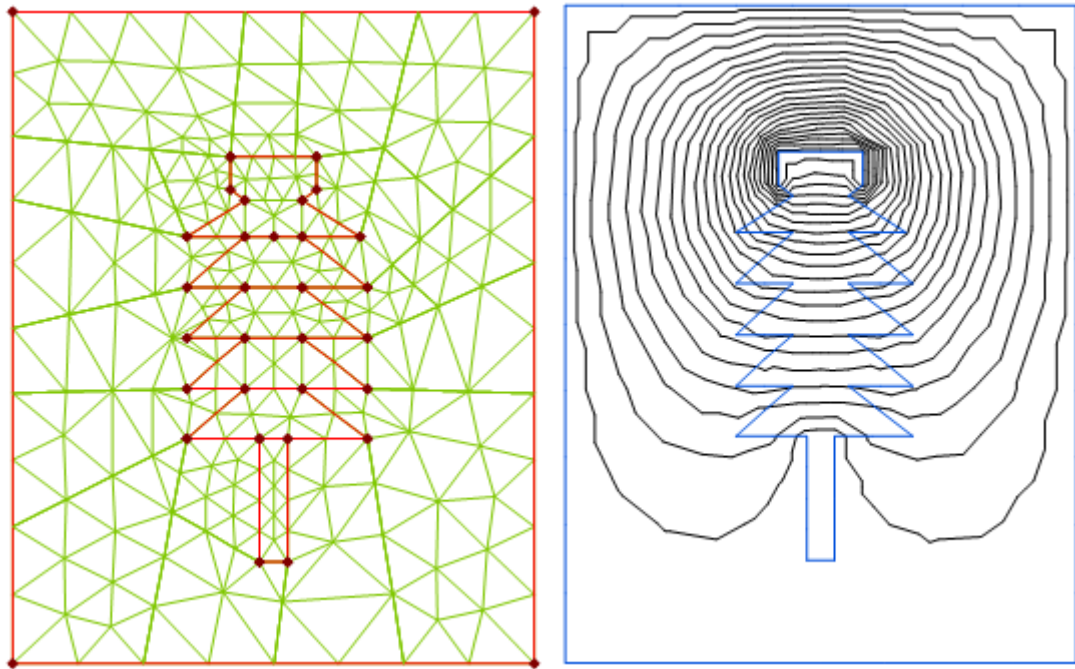
รูปที่ 3.30 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว



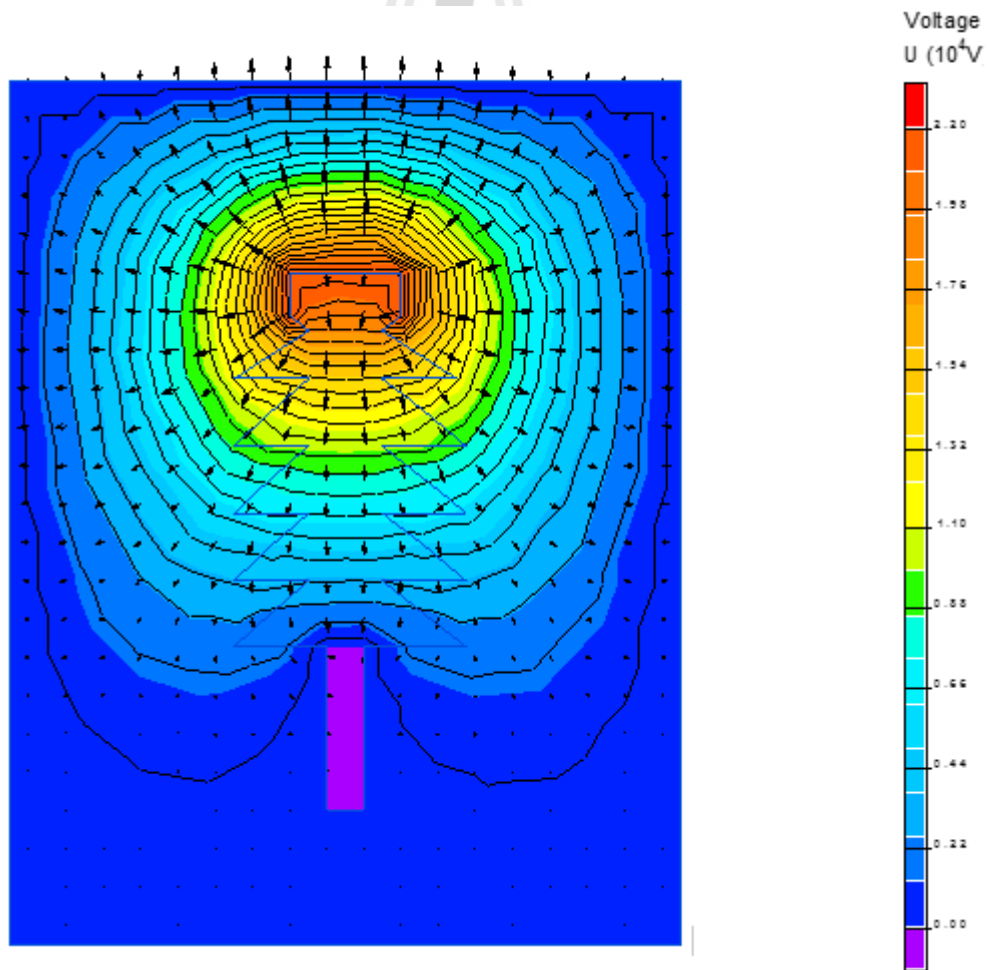
รูปที่ 3.31 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน



