



การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย  
โดยมีสองสถานีในบริเวณเดียวกัน

Ground Grid Design of Two Neighbouring Distribution Substation

นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
ศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพัฒน์พันธุ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์สำหรับติดตั้งสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย  
ผู้วิจัย : รศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
ผศ.ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
พ.ศ. : 2562

### บทคัดย่อ

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากความผิดพลาดซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าสูงจนทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์และเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ปัจจุบันสถานีไฟฟ้าย่อยแบบที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน (Gas Insulated Substation: GIS) ถูกสร้างขึ้นมากโดยเฉพาะในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบที่ใช้อากาศเป็นฉนวน (Air Insulated Substation: AIS) ในการที่จะสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแบบ GIS ขึ้นมาแทนแบบ AIS และการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจำเป็นต้องสร้างสถานีไฟฟ้าขนาดเล็กอีกสถานีหนึ่งขึ้นมาเพื่อทำการจ่ายไฟฟ้าทดแทนให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเดิม แต่การที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยสองสถานีในบริเวณเดียวกันอาจทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียลที่มีความชันสูงระหว่างระบบกราวด์กริดของทั้งสองสถานีขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มีค่าสูงขณะที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นก่อนทำการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยจึงต้องทำการวิเคราะห์ระยะห่างของกราวด์กริดและขนาดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่สร้างขึ้นใหม่ว่าจะมีผลอย่างไรต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว รวมทั้งศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่จะเกิดขึ้นดังกล่าว

Title : Ground Grid Design of Two Neighbouring Distribution Substation  
Researcher : Associate Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep,  
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP  
Assistant Professor Dr.Sakhon Woothipatanapan,  
Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering, RMUTP  
Year : 2019

### Abstract

Ground grid design of substation is very important. It will help prevent the danger caused by the fault which causes the high step voltage and high touch voltage and may cause the operator to die. It also helps prevent damage to equipment and increases reliability for power systems as well. Currently, the Gas Insulated Substation (GIS) has been built a lot, especially in areas with limited space because it takes less space than the Air Insulated Substation (AIS). In order to create a substation of the GIS model instead of the AIS model. In order to create the GIS instead of AIS, including the improvement or maintenance of the substation, it is necessary to build another small substation to supply electricity to replace electricity from the original substation. However, there are two substation stations in the same area may cause an increase of high-slope ground potential between the ground grid systems of both substations. It will cause high step voltage and high touch voltage while the fault is diminished. Therefore, before improvement or maintenance of substation, the ground grid distance and the size of the newly constructed substation must be analyzed that what effect on step voltage and touch voltage generation. Including studying the effects of step voltage and touch voltage that will occur.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยโดยมีสองสถานีในบริเวณเดียวกัน ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 แนวทางการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ	4
2.2 จุดประสงค์การออกแบบกราฟด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย	4
2.3 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบการต่อลงดิน	4
2.4 นิยามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพื่อออกแบบกราฟด์กริดในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย	6
2.5 ความต้านทานจำเพาะของดิน	7
2.6 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถได้	10
2.7 ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์	16
2.8 การหาค่าความต้านทานดินด้วยสมการของ Schwarz ในดินชั้นเดียว	18
2.9 คำนวณความต้านทานดินด้วยสมการของ Schwarz ในดินสองชั้น	20
2.10 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด	21
2.11 การเพิ่มขึ้นของกราฟด์กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้และแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุด	22
2.12 แรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุด	23
2.13 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 การประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบการต่อลงดิน	28
2.15 การจัดวางตัวนำ	28
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	<b>32</b>
3.1 บทนำ	32
3.2 กรอบแนวความคิด	33
3.3 โปรแกรม CDEGS	34
3.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม CDEGS	35
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล</b>	<b>45</b>
4.1 บทนำ	45
4.2 กรณีศึกษา	46
4.3 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษา	72
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>80</b>
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	83
คณะผู้วิจัย	95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง (Mesh) ห่างกันไม่เท่ากัน ซึ่งแต่ละพื้นที่ ที่มีระยะห่างของตัวนำนั้นมีการเพิ่มขึ้นของทางด้านการกราวด์ (Ground Potential Rise) แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) จะมีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลจากค่าการบีบอัดของอัตราส่วนตัวนำ (Conductor Compression Ratio) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตายด้วยความสัมพันธ์สัดส่วนการบีบอัดที่ดีที่สุด (Optimal Compression Ratio : OCR) ของตัวนำ ภายใต้การต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยในระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอในดินชั้นเดียว (Uniform Soil) และดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในดินสองชั้น (Two -Layer) โดยงานโครงการนี้มีจุดประสงค์ที่จะหาค่าของ OCR ซึ่งจะเป็นค่าที่ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าต่ำสุดส่วนค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในกฎเกณฑ์กฎเกณฑ์ความปลอดภัย (Safety Criteria)

ดังนั้นการลดค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดจึงเป็นสิ่งที่ทำได้ยากและเป็นสิ่งที่โครงการนี้จะทำการศึกษา

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อให้ได้หลักเกณฑ์ในการพิจารณารูปแบบการออกแบบกราวด์กริดที่ค่าสัดส่วนการบีบอัดที่ดีที่สุด (Optimal Compression Ratio : OCR)
- 1.2.2 เพื่อให้ได้หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบกราวด์กริดสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย
- 1.3.2 เพื่อสร้างจำลองงานโครงการโดยใช้โปรแกรม Current Distribution  
Electromagnetic interference Grounding and Soil structure (CDEGS)

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การวางแผนและดำเนินงานอย่างเหมาะสมในการออกแบบกราวด์กริดในสถานีจำหน่ายไฟฟ้า  
ย่อยมีขอบเขตดังนี้

- 1.3.1 ออกแบบระบบกราวด์ตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000
- 1.3.2 การวิเคราะห์การวางตัวนำที่ระยะห่างไม่เท่ากัน
- 1.3.3 การประเมินการบีบอัดตัวนำที่ (Optimal Compression Ratio) มีความปลอดภัย  
ในระดับ 0.0 – 1.0

### 1.4 แนวทางการดำเนินงาน

การวางแผนและดำเนินงานอย่างเหมาะสมสำหรับการออกแบบกราวด์กริดในสถานีจำหน่าย  
ไฟฟ้าย่อยมีวิธีการวิจัยดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน  
IEEE std. 80-2000 ดังนี้
  - 1.4.1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณเกณฑ์ความปลอดภัย
  - 1.4.1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและ  
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว
- 1.4.2 ศึกษาการใช้งานขั้นสูงของโปรแกรม CDEGS และเรียนรู้เทคนิคจากผู้เชี่ยวชาญ
- 1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ค่าเกณฑ์ความปลอดภัยซึ่งประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส  
และ ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวด้วยโปรแกรม CDEGS เพื่อเป็นข้อกำหนดตาม  
มาตรฐาน IEEE std. 80-2000
- 1.4.4 รวบรวมเรียบเรียง ตรวจสอบข้อมูล และจัดทำรายงานผลการวิจัย
- 1.4.5 สรุปผลการวิจัย



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 5.1 สามารถประเมินสมรรถนะด้านกราวด์ที่ค่าสัดส่วนการบีบอัดค่าต่างๆได้
- 5.2 เข้าใจการคำนวณออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างการวางตัวนำที่ไม่สม่ำเสมอในรูปแบบต่างๆเช่น สีเหลี่ยมจัตุรัส และสีเหลี่ยมผืนผ้า
- 5.3 สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงระบบกราวด์
- 5.4 สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยได้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการนำเสนอจุดประสงค์ของการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อความปลอดภัยและทฤษฎีการคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย หรือเป็นกฎเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย

#### 2.2 จุดประสงค์การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ที่ดีต้องคำนึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานสถานีไฟฟ้าย่อยและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย เนื่องจากกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริด หรือพื้นดินที่ที่อยู่ในบริเวณรอบๆ และรวมถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ในการออกแบบหรือสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ในการก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยควรมีค่าความต้านทานของระบบไม่เกิน 5 โอห์มที่บริเวณรอบๆกราวด์กริดแต่ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงได้ เมื่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยเสร็จสมบูรณ์ จะมีค่าความต้านทานของดินเท่าไร ในขั้นตอนการออกแบบทั้งนี้ การออกแบบจะใช้การประมาณค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดิน ซึ่งจะนำไปใช้ในสมการคำนวณความต้านทานดิน ของระบบสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อความปลอดภัย ซึ่งจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step Voltage) และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสหรือแรงดันเมชสูงสุด (Touch Voltage) ที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ [5]

#### 2.3 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบการต่อลงดิน

เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติของลงดิน (Ground fault condition) ในสถานีไฟฟ้าย่อย จะมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านระบบที่ต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยสู่ระบบดิน ซึ่งกระแสที่ไหลลงระบบดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวดินในบริเวณรอบๆ

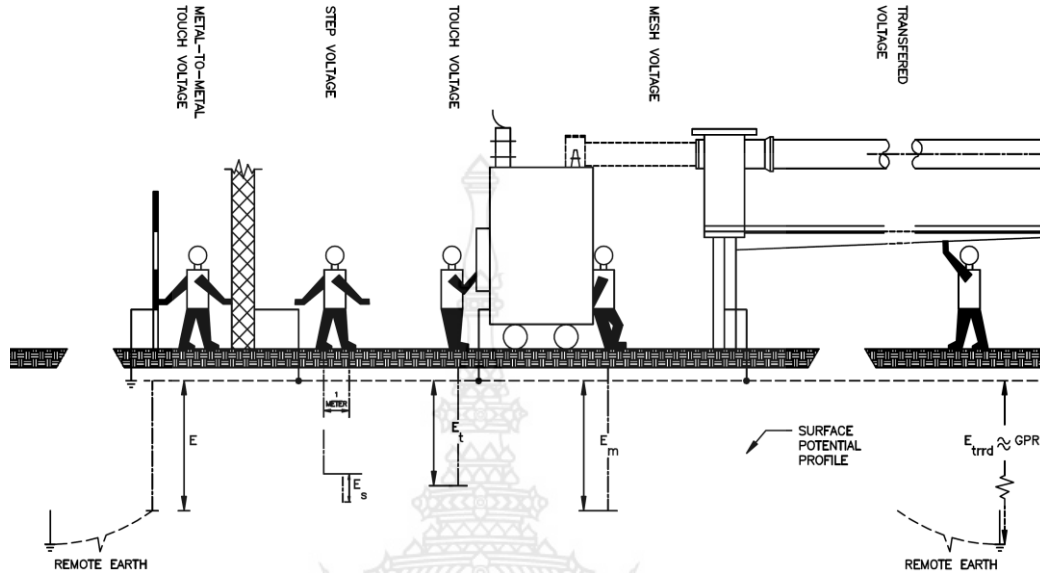
ในสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ผิวดินมีค่าไม่สม่ำเสมอจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นภายในสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อยและบริเวณรอบๆ สถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย ทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่จะได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้าค่าความต่างศักย์ที่เกิดในสภาวะผิดปกติค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในภายในบริเวณสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานียำหน่ายไฟฟ้านั้นนิยามมีดังนี้

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Ground potential rise, GPR) คือ ค่าความต่างศักย์หรือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงตาข่ายกับตำแหน่งที่มีความห่างจากสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage ,Et) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 จุดที่ผิวพื้นผิวดิน เนื่องจากยืนอยู่ภายในสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยที่มนุษย์ไปสัมผัสหรือแตะกับโครงสร้างที่เป็นโลหะหรือตัวถังของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage ,Es) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวดินระหว่างจุด 2 จุดของเท้าทั้ง 2 ข้างที่สัมผัสกับพื้นผิวดินที่ยืนอยู่ในภายในสถานียำหน่ายไฟฟ้าย่อย ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างช่วงก้าวของเท้าเท่ากับ 1 เมตร

## 2.4 นิยามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพื่อออกแบบกราวด์กริดในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 1 รูปแบบการเกิดแรงดันต่างๆภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย

เมื่อเกิดสถานะกระแสผิดพ่วง

ที่มา : อรรถ พยอมหอม. การประเมินสมรรถนะด้านป้องกันฟ้าผ่าและกฎเกณฑ์การออกแบบด้านความปลอดภัยสำหรับสายส่งย่อยสายฟอนและสถานีจำหน่ายไฟฟ้า. หน้า 117

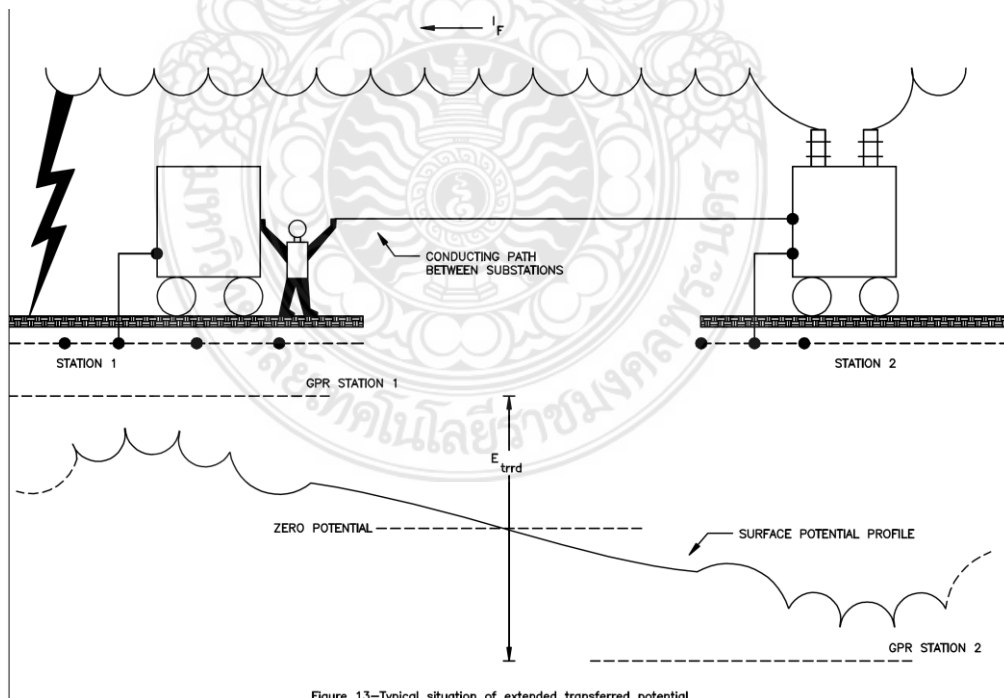


Figure 13—Typical situation of extended transferred potential

รูปที่ 2 รูปแบบการเกิดแรงดันถ่ายโอน

ที่มา : อรรถ พยอมหอม. การประเมินสมรรถนะด้านป้องกันฟ้าผ่าและกฎเกณฑ์การออกแบบด้านความปลอดภัยสำหรับสายส่งย่อยสายฟอนและสถานีจำหน่ายไฟฟ้า. หน้า 117

ระบบกราวด์กริด (Grounding Grid) เป็นระบบการต่อลงดินในแนวราบที่ประกอบด้วยตัวนำที่ฝังดินที่ต่อถึงกัน และเป็นจุดต่อลงดินร่วมของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างโลหะที่อยู่ภายในพื้นที่นั้นๆ

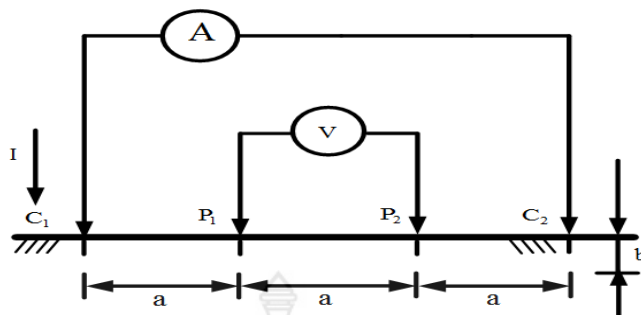
แรงดันที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Ground Potential Rise : GPR) หรือการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียล คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นในระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ซึ่งเพิ่มขึ้นที่ผิวดินเนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างกราวด์กริดที่ต่อลงดินเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้า (Remote Ground) และมีค่าเท่ากับกระแสกริดสูงสุดคูณกับความต้านทานของระบบกราวด์กริด

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal to Metal Touch Voltage : Emm) คือค่าความต่างศักย์ระหว่างวัตถุโลหะหรือโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งต่อถึงกันระหว่างมือกับมือ หรือมือกับเท้าทำให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย

แรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transfer Voltage : Etrrd) คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ถ่ายโอนเข้าหรือออกจากสถานีไฟฟ้าไปยังจุดระยะไกล (Remote Point) ที่อยู่นอกสถานีไฟฟ้า

## 2.5 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานดินจำเพาะที่มีความสำคัญต่อการออกแบบการต่อลงดินมาก เพราะเป็นองค์ประกอบที่มีสำคัญในการออกแบบการต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ซึ่งจะมีผลทำให้ต้องใช้ตัวนำต่อลงดินมากหรือน้อย ดังนั้นการต่อลงดินจึงต้องการวัดค่าความต้านทานของดินเพื่อที่นำค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ไปใช้ในการออกแบบสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความชื้นของดิน ส่วนประกอบทางเคมี ความเข้มข้นของเกลือที่อยู่ในดิน ขนาดของเม็ดดิน ชนิดของแมวลดิน ดิน หินทราย กรวด ฯลฯ โดยทั่วไปวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งได้แสดงไว้ในมาตรฐาน IEEE Std 80-2000 (Soil structure and selection of soil model) จะมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีวัดแบบ 4 จุด และแบบ 3 จุด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงแบบ 4 จุด วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่นิยมใช้คือ Wenner Method หรือแบบ 4 จุด (Four Point Method)



รูปที่ 3 การวัดความต้านดินแบบ 4 จุด

ที่มา : IEEE Std 80-2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding 2000. หน้า 53

กรณีระบบดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ การวัดค่าความต้านจำเพาะของระบบดินแบบ 4 จุด มีระยะทางระหว่างโพรบเท่ากัน นำค่าความต้านของดินที่วัดได้สามารถนำค่ามาหาความต้านทานจำเพาะได้ดังสมการที่ (2.1) [2,5]

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\rho_a$	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณได้ (โอห์ม เมตร)
	$R$	คือ	ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ที่ระยะห่างโพรบ (โอห์ม)
	$a$	คือ	ระยะห่างของโพรบ (เมตร)
	$b$	คือ	ความลึกของอิเล็กโทรดที่ปักลงดิน (เมตร)
	$P_1, P_2$	คือ	ตำแหน่งเครื่องวัดแรงดัน
	$C_1, C_2$	คือ	ตำแหน่งเครื่องวัดกระแส

ถ้ากรณีที่  $b$  มีค่ามากกว่า  $a$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (2.2)$$

กรณีที่เป็นดินสองชั้น

$$\rho_a = \rho_1 \left( 1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \quad (2.3)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ	$\rho_1$	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (โอห์ม เมตร)
	$\rho_2$	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (โอห์ม เมตร)
	$h$	คือ	ความสูงของดินชั้นบน (เมตร)
	$K$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อน

### 2.5.1 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance, $R_B$ )

ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ต่อการออกแบบการต่อลงดินสถานีจำหน่ายไฟฟ้า ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ จะขึ้นอยู่กับความชื้นในร่างกายของมนุษย์ สำหรับการออกแบบการต่อลงดินสถานีจำหน่ายไฟฟ้า ย่อย นำค่าความต้านของร่างกายมนุษย์มาพิจารณาเพื่อนำไปหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ เพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการประเมินการออกแบบการต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้า ย่อย โดย IEEE Std 80-2000 (Accidental ground circuit) ได้กำหนดค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ ( $R_B$ ) มีค่าเท่ากับ 1000 โอห์ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) [2,5,6]

$$R_B = 1000 \quad (2.5)$$

เมื่อ

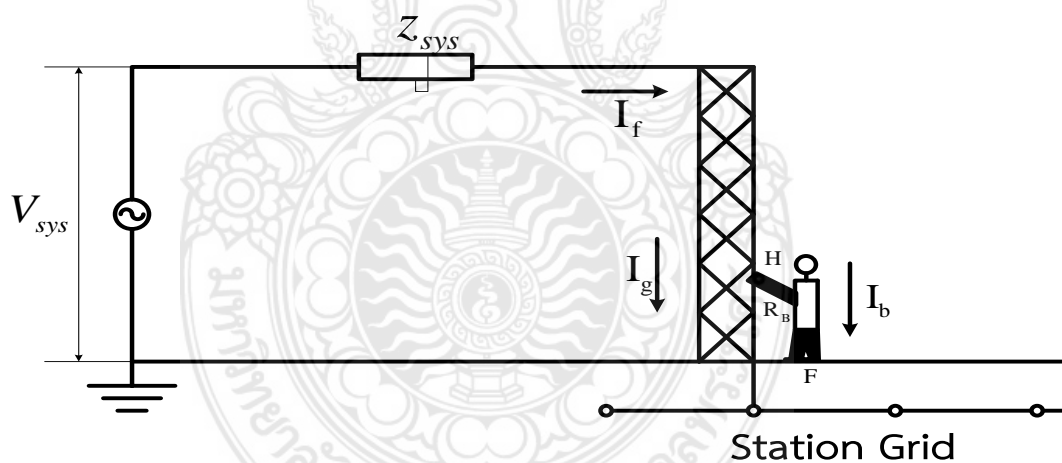
$R_B$  คือ ค่าความต้านทานจากร่างกายมนุษย์ (โอห์ม)

## 2.6 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถได้

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยเมื่อเกิดความผิดปกติของลงดินดังนั้นจึงต้องพิจารณาความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสองจุดภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยมาเป็นเกณฑ์พิจารณาความปลอดภัยซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าสัมผัส สูงสุดและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ [6]

### 2.6.1 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ [1,2]

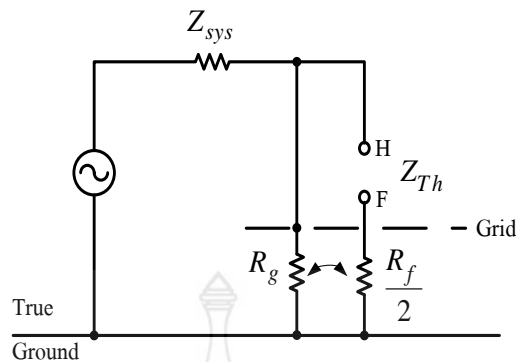
แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ขณะที่มีการเสกต์วงจรไหลสู่ระบบดินเมื่อเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่ผิวดิน จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดหรือค่าค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยหรือบริเวณรอบ ๆ สถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรูปที่เกิดในขณะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกาย และในรูปที่ 5 เป็นวงจรแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์เทวินิน



รูปที่ 4 วงจรอุบัติเหตุที่มีความเสี่ยงต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

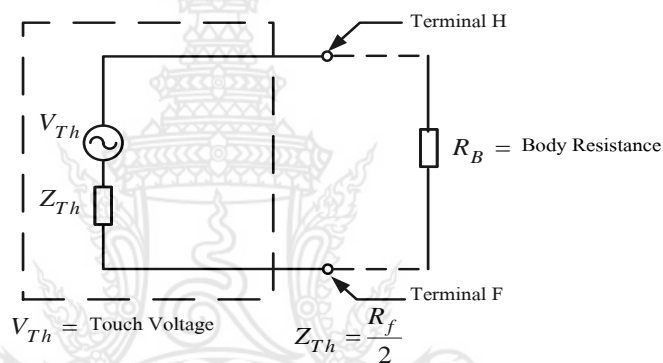
ที่มา : IEEE Std 80-2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding 2000. หน้า 17





รูปที่ 5 วงจรสมมูลแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เพื่อหาอิมพีแดนซ์เทวินิน

ที่มา : IEEE Std 80-2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding 2000. หน้า 18



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของวงจรอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ที่มา : IEEE Std 80-2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding 2000. หน้า 18

- เมื่อ  $V_{sys}$  คือ แรงดันของระบบ (โวลต์)
- $Z_{sys}$  คือ อิมพีแดนซ์ของระบบ (โอห์ม)
- $V_{Th}$  คือ แรงดันเทวินิน (โวลต์)
- $Z_{Th}$  คือ อิมพีแดนซ์เทวินิน (โอห์ม)
- $R_f$  คือ ความต้านทานเท้าข้างหนึ่ง (โอห์ม)
- $R_B$  คือ ความต้านทานร่างกาย (โอห์ม)
- $R_g$  คือ ความต้านทานรวมของระบบกราวด์กริด (โอห์ม)
- $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

จากรูปที่ 4 ค่าของ  $R_g$  และ  $Z_{sys}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $\frac{R_f}{2}$  ดังนั้น  $Z_{Th}$  จึงมีค่าโดยประมาณ

เท่ากับ  $\frac{R_f}{2}$  และค่า  $V_{Th}$  ในรูปที่ 6 คือความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มีสัมผัสกับโครงสร้าง

ของอุปกรณ์ที่จุด H และตำแหน่งที่มนุษย์ยืนที่จุด F ซึ่งทำให้กระแสไหลผ่านจากมือไปยังเท้าทั้งสองข้างที่สัมผัสกับพื้นดินเพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลขณะที่มนุษย์ได้รับแรงดันดังรูปที่ 4 และสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ดังสมการที่ (2.6) และสำหรับความต้านทานของร่างกายมนุษย์ ( $R_B$ ) นั้น IEEE Std 80-2000 (Tolerable body current limit) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1,000  $\Omega$  [5,6]

$$I_B = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) นี้จะสามารถพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้สมการที่ (2.7)

$$E_{touch} = I_B (R_B + Z_{Th}) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $E_{touch}$  คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (โวลต์)

ถ้าแทนรัศมีเท้าด้วย  $b$  เมตร (รัศมีของเท้าซึ่งในที่นี้เท้าแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมีเท่ากับ 0.08 เมตร โดยไม่คำนึงถึงอุปกรณ์เพิ่มความต้านทานเช่น รองเท้า ถุงเท้า เป็นต้น) บนพื้นผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) จะได้ดังสมการที่ (2.8)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เพื่อนำไปหาค่าของ  $Z_{Th}$  จะได้ดังสมการที่ (2.9)

$$Z_{Th} = 1.5\rho \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) นำไปแทนในสมการที่ (2.7) เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส สูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้จะได้ดังสมการที่ (2.10)

$$E_{touch} = I_B (1,000 + 1.5\rho) \quad (2.10)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.19) และ(2.20) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.10) ก็จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม ( $E_{touch50}$ ) สามารถหาได้ดังในสมการที่ (2.11)

