

การทดสอบค่าความต้านทานดิน
GROUND RESISTANCE TESTING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

.....
.....
.....

การทดสอบค่าความต้านทานดิน
GROUND RESISTANCE TESTING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบค่าความต้านทานดิน

GROUND RESISTANCE TESTING

ผู้จัดทำ

1. นาย โชคชัย พงศ์วิทยาเลิศ รหัสประจำตัว 43010113
2. น.ส. ธัญญรัตน์ หาญเหรียญศรี รหัสประจำตัว 43010181
3. นาย ประสิทธิ์ บุญสนอง รหัสประจำตัว 43010251
4. น.ส. สุภัชชา บุญประสม รหัสประจำตัว 43010490



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. นฤพล ลีลาจินดาไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบค่าความต้านทานดิน

นาย โชคชัย พงศ์วิทยาเลิศ 43010113

น.ส. ธัญญรัตน์ หาญเหรียญศรี 43010181

นาย ประสิทธิ์ บุญสนอง 43010251

น.ส. สุภัสชยา บุญประสม 43010490

รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบค่าความต้านทานดินด้วยเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน TERCA 2 และสร้างแบบจำลองของระบบต่อลงดินขึ้น โดยทำการย่อส่วนโดยอาศัยสเกลแฟคเตอร์ เพื่อหาความต้านทานของตะแกรงในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและระยะห่างของตัวนำในตะแกรงที่มีความสม่ำเสมอ โดยมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำของตะแกรง, ความลึกของตะแกรง, จำนวนเมฆในแต่ละด้านของตะแกรง และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ETAP ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROUND RESISTANCE TESTING