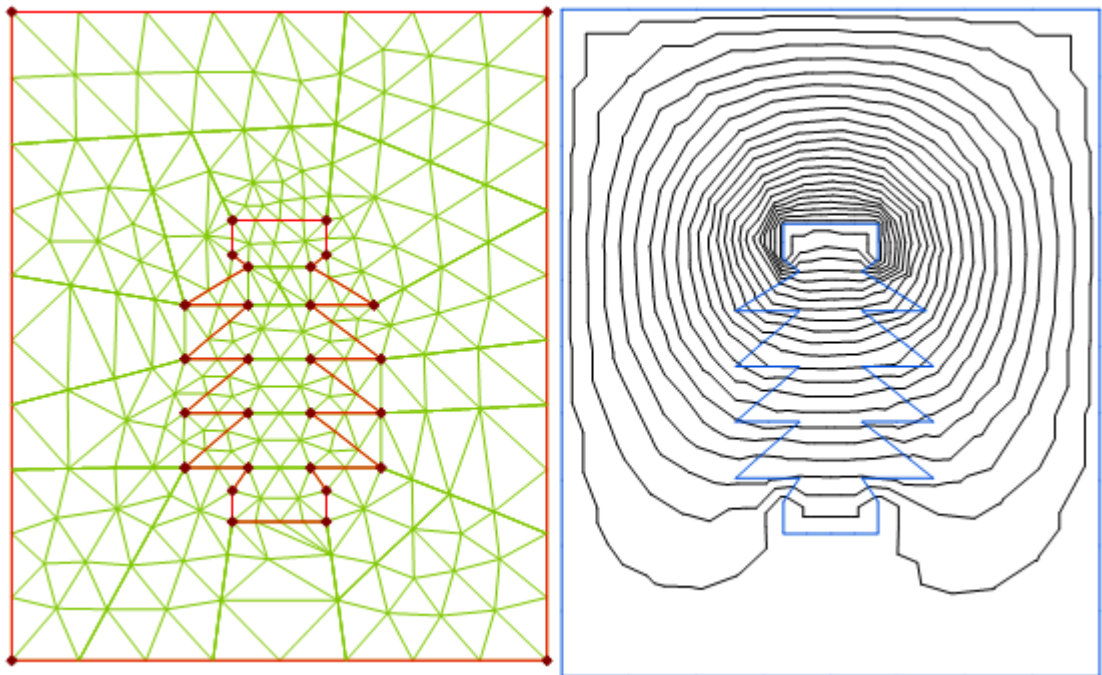
รูปที่ 3.32 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน



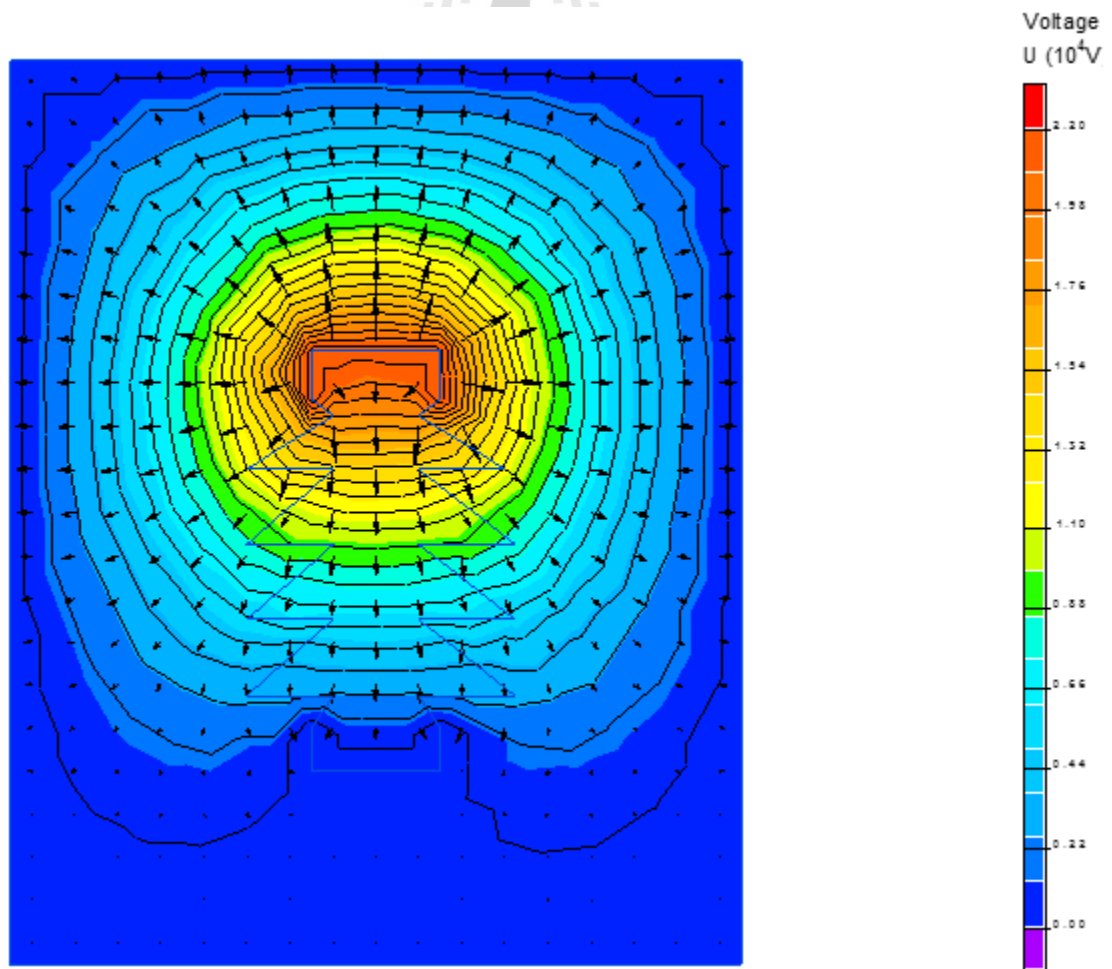
รูปที่ 3.33 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่ง