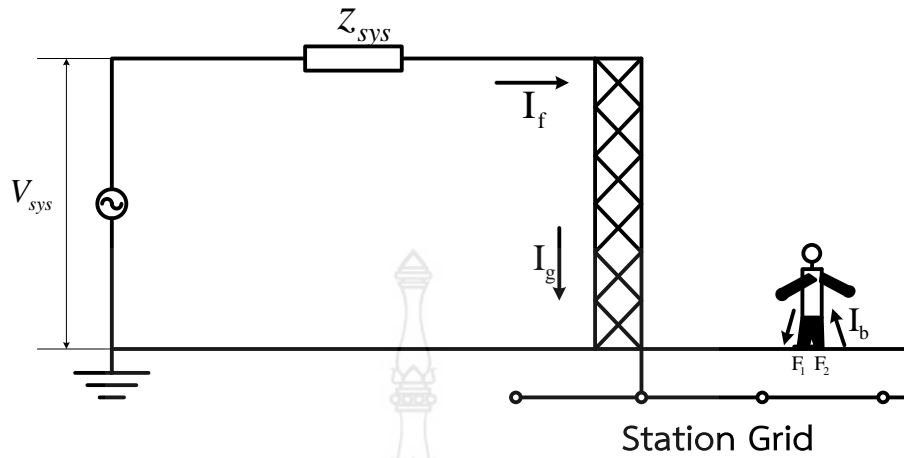
$$E_{touch50} = (1,000 + 1.5\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.14) ก็จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม ( $E_{touch70}$ ) สามารถหาได้ดังในสมการที่ (2.12)

$$E_{touch70} = (1,000 + 1.5\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.12)$$

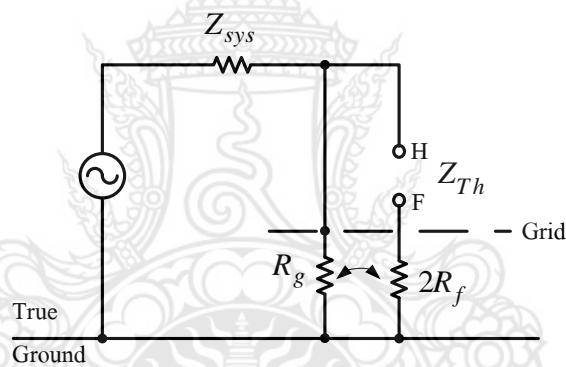
## 2.6.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ [3,5]

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ขณะที่มีการแสไหลสู่ระบบดินจะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอที่ผิวดิน และส่งผลให้เกิดอันตรายต่อบุคคลภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ค่าความต่างศักย์ของจุดเท้าทั้ง 2 ข้างสัมผัสกับพื้นดินที่อยู่ภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยโดยกระแสจะไหลผ่านร่างกายจาก F1 ไปยัง F2 เพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินดัง รูปที่ 7 และในรูปที่ 8 เป็นวงจรแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เพื่อไปหาค่าอิมพีแดนซ์เทวินิน



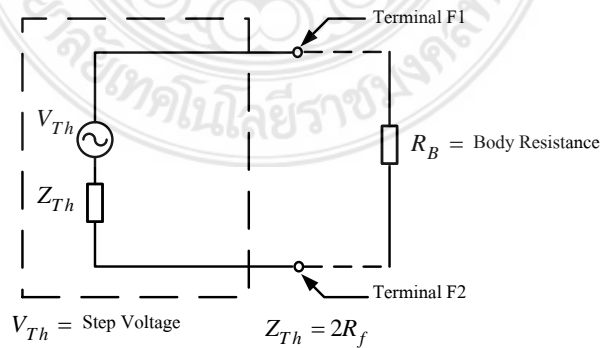
รูปที่ 7 วงจรอุบัติเหตุที่มีความเสี่ยงต่อแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว [1]

ที่มา : IEEE Std 80-2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding 2000. หน้า 19



รูปที่ 8 วงจรแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเพื่อหาอิมพีแดนซ์เทวินิน

ที่มา : อรรถ พยอมหอม. การประเมินสมรรถนะด้านป้องกันฟ้าผ่าและกฎเกณฑ์การออกแบบด้านความปลอดภัยสำหรับสายส่งย่อยสายพylonและสถานีจำหน่ายไฟฟ้า. หน้า 121



รูปที่ 9 วงจรสมมูลของวงจรอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ที่มา : อรรถ พยอมหอม. การประเมินสมรรถนะด้านป้องกันฟ้าผ่าและกฎเกณฑ์การออกแบบด้านความปลอดภัยสำหรับสายส่งย่อยสายพylonและสถานีจำหน่ายไฟฟ้า. หน้า 121

จากรูปที่ 7 ค่าของ  $R_g$  และ  $Z_{sys}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $2R_f$  ดังนั้น  $Z_{Th}$  จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $2R_f$  และค่า  $V_{Th}$  ในรูปที่ 9 คือความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของเท้าทั้งสองข้างที่จุด F1 และ F2 ดังนั้นจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ซึ่งกระแสจะไหลผ่านจากมือข้างหนึ่งไปอีกเท้าหนึ่งเพื่อเป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ขณะที่มนุษย์ได้รับแรงดันดังรูปที่ 9 และสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวได้ดังสมการที่ (2.13) [2]

$$E_{step} = I_B (R_B + Z_{Th}) \quad (2.13)$$

ถ้าแทนรัศมีเท้าด้วย  $b$  เมตร (รัศมีของเท้าในที่นี้เท้าแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมีเท่ากับ 0.08 เมตร โดยไม่คำนึงถึงอุปกรณ์เพิ่มความต้านทานเช่น รองเท้า ถุงเท้า เป็นต้น) บนพื้นผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) และนำไปหาค่าของ  $Z_{Th}$  ดังสมการที่ (2.14)

$$Z_{Th} = 6\rho \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) นำไปแทนในสมการที่ (2.13) เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้จะได้ดังสมการที่ (2.15)

$$E_{step} = I_B (1,000 + 6\rho) \quad (2.15)$$

และจากสมการที่ (2.19) และ (2.20) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.15) ก็จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส สูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม ( $E_{step50}$ ) สามารถหาได้ดังในสมการที่ (2.16)

$$E_{step50} = (1,000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.16)$$

และจากสมการที่ (2.19) และ (20) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.15) ก็จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม ( $E_{step70}$ ) สามารถหาได้ดังในสมการที่ (2.17)

$$E_{step70} = (1,000 + 6\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (17)$$

## 2.7 ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์

สมการของปริมาณพลังงานที่ร่างกายมนุษย์สามารถทนได้เมื่อถูกกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายระหว่าง 0.03 ถึง 3.0 วินาทีโดยไม่เกิดอันตรายถึงชีวิตดังสมการที่ (2.18) [1,2,6]

$$S_B = (I_B^2) \times t_s \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) มีเงื่อนไขว่าระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายต้องอยู่ในช่วงเวลาดังกล่าวและสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้ดังสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20)

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2.19)$$

$$k = \sqrt{S_B} \quad (2.20)$$

เมื่อ	$S_B$	คือ	พลังงานที่ร่างกายสามารถทนได้เมื่อถูกกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
	$I_B$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านร่างกาย (แอมป์)
	$t_s$	คือ	ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (วินาที)

สำหรับค่าพลังงานสะสมสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านร่างกายมีค่าของ  $S_B$  เท่ากับ 0.0135 จะได้ค่า  $k$  เท่ากับ 0.116 ซึ่งจากสมการที่ (2.20) ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์น้ำหนัก

เฉลี่ย 50 กิโลกรัมและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายดังสมการที่ (2.21)

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.21)$$

สำหรับพลังงานสะสมสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนในขณะที่มีกระแสไหลผ่านร่างกายมีค่าของ  $S_B$  เท่ากับ 0.0246 จะได้ค่า  $k$  เท่ากับ 0.157 ซึ่งจากสมการที่ (2.19) ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายดังสมการที่ (2.22)

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.22)$$

ซึ่งสมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22) จะมีความปลอดภัยถึง 99.5% และจากสมการที่ (2.16) และ สมการที่ (2.17) เมื่อพิจารณาที่เวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถเปิดวงจรเพื่อตัดกระแสผิดพ่วงจะได้ขนาดกระแสต่ำสุดที่ร่างกายมนุษย์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ขนาดกระแสที่ผ่านร่างกายต่ำสุดและระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกัน (RCD )เปิดวงจร [2]

เวลาดัดกระแส (วินาที)	กระแส (mA)	
	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	
	50	70
0.03	670	906
0.1	367	496
0.5	164	222
1	116	157
2	82	111
3	67	91
15	30	41

## 2.8 การหาค่าความต้านทานดินด้วยสมการของ Schwarz ในดินชั้นเดียว

ความต้านทานดินเป็นองค์ประกอบสำคัญ ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปความต้านทานของระบบส่งและสถานีไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่มีค่าประมาณ  $1 \Omega$  หรือต่ำกว่าและสำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดเล็กหรือในระบบจำหน่ายมีค่าที่ยอมรับได้คือ 1 ถึง  $5 \Omega$  ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่บริเวณนั้น สมการของ Schwarz เนื่องจากสมการของค่าความต้านทานของกราวด์กริด และแท่งรากสายดินสามารถที่จะนำมาหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดที่อยู่ในดินชั้นเดียวได้อย่างถูกต้อง จะแยกจากกันและค่าความต้านทานรวมของระบบต่อลงดิน ยังได้รวมเอาค่าความต้านทานร่วม (Mutual Ground Resistance) ระหว่างกราวด์กริดและแท่งรากสายดินที่ต่อร่วมกันเข้าไปด้วยตามสมการที่ (2.23)

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2.23)$$

เมื่อ	$R_g$	คือ	ความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า (โอห์ม)
	$R_1$	คือ	ความต้านทานของกราวด์กริด (โอห์ม)
	$R_2$	คือ	ความต้านทานของแท่งรากสายดิน (โอห์ม)
	$R_m$	คือ	ความต้านทานร่วม (โอห์ม)

โดยค่าความต้านทานของกราวด์กริดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.24)

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ	$R_1$	คือ	ความต้านทานของระบบกราวด์กริด (โอห์ม)
	$L_c$	คือ	ความยาวทั้งหมดของตัวนำกราวด์กริด (เมตร)



$a'$  คือ  $\sqrt{a2h}$  เมื่อฝังกราวด์กริดที่มีความลึก  $h$  (เมตร)

$2a$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำของกราวด์กริด (เมตร)

$k_1, k_2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด (เมตร)

และค่าความต้านทานของแท่งรากสายดินสามารถหาได้จากสมการที่ (2.25)

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (2.25)$$

และค่าความต้านทานรวมหาได้จากสมการที่ (2.26)

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_R} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (2.26)$$

ค่าความต้านทานรวมของระบบต่อลงดินดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานของแต่ละส่วน แต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการนำเอาค่าความต้านทานของกราวด์กริดและแท่งรากสายดินมาขนานกัน

สามารถหาค่า  $k_1$  และ  $k_2$  ได้จากสมการที่ (2.27) และ สมการที่ (2.28)

$$k_1 = \frac{\sqrt{ab}}{2} (1.84) \left[ \frac{1}{a} \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right) + \frac{1}{b} \ln \left( \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right) + \frac{a}{3b^2} + \frac{b}{3b^2} - \frac{(a^2 + b^2)}{3a^2 b^2} \sqrt{a^2 + b^2} \right] \quad (2.27)$$

$$k_2 = \ln \frac{4(a+b)}{b} + 2k_1 \frac{(a+b)}{\sqrt{ab}} - \ln \frac{\left( a + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} \right)}{\frac{b}{2}} - \frac{1}{2} \ln \frac{\frac{b}{2} + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2}}{-\frac{b}{2} + \sqrt{a^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2}} \quad (2.28)$$

เมื่อ $R_2$	คือ ความต้านทานของแท่งรากสายดิน ( $\Omega$ )
$L_r$	คือ ความยาวของแท่งรากสายดินแต่ละแท่ง (เมตร)
$L_R$	คือ ความยาวของแท่งรากสายดินทั้งหมด (เมตร)
$n_R$	คือ จำนวนแท่งรากสายดินในพื้นที่กราวด์กริดขนาด A
$2b$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งรากสายดิน (เมตร)

## 2.9 คำนวณความต้านทานดินด้วยสมการของ Schwarz ในดินสองชั้น

ในกรณีของดินสองชั้นที่ดินชั้นบน ( $\rho_1$ ) ซึ่งมีความชื้นหนา ( $H$ ) และมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน สูงกว่าดินชั้นล่าง ( $\rho_2$ ) เราจะสามารถหาค่าความต้านทานรวมของระบบต่อลงดินได้ โดยใช้สมการที่ได้แสดงไว้ในมาตรฐาน IEEE Std 80-2000 (Schwarz's equations) คือ

ค่าความต้านทานของกราวด์กริด หาได้จากสมการที่ (2.30)

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{a} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (2.30)$$

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน หาได้จากสมการที่ (2.31)

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} \left( \sqrt{n_R} - 1 \right)^2 \right] \quad (2.31)$$

และค่าความต้านทานร่วม หาได้จาก สมการที่ (2.32)

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_R} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (2.32)$$

กรณีทีกราวด์กริดฝังอยู่ในดินชั้นบน และบางส่วนของแท่งรากสายดินปักอยู่ในดินชั้นบนและบางส่วนอยู่ในดินชั้นล่าง โดยที่ส่วนบนของแท่งรากสายดินอยู่เสมอกับผิวดินจะใช้

$$\rho_a = \frac{L_R (\rho_1 \rho_2)}{\rho_2 H + \rho_1 (L_R - H)} \quad (2.33)$$

ในกรณีที่ส่วนบนของแท่งรากสายดินอยู่ที่ความลึกเดียวกันกับกราวด์กริด จะใช้

$$\rho_a = \frac{L_R (\rho_1 \rho_2)}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_R + h - H)} \quad (2.34)$$

## 2.10 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด (Maximun grid current, $I_G$ )

กระแสกริดสูงสุดคือกระแสผิดพลาดที่ไหลลงสู่ดินโดยผ่านระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยค่ากระแสกริดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างค่าได้แก่ ค่ากระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้น ตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด การเชื่อมกับระบบการต่อลงดินภายนอกสำหรับค่ากระแสกริดที่ใช้ในการออกแบบระบบกราวด์กริดนี้ต้องพิจารณาจากค่ากระแสผิดพลาดแบบไม่สมมาตรคือการเกิดความผิดพลาดระหว่างสายเฟสกับดิน (Single Line to Ground Fault) หรือการเกิดความผิดพลาดระหว่างสายเฟสกับสายเฟส (Double Line to Ground Fault) [2-3]

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.35)

$$I_G = D_f I_g \quad (2.35)$$

สำหรับกระแสกริดสมมาตร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.36)

$$I_g = S_f I_f \quad (2.36)$$

$D_f$  ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาการเกิดความผิดพลาดก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน โดยสามารถคำนวณค่า  $D_f$  และ  $T_a$  ได้จากสมการที่ (2.37) และสมการที่ (2.38) ตามลำดับ

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad (2.37)$$

$$T_a = \frac{X}{\omega R} \quad (2.38)$$

เมื่อ	$I_G$	คือ กระแสกริดสูงสุด หน่วย (แอมป์)
	$D_f$	คือ ดีกรีเมนต์แฟคเตอร์ (Decrement Factor)
	$I_g$	คือ กระแสกริดสมมาตร หน่วย (แอมป์)
	$S_f$	คือ ดิวชันแฟคเตอร์ของกระแสผิดพลาด (Division Fractor)
	$I_f$	คือ กระแสผิดพลาด หน่วย (แอมป์)
	$T_a$	คือ DC Offset Time Constant
	$t_f$	คือ ช่วงเวลาการเกิดกระแสผิดพลาด(วินาที)
	$X$	คือ รีแอกแตนส์ของ (โอห์ม)
	$R$	คือ รีซิสแตนส์ของ (โอห์ม)
	$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

## 2.11 การเพิ่มขึ้นของกราวด์กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้และแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุด

การเพิ่มขึ้นของกราวด์ (Ground Potential Rise) หาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดดังสมการที่ (2.39)

$$GPR = I_G R_g \quad (2.39)$$

เมื่อ	$GPR$	คือ แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นของกราวด์ (โวลต์)
	$I_G$	คือ ค่ากระแสกริดสูงสุด (แอมป์)
	$R_g$	คือ ความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า (โอห์ม)

ถ้าการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียลมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าการเพิ่มขึ้นของกราวด์มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมชของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่มนุษย์สามารถทนได้

## 2.12 แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด

แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด เป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ต้องพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด เพื่อนำมาตรวจสอบความปลอดภัยของการออกแบบระบบการต่อลงดิน แรงดันไฟฟ้าเมชตามมาตรฐาน IEEE Std 80-2000 (Design of grounding system) นั้นจะให้ความปลอดภัยและเป็นการคิดผลกระทบของตัวแปรทุกตัว ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.40)

$$E_m = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_M} \quad (2.40)$$

เมื่อ	$E_m$	คือ แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (V)
	$K_m$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริด สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Spacing Factor for Mesh Voltage)
	$K_i$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากลักษณะรูปทรงของกราวด์กริด (Correction Factor for Grid Geometry)
	$L_M$	คือ ความยาวของตัวนำทั้งหมดของกราวด์กริดและความยาวทั้งหมดของแท่งรากสายดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (m)

สำหรับตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.41)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (2.41)$$

- เมื่อ
- $h$  คือ ความลึกของกราวด์กริด (เมตร)
  - $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำของกราวด์กริด (เมตร)
  - $D$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (เมตร)
  - $K_{ii}$  คือ สัมประสิทธิ์เนื่องจากลักษณะการวางกราวด์กริด (Corrective Weighting Factor)
  - $K_h$  คือ สัมประสิทธิ์เนื่องจากความลึกของการฝังตัวนำของกราวด์กริด (Corrective Weighting Factor)
  - $n$  คือ แฟคเตอร์เนื่องจากรูปทรงของกราวด์กริดซึ่งมีองค์ประกอบของ  $n_a, n_b, n_c, n_d$  (Geometric Factor)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากลักษณะการวางกราวด์กริด กรณีไม่มีแท่งดินเชื่อมไม่ถึงกัน หรือแท่งกราวด์กริดมีแท่งดินเชื่อมต่ออยู่จำนวนน้อย แต่ไม่เชื่อมต่อบริเวณพื้นที่โดยรอบกราวด์กริดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.42)

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (2.42)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากลักษณะการวางกราวด์กริด กรณีที่มีแท่งดินเชื่อมต่อบริเวณรอบนอกของกราวด์กริด หรือบริเวณมุมของกราวด์กริด ตลอดพื้นที่ที่สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.43)

$$K_{ii} = 1 \quad (2.43)$$

สำหรับการคำนวณหาค่า  $K_h$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.44)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $h_0$  คือ ความลึกอ้างอิงของกราวด์กริดมีค่าเท่ากับ 1 เมตร

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากลักษณะรูปทรงของกราวด์กริด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.45)

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (2.45)$$

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (2.46)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} \quad (2.47)$$

สำหรับค่า  $K_i$  นั้นเกี่ยวกับจำนวนตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในกราวด์กริดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.30) โดย  $n_b$  เท่ากับ 1 ถ้ากราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส  $n_c$  เท่ากับ 1 ถ้ากราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า  $n_d$  เท่ากับ 1 ถ้ากราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปตัวแอลและถ้าเป็นในกรณีอื่นค่าของ  $n_b$   $n_c$  และ  $n_d$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.48) สมการที่ (2.49) และสมการที่ (2.50)

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (2.48)$$

$$n_c = \left( \frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad (2.49)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (2.50)$$

เมื่อ	$L_C$	คือ	ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน (m)
	$L_p$	คือ	เส้นรอบรูปของกราวด์กริด (m)
	$L_x$	คือ	ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง x (m)
	$L_y$	คือ	ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง y (m)
	$D_m$	คือ	ระยะห่างมากที่สุดระหว่างจุดสองจุดใดๆ บนกราวด์กริด (m)
	$n_b$		สำหรับกริดที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่า n จะเท่ากับ 1
	$n_c$		สำหรับกริดที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่า n จะเท่ากับ 1
	$n_d$		สำหรับกริดที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับรูปตัว L ค่า n จะเท่ากับ 1

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดกราวด์กริดที่ไม่มีแท่งรากดินเชื่อมต่อ หรือมีแท่งดินต่อจำนวนน้อยสามารถคำนวณความยาวทั้งหมดแท่งรากสายดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด ( $L_M$ ) ได้ดังสมการที่ (2.51)

$$L_M = L_C + L_R \quad (2.51)$$

และ สำหรับกราวด์กริดที่มีแท่งรากสายดินที่มุม ที่เส้นรอบกราวด์กริด หรือกระจายทั่วพื้นที่กราวด์กริด สามารถคำนวณค่าของความยาวของตัวนำทั้งหมดของกราวด์กริดและความยาวทั้งหมดของแท่งรากสายดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด ( $L_M$ ) ได้ดังสมการที่ (2.52)

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (2.52)$$

เมื่อ	$L_r$	คือ	ความยาวของแท่งรากสายดินแต่ละแท่ง (เมตร)
	$L_R$	คือ	ความยาวของแท่งรากสายดินทั้งหมด(เมตร)



### 2.13 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step Voltage , $E_s$ ) [1,2]

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย เป็นการประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยโดยการเปรียบเทียบ ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงกับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.53)

$$E_s = \frac{\rho_a K_i K_s I_G}{L_S} \quad (2.53)$$

- เมื่อ  $E_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (V)  
 $K_s$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริด สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Spacing Factor for Step Voltage)  
 $L_S$  คือ ความยาวตัวนำทั้งหมดของกราวด์กริดและความยาวทั้งหมดของแท่งราก สายดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (m)

สำหรับการหาค่าของ  $K_s$  นั้นสามารถหาได้ด้วยสมการที่ (2.54) แต่สมการนี้มีข้อจำกัดของกราวด์กริดโดยที่ค่าความลึกที่ใช้ในการฝังกราวด์กริดนั้นควรอยู่ในช่วง 0.25 เมตร ถึง 2.5 เมตร

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (2.54)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าของ  $L_S$  ความยาวยังตัวนำทั้งหมดของกราวด์กริดและความยาวทั้งหมดของตัวนำ ที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.55) ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีแท่งรากสายดินหรือมีเชื่อมต่ออยู่จำนวนน้อยกับกราวด์กริดแต่ไม่เชื่อมต่อบริเวณมุม

$$L_S = 0.75L_C \quad (2.55)$$

สำหรับการคำนวณค่า  $L_S$  กรณีที่กราวด์กริดมีแท่งรากสายดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบนอกของกราวด์กริด หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบนอกและตลอดพื้นที่ของกราวด์กริดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.56)

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (2.56)$$

## 2.14 การประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบการต่อลงดิน

การประเมินความปลอดภัยระหว่างแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Grid potential rise ) กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด ที่มนุษย์สามารถทนได้ ได้จากสมการที่ (2.57) [1]

$$GPR < E_{touch} \quad (2.57)$$

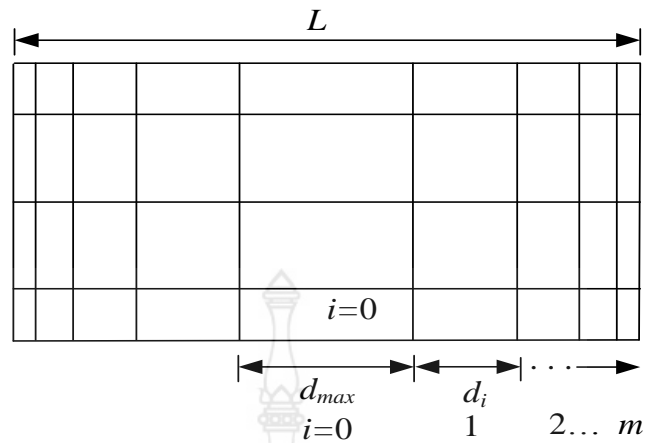
การประเมินความปลอดภัยระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุด กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และการประเมินความปลอดภัยระหว่างแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ จากสมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.59)

$$E_m < E_{touch} \quad (2.58)$$

$$E_s < E_{step} \quad (2.59)$$

## 2.15 การจัดวางตัวนำ

ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุด ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวนำที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละด้านถ้าเป็นจำนวนคู่ระยะห่างระหว่างตัวนำจะมีเพียงข้างเดียว แต่เมื่อจำนวนตัวนำที่มีระยะห่างไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละด้านเป็นจำนวนคี่ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุดของตาข่ายมีจำนวนคู่ โดยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำที่เท่ากัน สำหรับกรณีตัวนำที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคู่ ตามแนวแกน x สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.68)



รูปที่ 10 ลักษณะการวางตัวนำ

ที่มา : อรรถ พยอมหอม. การประเมินสมรรถนะด้านป้องกันฟ้าผ่าและกฎเกณฑ์การออกแบบ  
ด้านความปลอดภัยสำหรับสายส่งย่อยสายพylonและสถานีจำหน่ายไฟฟ้า. หน้า 242

$$d_{\max} = \frac{L_x(1-C)}{1+C - \left[ 2C^{\left[ \frac{n_y}{2} \right] + 1} \right]} \quad (2.68)$$

ตามแนวแกน y สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.69)

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{1+C - \left[ 2C^{\left[ \frac{n_x}{2} \right] + 1} \right]} \quad (2.69)$$

สำหรับกรณีตัวนำที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคี่ ตามแนวแกน x สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.70)

$$d_{\max} = \frac{L_x(1-C)}{2 \left[ 1 - C^{\left[ \frac{n_y-1}{2} \right]} \right]} \quad (2.70)$$

ตามแนวแกน  $y$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.71)

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{2 \left[ 1 - C^{\left[ \frac{n_x-1}{2} \right]} \right]} \quad (2.71)$$

สำหรับระยะห่างระหว่างตัวนำของช่องย่อยลำดับที่  $i$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.72)

$$d_i = d_{\max} C^i \quad (2.72)$$

สำหรับจำนวนช่องย่อย  $i = 0$  ถึง  $m$  (ดูรูปที่ 10)