Chokchai Phongwittayalert

Thanyarat Harnriantri

Prasit Boonsanong

Supatchaya Boonprasom

Assoc.Prof.Monton Leelajindagriylerg Advisor

Assist.Prof.Dr.Anontawat Kunagor Advisor

ABSTRACT

This thesis presents ground resistance testing employing TERCA 2. The experimental model of a ground system is constructed using scale factors in order to determine ground resistance of a square shape ground grid with uniform distribution length for the grid. The conductor size, grid depth and number of mesh in each side of the grid are varied to study their effects on the ground resistance value. Computer simulations using ETAP are performed, and the results are compared with measurements.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลสำคัญที่ต้องกล่าวถึง คือ รศ. มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ และ ผศ.ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูคณะผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ คณะผู้จัดทำขอระลึกในพระคุณอันล้นพ้นสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบต่อลงดิน	3
2.1 ความจำเป็นของระบบการต่อลงดิน	3
2.2 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	3
2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย	4
2.3.1 ร่างกายของมนุษย์	4
2.3.2 กระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์	4
2.3.3 เส้นทางของกระแสที่ผ่านร่างกาย	5
2.3.4 ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในสภาวะผิดปกติ	6
2.3.5 ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน	7
2.4 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ	8
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าความต้านทานดิน	10
2.5.1 จุดประสงค์ในการวัดค่าความต้านทานดิน	10
2.5.2 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านทานของเนื้อดิน	11
2.5.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	13
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของการทดสอบความต้านทานระบบต่อลงดิน	14
2.6.1 วงจรการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน	15
2.6.2 ตำแหน่งการตอกหลักเพิ่มเพื่อวัดความต้านทานระบบต่อลงดิน	15
2.6.3 การวัดความต้านทานของแท่งกราวด์ด้วยวิธี 62% (Fall of Potential Method)	16
2.6.4 ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับแท่งอิเล็กโทรดที่ตอกเพิ่มลงไป	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 3 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินและ	
การออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP	18
3.1 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน	18
3.1.1 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน	18
3.1.2 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน	18
3.1.3 การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน	19
3.1.4 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน	21
3.1.5 ค่ากระแสกริด (Grid Current)	21
3.2 การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าแม่ขและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด	
ที่สามารถเกิดขึ้นได้	21
3.3 การออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP	24
3.3.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ETAP	24
3.3.2 หน้าต่างแสดงวิธีการออกแบบระบบต่อลงดิน	25
3.3.3 หน้าต่างการออกแบบของวิธี IEEE Method	25
3.3.4 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	26
3.3.5 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับตัวนำ	27
3.3.6 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับแท่งหลักดิน	28
3.3.7 หน้าต่างข้อมูลการออกแบบ	29
3.3.8 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ	30
3.3.9 หน้าจอแสดงการเตือนเมื่อผลการออกแบบไม่มีความปลอดภัย	31
3.3.10 หน้าต่างแสดงผลการออกแบบ	32
3.3.11 ข้อแตกต่างของโปรแกรมส่วน Finite Element Method (FEM)	32
3.3.12 หน้าต่างแสดงรายงานการออกแบบ	35
3.3.13 หน้าต่างแสดงผลสรุปการคำนวณ	35
บทที่ 4 การวัดค่าความต้านทานดิน และการสร้างชุดจำลองการทดสอบตะแกรงต่อลงดิน	37
4.1 ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานดิน	37
4.2 รายละเอียดของชุดทดสอบตะแกรงต่อลงดินจำลอง	38
4.2.1 สเกลแฟคเตอร์	39
4.2.2 ความถูกต้องของโมเดลที่ใช้ทดสอบ	39
4.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	40
4.2.4 วิธีการทดสอบค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจำลอง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
4.2.5 สมการที่ใช้ในการแปลงค่าแบบจำลองให้เป็นค่าจริง	42
4.2.6 การวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน	43
บทที่ 5 ผลการทดลอง	45
5.1 การวัดค่าความต้านทานดิน	45
5.2 ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดินของระบบจำลอง	52
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	56
6.1 การวัดค่าความต้านทานดิน	56
6.2 การวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจำลอง	57
6.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน	57
6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเมชในแต่ละด้านของตะแกรงกับค่าความต้านทาน	58
6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน	59
6.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	60
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก: คู่มือเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน TERCA 2	62
ภาคผนวก ข: การทดลองที่ 1 การวัดค่าความต้านทานดิน	72
ภาคผนวก ค: การทดลองที่ 2 การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP	80
ภาคผนวก ง: การวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงค่าความต้านทานของดินแต่ละชนิด	11
2-2 แสดงค่าความต้านทานดินตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตามน้ำหนัก	11
2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของดินเหนียวปนทรายตามอุณหภูมิ	12
2-4 แสดงค่าความต้านทานของเนื้อดินเหนียวปนทรายที่เพิ่มสารละลายของเกลือลงไป ในปริมาณต่างๆ กัน	13
2-5 แสดงค่าความต้านทานของดินเหนียวปนทรายแปรตามอุณหภูมิเมื่อมีการปรับสภาพดิน ด้วยสารเคมี	13
2-6 แสดงระยะทางโดยประมาณสำหรับคอกแท่งอิเล็กโทรด Y และ Z ด้วยวิธีวัดแบบ 62 %	17
3-1 ค่าคงที่ของสายตัวนำดิน	20
5-1 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนสิงหาคม 2546	45
5-2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนกันยายน 2546	46
5-3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนตุลาคม 2546	47
5-4 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนพฤศจิกายน 2546	48
5-5 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนธันวาคม 2546	49
5-6 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนมกราคม 2547	50
5-7 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนกุมภาพันธ์ 2547	51
5-8 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm ² ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	52
5-9 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm ² ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	52
5-10 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm ² ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	52
5-11 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm ² ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	53
5-12 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	53
5-13 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	53
5-14 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้าที
5-15 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	54
5-16 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	54
5-17 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	55
5-18 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	55
5-19 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm ² ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ 20 Ω - m	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้าที่
2-1 แสดงตะแกรงค้ำถ่วงขนาด 16 เมช	3
2-2 แสดงการเชื่อมต่อระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า	4
2-3 แสดงรูปแบบการเกิดแรงดันต่างๆที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน	6
2-4 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	8
2-5 แสดงวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	8
2-6 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	9
2-7 แสดงวงจรสมมูลขณะที่มีมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	9
2-8 แสดงกราฟ ความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของความต้านทานดินของท่อโลหะขนาด 3/4 นิ้ว ฝังในดินเหนียวปนหิน Curve 1 เป็นกราฟที่ความลึก 3 ฟุต Curve 2 ที่ความลึก 10 ฟุต	12
2-9 แสดงวงจรการวัดความต้านทานดินแบบ 4 จุด	14
2-10 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน	15
2-11 ,2-12 แสดงการทับซ้อนกันและไม่ทับซ้อนกันของพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้า ของแท่ง X และ Z ตามลำดับ	15
2-13 แสดงการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยวิธี 62 %	16
2-14 แสดงระยะห่างระหว่างแท่งกราวด์ทดสอบกับขั้ว Y ที่ให้ค่าความต้านทานที่ต้องการ	16
3-1 แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงดันไฟฟ้ามาชและแรงดันช่วงก้าวสูงสุด	23
3-2 แสดงหน้าตาหลักของโปรแกรม ETAP	24
3-3 แสดงหน้าตาวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของโปรแกรม ETAP	25
3-4 แสดงหน้าตาการออกแบบของวิธี IEEE Method	25
3-5 แสดงหน้าตาข้อมูลเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	26
3-6 แสดงหน้าตาข้อมูลเกี่ยวกับตัวนำ	27
3-7 แสดงหน้าตาข้อมูลเกี่ยวกับแท่งหลักดิน	28
3-8 แสดงหน้าตาข้อมูลการออกแบบ	29
3-9 แสดงหน้าตาต่างแสดงผลการคำนวณและออกแบบ	30
3-10 แสดงตัวอย่างหน้าจอการเตือนเมื่อผลการออกแบบไม่มีความปลอดภัย	31
3-11 แสดงหน้าตาต่างแสดงผลการออกแบบ	32
3-12 แสดงหน้าจอการออกแบบของวิธี Finite Element Method	33
3-13 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Absolute Voltage	33
3-14 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Touch Voltage	34
3-15 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Step Voltage	34
3-16 แสดงหน้าตาต่างรายงานผลการออกแบบ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
3-17 แสดงหน้าต่างสรุปผลการคำนวณ	36
4-1 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานดิน	37
4-2 แสดงการวัดค่าความต้านทานดินด้วยเครื่องมือวัด TERCA 2	38
4-3 แสดงชุดจำลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	39
4-4 แสดงตะแกรงต่อลงดินขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2	41
4-5 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน	43
4-6 แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงด้วยเครื่องมือวัด TERCA 2	44
6-1 แสดงกราฟความต้านทานจำเพาะของดินบริเวณสนามหญ้าศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง ระหว่าง เดือนสิงหาคม 2546 – เดือนกุมภาพันธ์ 2547	56
6-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดิน กับค่าความต้านทาน	57
6-3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเมฆในแต่ละคืนของตะแกรงต่อลงดิน กับค่าความต้านทาน	58
6-4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน กับค่าความต้านทาน	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในสถานีไฟฟ้าย่อย การต่อลงดินเป็นมาตรการหนึ่งของความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึงสำหรับผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายใน โดยเฉพาะความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการลัดวงจรลงดินของระบบไฟฟ้า อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกายของผู้ปฏิบัติงานเมื่อยืนระหว่างจุด 2 จุดที่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น และกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าสูงมากเกินกว่าค่าที่กระแสที่มนุษย์ยอมรับได้ก็อาจมีอันตรายจนถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้ผลของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดได้จากประเด็นนี้จึงได้มีการนำระบบต่อลงดินมาใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อช่วยกำจัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งช่วยป้องกันอันตรายให้แก่บุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆได้ และช่วยให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้อย่างถูกต้อง