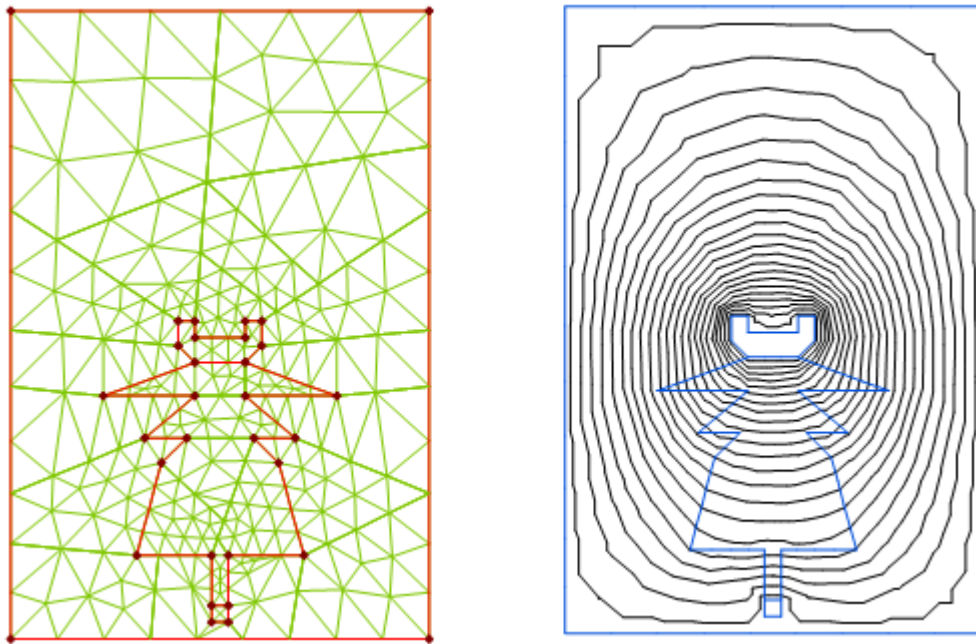
รูปที่ 3.34 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่ง



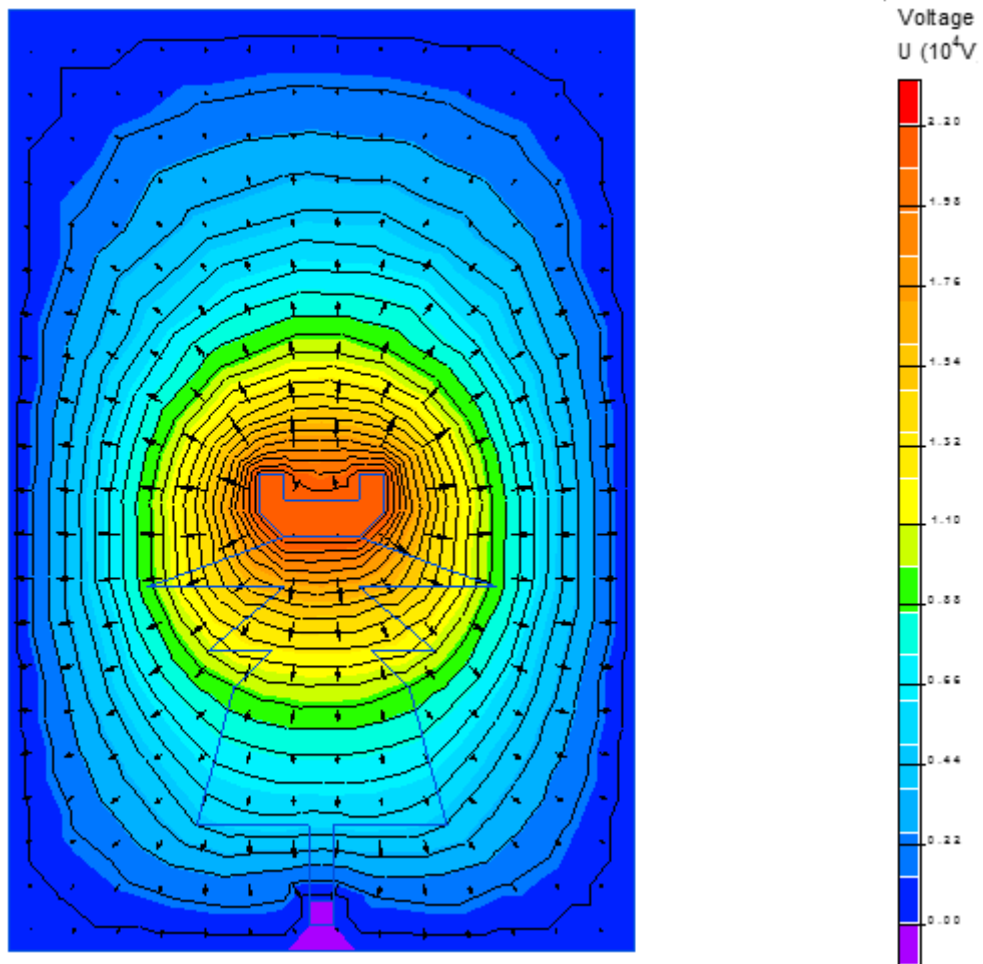
รูปที่ 3.35 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยหลัก



รูปที่ 3.36 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยหลัก



รูปที่ 3.37 แบบจำลอง FEM และการกระจายเส้นสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่งก้านตรง



รูปที่ 3.38 การกระจายสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยแท่งก้านตรง

### 3.4 การตรวจวัดอุณหภูมิขณะทำงานของบริษัทไฟฟ้าด้วยภาพถ่ายอินฟราเรด

การศึกษาภาพถ่ายอินฟราเรดในงานวิจัยนี้ใช้กล้องอินฟราเรด DALI รุ่น DL-770A ซึ่งเป็นกล้องที่มีขนาดหน้ามีจอตัวตรวจจับ 160×120 pixels มีขนาดเล็กให้จับกระชับด้วยมือ ได้ภาพที่คมชัด เครื่องมือมีความไวสูง และมีความแม่นยำ มีรูปแบบการวิเคราะห์หลากหลายแบบทั้งพิจารณาเป็นจุดและเป็นพื้นที่ ง่ายต่อการวิเคราะห์และใช้งาน ดังรูปที่ 3.39