เมื่อ

$d_i$	คือ	ระยะห่างระหว่างของช่องย่อยลำดับที่ $i$ หน่วย เมตร
$d_{\max}$	คือ	ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุด หน่วย เมตร
$i$	คือ	ลำดับของช่องย่อยของตะแกรงตาข่าย
$L_x$	คือ	ความยาวตัวนำของพื้นที่ตามแนวแกน $x$
$L_y$	คือ	ความยาวตัวนำของพื้นที่ตามแนวแกน $y$
$C$	คือ	อัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม

จำนวนตัวนำที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคู่ ตามแนวแกน  $x$  และตามแนวแกน  $y$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.73) สมการที่ (2.74)

$$m = \frac{n_y}{2} - 1 \quad (2.73)$$

$$m = \frac{n_x}{2} - 1 \quad (2.74)$$

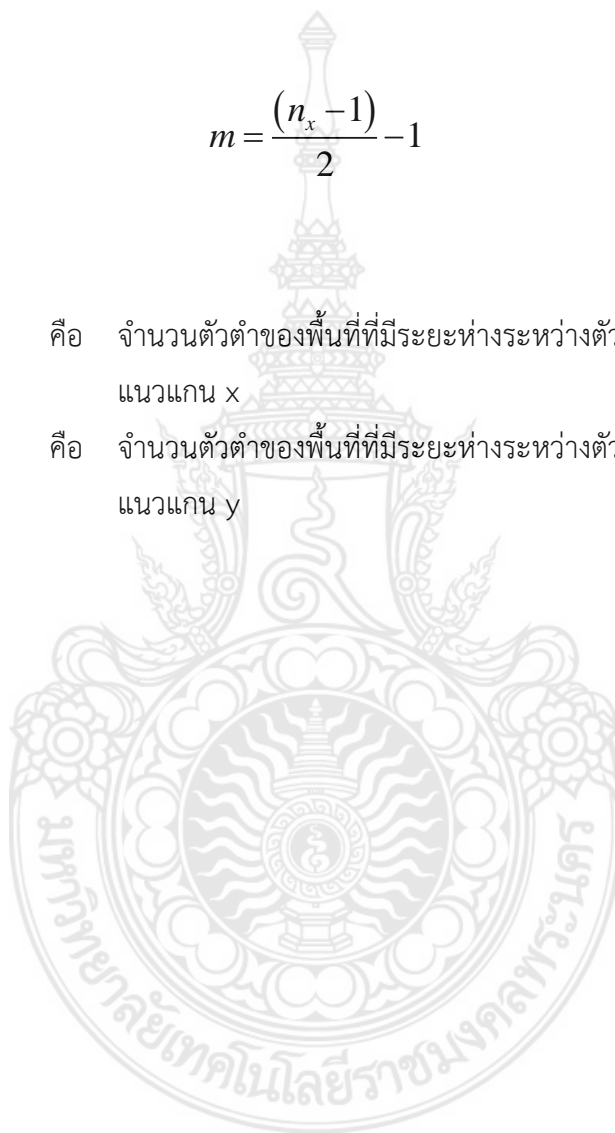
จำนวนตัวนำที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคี่ ตามแนวแกน  $x$  และตามแนวแกน  $y$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.75) สมการที่ (2.76)

$$m = \frac{(n_y - 1)}{2} - 1 \quad (2.75)$$

$$m = \frac{(n_x - 1)}{2} - 1 \quad (2.76)$$

เมื่อ

- $n_x$  คือ จำนวนตัวนำของพื้นที่ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน  $x$
- $n_y$  คือ จำนวนตัวนำของพื้นที่ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน  $y$


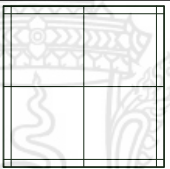
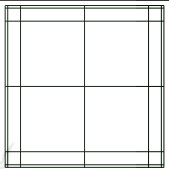
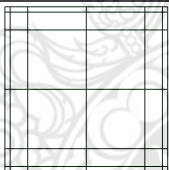
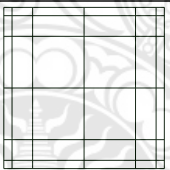
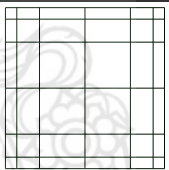
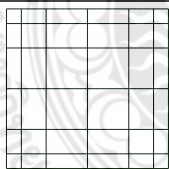
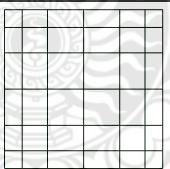
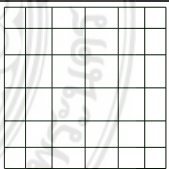
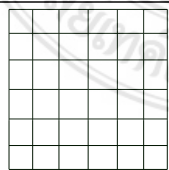
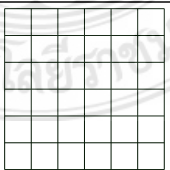


## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

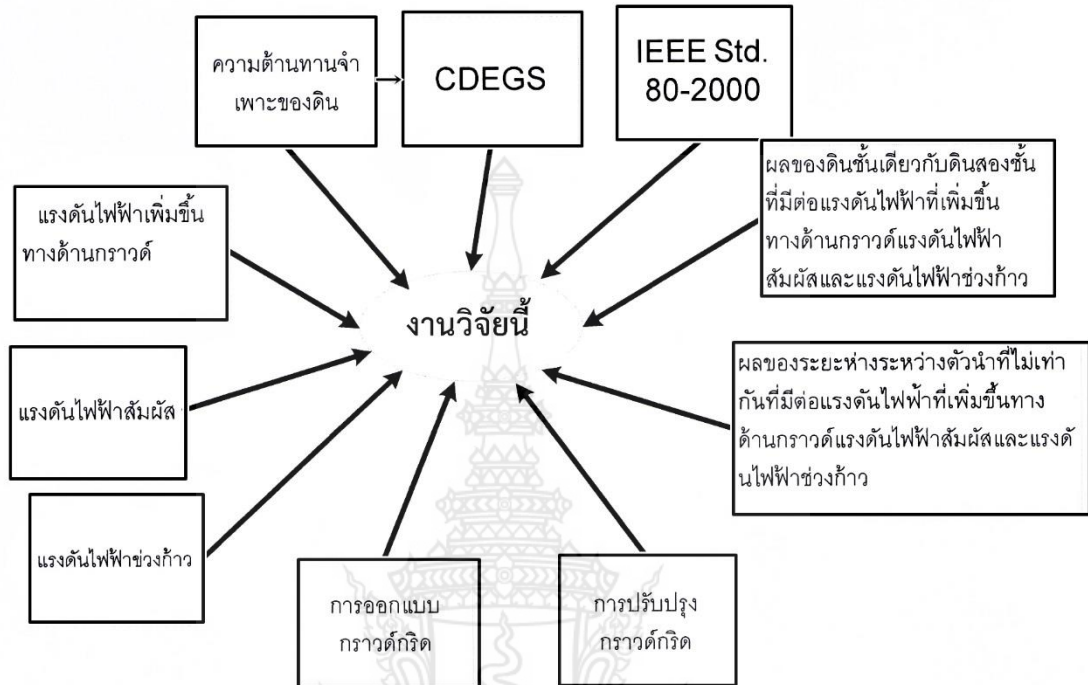
#### 3.1 บทนำ

การออกแบบกราวด์กริดจะมีทั้งหมด 3 ขนาดแบ่งเป็นพื้นที่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร, 20x20 ตารางเมตร และ 30x30 ตารางเมตร ที่ดินชั้นเดียวและดินสองชั้นโดยมีการวางที่ไม่เท่ากันตามค่าสัดส่วนการบีบอัดตั้งแต่ 0.0 – 1.0 ดังแสดงดังรูปที่ 3.1

C=0.0	C=0.1	C=0.2
		
C=0.3	C=0.4	C=0.5
		
C=0.6	C=0.7	C=0.8
		
C=0.9	C=1.0	
		

รูปที่ 3.1 กราวด์กริดรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สัดส่วนการบีบอัดค่าต่าง ๆ

### 3.2 กรอบแนวความคิด



รูปที่ 3.2 กรอบแนวคิดของปริญญานิพนธ์

กรณีศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1

ความต้านทานจำเพาะของดินเป็นดินชั้นเดียว 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางเมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเมตร

กรณีที่ 2

ดินสองชั้นโดยที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ดินชั้นล่าง 100 โอห์ม-เมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางเมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเมตร

### กรณีที่ 3

ดินสองชั้นโดยที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะของดิน 100โอห์ม-เมตร ดินชั้นล่าง 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางเมตร

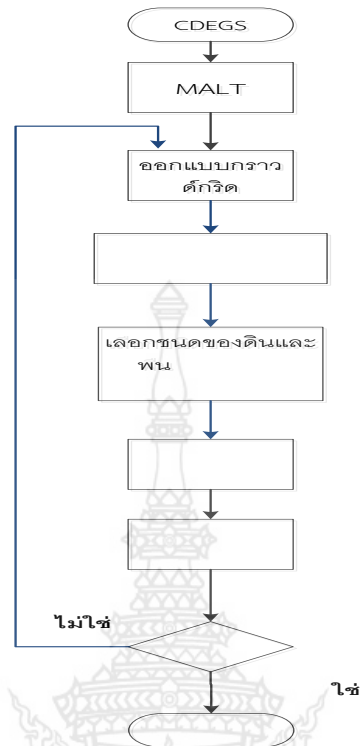
พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเมตร

พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเมตร

### 3.3 โปรแกรม CDEGS

โปรแกรม (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure) ตัวย่อ CDEGS เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของดิน และสามารถวิเคราะห์ค่าดินต่างๆ และสามารถสร้างแบบจำลองของกราวด์กริดได้หลายรูปแบบ ในการจำลองออกแบบกราวด์กริดโปรแกรม CDEGS จะวิเคราะห์ค่าได้ทั้งหมด 3 ค่า ซึ่งได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และสามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟที่บอกถึงบริเวณของแรงดันที่มีค่าสูงได้

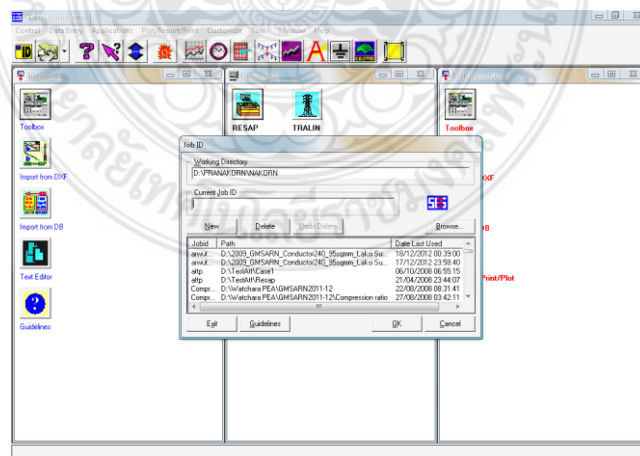




รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการการทดลองผลใช้โปรแกรม CDEGS

### 3.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม CDEGS

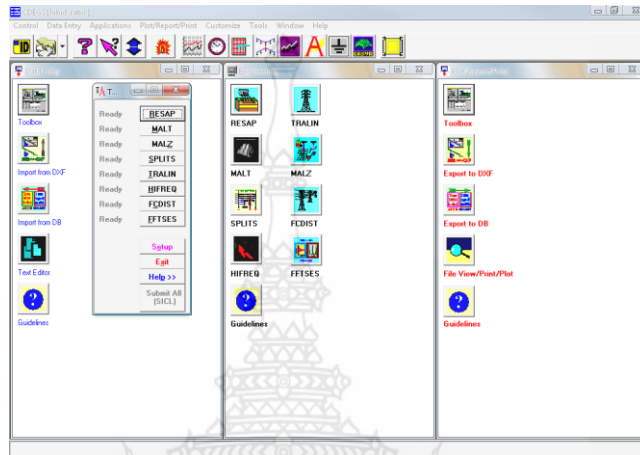
#### 3.4.1 เปิดโปรแกรม CDEGS



รูปที่ 3.4 การเปิดโปรแกรมและตั้งชื่อไฟล์งาน

ทำการเปิดโปรแกรม CDEGS และทำการตั้งชื่อ และตำแหน่งที่จะจัดเก็บข้อมูลที่ได้จาก  
ประมวลผล โดยการกดเข้าไปที่กดเข้าไป ID

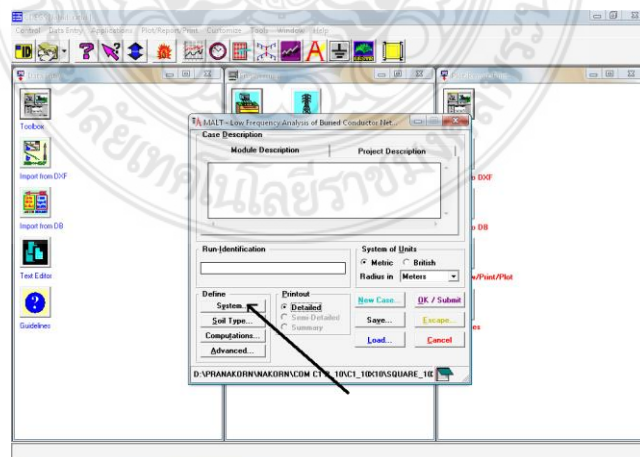
### 3.4.2 คลิกที่ toolbox



รูปที่ 3.5 กดเข้า MALT เพื่อเข้าไปในโปรแกรม

ขั้นตอนต่อมาเพื่อตั้งชื่อไฟล์เรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ toolbox จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างต่าง  
ขึ้นมาจากนั้นให้เลือกที่คำว่า MALT เพื่อเข้าไปในขั้นตอนต่อไป

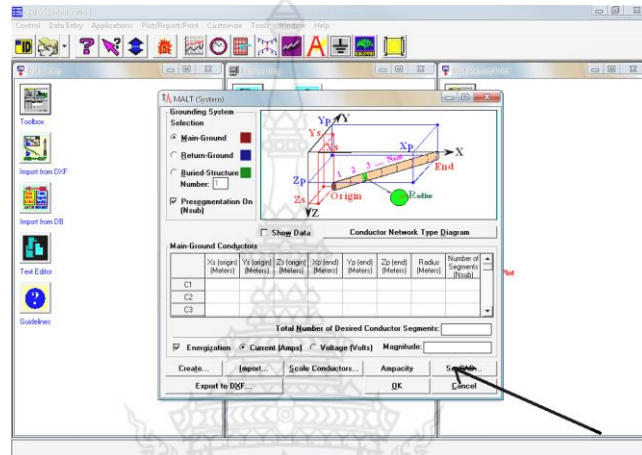
### 3.4.3 เมื่อกดที่ MALT แล้วจากนั้นคลิกที่ System



รูปที่ 3.6 การเข้าไปในระบบการตั้งค่า

เมื่อคลิกที่คำว่า MALT จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมาให้คลิกที่ System เพื่อที่จะเข้าไปออกแบบ

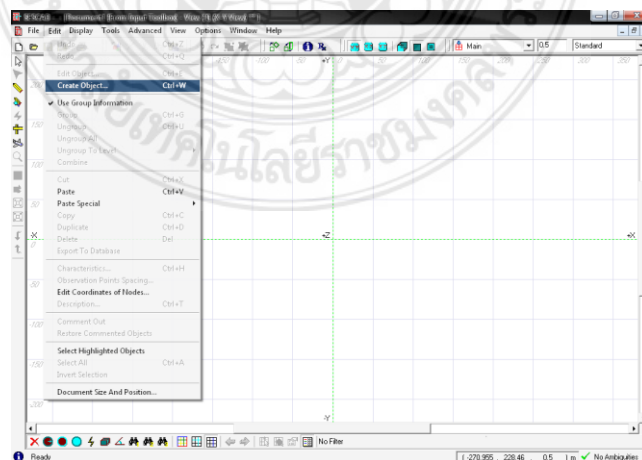
### 3.4.4 จำลองกราวด์กริดโดยคลิกที่ SesCAD



รูปที่ 3.7 การเข้าแบบจำลองกราวด์กริด

ขั้นตอนต่อมาเมื่อกดเข้า System จะปรากฏหน้าต่างต่างขึ้นมาให้คลิกคำว่า SesCAD เพื่อเข้าไปทำจำลองรูปแบบกราวด์กริด

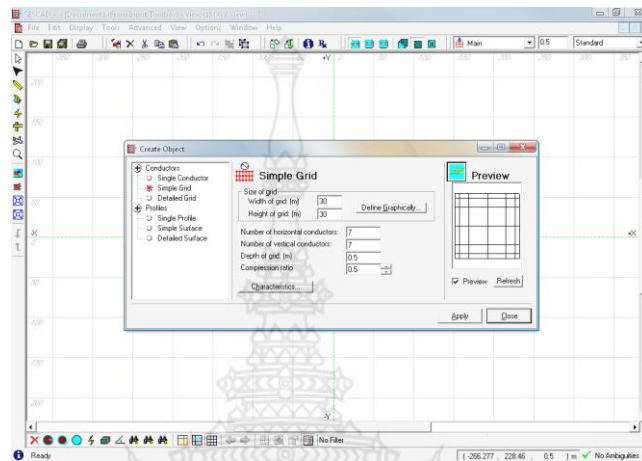
### 3.4.5 เลือก Create Object



รูปที่ 3.8 ตั้งค่าหัวข้อ

ขั้นตอนต่อมาพกดเข้า SesCAD จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้ไปคลิกที่ Edit แล้วทำการเลือก Create Object เพื่อจำลองรูปแบบกรวดกริด

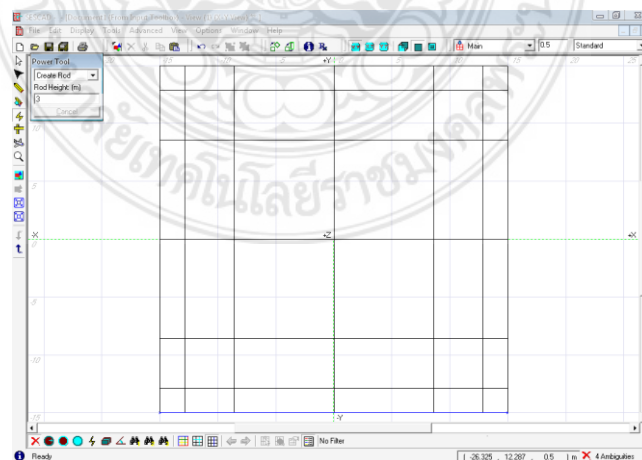
### 3.4.6 การออกแบบการวางตัวนำที่สัดส่วนการบีบอัดโดย



รูปที่ 3.9 เลือกป้อนค่ากรวดกริด

ขั้นตอนมา ทำการป้อนค่าที่พื้นที่ 30x30 ตารางเมตรที่ช่อง Compression ratio ป้อนค่า สัดส่วนการบีบอัด 0.5

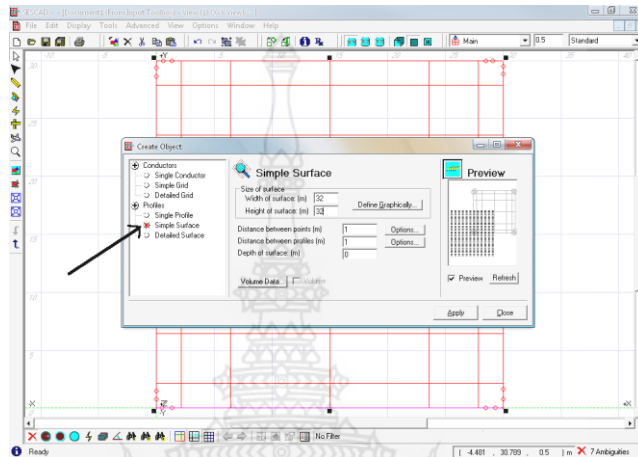
### 3.4.7 คลิกที่ power tool ตามที่ลูกขรที่เพื่อทำการจำลอง แท่งหลักดิน



รูปที่ 3.10 การสร้างแบบจำลองแท่งหลักดิน

ขั้นตอนต่อมา คลิกที่ power tool เพื่อทำการสร้างแบบจำลองแห่งหลักดินลงไปตามต้องการ

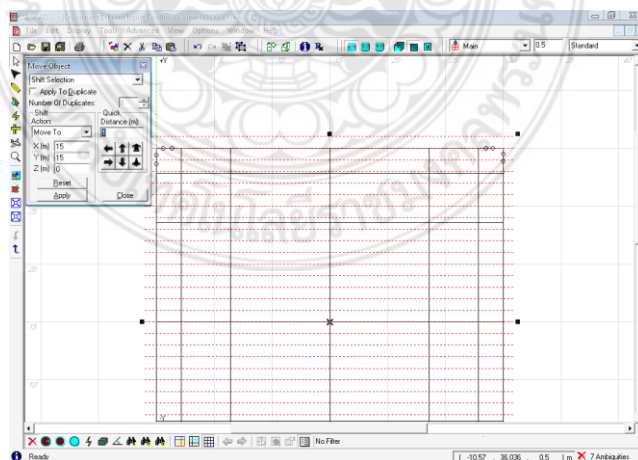
3.4.8 เลือกพื้นที่ที่ต้องการจะคำนวณโดยการเลือก Create Object ดั้งขั้นตอนข้างต้น จากนั้นเลือก Simple Surface ดังลูกศรชี้ แล้วทำการป้อนค่าที่ต้องการ



รูปที่ 3.11 เลือก Simple Surface การป้อนค่าที่ต้องการ

เมื่อสร้าง แห่งหลักดิน เรียบร้อยแล้วก็จะต้องเลือกพื้นที่ที่ต้องการจะคำนวณโดยการเลือก Create Object ดั้งขั้นตอนข้างต้น จากนั้นเลือก Simple Surface ทำการป้อนค่าที่ของ Size surface เท่ากับ 32

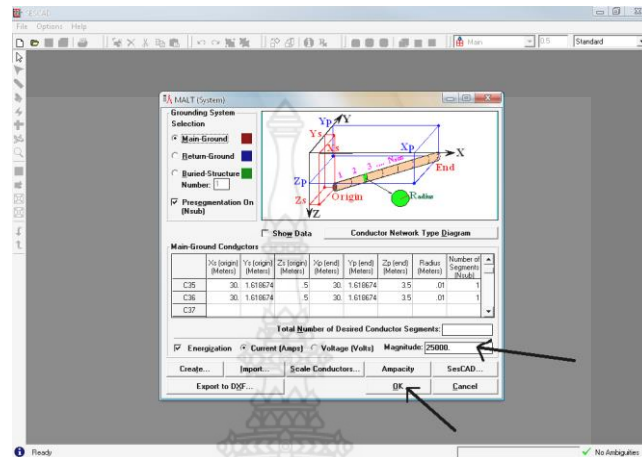
3.4.9 การจัดตำแหน่งให้ได้ตามที่ต้องการแล้วทำการบันทึกค่า



รูปที่ 3.12 การจัดตำแหน่ง

ทำการตำแหน่งโพลตามที่ต้องการแล้วทำการบันทึกค่า

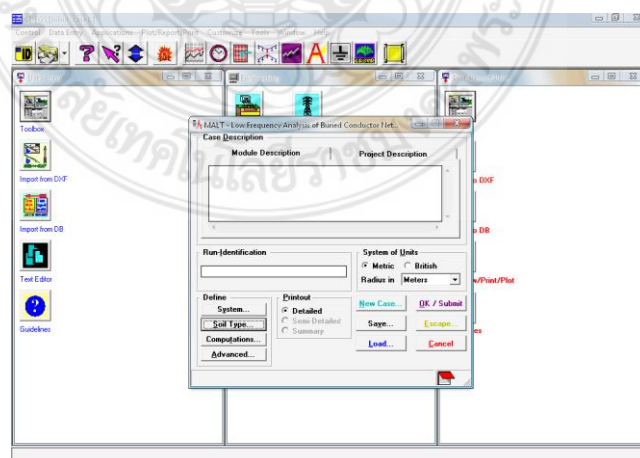
### 3.4.10 ทำการป้อนกระแสฟอลต์ จากนั้นกดปุ่ม OK



รูปที่ 3.13 การป้อนกระแสฟอลต์

ขั้นตอนต่อมาทำการป้อนกระแสฟอลต์เข้าไปในระบบ 25000 kv

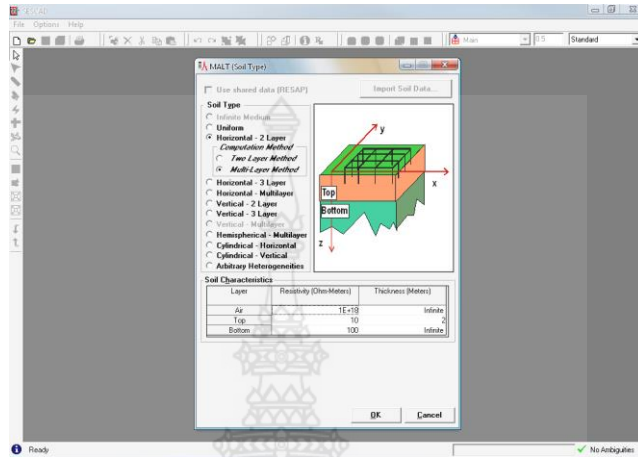
### 3.4.11 ป้อนค่าของดิน



รูปที่ 3.14 การป้อนค่าของดิน

เมื่อจำลองเมื่อทำการจำลองกราวด์กริดเสร็จแล้ว ต่อมาเป็นการป้อนค่าดินโดยคลิกที่ Soil Type

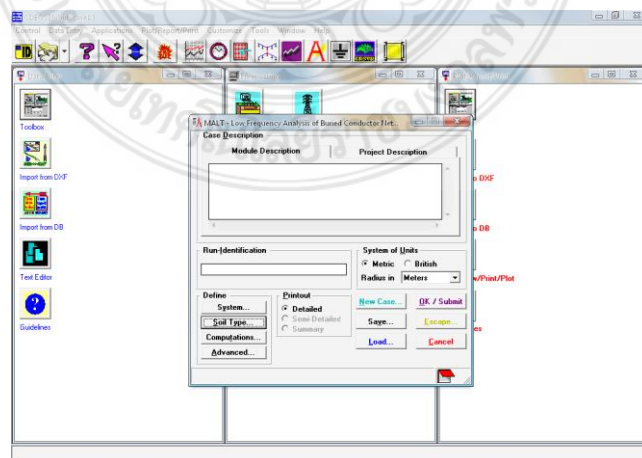
### 3.4.12 เลือกชนิดของดินและพื้นที่ที่ต้องการประมวลผล