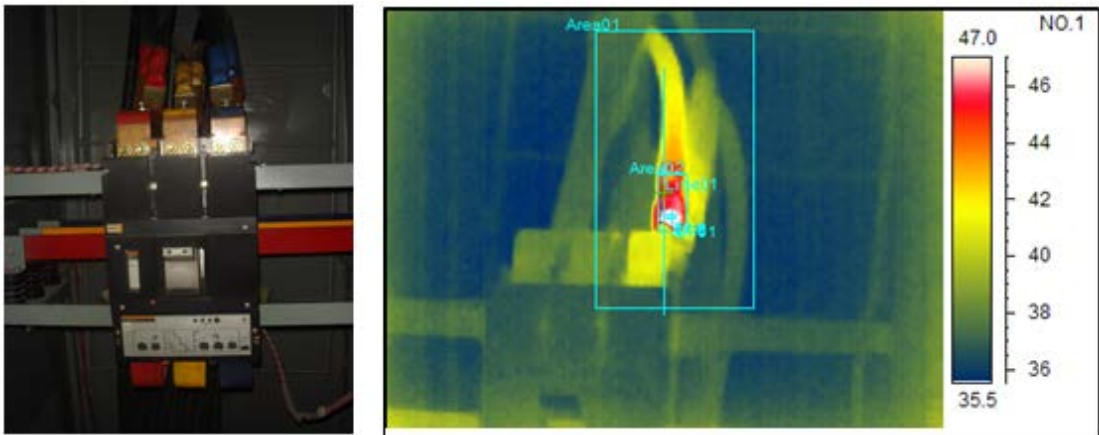
รูปที่ 3.39 กล้องอินฟราเรด DALI รุ่น DL-770A ที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบอุณหภูมิฉนวนและจุดเชื่อมต่อของบริษัทไฟฟ้าเพื่อวินิจฉัยสภาพการทำงานและความจำเป็นที่ต้องบำรุงรักษา การประเมินผลทางความร้อนทำให้ทราบว่าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อค่าอุณหภูมิของบัสบาร์ทั้ง 3 เฟส มีความแตกต่างกัน หมายถึงความไม่สมดุลในการทำงาน อาจจะมีกระแสไหลในเฟสใดเฟสหนึ่งมากเกินไป หรืออาจจะเกิดจากหน้าสัมผัสหรือจุดเชื่อมต่อของตัวนำที่บัสบาร์ไม่แน่น ผลดังกล่าวนำมาใช้ประเมินเพื่อทำการบำรุงรักษาต่อไป

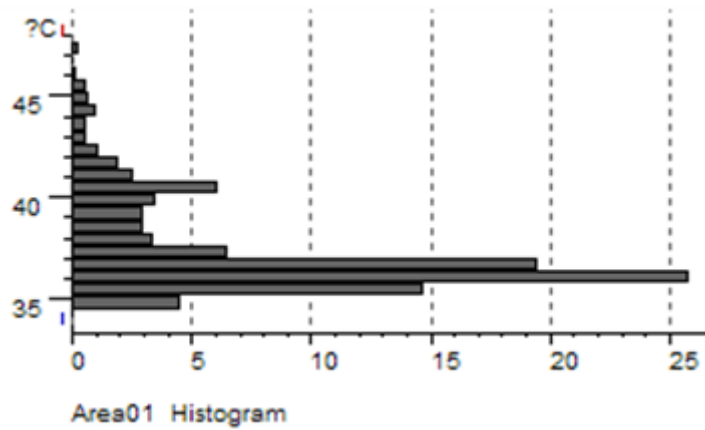
งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบภาพถ่ายอินฟราเรดที่ตู้ไฟฟ้าหลัก (main distribution board: MDB) ของอาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายอินฟราเรดแสดงไว้ในรูปที่ 3.40 จากรูปจะเห็นว่า อุณหภูมิที่บัสบาร์ เฟส B (blue) มีความเข้มกว่าเฟสอื่น ๆ อย่างชัดเจน แสดงถึงความผิดปกติที่เฟสดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ได้แสดงถึงค่าการวิเคราะห์ตามพื้นที่ Area01 Area02 ดังรูปที่ 3.41 และ 3.42 การวิเคราะห์ความร้อนตามเส้นจากภาพถ่ายอินฟราเรด Line01 ดังรูปที่ 3.43 ผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบถึงค่าสูงสุด ต่ำสุดในพื้นที่หรือตามเส้นที่สนใจ

ผลการประเมินตู้ MDB ที่อาคารวิจัย สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นำเสนอค่าสูงสุดและต่ำสุดของ Area01 Area02 Line01 และแสดงรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ปรับตั้งเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์

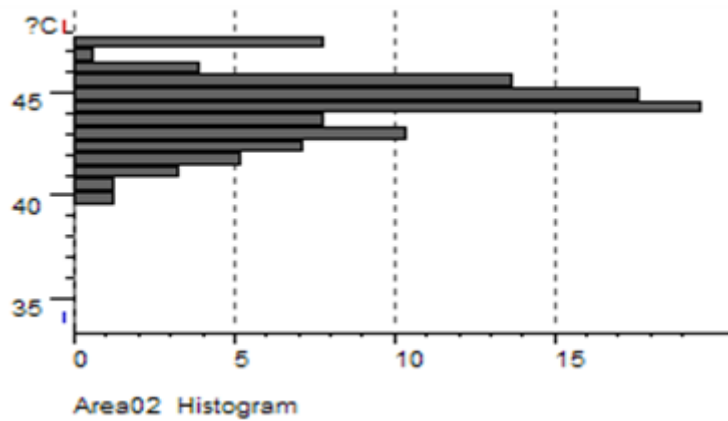




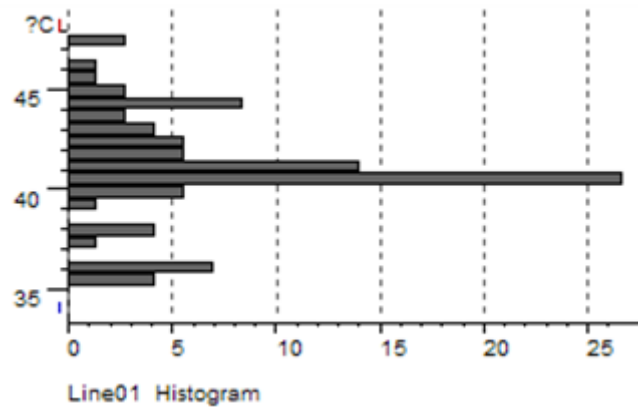
รูปที่ 3.40 เบรกเกอร์หลักในตู้ MDB อาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.41 ฮิสโทแกรมสำหรับ Area01



รูปที่ 3.42 ฮิสโทแกรมสำหรับ Area02



รูปที่ 3.43 ฮิสโทแกรมสำหรับ Line01

## ตารางที่ 3.1 สรุปผลวิเคราะห์ภาพอินฟราเรด

Picture info	Value
Title	MDB อาคารวิจัย
<b>Parameters</b>	<b>Value</b>
Emissivity	0.90
Ambient	31.4
Reference	31.4
<b>Spot analysis</b>	<b>Value</b>
SP01Temperature	51.7 °C
<b>Line analysis</b>	<b>Value</b>
Line01Max	49.3 °C
Line01Min	36.4 °C
<b>Area analysis</b>	<b>Value</b>
Area1 Max	51.8 °C
Area1 Min	35.5 °C
Area2 Max	51.8 °C
Area2 Min	40.7 °C

## 3.5 สรุป

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยเน้นศึกษา 1) สายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง 230 kV โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ลูกถ้วยฉนวน โดยศึกษาลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว ลูกถ้วยแขวนคู่คอตัน ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยหลัก และลูกถ้วยแท่งก้านตรง การวิเคราะห์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 3) การศึกษาภาพถ่ายอินฟราเรดเพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิฉนวนและอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำงานของบริษัทไฟฟ้า

## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยเน้นศึกษา 1) สายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง 230 kV โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ลูกถ้วยฉนวน โดยศึกษาลูกถ้วยแขวนชนิดแก้ว ลูกถ้วยแขวนคู่คอดตัน ลูกถ้วยแท่ง ลูกถ้วยหลัก และลูกถ้วยแท่งก้านตรง การวิเคราะห์ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 3) การศึกษาภาพถ่ายอินฟราเรดเพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิฉนวนและอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำงานของบริษัทไฟฟ้า ผลจากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้พิจารณาค่าความเป็นฉนวนเพื่อหาจุดที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความบ่งพร่องที่เกิดจากการทำงาน ทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ทันก่อนที่อุปกรณ์จะเกิดการวิบัติขึ้นได้

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

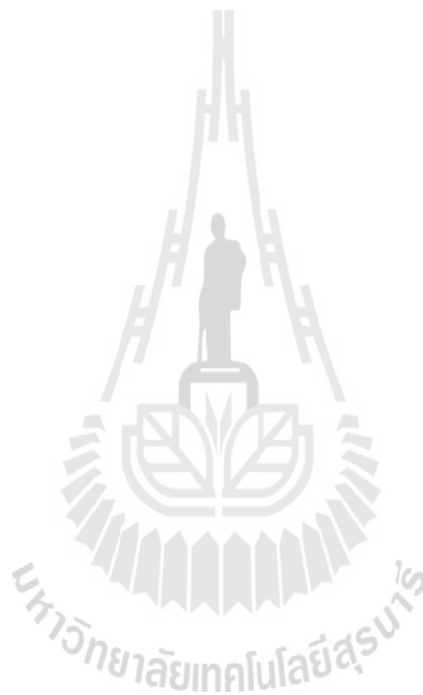
การทดสอบคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าอาจจะเลือกใช้การวิเคราะห์รูปแบบอื่น ๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง (ultrasonic) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางแสงซินโครตรอน การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การศึกษาการเสื่อมสภาพของฉนวนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถดำเนินการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิร่วมกันได้ เพื่อให้รวมผลของความร้อนที่เกิดขึ้น และผลจากสนามไฟฟ้าต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน

## บรรณานุกรม

1. A.S. Malinovski, M.d. Noskov, M. Sack and A.J. Schwab, "SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE AND ELECTRICAL TREE GROWTH IN SOLID INSULATION UNDER AC VOLTAGE" IEEE, June 22-25, 1998, Vasteras, Sweden.
2. T. Seghir, A. Nouar, K. Lefkaier and D. Mahi, "Study by simulation of the effect of temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable", IEEE, 2003.
3. D. Frey, J.L. Schanen, J.L. Auge, and O. Lesaint, "Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements", IEEE, 2003.
4. Nung-Pyo Hang, Pil-Gyu Im and Deok-Jung Kim and Kyung-Soon Cho, Don-Chan Cho, Yong-Woo Lee, Jin-Woong Hong, "The Electrical Breakdown Properties of Low Density Polyethylene Film due to Morphological Change", IEEE, 1996.
5. S.M. Korobeynikov, Yu.N. Sinikh and A.G. Tregubov, "Research and Educational Computer Program of Breakdown Initiation in Liquids", Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids(ICDL '99), Nara, Japan, July 20-25,1999.
6. N. Kolev, P. Darjanov, E. Gadjeva, D. Darjanova, "PARTIAL DISCHARGE PHENOMENA SIMULATION USING GENERAL-PURPOSE ANALYSIS PROGRAMS", IEEE, 1997.
7. S. Carabajar, C. Olagnon, G. Fantozzi, C.Le. Gressus, "Relations between Electrical Breakdown Field and Mechanical Properties of Ceramics"
8. J. Qian, R.P. Joshi, K.H. Schoenbach, M. Laroussi, E. Schamiloglu, and C.G. Christodoulou, "Percolative Model of Electric Breakdown in Liquid Dielectric", IEEE, 2002
9. X. Jianyuan, W. Haifeng, Z. Jisheng, S. fengyi, "The Numerical Simulation and Experiment of Electric Breakdown inside the Three-phase Common Enclosure SF6 Insulated GIS", Shengyang University of Technology, China
10. B.Y. Seok, H. Komatsu, J. Suehiro, and M. Hara, "Partial and Complete Electrical Breakdown in Simulated High Temperature Superconducting Coils", IEEE, 2000
11. L. Bayon, F. Buret, C. Koellblin, T. Toledo, "Field Distribution Measurement and Simulation of Stress Control Materials for Cable Accessories", IEEE, 2004