รูปที่ 3.15 การป้อนค่าตามที่ต้องการจำลองผล

ขั้นตอนต่อมา ทำการเลือกลักษณะของดินแล้วป้อนค่าดินตามที่ต้องการจำลองผล

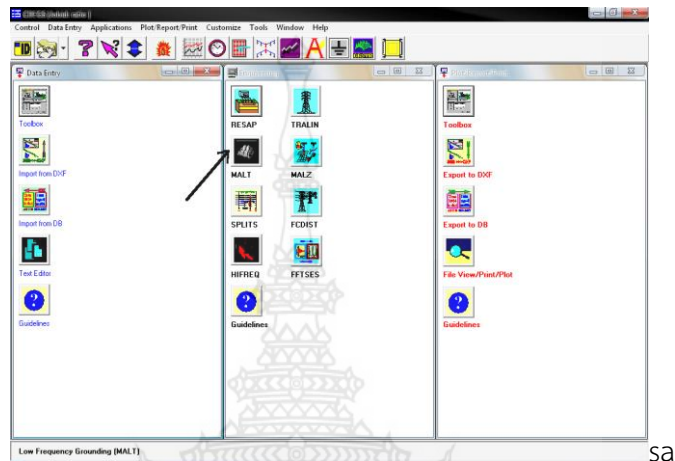
### 3.4.13 เมื่อป้อนค่าของดินเสร็จเรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม OK/Submit



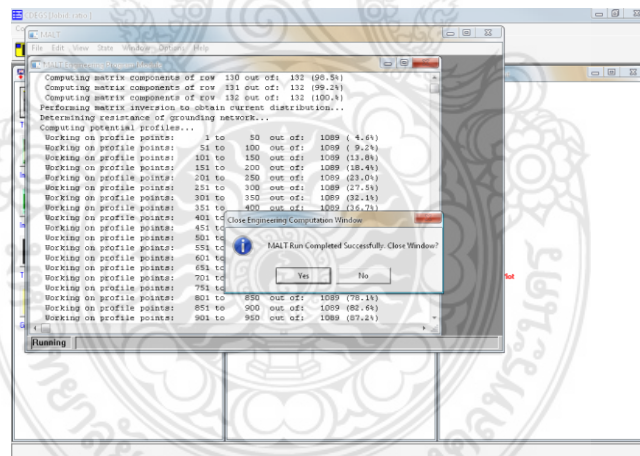
รูปที่ 3.16 กด OK เมื่อป้อนค่าดินเสร็จ

เมื่อทำการจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม OK/Submit

### 3.4.14 ประมวลผลโดยคลิกที่ MALT เพื่อทำการประมวลผล



รูปที่ 3.17 กด MALT เพื่อประมวลผล

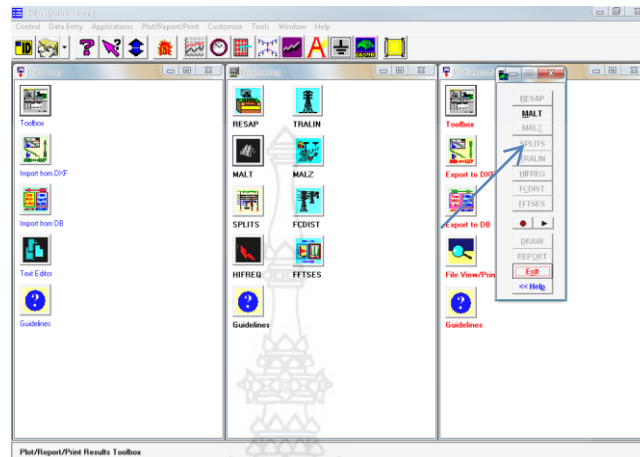


รูปที่ 3.18 การ RUN ผล

ขั้นตอนต่อมา ให้กดคำว่า MALT ซองที่ 2 เพื่อทำการประมวล รอนจนเสร็จ ดังรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.18



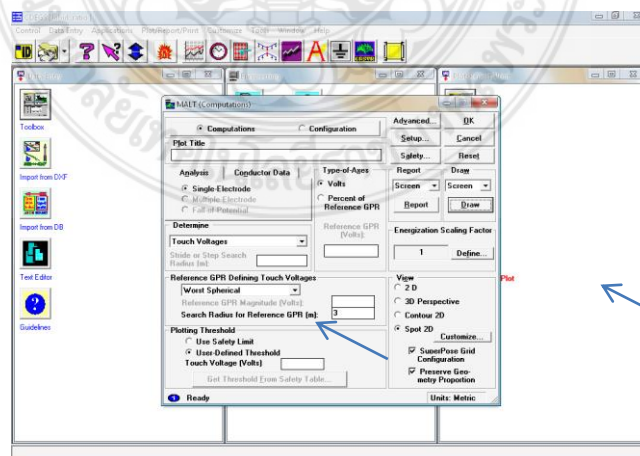
3.4.15 แสดงผลเมื่อรันผลเสร็จให้กดที่ tool box ตามลูกศร แล้วกด MALT เพื่อทำการแสดงผล



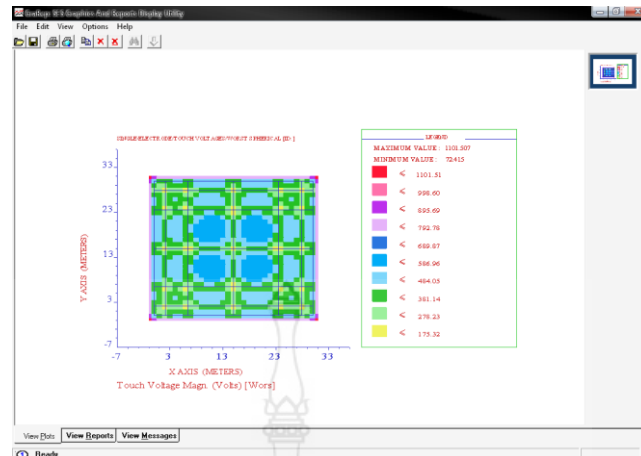
รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการเข้าเพื่อการแสดงผล

เมื่อประมวลผลเสร็จเรียบร้อยให้กดว่า MALT ช่องที่ 3 เพื่อทำการแสดงผล

3.4.16 กด Draw เพื่อแสดงผลกราฟ และเมื่อต้องการดูค่าอื่นให้เปลี่ยนที่ Determine



รูปที่ 3.20 การเลือกDetermine



รูปที่ 3.21 ค่า Touch

เมื่อกด ว่า MALT จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้กด Determine เลือกค่าที่ต้องการแสดงผลตามที่ต้องการ และหลังจากนั้นให้ไปกดที่ Draw เพื่อแสดงผล ดังรูปที่ 3.20 และ รูปที่ 3.21

จากผลการทดลองที่แสดงมาในขั้นตอนเป็นการยกตัวอย่างกรณีที่ 1 พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ที่ดินชั้นเดียวความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ซึ่งรูปที่ 3.21 เป็นการแสดงผลค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่เกิดขึ้นโดยสัดส่วนการบีบอัด 0.5 จากรูปที่ 3.21 ทางด้านซ้าย โข้วแรงดันไฟฟ้าในระดับต่างๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1101.31 V แถบสีจะโชว์เป็นสีแดงเพื่อให้รู้ว่าบริเวณนั้นมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูง ซึ่งกรณีที่เหลือก็จะทำการทดลองคล้ายๆกัน

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม CDEGS โดยค่าที่วิเคราะห์มีทั้งหมดสามค่าคือ แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (GPR) แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์จะมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากกราฟทั้งนี้เนื่องจาก ค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวนั้นสามารถอ่านค่าได้โปรแกรม CDEGS โดยตรง เพราะมีความละเอียดมากกว่า โดยดูได้จากค่าเฉลี่ยของพื้นที่ในสีนั้นๆ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดจะใช้ค่าสูงสุดที่ได้จากกราฟ เนื่องจากผลของโปรแกรม CDEGS ไม่มีค่าทั้งสองค่านี้ จึงจำเป็นต้องใช้ค่าจากกราฟในการวิเคราะห์

เนื่องจากว่ากราฟในกรณีย่อยของแต่ละกรณีมีลักษณะคล้ายกัน ต่างกันเพียงค่าของแรงดันไฟฟ้าในสีต่างๆเท่านั้น แต่รูปร่างของกราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกันจึงนำเสนอกราฟเพียงกราฟที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และ ต่ำสุดของแต่ละกรณีโดยกราฟที่จะแสดงนั้นแบ่งเป็น กราฟของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติและสามมิติ แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว สร้างแบบจำลองของกราวด์กริดพื้นที่ขนาด 10x10, 20x20, 30x30 ตารางเมตร ที่ดินชั้นเดียวมีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ดินสองชั้นที่ความต้านจำเพาะของดินชั้นบน 10 โอห์ม-เมตร ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 100 โอห์ม-เมตร และที่ดินสองชั้นที่ความต้านจำเพาะของดินชั้นบน 100 โอห์ม-เมตร ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 10 โอห์ม-เมตร โดยจะใช้โปรแกรม CDEGS ทำการทดลองหาค่าสัดส่วนการบีบอัด หรือ compression ratio (OCR) ที่ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 ซึ่งจะพิจารณาการเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Ground Potential Rise,GPR) ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ให้ค่าต่ำสุด โดยที่ฝังอยู่ในดินที่ระดับความลึก 0.5 เมตร

## 4.2 กรณีศึกษา

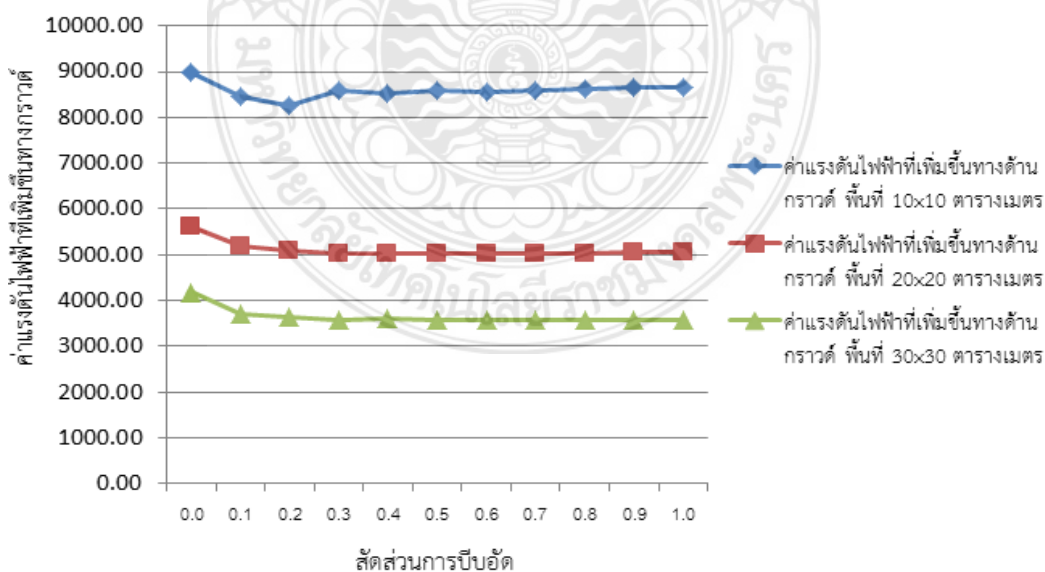
กรณีที่ 1. ดินชั้นเดียวที่ความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ที่พื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ30x30 ตารางเมตร โดยมีความลึกของกราวด์กริด 0.5 เมตร ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทำการปรับเปลี่ยนค่าของสัดส่วนการบีบอัดของตัวนำกราวด์กริด ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยใช้ทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (GPR) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,985 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8,249 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 ดังรูปที่ 4.1

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,625 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5,011 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.7 ดังรูปที่ 4.1

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4,182 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางกราวด์มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 3,557 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 และสัดส่วนการบีบอัดที่ 0.9 ดังรูปที่ 4.1



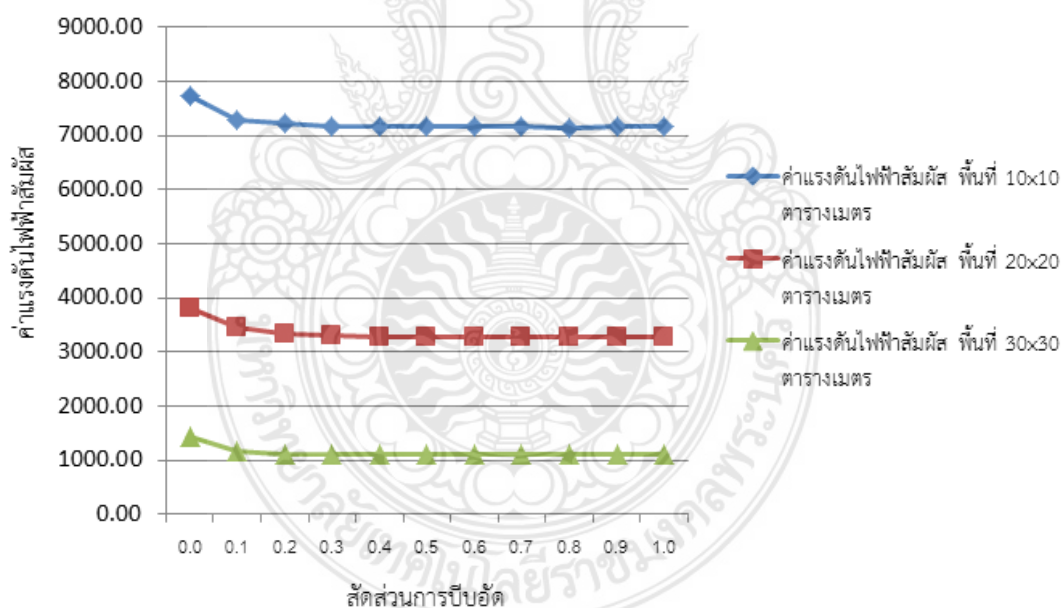
รูปที่ 4.1 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 7,742 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 7,150 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.8 ดังรูปที่ 4.2

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 3,814 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 3,268 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.8 ดังรูปที่ 4.2

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 1,430 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,098 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.4 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของสัดส่วนการปิด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

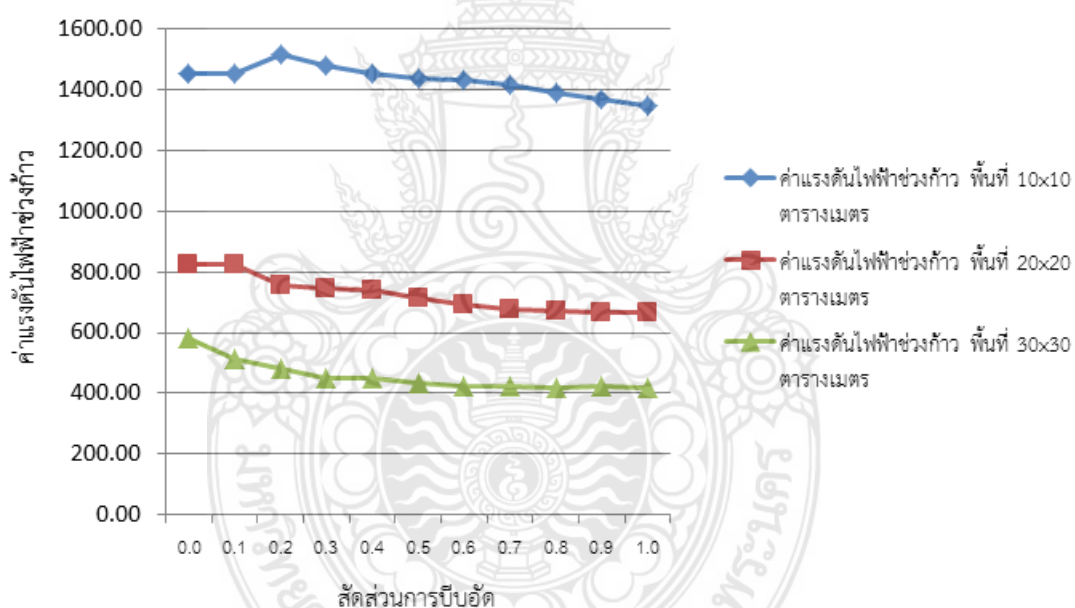
บนรูปแบบกราฟดัดกริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 1,516 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,350 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.3

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 825 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 665 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.3

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 583 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 420 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.8 และที่สัดส่วนการبيبัด 0.9 ดังรูปที่ 4.3

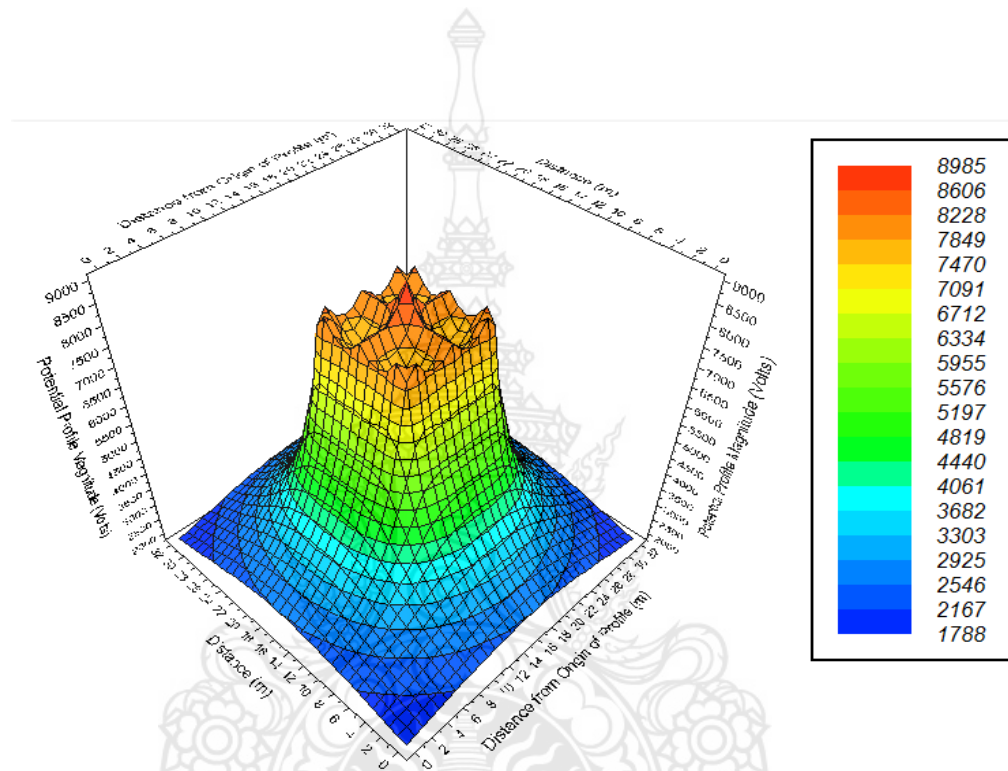


รูปที่ 4.3 ผลของสัดส่วนการبيبัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าว

บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

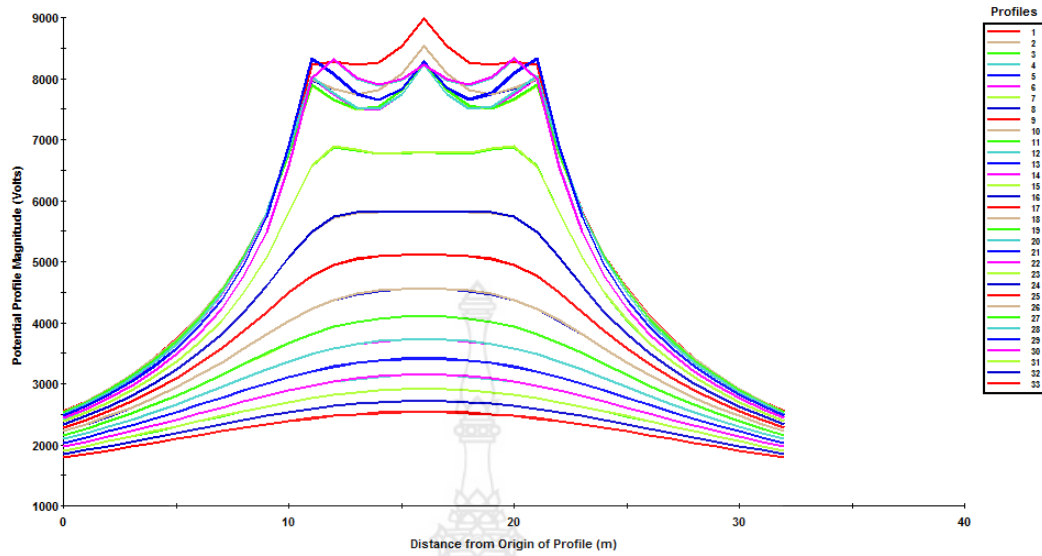
จากผลการศึกษากรณีที่ 1 พบว่าที่ค่าความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงที่สุดของกรณีที่ 1 และค่าดินที่เป็นดินชั้นเดียว มีค่าความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดและแรงดัน

ช่วงก้าวที่ต่ำสุด กราฟของค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆที่ได้จากการใช้โปรแกรมประมวลซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆในกรณีที่ 1



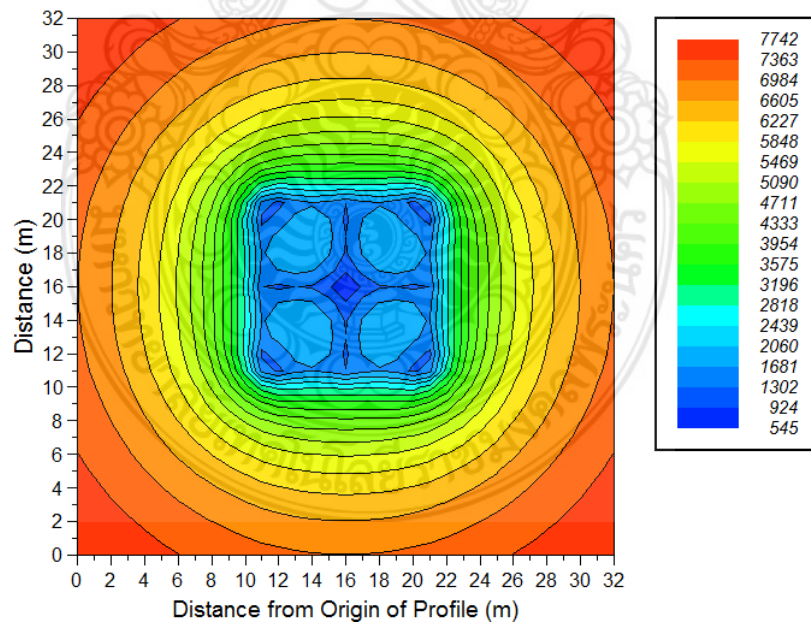
รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติสูงสุด

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการปีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 1



รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติสูงสุด

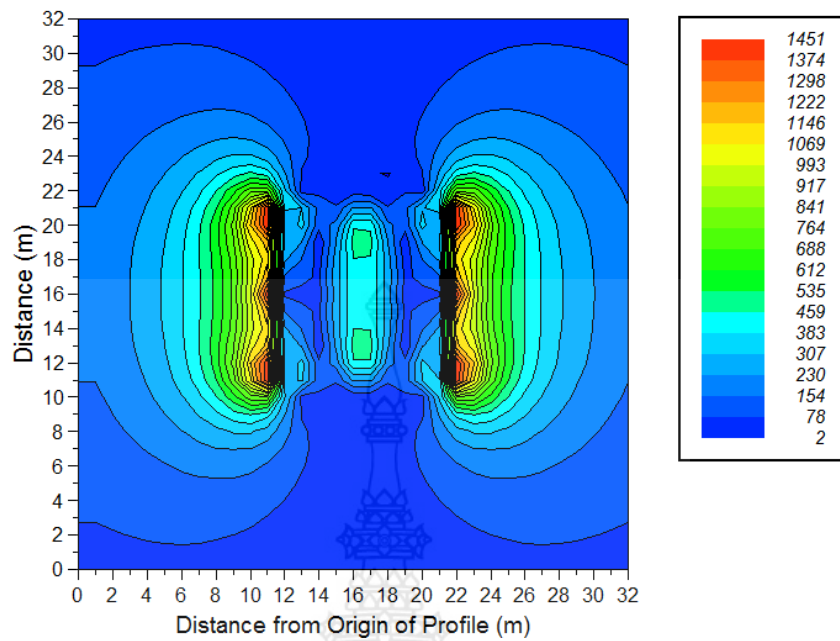
รูปที่ 4.5 เป็นกราฟสองมิติซึ่งจะโชว์แถบสีของค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 1



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสแบบเฉพาะจุดสูงสุดที่

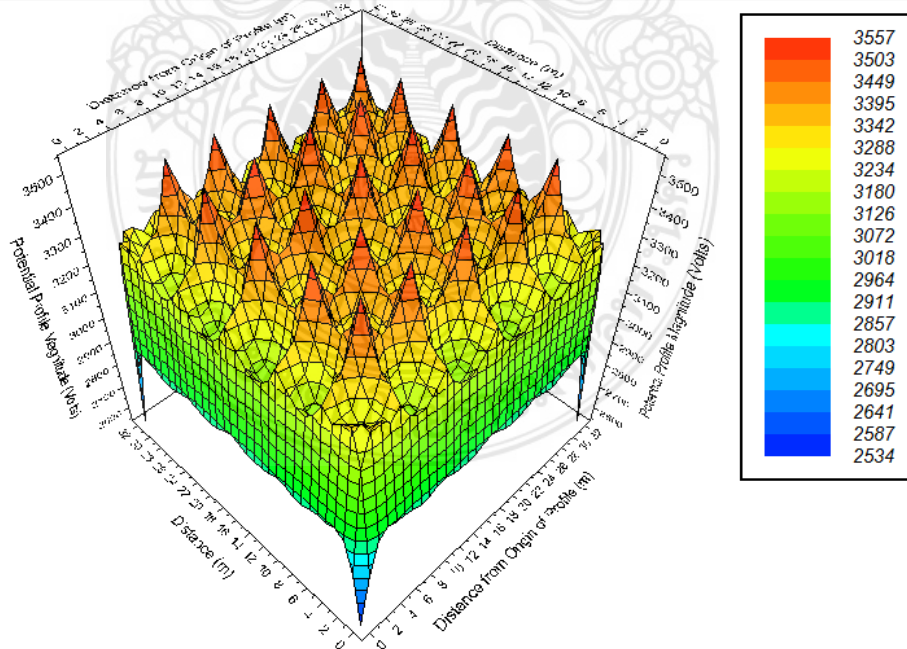
รูปที่ 4.6 รูปที่ 4.12 เป็นกราฟสองมิติซึ่งจะโชว์แถบสีของค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.4 ของกรณีที่ 1