12. V.A. Garanov, A.A. Kalachev, A.N. Lagar'kov, S.M. Matitsin, A.B. Pakhomov, A.K. Sarichev, A.P. Vinogradov, A.M. Virnik, "THE BREAKDOWN OF METAL INSULATOR GRANULAR SYSTEM FOR OBTAINING OF DIELECTRIC WITH ANOMALEOUS HIGH VALUE OF DIELECTRIC CONSTANT", IEEE, 2003
13. H. Krompholz, A. Neuber, M. Haustein, J. Dickens, "Electric Breakdown in Liquid Nitrogen"
14. R. Tadikonda, S. Hardikar and E.M.S. Narayanan, "Potential of high-k Dielectrics for Lateral Power and High Voltage Devices", IEEE, 2004
15. E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering: Fundamentals, section edition, pp. 242-254.



ภาคผนวก ก  
ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลผลิต ดังต่อไปนี้

**บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่**

Anant Oonsivilai, Rattarong Boonwutiwiwat, Thanatchai Kulworawanichpong, Padej Pao-La-Or, “Electric Field Estimation around an Overhead Power Transmission Line using Neural Network Model”, **The 11th WSEAS International Conference on Systems**, Crete Island, Greece, 23-28 July 2007



## Artificial Neural Network Approach to Electric Field Approximation around Overhead Power Transmission Lines

Anant Oonsivilai, Rattarong Boonwutiwiwat, Thanatchai Kulworawanichpong, Padej Pao-La-Or  
Power and Energy Research Unit, School of Electrical Engineering  
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

[anant@sut.ac.th](mailto:anant@sut.ac.th);  
[rattarong@hotmail.com](mailto:rattarong@hotmail.com);  
[thanatchai@gmail.com](mailto:thanatchai@gmail.com);  
[padej@sut.ac.th](mailto:padej@sut.ac.th)

### ABSTRACT

This paper presents the use of artificial neural networks (ANN) to estimate electric fields around an overhead power transmission line. Although, there exist many efficient numerical methods, e.g. finite difference method (FDM), finite element method (FEM), boundary element method (BEM), etc, to estimate electric field distribution caused by live conductors, it typically consumes substantial execution time when high accuracy of obtained solutions is required or especially when time-varying field is involved. Therefore, to estimate the electric field strength using ANN employing feedforward network with backpropagation learning can be an alternative. To evaluate its use, overhead 22-kV single-phase power line of 100 m<sup>2</sup> test area and 230-kV three-phase power lines of 400 m<sup>2</sup> test area were simulated. The results obtained from the ANN are compared with those obtained by the analytical method, the FDM and the FEM.

### KEY WORDS

electric field strength, finite difference method (FDM), finite element method (FEM), artificial neural network (ANN), boundary conditions, estimation

### 1. Introduction

The computation of electric fields is complex and difficult to find an exact solution [1]. Several numerical techniques have been increasingly employed to solve such problems since availability of high performance computers. Among these, finite difference method (FDM), finite element method (FEM) and boundary element method (BEM) are very popular [2]. Although they are simple and useful to estimate electromagnetic fields, it typically consumes substantial execution time when high accuracy of obtained solutions is required or especially when time-varying field is involved. Utilizing some efficient intelligent methods such as artificial neural networks (ANN) is able to estimate an electric field via an appropriate neural model. This technique is very useful

when some environmental factors (e.g. temperature, moisture, etc) are taken into account [3]. The neural model is very flexible. When its weighting parameters are successfully trained corresponding to appropriate input variables, electric field estimation of any input values can be made rapidly.

The prediction of electric field intensity is very important in many aspects nowadays. Due to difficulty and time consuming of electric field measurement, numerical calculation can be applied to evaluate electric field distribution. In addition, since serious effects on health risk caused by electric field strength have been reported [4], recommendation and guidelines of electric-field-related tasks such as an overhead power transmission line are released to prevent a careless activity that might be performed close to the restricted area around the live conductor.

In this paper, exploitation of neural modeling to estimate electric field strength at any point around an overhead transmission line is demonstrated. The popular feedforward network with backpropagation learning is used. First of all, Section 2 presents an analytical solution of electric fields around an overhead power line system of single-phase and 3-phase conductors. Also, brief explanation of FDM and FEM to estimate electric field solutions is included. The neural model of electric field estimation is described in Section 3. Section 4 and 5 show numerical results and conclusions respectively.

### 2. Electric Field Calculation of a Single - conductor System

Fig. 1 shows a single conductor system in 2D. Points 1 and 1' in the figure represent the live conductor with potential  $V_1$  and its image potential, respectively.

To compute the electric field strength at a point  $P(x,y)$  can be performed in many different ways. Some require tedious and substantial mathematical expression. Whereas some employ a simple formula, but obtained solutions are less accuracy.

In this paper, an analytical solution derived from Maxwell's equations, the FDM and the FEM are summarized.