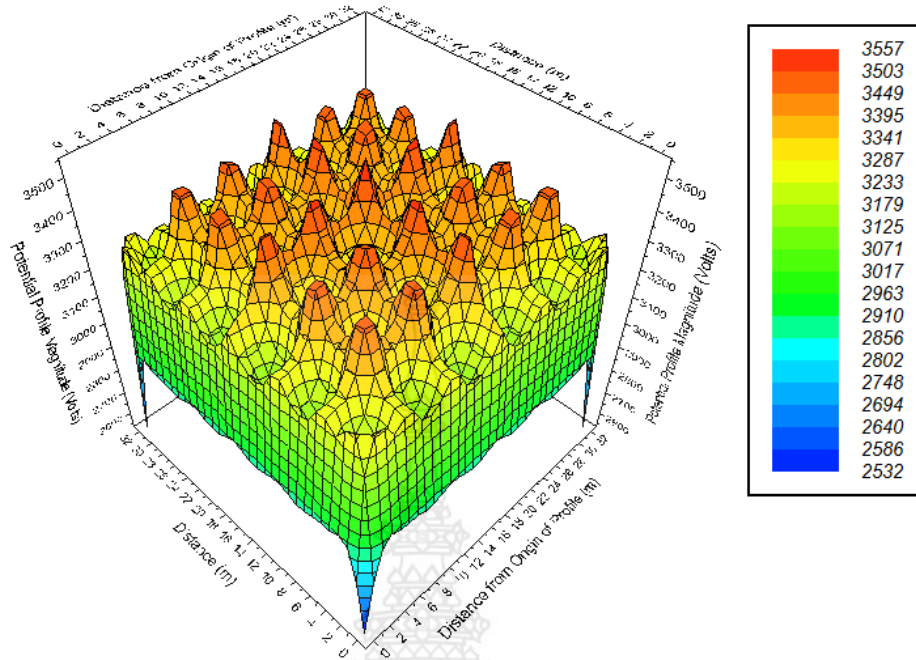


รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวแบบเฉพาะจุดสูงสุดที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 1

รูปที่ 4.21 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 1

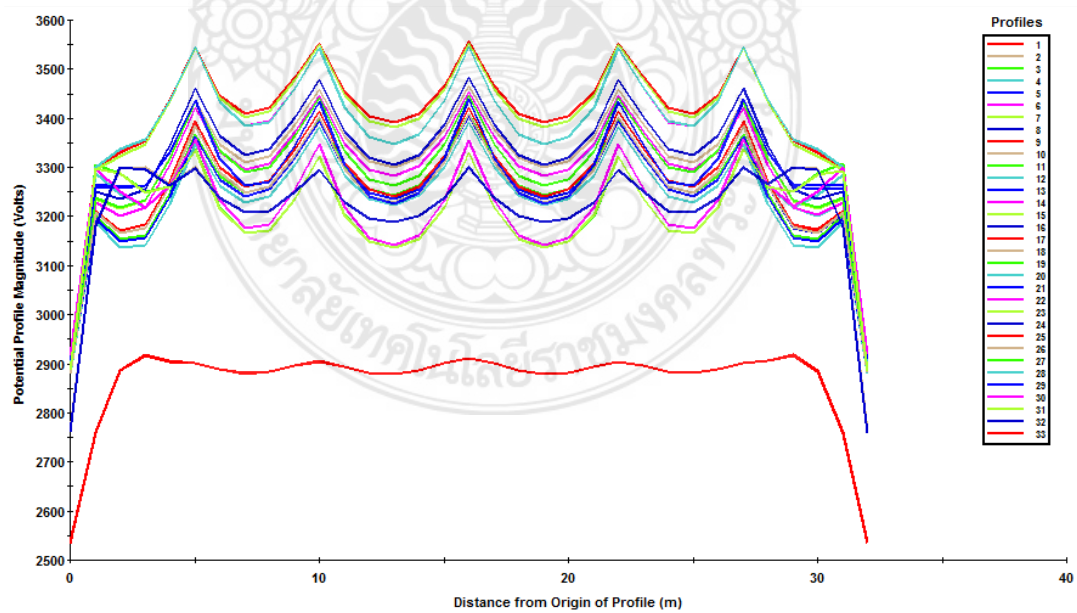


รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติต่ำสุด  
ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 กรณีที่ 1



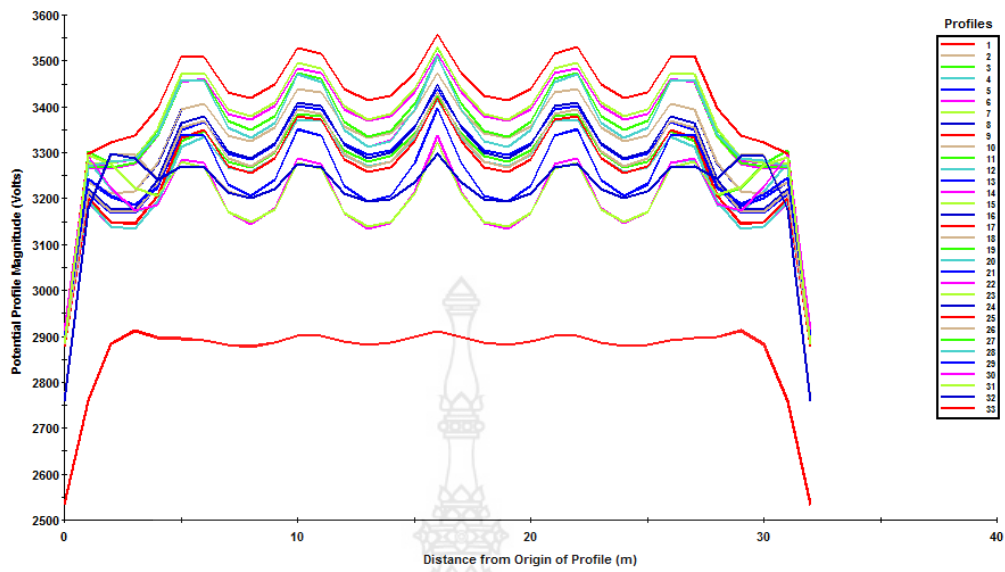
รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 และที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.9 ของกรณีที่ 1



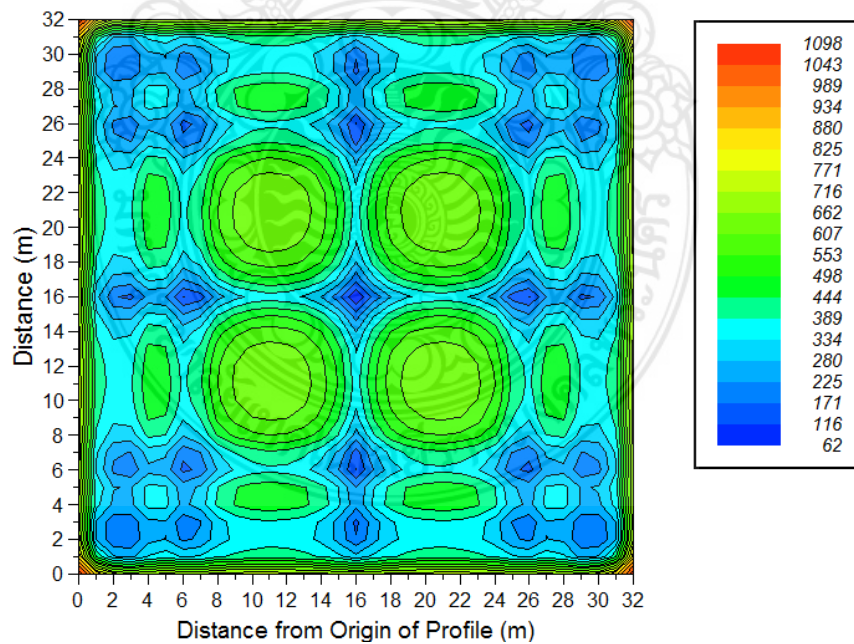
รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติต่ำสุด

สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 กรณีที่ 1



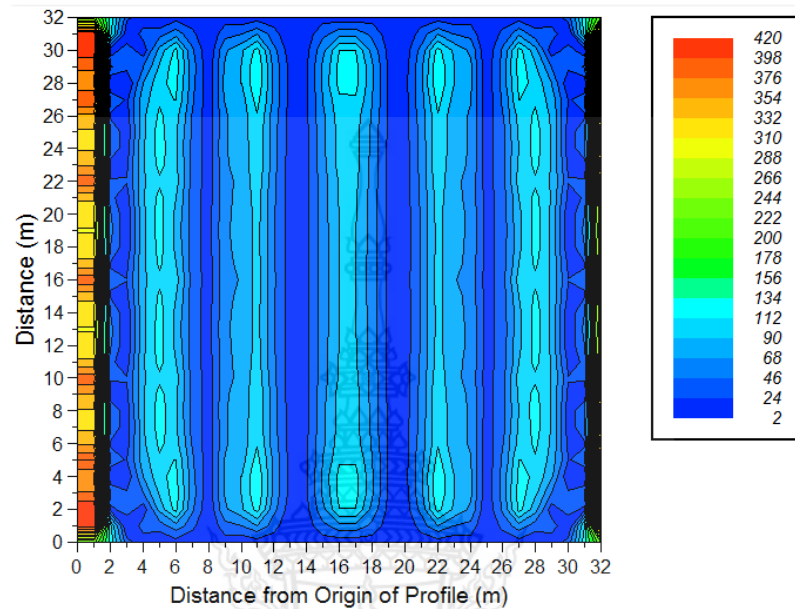
รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นกราฟสองมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 และที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.9 ของกรณีที่ 1

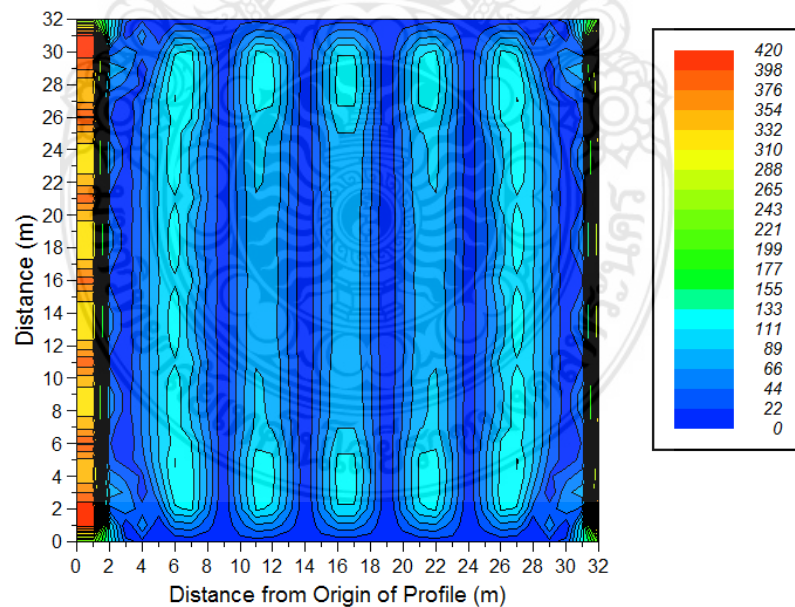


รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.12 เป็นกราฟสองมิติซึ่งจะโชว์แถบสีของค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.4 ของกรณีที่ 1



รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวแบบเฉพาะจุดต่ำสุด สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 กรณีที่ 1



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.8 และที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 1.0 ของกรณีที่ 1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆในกรณีที่ 1

Compression Ratio	square 10m x 10m			square 20m x 20m			square 30m x 30m		
	Type of Voltage			Type of Voltage			Type of Voltage		
	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)
0.0	8,985	7,742	1,451	5,625	3,814	825	4,182	1430	583
0.1	8,452	7,293	1,451	5,195	3,441	824	3,706	1,151	515
0.2	8,249	7,211	1,516	5,090	3,331	756	3,622	1,116	482
0.3	8,586	7,174	1,478	5,012	3,297	747	3,580	1,103	452
0.4	8,530	7,161	1,451	5,030	3,278	739	3,590	1,098	452
0.5	8,579	7,157	1,436	5,017	3,273	713	3,575	1,102	433
0.6	8,567	7,158	1,433	5,012	3,272	692	3,565	1,105	424
0.7	8,573	7,159	1,415	5,011	3,273	679	3,559	1,110	421
0.8	8,629	7,150	1,390	5,014	3,275	672	3,557	1,114	420
0.9	8,649	7,154	1,368	5,045	3,268	666	3,557	1,118	421
1.0	8,670	7,158	1,350	5,049	3,273	665	3,580	1,118	420

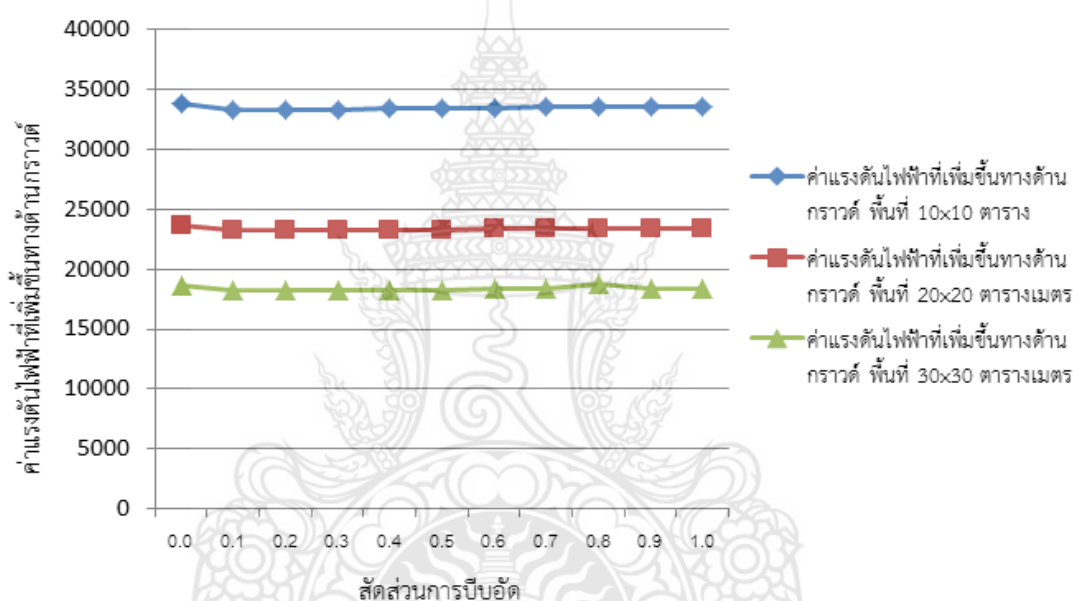
กรณีที่ 2 ดินเป็นดินสองชั้น โดยที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตรที่พื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร โดยมีความลึกของกราวด์กริด 0.5 เมตร ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทำการปรับเปลี่ยนค่าของสัดส่วนการบีบอัดของตัวนำกราวด์กริด ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยเป็นทศนิยมหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านทานกราวด์ของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 33,708 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 33,316 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 ดังรูปที่ 4.15

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 23,670 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 23,222 ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 ดังรูปที่ 4.15

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 18,647 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 18,242 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์

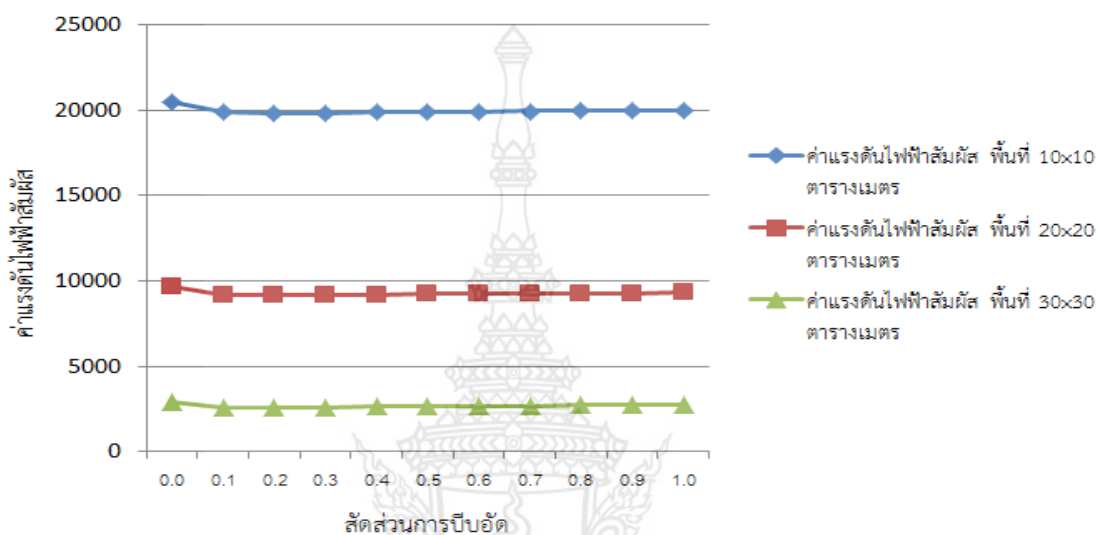
บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดเท่ากับ 20,468 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 19,848 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.3 ดังรูปที่ 4.16

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดเท่ากับ 9,647 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 9,147 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 ดังรูปที่ 4.16

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 2,890 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 2,581 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

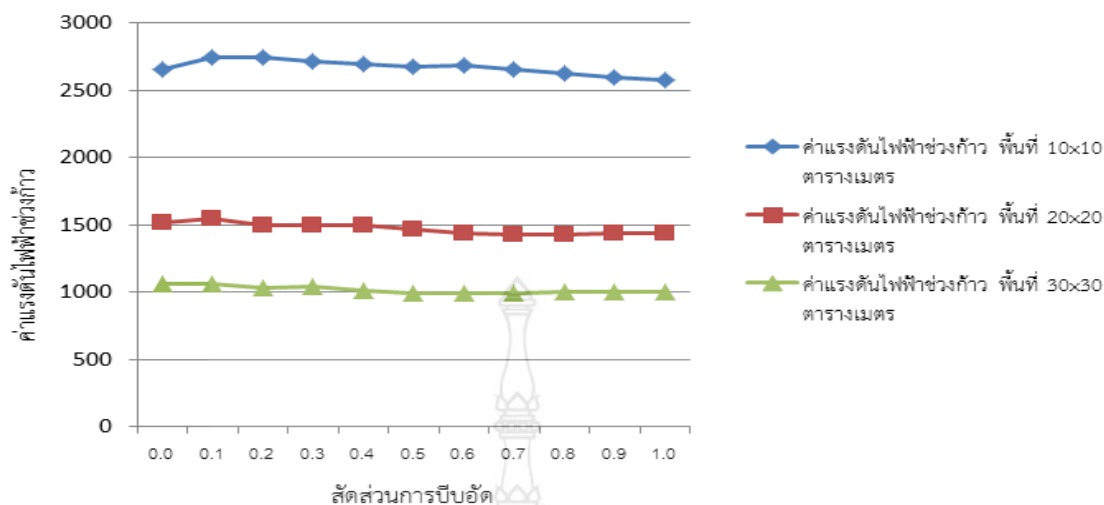
บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สูงสุดเท่ากับ 2,749 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่ต่ำสุดเท่ากับ 2,508 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.17

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สูงสุดเท่ากับ 1,549 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,431 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.7 ดังรูปที่ 4.17

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สูงสุดเท่ากับ 1,064 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่ต่ำสุดเท่ากับ 990 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.5 ดังรูปที่ 4.17

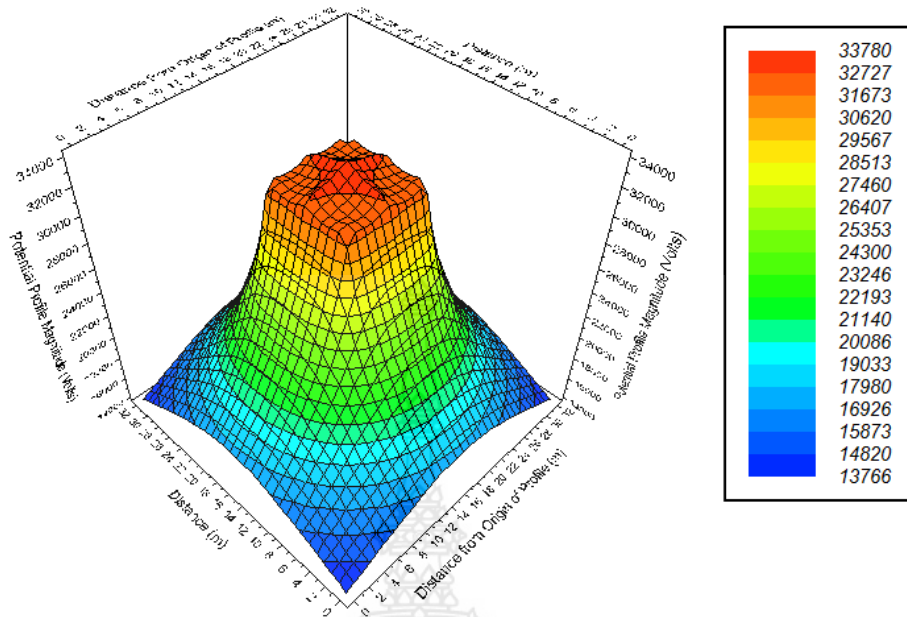


รูปที่ 4.17 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

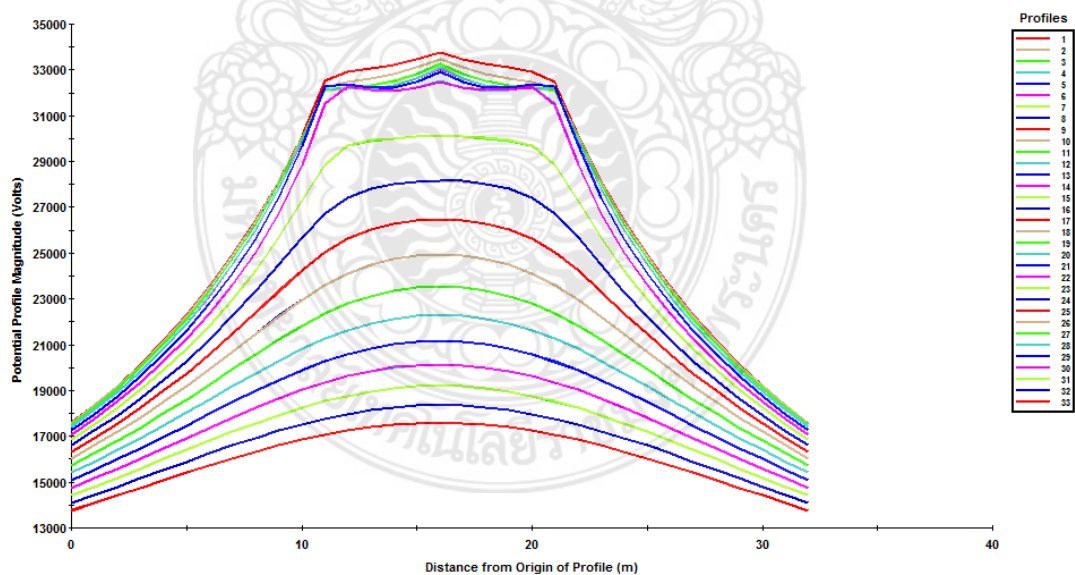
จากผลการศึกษารณีที่ 2 พบว่าที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 10x10 มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดของกรณีที่ 2 และที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 30x30 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดและแรงดันช่วงก้าวที่ต่ำสุด กราฟของค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆที่ได้จากการใช้โปรแกรมประมวลซึ่งแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.25 และตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆในกรณีที่ 2





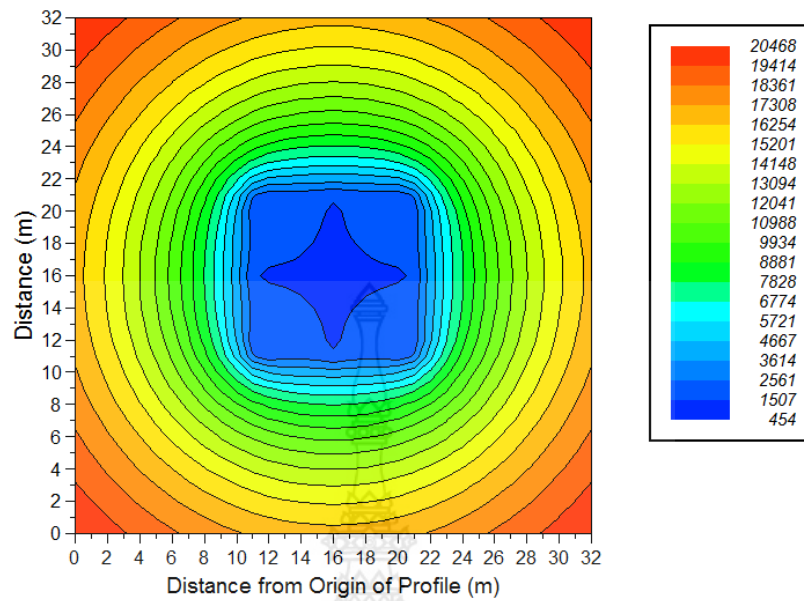
รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติสูงสุด

รูปที่ 4.18 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



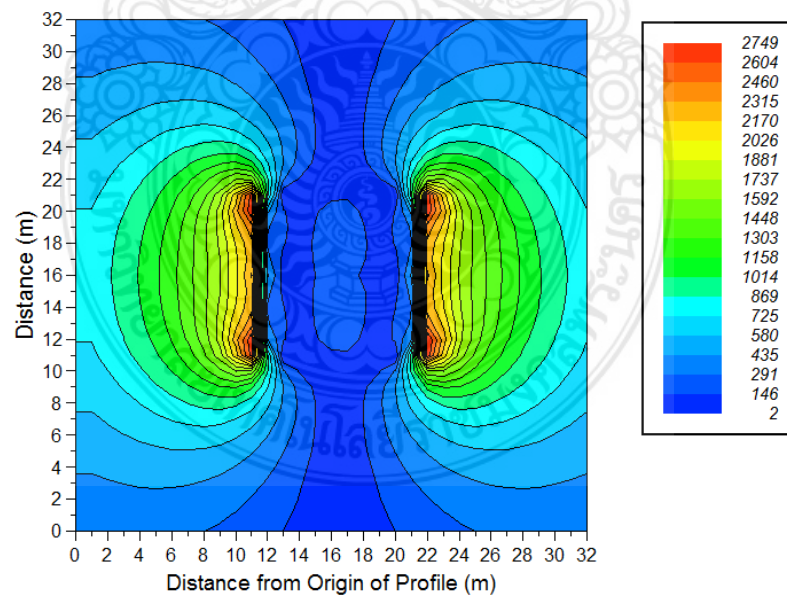
รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติสูงสุด

รูปที่ 4.19 เป็นกราฟสองมิติซึ่งจะโชว์แถบสีของค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



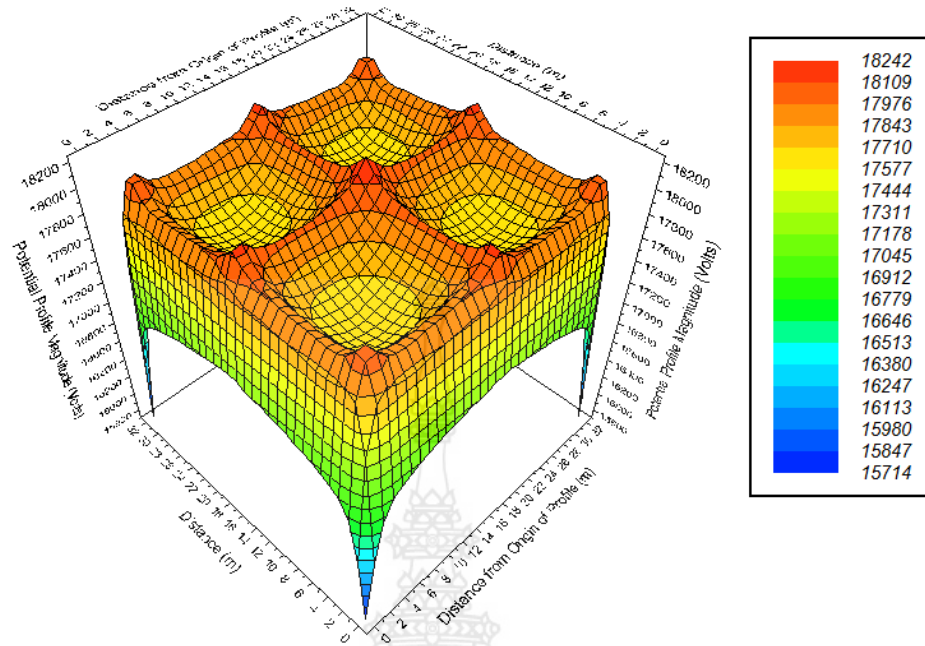
รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์แบบเฉพาะจุดสูงสุด

รูปที่ 4.20 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



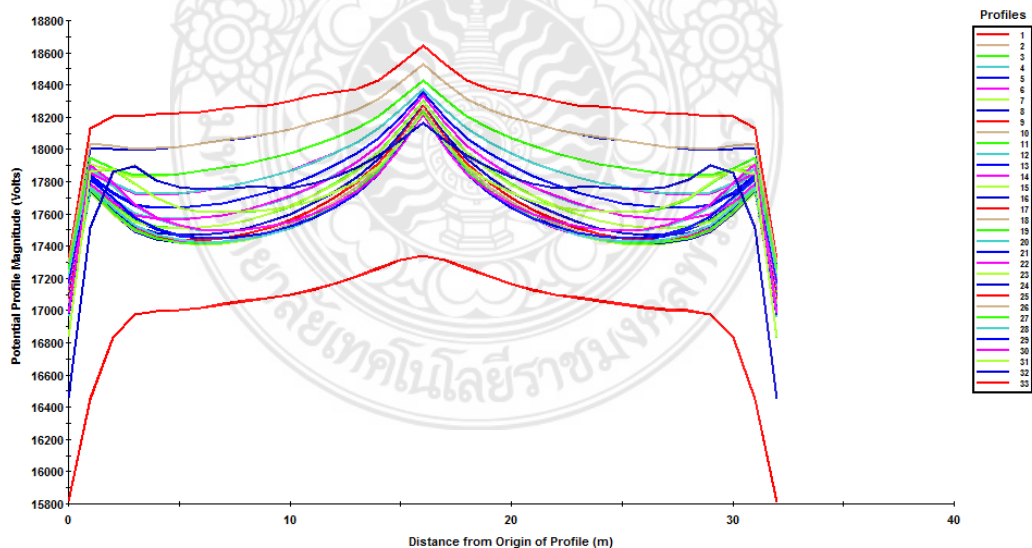
รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวแบบเฉพาะจุดสูงสุด

รูปที่ 4.21 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



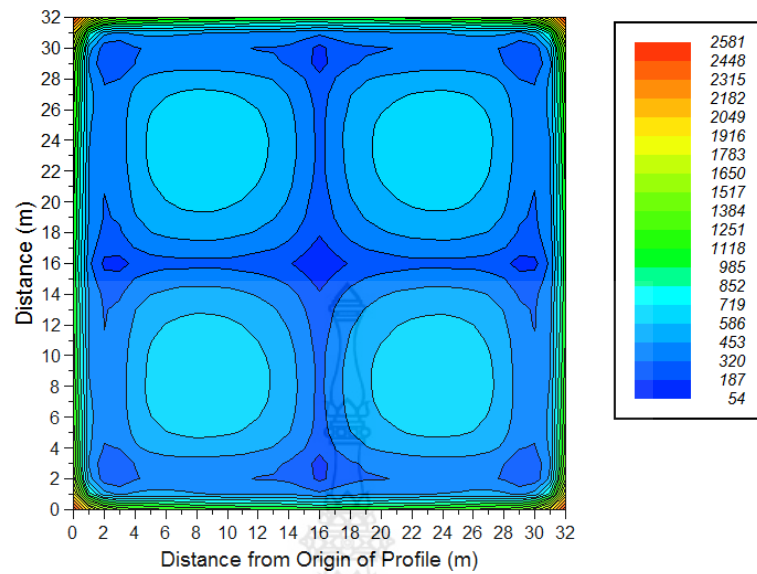
รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.22 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



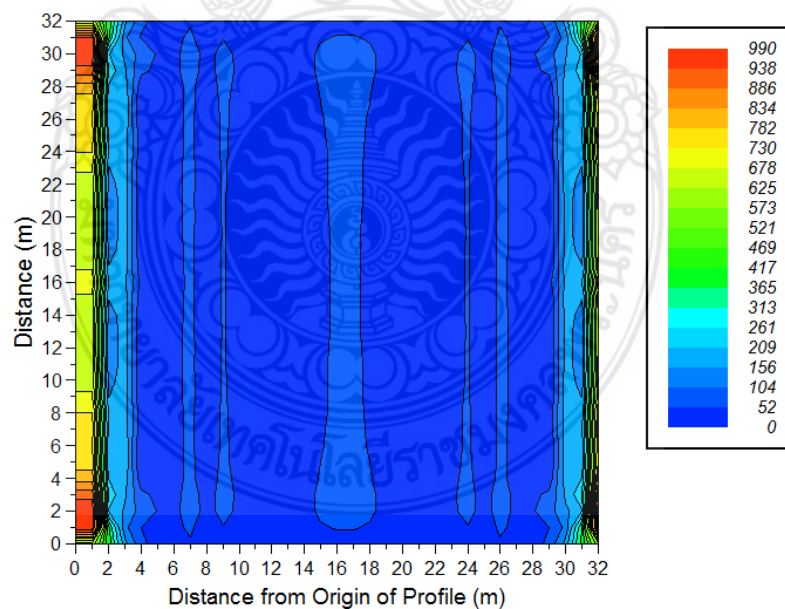
รูปที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.23 เป็นกราฟสองมิติซึ่งจะโชว์แถบสีของค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.24 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2



รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.25 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 2

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆในกรณีที่ 2

Compression Ratio	square 10m x 10m			square 20m x 20m			square 30m x 30m		
	Type of Voltage			Type of Voltage			Type of Voltage		
	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)
0.0	33,780	20,468	2,657	23,670	9,647	1,520	18,645	2,890	1,064
0.1	33,339	19,903	2,749	23,222	9,147	1,549	18,242	2,581	1,059
0.2	33,316	19,850	2,748	23,236	9,164	1,502	18,255	2,582	1,034
0.3	33,346	19,848	2,720	23,251	9,179	1,501	18,260	2,610	1,037
0.4	33,407	19,870	2,693	23,279	9,202	1,502	18,275	2,638	1,011
0.5	33,450	19,898	2,678	23,320	9,229	1,468	18,308	2,659	990
0.6	33,488	19,923	2,681	23,341	9,251	1,442	18,318	2,674	992
0.7	33,521	19,944	2,657	23,358	9,267	1,431	18,327	2,690	996
0.8	33,548	19,961	2,629	23,371	9,282	1,432	18,839	2,704	999
0.9	33,588	19,968	2,600	23,386	9,294	1,434	18,348	2,713	1,002
1.0	33,619	19,981	2,580	23,414	9,301	1,436	18,348	2,715	1,002

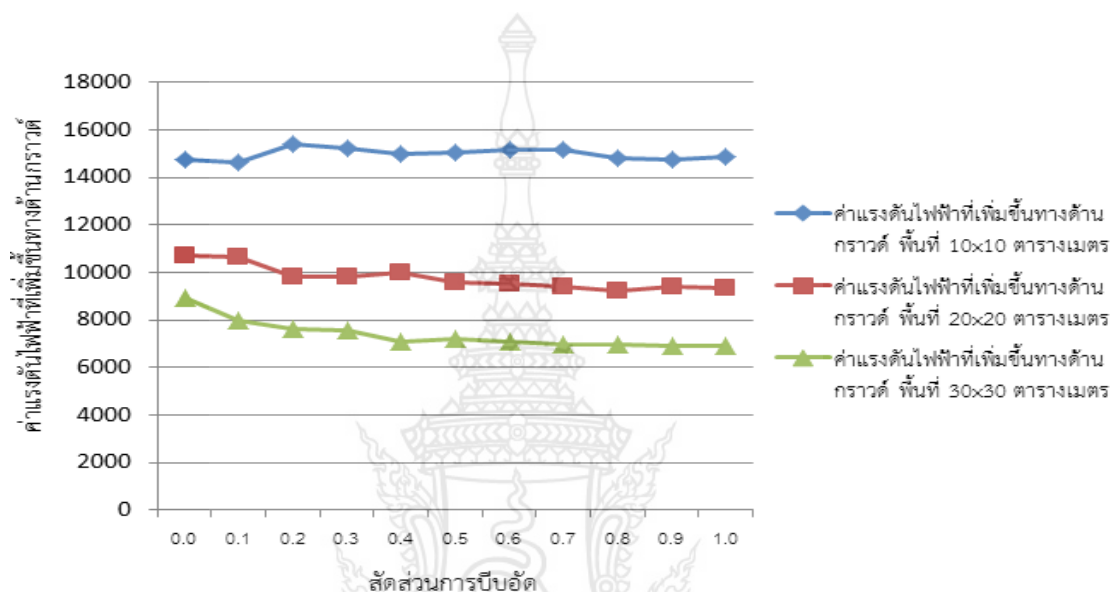
กรณีที่ 3 ดินเป็นดินสองชั้น โดยที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตรที่พื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ30x30 ตารางเมตร โดยมีความลึกของกราวด์กริด 0.5 เมตร ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทำการปรับเปลี่ยนค่าของสัดส่วนการบีบอัดของตัวนำกราวด์กริด ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยเป็นทศนิยมหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 15,425 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14,631 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.1 ดังรูปที่ 4.26

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10,683 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 9,221 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 ดังรูปที่ 4.26

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,947 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางกราวด์มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 6,883 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.26



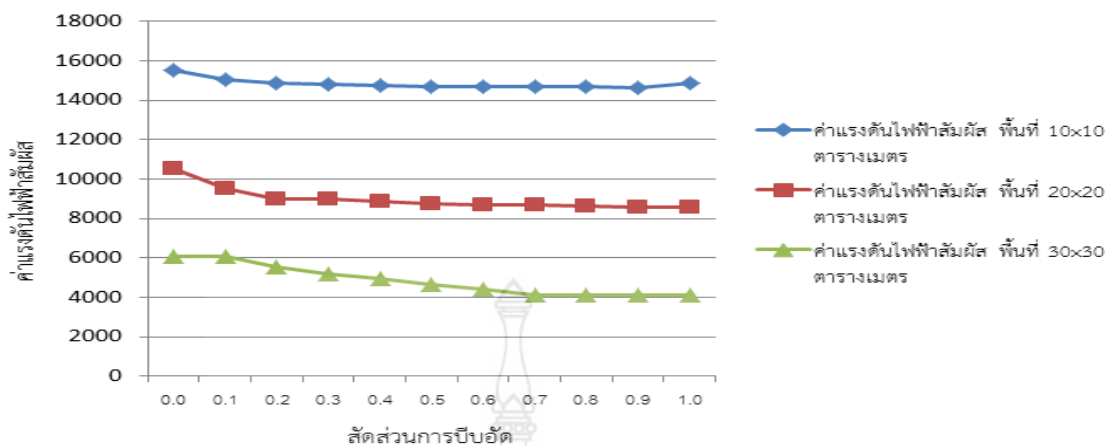
รูปที่ 4.26 ผลของสัดส่วนการبيبัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์  
บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดเท่ากับ 15,527 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 14,639 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.9 ดังรูปที่ 4.27

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดเท่ากับ 10,523 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 8,572 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.9 ดังรูปที่ 4.27

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดเท่ากับ 6,054 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 4,091 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.9 ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลของสัดส่วนการبيبัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์

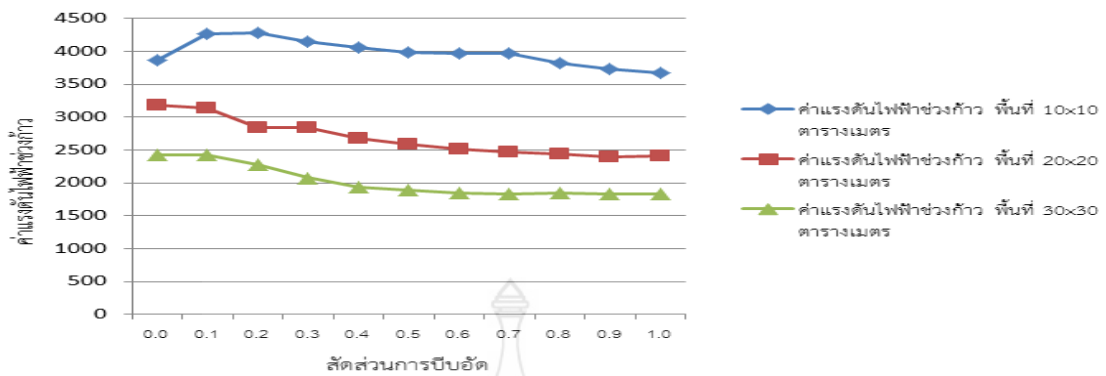
บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวของพื้นที่ 3 ขนาดที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 4,281 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 3,673 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.28

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 3,179 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 23,931 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.9 ดังรูปที่ 4.28

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่สูงสุดเท่ากับ 2,427 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,825 V ซึ่งสัดส่วนการبيبัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังรูปที่ 4.28

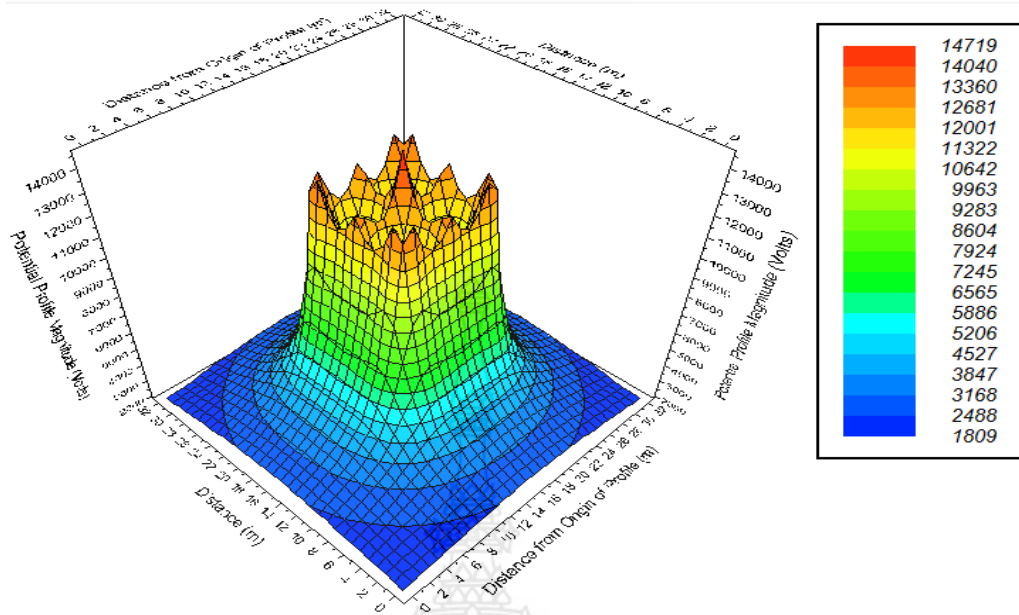


รูปที่ 4.28 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร

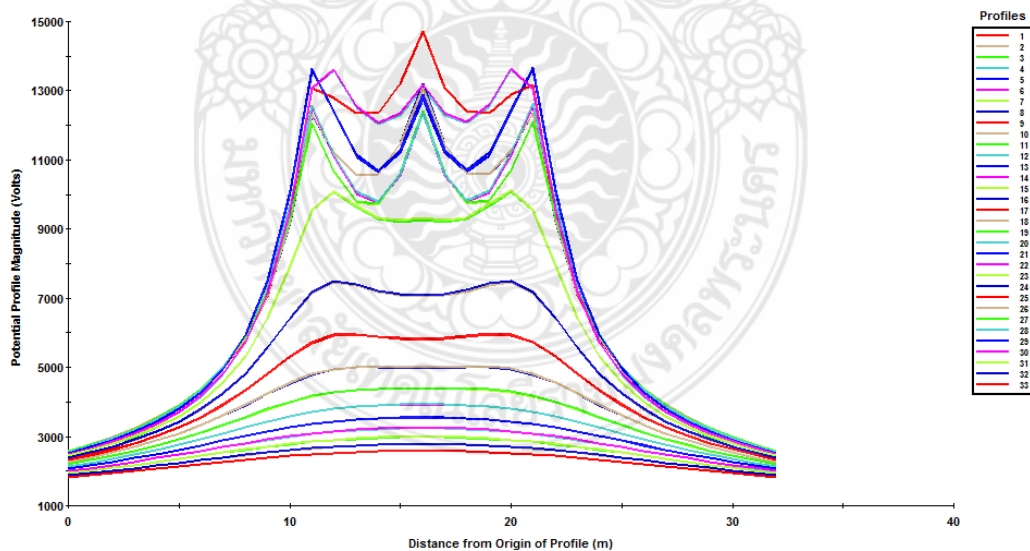
จากผลการศึกษากรณีที่ 3 พบว่าที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 10x10 มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดของกรณีที่ 3 และที่ดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร และดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 30x30 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดและแรงดันช่วงก้าวที่ต่ำสุด กราฟของค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆที่ได้จากการใช้โปรแกรมประมวลซึ่งแสดงในรูปที่ 4.29 ถึง 4.36 และตารางที่ 4.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆในกรณีที่ 3





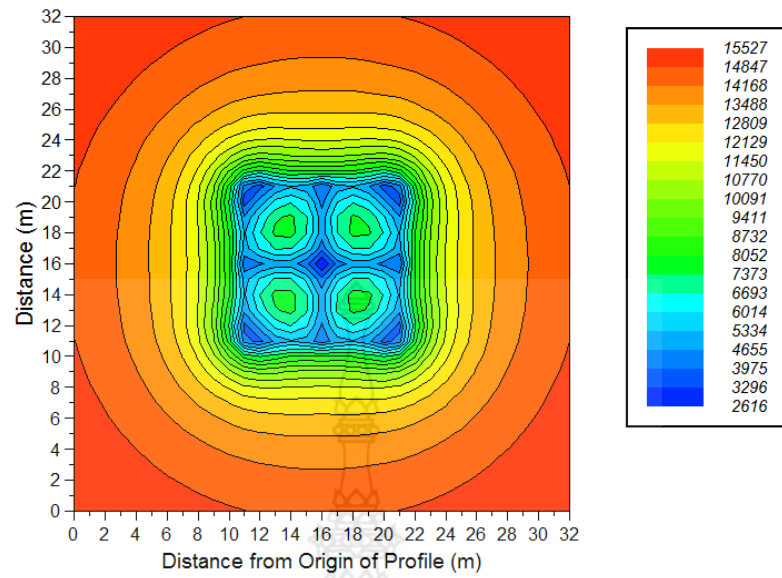
รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติสูงสุด

รูปที่ 4.29 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 3



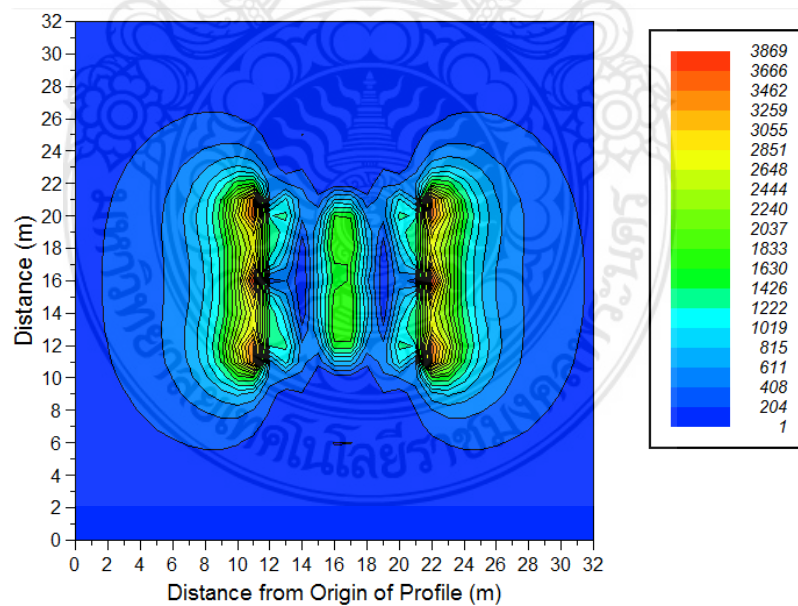
รูปที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติสูงสุด

รูปที่ 4.30 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 3



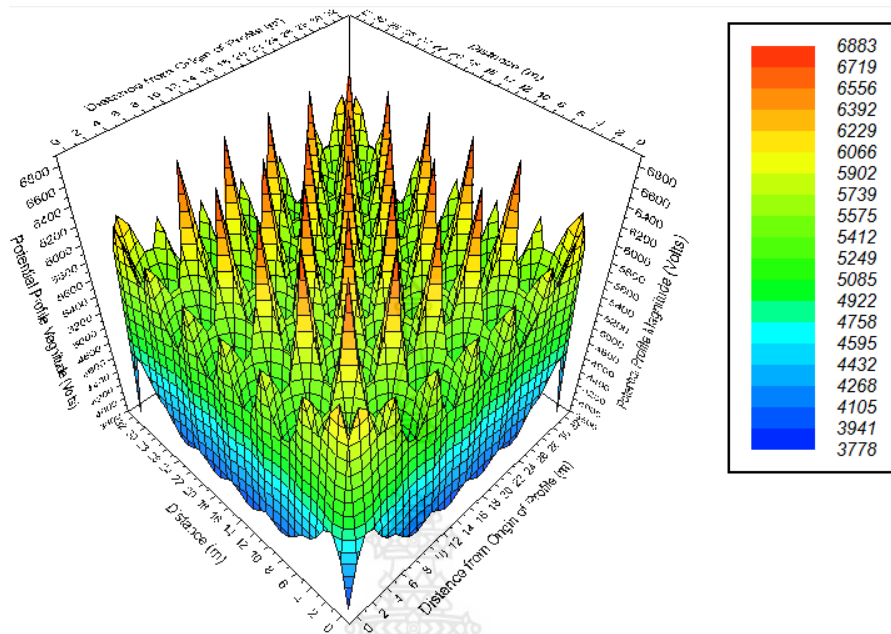
รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์แบบเฉพาะจุดสูงสุด

รูปที่ 4.31 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 3



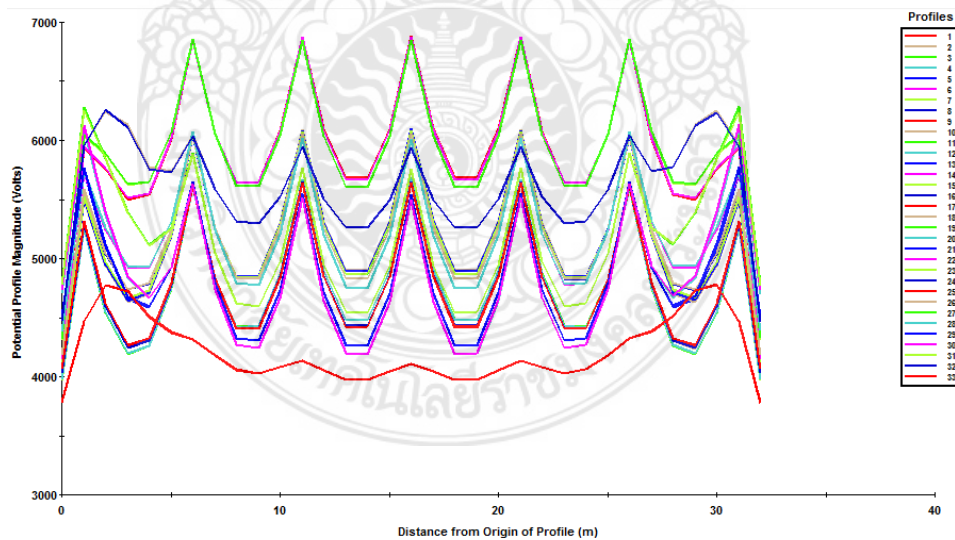
รูปที่ 4.32 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำแบบเฉพาะจุดสูงสุด

รูปที่ 4.32 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงดันไฟฟ้าสัมพัทธ์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 ของกรณีที่ 3