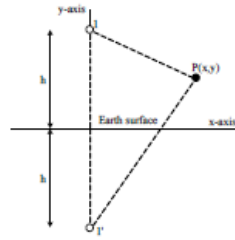


Fig. 1. A single conductor system

**2.1 Analytical method**

From Maxwell's equations electric field strength at a specified point P(x,y) can be expressed [5] as follows

$$E(x,y) = \frac{2hV_1}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \sqrt{x^4 + y^4 + h^4 + 2h^2x^2 + 2x^2y^2 - 2h^2y^2}} \quad (1)$$

Where  $r$  is a conductor radius  
 $h$  is a distance between the conductor and the earth surface underneath  
 $V_1$  is a conductor potential

Beside the analytical approach, numerical solutions can be alternatively obtained by using the FDM and the FEM.

**2.2 Finite Difference and Finite Element Methods**

Solutions of partial differential equations such as Laplace or Poisson equations can be obtained numerically by using the FDM and the FEM. These two methods divide a domain into many small discrete elements to formulate a set of algebraic difference equations characterizing electric flux of the domain. With given boundary conditions on the solution region, an approximate solution is simply obtained by solving such algebraic equations. In 2D problems, rectangular grid and linear triangular elements as shown in Fig. 2 are the most commonly used domain discretization [6] for the FDM and the FEM respectively.

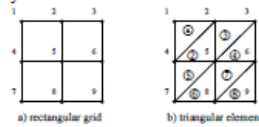


Fig. 2. Domain discretization of the FDM and FEM

After all node equations or all element equations are successfully derived, they must be assembled altogether to represent the unified characteristic of the entire domain. The entire system is expressed in matrix form as  $[C][V] = [F]$ , where  $[C]$  is a coefficient matrix,  $[V]$  is a

vector of unknowns and  $[F]$  is a vector of external forces. Its solutions can be obtained with many efficient techniques of handling a set of linear equations, e.g. Gaussian elimination, matrix factorization, conjugate gradient method, etc.

Although the FDM is straightforward and simple, it is not widely used when a non-uniform domain shape and heterogeneous conditions are involved. The FEM is more acceptable to deal with nonlinear problems. However it can be computationally expensive for large problems. Furthermore, to include effects of conductor size, unstructured and non-uniform grid must be used inevitably. Hence, the overall execution time is very expensive.

**3. Electric Field Model using Artificial Neural Networks**

The ANN is well-known and widely used in several research areas [7]. The ANN typically consists of a set of processing elements called neurons that interact by sending signals to one another along weighted connections. The connection weights, which can be determined adaptively, specify the precise knowledge representation. Usually it is not possible to specify the connection weights beforehand, because knowledge is distributed over the network. Therefore, a learning procedure is necessary in which the strengths of the connections are modified to achieve the desired form of activation function.

In electromagnetic problems, a small number of publications have been found. The implementation of ANN model for electric field problems requires electric field database of a 2D field domain. This paper focuses on the estimation of the electric field strength. Hence a single output structure of the ANN is presented as shown in Fig. 3.

All weighting parameters are obtained by backpropagation training in order to minimize mean square error or so-called loss function. Fig. 4 shows training structure of a simple feedforward network. The training problem can then be formulated as the following optimization problem.

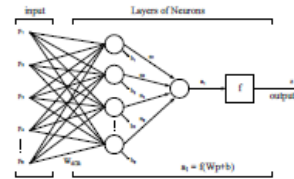


Fig. 3. Simple structure of a feedforward neural network

$$\underset{w \in \mathbb{R}^{S \times K}}{\text{minimize}} \quad MSE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (z_{d,i} - z_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (z_{d,i} - f(Wp+b))^2 \quad (2)$$



Some efficient classical optimization techniques such as steepest descent methods, Newton and quasi-Newton methods, etc. are applied to find a set of optimal weighting parameters [8].

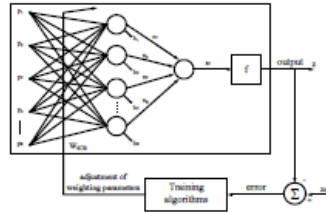


Fig. 4. Training structure of a simple feedforward network

In this paper, when a solution region is defined, electric field strength depends on a position of measured points, boundary conditions, conductor radius, environmental conditions, etc. All physical factors can be taken into account as many as possible, as shown in Fig. 5.

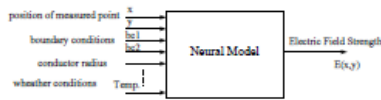


Fig. 5. Relation among physical factors via neural model

**4. Numerical Results**

100 m<sup>2</sup> area near an overhead power transmission line as shown in Fig. 6 is situated as the test system. The voltage distribution standard level of Thailand (22 kV, 50 Hz) is applied as the surface conductor potential. For benchmarking, calculation lines of 2-m, 4-m, 6-m above the earth surface and the earth surface level are defined.

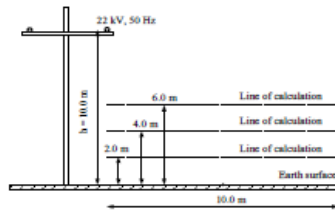


Fig. 6. Test domain of an overhead power transmission line

For comparison, the solution domain for the FDM and the FEM can be discretized as shown in Fig. 7.

The neural model used in this paper consists of two layers with 500 nodes and 1 node respectively. The transfer function of the first layer is the log sigmoid transfer function, while the linear transfer function is applied to the second layer. The training process

corresponds to electric field strength as a function of Cartesian coordinates (x,y), conductor radius and boundary conditions. The training of the neural network is carried out through 108 training points, 36 training for each radius (35 70 and 150 mm<sup>2</sup> AAC: All Aluminium Conductor) as shown in Fig. 8.

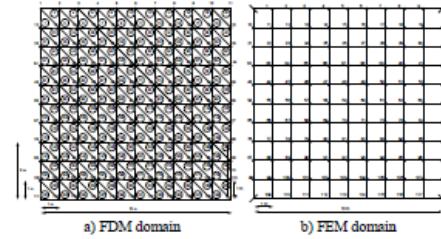


Fig. 7. Solution domain of the FDM and the FEM

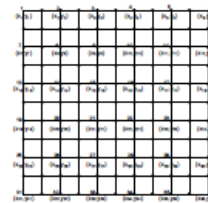


Fig. 8. 36 training points for a fixed radius of the neural network model

After the training, electric field strength at test positions along the calculation lines can be achieved and graphically presented in Figs 9,10 and 11.

As a result, the neural network model gives good performances for the electric field strength estimation. With the training algorithm, this model can account effects of some key environmental factors such as conductor size, temperature, moisture and humidity, dirt or fog condition, etc. This leads the neural network approach to overcome other efficient numerical methods like the FDM and the FEM in this aspect.

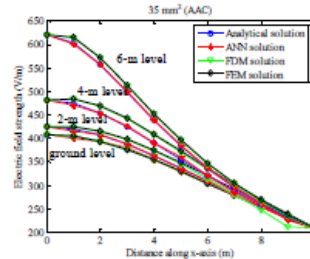


Fig. 9. Electric field strength caused by 35 mm<sup>2</sup> ACC conductor size

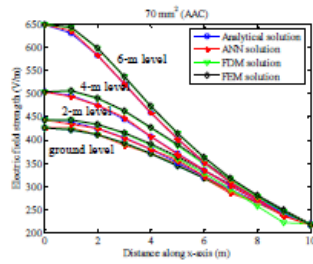


Fig. 10. Electric field strength caused by 70 mm<sup>2</sup> ACC conductor size

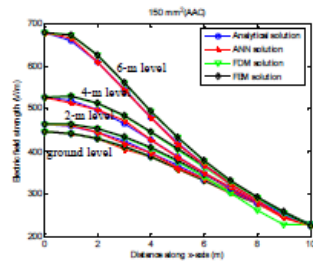


Fig. 11. Electric field strength caused by 150 mm<sup>2</sup> ACC conductor size

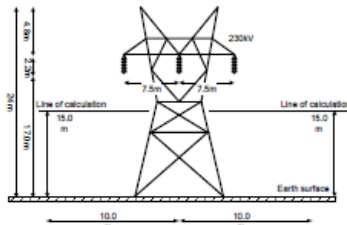


Fig. 13. Test domain of an overhead power transmission line

The second test is a 400 m<sup>2</sup> cross-area around an overhead power transmission line as shown in Fig. 13. The voltage distribution standard level of Thailand (230 kV, 50 Hz) is assumed as the surface conductor potential. For benchmarking, calculation lines of 15-m above the earth surface and the earth surface level are defined.

In the same manner, the electric field distribution of this test can be characterized by the FEM, FDM and ANN. They can be depicted as shown in Fig. 14. Also, comparative results among them are illustrated graphically in Fig. 15.

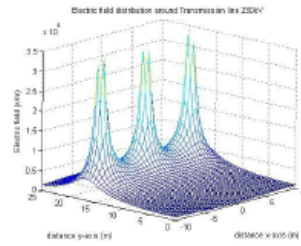


Fig. 14. Electric fields around the 3-phase power line

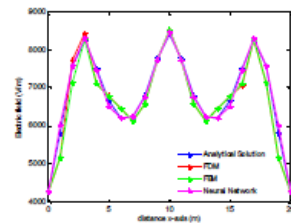


Fig. 15. Electric fields around the power line at y-axis = 15m

From the calculation, the level from 15-m above the ground to the conductor is critical due to the excessive electric field strength (greater than the maximum allowance of 5 kV/m that human body can stand) according to the international radiation protection association (IRPA) [9].

## 5. Conclusion

Estimation of electric field strength can be performed by using the neural network model. In this paper, overhead 22-kV and 230-kV power transmission lines are used for test as solution domains. The first test, the 22-kV system, consists of 121 nodes. The training of neural network is based on training data, which correspond to the electric field strength at given points. This system is simple and the analytical solution is available for comparison. With 108 training data, optimal weighting parameters are obtained by minimizing the mean square error. The test of the network is challenged with 36 test points along four calculation lines above the earth surface. The second test, the 230-kV power transmission line, consists of 441 nodes. The training of neural network is based on training data, which correspond to the electric field strength at given points. With 200 training data, optimal weighting parameters are obtained by minimizing the mean square error. The test of the network is challenged with 121 test points along four calculation lines above the earth surface. The numerical results present good agreement with that obtained by the analytical method, while the FDM and the

FEM do not. It is very important to be in evidence that the neural model gives good results in electric field estimation. This might imply that the neural network approach can be further used to predict electric field distribution around an overhead power transmission line under an unexpected weather condition, e.g. rainy, foggy, dirty, or other extreme conditions.

### References

- [1] Bossavit, A., *Computational Electromagnetics - Variational Formulations, Complementarity, Edge Elements*. Academic Press, New York (1998)
- [2] Lu, J., Thiel, D.V., *Computational and Visual Electromagnetics Using an Integrated Programming Language for Undergraduate Engineering Students*, IEEE Transactions on Magnetics 4 (2000), 1000 – 1003
- [3] Zhou, Q., Sun, C., Liu, L., Sima, W., An, W., *Electromagnetic Environment of the EHV Transmission Line and its Effect*, International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001), 19 – 22 November 2001, 229 – 232
- [4] Neskovic, A., Neskovic, N., Paunovic, D., *Indoor Electric Field Level Prediction Model Based on the Artificial Neural Networks*, IEEE Communications Letters 6 (2000), 190 – 192
- [5] Youngang, G., Lifang, Y., *Determination of Dangerous Region of the Electromagnetic Pollution Caused by the Electric Fields around Power Line*, International Conference on Communication Technology (ICCT'98), October 1998, 22-24
- [6] Sadiku, M.N.O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, New York, (2001)
- [7] Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R.G., *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley (1991)
- [8] Yundong, C., Dong, L., Xiaoming, L., Yuan, T., *Optimization Design of Electric Field Using Artificial Neural Networks*, The Fourth International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2002), 8 – 11 April 2002, 44 – 45
- [9] International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association, *IRPA/INRCC, Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields*, Health Physics vol.58 No. 1 January 1990, 113-122