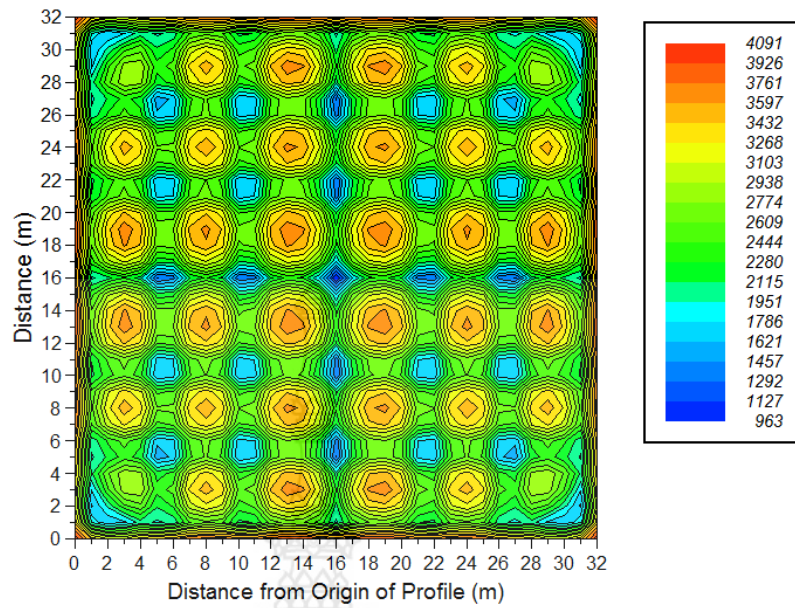
รูปที่ 4.33 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.33 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 1.0 ของกรณีที่ 3



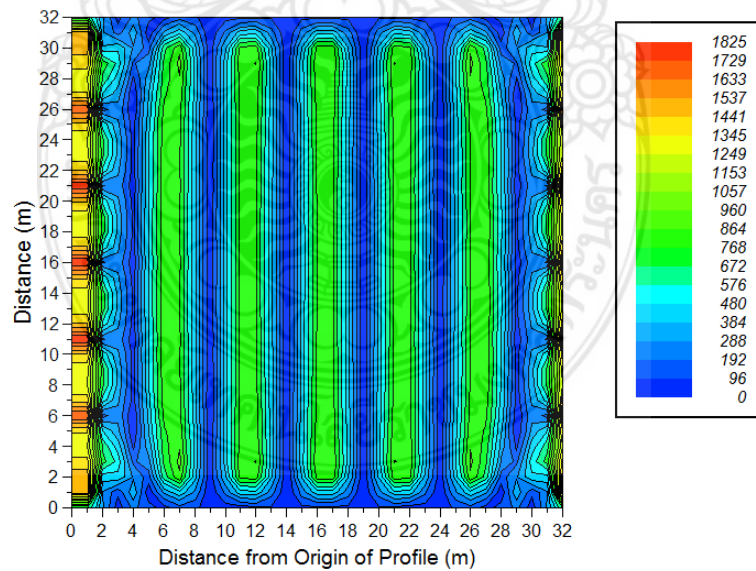
รูปที่ 4.34 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสองมิติต่ำสุด

รูปที่ 4.34 เป็นกราฟสามมิติที่ถึงแถบสีของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 1.0 ของกรณีที่ 3



รูปที่ 4.35 แรงแรงไฟฟ้าสัมผัสแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.35 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงแรงไฟฟ้าสัมผัสที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.9 ของกรณีที่ 3



รูปที่ 4.36 แรงแรงไฟฟ้าช่วงก้ำวแบบเฉพาะจุดต่ำสุด

รูปที่ 4.32 เป็นกราฟ spot ซึ่งจะโชว์แถบสีของแรงแรงไฟฟ้าช่วงก้ำวที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 1.0 ของกรณีที่ 3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆในกรณีที่ 3

Compression Ratio	square 10m x 10m			square 20m x 20m			square 30m x 30m		
	Type of Voltage			Type of Voltage			Type of Voltage		
	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)
0.0	14,719	15,527	3,869	10,683	10,523	3,179	8,947	6,054	2,427
0.1	14,631	15,047	4,265	10,654	9,491	3,137	7,959	6,054	2,427
0.2	15,425	14,893	4,281	9,820	8,972	2,844	7,608	5,540	2,272
0.3	15,231	14,806	4,143	9,820	8,972	2,844	7,545	5,204	2,075
0.4	15,003	14,745	4,063	9,985	8,842	2,679	7,102	4,927	1,940
0.5	15,039	14,713	3,983	9,577	8,759	2,588	7,189	4,645	1,884
0.6	15,138	14,691	3,972	9,524	8,708	2,511	7,081	4,403	1,850
0.7	15,138	14,691	3,972	9,397	8,672	2,465	6,992	4,127	1,834
0.8	14,821	14,666	3,816	9,221	8,649	2,434	6,958	4,095	1,842
0.9	14,768	14,639	3,726	9,396	8,572	2,393	6,902	4,091	1,835
1.0	14,862	14,838	3,673	9,359	8,579	2,416	6,883	4,111	1,825

โดยทั่วไป แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ จะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด แต่เมื่อทำการคำนวณค่าแรงดันที่เป็นค่ากฎเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ซึ่งในการออกแบบนั้น ถ้าคำนวณออกมาแล้ว ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยแล้ว ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดก็จะอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัยด้วย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจึงไม่ใช่ปัจจัยที่ใช้ตัดสินใจในการกำหนดค่าสัดส่วนการบีบอัดที่เหมาะสมด้วย แรงดันไฟฟ้าสัมผัสนั้น โดยทั่วไปค่อนข้างยากในการที่จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบกราวด์กริด และใช้กำหนดค่าสัดส่วนการบีบอัดที่เหมาะสมของรูปแบบกราวด์กริด

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

Surface Layer Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Fault Clearing Time 0.1 sec		Foot Resistance:
	Touch Voltage (V)	Step Voltage (V)	1 Foot ( $\Omega$ )
None	293.7	307.3	31.2
1,000	689.3	1,889.7	2,767.3
2,000	1,088.7	3,487.1	5,529.4
3,000	1,488	5,084.6	8,291.5
4,000	1,887.4	6,682.1	11,053.6
5,000	2,286.8	8,279.6	13,815.7
6,000	2,686.2	9,877.1	16,577.8
7,000	3,085.5	11,474.6	19,339.9
8,000	3,484.3	13,072	22,102.1
9,000	3,884.3	14,669.5	24,864.2
10000	4,283.6	16,267.0	27,626.3

### 4.3 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษา

กรณีที่ 1 ที่ดินชั้นเดียวความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร ที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,985 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่ม ทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8,249 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 7.94 % และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 7,742 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 7,150 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 พบว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 7.64 %: ซึ่งสัดส่วนการบีบอัด 0.8 เป็นสัดส่วนการบีบอัดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร สำหรับพื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,625 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5,011 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.7 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 10.91% และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3,814 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 3,268 V ซึ่งสัดส่วนการ

บิบัติจะอยู่ที่ 0.9 พบว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 14.31% ซึ่งสัดส่วนการบิบัติ 0.9 เป็นสัดส่วนการบิบัติที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร และพื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4,182 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่ม ทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3,557 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.8 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 14.94% และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ ,1430 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1,098 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.4 พบว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 23.21% ซึ่งสัดส่วนการบิบัติ 0.4 เป็นสัดส่วนการบิบัติที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร และสำหรับพื้นที่ขนาด

พบว่าพื้นที่สามขนาด พื้นที่ 30x30 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้านกราวด์ต่ำสุด ซึ่งสัดส่วนการบิบัติอยู่ที่ 0.8 สัดส่วนการบิบัติ 0.9 และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำซึ่งสัดส่วนการบิบัติอยู่ที่ 0.4 สำหรับพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์สูงสุดซึ่งสัดส่วนการบิบัติอยู่ที่ 0.8 และ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดซึ่งสัดส่วนการบิบัติอยู่ที่ 0.8 เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางกราวด์ทั้งสองพื้นที่ ที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ต่ำสุดเท่ากับ 8,249 V และที่พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ต่ำสุดเท่ากับ 3,557V พบค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 56.87% สำหรับที่พื้นที่ขนาด 10x10 ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ 7,150 V และที่พื้นที่ 30x30 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ 1,098 V พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 84.64% ซึ่งสัดส่วนการบิบัติที่ 0.4 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดในกรณีที่ 1 ทั้งนี้พื้นที่กราวด์กริดรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถใช้ค่าสัดส่วนการบิบัติที่ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่ำสุด แทนค่าสัดส่วนการบิบัติที่เหมาะสมที่สุดก็ได้ ถ้าสมรรถนะแรงดันของระบบกราวด์กริดยังอยู่ในกฎเกณฑ์ความปลอดภัย

กรณีที่ 2 ที่ดินสองชั้นความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน 10 โอห์ม-เมตร ที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 100 โอห์ม-เมตร พบว่าที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 33,780 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่ม ทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 33,316 V ซึ่งสัดส่วนการบิบัติจะอยู่ที่ 0.2





การปิดที่ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดในกรณีที่ 2 ทั้งนี้พื้นที่กราวด์กริดรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถใช้ค่าสัดส่วนการปิดที่ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่ำสุด แทนค่าสัดส่วนการปิดที่เหมาะสมที่สุดก็ได้ ถ้าสมรรถนะแรงดันของระบบกราวด์กริดยังอยู่ในกฎเกณฑ์ความปลอดภัย

กรณีที่ 3 จากตารางที่ 4.3 ที่ดินสองชั้นความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน 100 โอห์ม-เมตร ที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 10 โอห์ม-เมตร พบว่าที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 15,425 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.2 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14,631 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.1 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 5.14 % และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 15,527 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 14,639 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.9 พบว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 5.17% ซึ่งสัดส่วนการปิด 0.9 เป็นสัดส่วนการปิดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร

สำหรับพื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 10,683 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 9,221 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.8 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 13.68% และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10,523 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 8,572 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.9 พบว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 44.19 % ซึ่งสัดส่วนการปิด 0.9 เป็นสัดส่วนการปิดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร

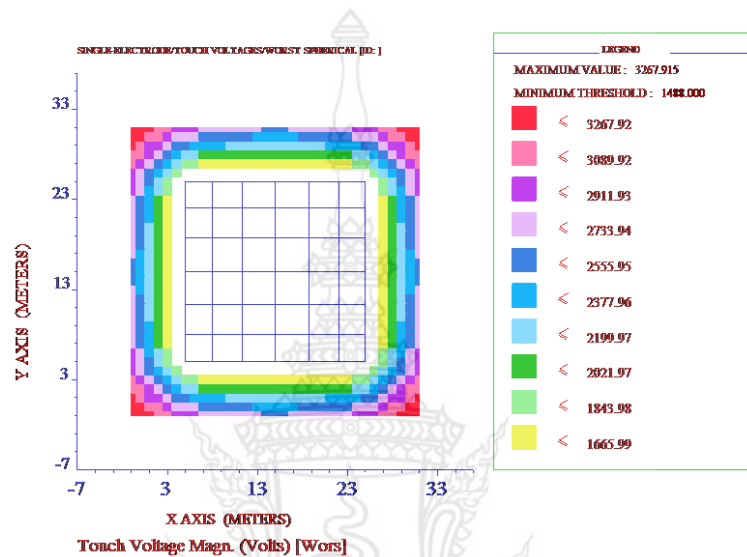
พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,947 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 6,883 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 1.0 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 23.06 % และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6,054 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.0 สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4,091 V ซึ่งสัดส่วนการปิดจะอยู่ที่ 0.9 พบว่า

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 32.48 % ซึ่งสัดส่วนการบีบอัด 0.9 เป็นสัดส่วนการบีบอัดที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำสุดที่พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร และสำหรับพื้นที่ขนาด

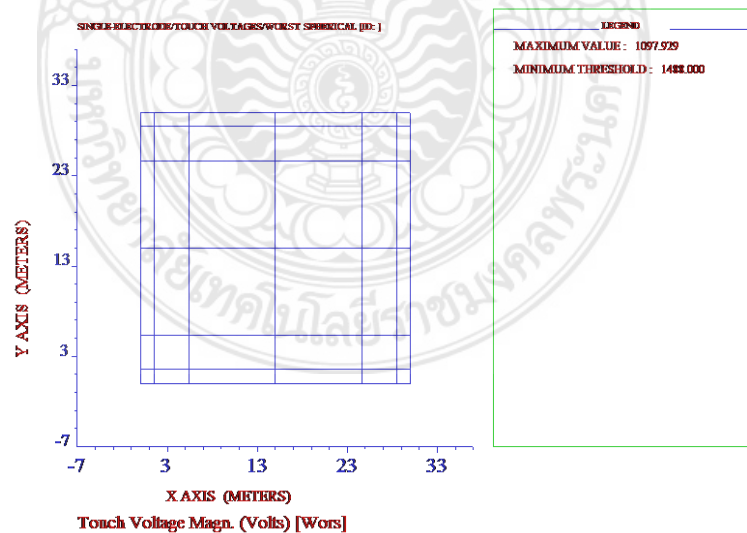
เมื่อเปรียบเทียบค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดพบว่าพื้นที่สามขนาด พื้นที่ 30x30 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้านกราวด์ต่ำสุด ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดอยู่ที่ 0.0 และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำซึ่งสัดส่วนการบีบอัดอยู่ที่ 0.9 สำหรับพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ต่ำสุดซึ่งสัดส่วนการบีบอัดอยู่ที่ 0.1 และ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดซึ่งสัดส่วนการบีบอัดอยู่ที่ 0.9 เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางกราวด์ทั้งสองพื้นที่ ที่พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ต่ำสุดเท่ากับ 14,631 V และที่พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ต่ำสุดเท่ากับ 6,883 V พบค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่างกัน 53.90% สำหรับที่พื้นที่ขนาด 10x10 ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ 14,639 V และที่พื้นที่ 30x30 ตารางเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดเท่ากับ 4,091 V พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่างกัน 72.05% ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดที่ 0.9 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดในกรณีที่ 3 ทั้งนี้พื้นที่กราวด์กริดรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถใช้ค่าสัดส่วนการบีบอัดที่ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าต่ำสุด แทนค่าสัดส่วนการบีบอัดที่เหมาะสมที่สุดก็ได้ ถ้าสมรรถนะแรงดันของระบบกราวด์กริดยังอยู่ในกฎเกณฑ์ความปลอดภัย

จากผลการดำเนินงานทั้ง 3 กรณี คือ ดินชั้นเดียวที่ความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ดินสองชั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน 10 โอห์ม-เมตร และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 100 และที่ดินสองชั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน 100 โอห์ม-เมตร และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 10 พบว่ารูปแบบกราวด์ที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดแตกต่างกันออกไปซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันทั้งสามค่า โดยพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวมีค่าต่ำกว่า พื้นที่ที่มีขนาดเล็กพื้นที่ที่ขนาดใหญ่มากก็จะมีผลให้ค่าความต้านทานของกราวด์กริดมีค่าน้อยลงมากเท่านั้น ซึ่งจะทำให้มีสมรรถนะของระบบการต่อลงดินดีมากขึ้น และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวที่มีค่าต่ำสุดคือที่ดินชั้นเดียวที่ความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร และที่ดินสองชั้นความต้านทานจำเพาะของดินชั้น 100 โอห์ม-เมตร ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 10 โอห์ม-เมตร ซึ่งเป็นค่าดินที่

เหมาะสมลงมา และที่ดินสองชั้นความต้านทานจำเพาะของดินชั้น 10 โอห์ม-เมตร ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 100 โอห์ม-เมตร ที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสามค่ามีค่าสูงสุด เพราะฉะนั้นลักษณะของดินและความลึกของแท่งหลักดินก็เป็นส่วนที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสามค่ามีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่ดินชั้นเดียว 10 โอห์ม-เมตร  
พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร เมื่อโรยวัสดุผิว

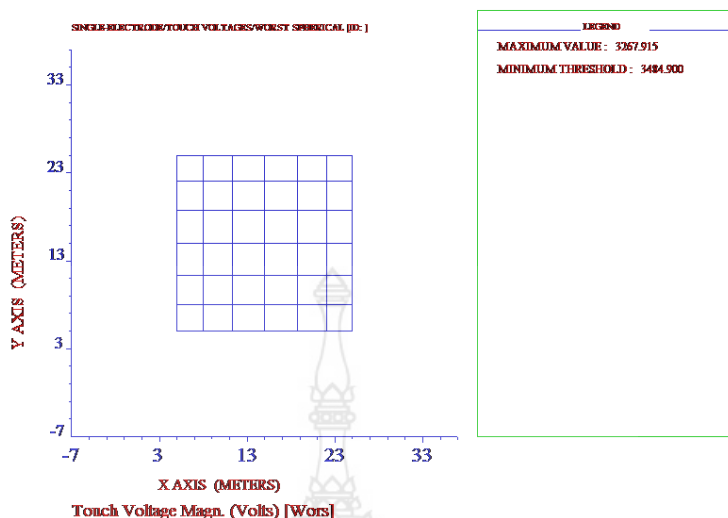


รูปที่ 4.38 แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่ดินชั้นเดียว 10 โอห์ม-เมตร  
พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร เมื่อโรยวัสดุผิว

ในรูปที่เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆแล้วถ้าหากต้องการที่จะลดค่าของแรงดันไฟฟ้าใช้การโรยวัสดุปูผิวที่บริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยประมาณ 30 เซนติเมตร ทั้งนี้ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวก็จะขึ้นอยู่กับแต่ละวัสดุ ตัวอย่างกราฟแรงดันไฟฟ้าสัมผัสกรณีที่ 1 เมื่อโรยวัสดุปูผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ 3,000 โอห์ม-เมตร ในความต้านทานดินจำเพาะต่างๆ จะแสดงเฉพาะพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเมตร และพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเมตร เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดต่ำสุดและค่าสูงสุด

ผลจากตารางที่ 4.1 เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆแล้วถ้าหากต้องการที่จะลดค่าของแรงดันไฟฟ้าก็อาจทำได้โดยการโรยวัสดุปูผิวที่บริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยประมาณ 30 เซนติเมตร ทั้งนี้ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวก็จะขึ้นอยู่กับแต่ละวัสดุ ตัวอย่างกราฟแรงดันไฟฟ้าสัมผัสกรณีที่ 1 เมื่อโรยวัสดุปูผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ 3,000 โอห์ม-เมตร ในความต้านทานดินจำเพาะต่างๆ จะแสดงเฉพาะพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20x20 ตารางเมตร และพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30x30 ตารางเมตร เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดต่ำสุดและค่าสูงสุด

จากกราฟแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อโรยวัสดุปูผิวเข้าไปแล้วพบว่าพื้นที่ที่ปลอดภัยเพิ่มขึ้นจากเดิมแต่ยังคงมีพื้นที่ที่มีแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเกินกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้อยู่บริเวณรอบๆ กราวด์กริดทั้งนี้อาจแก้ไขได้โดยการกั้นพื้นที่บริเวณที่มีความเสี่ยงไม่ให้เข้าไปในพื้นที่นั้นหรือจะเปลี่ยนวัสดุปูผิวให้เป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเพิ่มขึ้นยกตัวอย่างในกรณีที่ 1 ที่ดินชั้นเดียว 10 โอห์ม-เมตร พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร สังเกตจากรูปที่ 4.102 ในกรณีนี้ถ้าเปลี่ยนวัสดุปูผิวให้เป็นวัสดุที่มีความต้านทานจำเพาะ 8,000 โอห์ม-เมตร ก็จะมีความปลอดภัยทั้งพื้นที่ดังรูป 4.104



รูปที่ 4.39 แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่ดินชั้นเดียว 10 โอห์ม-เมตร พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร  
เมื่อเปลี่ยนวัสดุปูผิวที่โรย

ในที่นี้ไม่ได้หมายความว่าเมื่อเปลี่ยนวัสดุปูผิวเป็นวัสดุที่มีความต้านทานจำเพาะ 8,000 โอห์ม-เมตร แล้วจะมีความปลอดภัยในทุกกรณี เพราะว่าบางกรณีอาจจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีค่าสูงกว่าโดยต้องหาวิธีแก้ไขแบบอื่น หรือทำการโรยวัสดุปูผิวให้มีค่าความต้านทานที่สูงขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้มีความปลอดภัย

จากตารางที่ 4.1 ที่ดินชั้นเดียวที่มีขนาดของพื้นที่ 20x20 ตารางเมตร พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าเท่ากับ 3,268 V ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด และในตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีค่ามากกว่าคือ 3,848.3 V หรือ ที่ความต้านทานวัสดุโรยผิวที่ความต้านทาน 8,000 โอห์ม-เมตร จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีอยู่ในพื้นที่นั้นหมดไป ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.39 ซึ่งจะได้เห็นค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีสีต่างๆหมดไปจากพื้นที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.37 ที่โรยวัสดุผิวที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 3,000 โอห์ม-เมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อโรยวัสดุปูผิวที่มีความต้านทานเท่ากับ 3,000 โอห์ม-เมตร พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีสีต่างๆ ยังคงไม่มีอยู่ในพื้นที่ แต่ถ้ามีความปลอดภัยอยู่ดีในระดับหนึ่ง แต่ที่ความต้านทาน 8,000 โอห์ม-เมตร จะทำให้มีความปลอดภัยมากที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้อธิบายเกี่ยวกับการออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยและการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจรและมีกระแสสูงเกิดขึ้น เมื่อมีกระแสอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งหรือต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณนั้นซึ่งจะพิจารณาค่าสัดส่วนการปิดตัดตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 เพื่อให้ค่าที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด โดยการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) เพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ และนำผลของการออกแบบระบบกราวด์รูปแบบต่างๆ เมื่อนำไปปรับปรุงสมรรถนะแรงดันทางด้านกราวด์ของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย เพื่อจัดทำเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบ การปรับปรุงแก้ไขในกรณีที่เป็นแรงดันนั้น ก็อาจใช้วัสดุที่ได้มาตรฐานและมีคุณภาพมาปูผิวหน้าของบริเวณที่อาจจะเกิดอันตรายได้

จากผลการวิจัยพบว่าสามารถนำหลักเกณฑ์ไปใช้พิจารณารูปแบบการออกแบบกราวด์กริดที่สัดส่วนการปิดตัด ในกรณีที่ต้องการการสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยใหม่ซึ่งต้องรู้พื้นที่ในการก่อสร้างและวัดค่าความต้านดินว่าดินมีลักษณะเป็นดินแบบใด นำผลมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.1 ถึง 4.2 เช่นในกรณีที่ต้องการสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่พื้นที่ 30x30 เมตร โดยวัดค่าความต้านทานดินได้เป็นดินชั้นเดียวที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าตารางที่ 4.1 เพื่อหาค่าสัดส่วนการปิดตัดที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มีค่าต่ำสุดเพื่อนำไปออกแบบสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณและออกแบบกราวด์กริดในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย จากการศึกษาหลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบกราวด์กริดพบว่ารูปแบบกราวด์กริดพื้นที่ที่มีความกว้างและใหญ่จะมีสมรรถนะของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ต่ำกว่าพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก และพื้นที่ยิ่งใหญ่มากเท่าไรทำให้ค่าความต้านมีค่าน้อยลงไปด้วย จากการศึกษาพบว่าลักษณะของดินเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ค่าแรงดันทั้งสามค่ามีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งลักษณะของดินชั้นเดียวจะทำให้ค่าแรงดันทั้งสามค่ามีค่าที่ต่ำ การศึกษาค่าความต้านจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าดินชั้นล่างจะทำให้ค่าแรงดันทั้งสามค่ามีค่าลดลง

ข้อเสนอแนะ ในการออกแบบกราวด์กริดต้องการให้มีการออกแบบที่หลากหลายเช่น พื้นทีสี่เหลี่ยมพื้นผ้า พื้นทีรูปตัวแอว เป็นต้น และควรศึกษาข้อมูลให้มากกว่านี้หรือสำรวจความต้าน

จำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่เพื่อได้รับถึงคุณลักษณะของดิน และศึกษาลักษณะของดินชนิดต่างๆ ให้มากขึ้น ควรจะต้องทำการศึกษารอบนอกแบบกราวด์กริด ในกรณีเป็นสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยใต้ดินว่ามีปัจจัยสำคัญอะไรบ้างที่จำเป็นต่อการออกแบบระบบกราวด์กริด และควรศึกษาเพื่อปรับปรุงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดอันตรายในระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย



## บรรณานุกรม

- [1] A. Phayomhom, and et.al., “Safety analysis for grounding potential rise of two neighbouring substations: case study of metropolitan electricity Authority’s System. In Proce. 44th International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, August 2012.
- [2] IEEE Std 80-2000, “IEEE guide for safety in AC substation grounding,” 2000.
- [3] ANSI/IEEE Std 81-1983, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System,” 1983.
- [4] A. Phayomhom, and et.al., “Safety design planning of ground grid for outdoor substation in MEA’s power distribution system,” in Proc. Electrical Engineering/Electronics Computer Telecom. and Information Technology International Conf.. pp. 298-302, 2010.
- [5] P. A. Zotos, “Ground grid design in large industrial plants,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 24, no. 3, pp.521-525, May/June, 1988.
- [6] IEEE Std 367-1996, “IEEE recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault,” 1996.
- [7] M. Mitolo, P. E. Sutherland and R. Natarajan, “Effects of High Fault Currents on Ground Grid Design,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 46, no. 3, May/June, 2010.
- [8] A. Puttarach, et.al., “Substation grounding grid Analysis with the Variation of Soil layer depth Method,” in Proc. IEEE Conf. Lausanne, Power Tech. pp. 1881-1886, 2007.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ



## การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยมีสองสถานีในบริเวณเดียวกัน

### Ground Grid Design of Two Neighbouring Distribution Substation

นัฐ โชติ รุกไทยเจริญชีพ<sup>1\*</sup> และ สากร วุฒิพัฒน์พันธุ์<sup>1</sup>

Nattachote Rugthaicharoencheep<sup>1\*</sup> and Sakhon Woothipatanapan<sup>1</sup>

#### บทคัดย่อ

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากความผิดพลาดซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าสูงจนทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ อีกทั้งยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์และเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ปัจจุบันสถานีไฟฟ้าย่อยแบบที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน (Gas Insulated Substation: GIS) ถูกสร้างขึ้นมากโดยเฉพาะในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบที่ใช้อากาศเป็นฉนวน (Air Insulated Substation: AIS) ในการที่จะสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแบบ GIS ขึ้นมาแทนแบบ AIS และการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจำเป็นต้องสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กอีกสถานีหนึ่งขึ้นมาเพื่อทำการจ่ายไฟฟ้าทดแทนให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเดิม แต่การที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยสองสถานีในบริเวณเดียวกันอาจทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียลที่มีความชันสูงระหว่างระบบกราวด์กริดของทั้งสองสถานีขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำที่มีค่าสูงขณะที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นก่อนทำการปรับปรุงหรือซ่อมบำรุงสถานีไฟฟ้าย่อยจึงต้องทำการวิเคราะห์ระยะห่างของกราวด์กริดและขนาดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่สร้างขึ้นใหม่ว่าจะมีผลอย่างไรต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำ รวมทั้งศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่จะเกิดขึ้นดังกล่าว

คำสำคัญ : กราวด์กริด, สถานีไฟฟ้าย่อย, แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำ, แรงดันไฟฟ้าสัมผัส

## ABSTRACT

Ground grid design of substation is very important. It will help prevent the danger caused by the fault which causes the high step voltage and high touch voltage and may cause the operator to die. It also helps prevent damage to equipment and increases reliability for power systems as well. Currently, the Gas Insulated Substation (GIS) has been built a lot, especially in areas with limited space because it takes less space than the Air Insulated Substation (AIS). In order to create a substation of the GIS model instead of the AIS model. In order to create the GIS instead of AIS, including the improvement or maintenance of the substation, it is necessary to build another small substation to supply electricity to replace electricity from the original substation. However, there are two substation stations in the same area may cause an increase of high-slope ground potential between the ground grid systems of both substations. It will cause high step voltage and high touch voltage while the fault is diminished. Therefore, before improvement or maintenance of substation, the ground grid distance and the size of the newly constructed substation must be analyzed that what effect on step voltage and touch voltage generation. Including studying the effects of step voltage and touch voltage that will occur.

**Keywords:** ground grid, distribution substation, step voltage, touch voltage

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Wongsawang, Bangsue, Bangkok10800, Thailand

ผู้พิมพ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail) : nattachote.r@rmutp.ac.th

## บทนำ

ในการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง (Mesh) ห่างกันไม่เท่ากัน ซึ่งแต่ละพื้นที่ ที่มีระยะห่างของตัวนำนั้นมีการเพิ่มขึ้นของทางต้านกราวด์ (Ground Potential Rise) แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) จะมีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลจากค่าการบีบอัดของอัตราส่วนตัวนำ (Conductor Compression Ratio) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายด้วยความสัมพันธ์สัดส่วนการบีบอัดที่ดีที่สุด (Optimal Compression Ratio : OCR) ของตัวนำภายใต้การต่อลงดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยในระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอในดินชั้นเดียว (Uniform Soil) และดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในดินสองชั้น (Two -Layer) โดยมีจุดประสงค์ที่จะหาค่าของ OCR ซึ่งจะเป็นค่าที่ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดมีค่าต่ำสุดส่วนค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในกฎเกณฑ์กฎเกณฑ์ความปลอดภัย (Safety Criteria)

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ที่ดีต้องคำนึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานสถานีไฟฟ้าย่อยและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย เนื่องจากกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริด หรือพื้นดินที่ที่อยู่บริเวณรอบๆ และรวมถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ในการออกแบบหรือสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ในการก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยควรมีค่าความต้านทานของระบบไม่เกิน 5 โอห์มที่บริเวณรอบๆ กราวด์กริดแต่ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงได้ เมื่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยเสร็จสมบูรณ์ จะมีค่าความต้านทานของดินเท่าไร ในขั้นตอนการออกแบบทั้งนี้การออกแบบจะใช้การประมาณค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดิน ซึ่งจะนำไปใช้ได้ในสมการคำนวณความต้านทานดิน ของระบบสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อความปลอดภัย ซึ่งจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step Voltage) และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสหรือแรงดันเมฆสูงสุด (Touch Voltage) ที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ [1]

สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบการต่อลงดิน

เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติของลงดิน (Ground fault condition) ในสถานีไฟฟ้าย่อย จะมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลผ่านระบบที่ต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยสู่ระบบดิน ซึ่งกระแสที่ไหลลงระบบดินของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวดินในบริเวณรอบๆ ในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ผิวดินมีค่าไม่สม่ำเสมอจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยและบริเวณรอบๆ สถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยที่ได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้าค่าความต่างศักย์ที่เกิดในสภาวะผิดปกติค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในภายในบริเวณสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย [2, 3] ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Ground potential rise, GPR) คือ ค่าความต่างศักย์หรือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงตาข่ายกับตำแหน่งที่มีความห่างจากสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย [4, 5]

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage,  $E_t$ ) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 จุด ที่ผิวพื้นผิวดิน เนื่องจากยืนอยู่ภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย โดยที่มนุษย์ไปสัมผัสหรือแตะกับ โครงสร้างที่เป็นโลหะหรือตัวถังของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดิน [6]

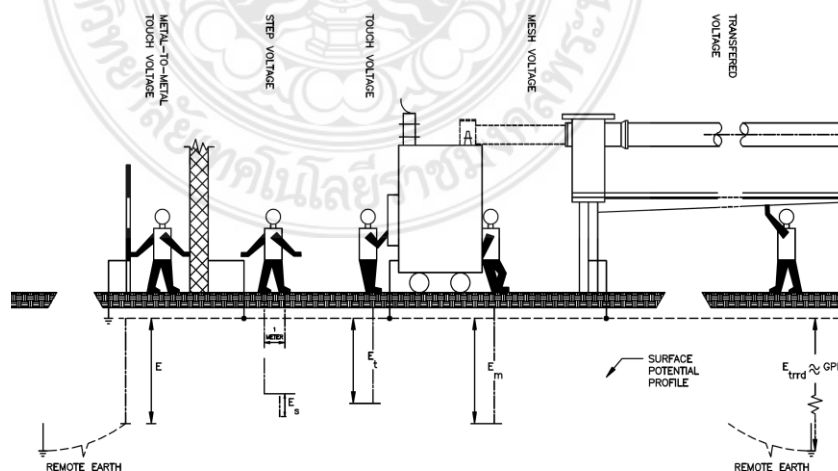
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage,  $E_s$ ) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวดินระหว่างจุด 2 จุดของเท้าทั้ง 2 ข้างที่สัมผัสกับพื้นผิวดินที่ยืนอยู่ในภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างช่วงก้าวของเท้าเท่ากับ 1 เมตร รูปแบบการเกิดแรงดันในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย

ระบบกราวด์กริด (Grounding Grid) เป็นระบบการต่อลงดินในแนวราบที่ประกอบด้วยตัวนำที่ฝังดินที่ต่อเนื่องกัน และเป็นจุดต่อลงดินร่วมของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างโลหะที่อยู่ภายในพื้นที่นั้นๆ

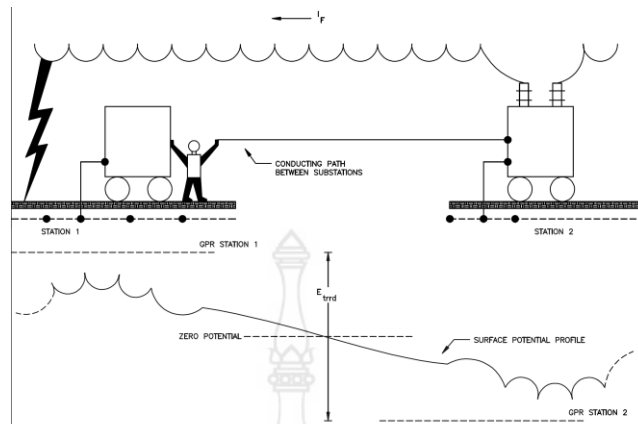
แรงดันที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (Ground Potential Rise : GPR) หรือการเพิ่มขึ้นของกราวด์โพเทนเชียล คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นในระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ซึ่งเพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างกราวด์กริดที่ต่อลงดินเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้า (Remote Ground) และมีค่าเท่ากับกระแสกริดสูงสุดคูณกับความต้านทานของระบบกราวด์กริด ดังแสดงในภาพที่ 1

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal to Metal Touch Voltage :  $E_{mm}$ ) คือค่าความต่างศักย์ระหว่างวัตถุโลหะหรือโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งต่อถึงกันระหว่างมือกับมือ หรือมือกับเท้าทำให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย [7, 8]

แรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transfer Voltage :  $E_{trfd}$ ) คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ถ่ายโอนเข้าหรือออกจากสถานีไฟฟ้าไปยังจุดระยะไกล (Remote Point) ที่อยู่นอกสถานีไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 รูปแบบการเกิดแรงดันต่างๆ ภายในสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยเมื่อเกิดสภาวะกระแสผิดปกติพร้อม



ภาพที่ 2 รูปแบบการเกิดแรงดันถ่ายโอน

### วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบกราวด์กริดจะมีทั้งหมด 3 ขนาดแบ่งเป็นพื้นที่เหลี่ยมจัตุรัสที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร, 20x20 ตารางเมตร และ 30x30 ตารางเมตร ที่ดินชั้นเดียวและดินสองชั้น โดยมีการวางที่ไม่เท่ากันตามค่าสัดส่วนการบีบอัด ตั้งแต่ 0.0 – 1.0 ดังแสดงในภาพที่ 3 [4]

C=0.0	C=0.1	C=0.2
C=0.3	C=0.4	C=0.5
C=0.6	C=0.7	C=0.8
C=0.9	C=1.0	

ภาพที่ 3 กราวด์กริดรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สัดส่วนการบีบอัดค่าต่างๆ

## ผลและวิจารณ์ผล

### กรณีศึกษา

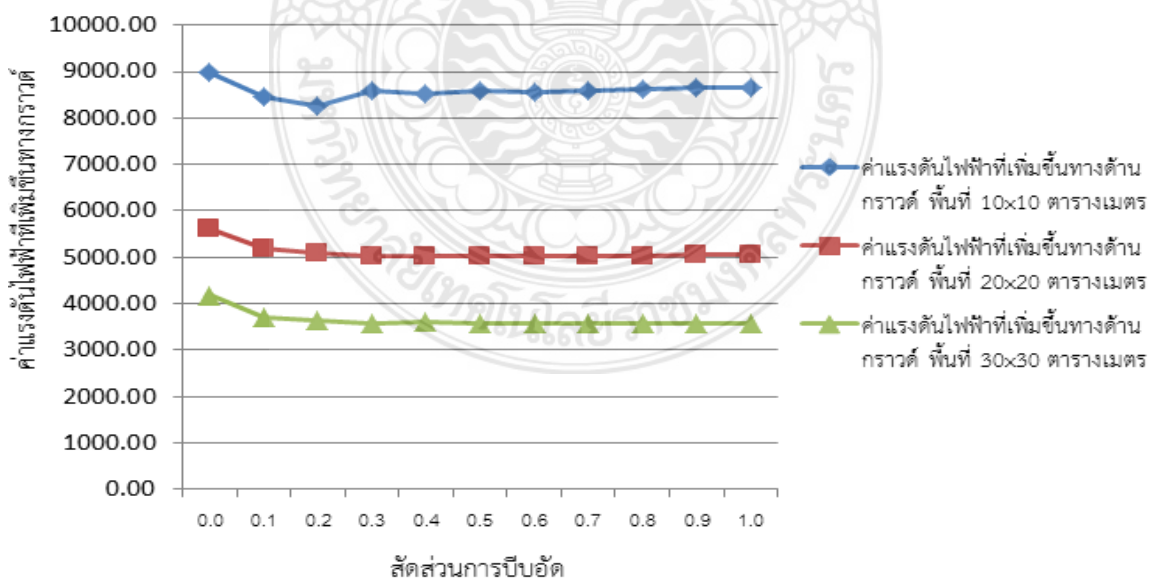
กรณีดินชั้นเดียวที่ความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ที่พื้นที่ขนาด 10x10 20x20 และ 30x30 ตารางเมตร โดยมีความลึกของกราวด์กริด 0.5 เมตร ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทำการปรับเปลี่ยนค่าของสัดส่วนการบิบบอดของตัวนำกราวด์กริด ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยใช้ทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (GPR) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8,985 V ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8,249 V ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.2 ดังแสดงในภาพที่ 4

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,625 V ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5,011 ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.7 ดังแสดงในภาพที่ 4

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4,182 V ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.0 และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3,557 ซึ่งสัดส่วนการบิบบอดจะอยู่ที่ 0.8 และสัดส่วนการบิบบอดที่ 0.9 ดังแสดงในภาพที่ 4



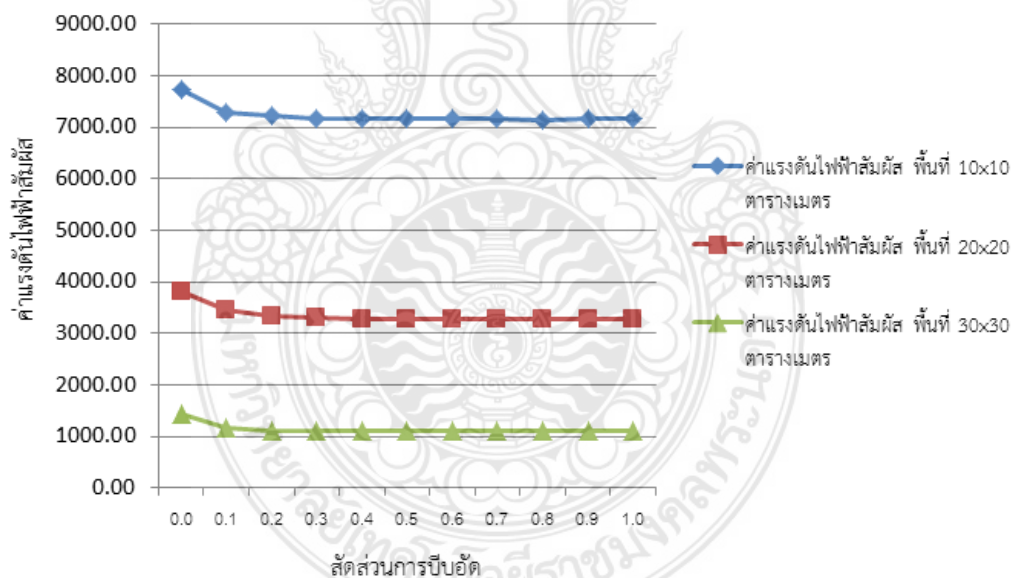
ภาพที่ 4 ผลของสัดส่วนการบิบบอด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร 20x20 ตารางเมตร และ 30x30 ตารางเมตร

จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 7,742 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 7,150 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 ดังแสดงในภาพที่ 5

พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 3,814 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 3,268 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 ดังแสดงในภาพที่ 5

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดเท่ากับ 1,430 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,098 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.4 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์บนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร 20x20 ตารางเมตร และ 30x30 ตารางเมตร

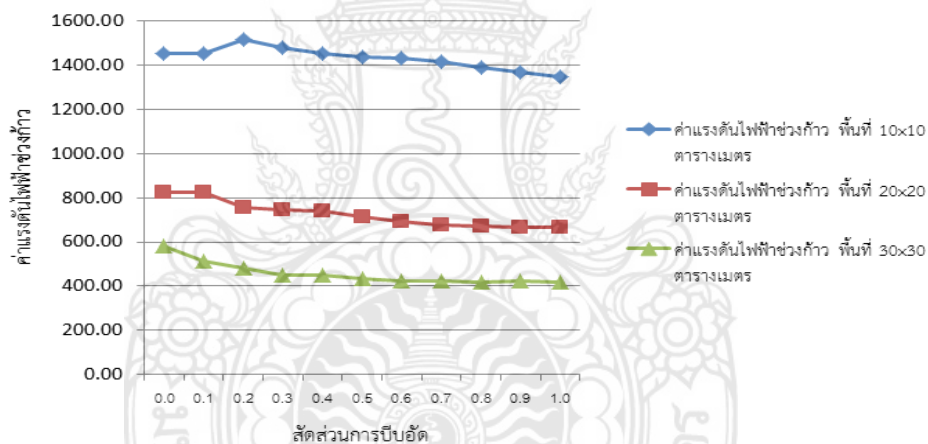


จากการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ของพื้นที่ 3 ขนาดที่มีความต้านจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

พื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่สูงสุดเท่ากับ 1,516 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 1,350 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังภาพที่ 6

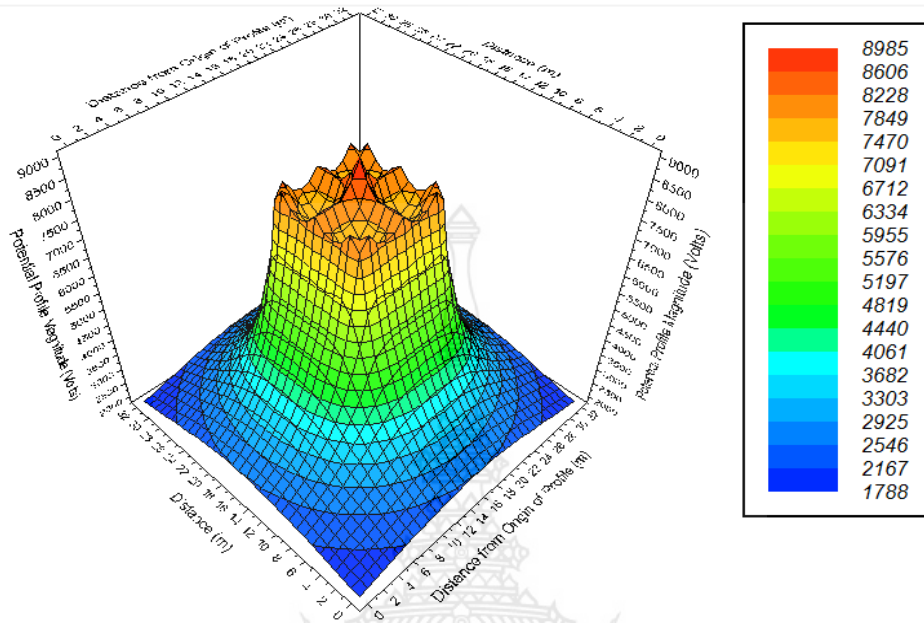
พื้นที่ขนาด 20x20 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่สูงสุดเท่ากับ 825 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.2 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 665 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 1.0 ดังภาพที่ 6

พื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่สูงสุดเท่ากับ 583 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.0 และสำหรับค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ต่ำสุดเท่ากับ 420 V ซึ่งสัดส่วนการบีบอัดจะอยู่ที่ 0.8 และที่สัดส่วนการบีบอัด 0.9 ดังภาพที่ 6

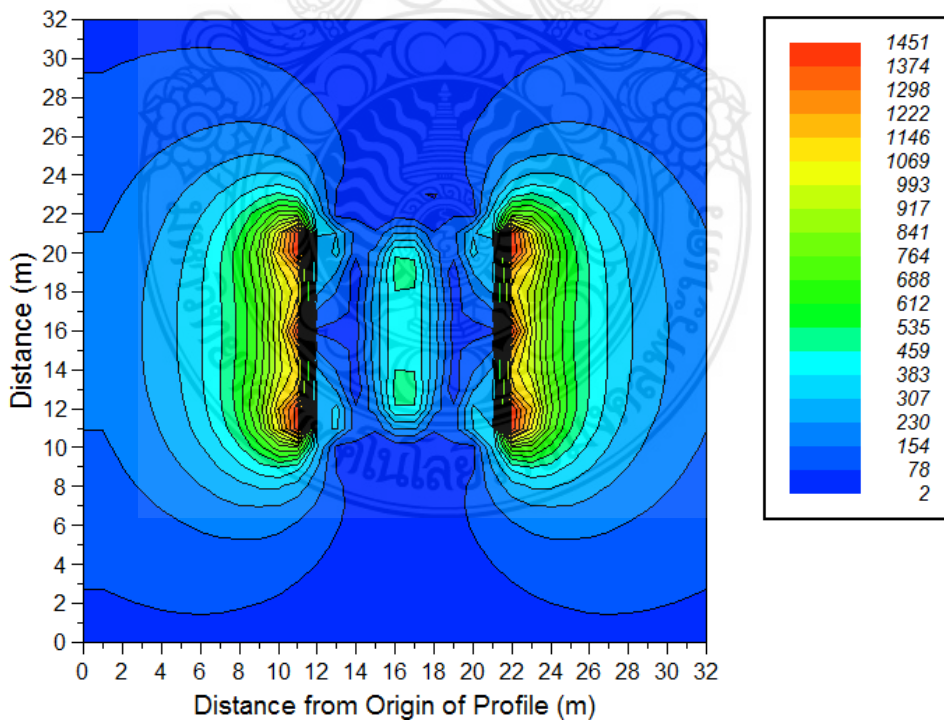


ภาพที่ 6 ผลของสัดส่วนการบีบอัด ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวบนรูปแบบกราวด์กริดของพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร 20x20 ตารางเมตร และ 30x30 ตารางเมตร

จากผลการศึกษา พบว่าที่ค่าความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงที่สุดของกรณีที่ 1 และค่าดินที่เป็นดินชั้นเดียวมีค่าความต้านทานจำเพาะ 10 โอห์ม-เมตร และลักษณะกราวด์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ขนาด 30x30 ตารางเมตร พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสต่ำสุดและแรงดันช่วงก้าวที่ต่ำสุด กราฟของค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่ได้จากการใช้โปรแกรมประมวลซึ่งแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติสูงสุดดังแสดงในภาพที่ 7 ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวแบบเฉพาะจุดสูงสุดที่สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0 แสดงในภาพที่ 8 และค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างตามสัดส่วนการบีบอัดตั้งแต่ 0.0 - 1.0 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 7 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์แบบสามมิติสูงสุด สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0



ภาพที่ 8 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวแบบเฉพาะจุดสูงสุด สัดส่วนการบีบอัดที่ 0.0

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าชนิดต่างๆตามสัดส่วนการบีบอัดตั้งแต่ 0.0 - 1.0

Compression Ratio	square 10m x 10m			square 20m x 20m			square 30m x 30m		
	Type of Voltage			Type of Voltage			Type of Voltage		
	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)	GPR (V)	Touch (V)	Step (V)
0.0	8,985	7,742	1,451	5,625	3,814	825	4,182	1,430	583
0.1	8,452	7,293	1,451	5,195	3,441	824	3,706	1,151	515
0.2	8,249	7,211	1,516	5,090	3,331	756	3,622	1,116	482
0.3	8,586	7,174	1,478	5,012	3,297	747	3,580	1,103	452
0.4	8,530	7,161	1,451	5,030	3,278	739	3,590	1,098	452
0.5	8,579	7,157	1,436	5,017	3,273	713	3,575	1,102	433
0.6	8,567	7,158	1,433	5,012	3,272	692	3,565	1,105	424
0.7	8,573	7,159	1,415	5,011	3,273	679	3,559	1,110	421
0.8	8,629	7,150	1,390	5,014	3,275	672	3,557	1,114	420
0.9	8,649	7,154	1,368	5,045	3,268	666	3,557	1,118	421
1.0	8,670	7,158	1,350	5,049	3,273	665	3,580	1,118	420

### สรุปผลการวิจัย

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยและการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดเมื่อเกิดการลัดวงจรและมีกระแสสูงเกิดขึ้น เมื่อมีกระแสอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งหรือต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณนั้นซึ่งจะพิจารณาค่าสัดส่วนการบีบอัดตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 เพื่อให้ค่าที่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดมีค่าต่ำที่สุด โดยการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) เพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ และนำผลของการออกแบบระบบกราวด์รูปแบบต่างๆ เมื่อนำไปปรับปรุงสมรรถนะแรงดันด้านกราวด์ของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย เพื่อจัดทำเป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบ การปรับปรุงแก้ไขในกรณีที่เป็นเร่งด่วนนั้น ก็อาจใช้วัสดุที่ได้มาตรฐานและมีคุณภาพมาปูผิวหน้าของบริเวณที่อาจจะเกิดอันตรายได้

ข้อเสนอแนะ ในการออกแบบกราวด์กริดต้องการให้มีการออกแบบที่หลากหลายเช่น พื้นที่สี่เหลี่ยม พื้นผ้า พื้นที่รูปตัวแอว เป็นต้น และควรศึกษาข้อมูลให้มากกว่านี้หรือสำรวจความต้านจำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่เพื่อได้รับถึงคุณลักษณะของดินและศึกษาลักษณะของดินชนิดต่างๆให้มากขึ้น และควรจะต้องทำการศึกษการออกแบบกราวด์กริด ในกรณีเป็นสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อยได้ดินว่ามีปัจจัยสำคัญอะไรบ้างที่จำเป็นต่อการออกแบบระบบกราวด์กริด และควรศึกษาเพื่อปรับปรุงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดอันตรายในระบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนผลงานวิจัย และ ขอขอบคุณ ดร.อรรถ พยอมหอม การไฟฟ้านครหลวงที่ให้ข้อมูลด้านเทคนิคการออกแบบกราวด์กริด จึงทำให้ผลงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Phayomhom, and et.al., “Safety analysis for grounding potential rise of two neighbouring substations: case study of metropolitan electricity Authority’s System. In Proce. 44th International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, August 2012.
- [2] IEEE Std 80-2000, “IEEE guide for safety in AC substation grounding,” 2000.
- [3] ANSI/IEEE Std 81-1983, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System,” 1983.
- [4] A. Phayomhom, and et.al., “Safety design planning of ground grid for outdoor substation in MEA’s power distribution system,” in Proc. Electrical Engineering/Electronics Computer Telecom. and Information Technology International Conf.. pp. 298-302, 2010.
- [5] P. A. Zotos, “Ground grid design in large industrial plants,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 24, no. 3, pp.521-525, May/June, 1988.
- [6] IEEE Std 367-1996, “IEEE recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault,” 1996.
- [7] M. Mitolo, P. E. Sutherland and R. Natarajan, “Effects of High Fault Currents on Ground Grid Design,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 46, no. 3, May/June, 2010.
- [8] A. Puttarach, et.al., “Substation grounding grid Analysis with the Variation of Soil layer depth Method,” in Proc. IEEE Conf. Lausanne, Power Tech. pp. 1881-1886, 2007.

## คณะผู้วิจัย



รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

### การศึกษา

ปร.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

### งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

### ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับสามัญวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง  
ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

### สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) สามัญสมาชิก ตลอดชีพ
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI Thailand)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- The Institution of Engineering and Technology (IET)
- International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT)

## คณะผู้วิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
E-mail: sakhon.w@rmutp.ac.th

### การศึกษา

วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)

วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)

วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (มทร.ธัญบุรี)

### งานวิจัยที่สนใจ

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบไฟฟ้ากำลัง

### ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

### สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)