การออกแบบระบบต่อลงดิน จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานขั้วพาดของดิน, ค่ากระแสกริด, ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน ขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน, จำนวนเมฆในแต่ละเส้นของตะแกรง เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาวัดค่าความต้านทานดิน, ออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP และศึกษาการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบและได้ทำการย่อส่วนของอุปกรณ์ โดยใช้สเกลแฟคเตอร์เปรียบเทียบกับสูตรในทางทฤษฎี

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาลักษณะการวัดค่าความต้านทานดินตลอดจนเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน TERCA 2 และผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน, ระดับความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน และจำนวนเมฆในแต่ละด้านของตะแกรงต่อลงดินว่ามีผลกระทบต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยใช้ชุดทดสอบตะแกรงต่อลงดินจำลอง รวมทั้งศึกษาขั้นตอนและหลักการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน การเพิ่มระดับความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน, การเพิ่มขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินและการเพิ่มจำนวนเมฆในแต่ละด้านของตะแกรงต่อลงดินนั้น จะเป็นการลดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลง

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 การวัดค่าความต้านทานดินในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ วิธี Four-Point Method (Wenner Method) และการทดสอบความต้านทานของระบบต่อลงดินใช้ วิธี 2-Point Measurement อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 81-1983

1.4.2 การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP (ส่วนของ Ground Grid System) อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 80 - 2000

1.4.3 ชุดทดสอบการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจำลองจะพิจารณาเฉพาะตะแกรงที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยโมเดลที่ได้สร้างขึ้นมานั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบรวมทั้งหมด 12 โมเดล โดยไม่ได้รวมผลของแท่งหลักดินประกอบด้วยและใช้ลวดทองแดงที่ชุดฉนวนเป็นตัวนำและจุดต่อเชื่อมของลวดนั้นับคกรี่ด้วยตะกั่ว

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการศึกษาการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน โดยใช้แบบจำลองในการทดสอบนั้นถือว่าน้ำที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีความสม่ำเสมอ (Homogeneous Water) มีค่าความต้านทานจำเพาะค่าหนึ่ง (ซึ่งในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ค่าที่ใช้เท่ากับ $20 \Omega \cdot m$)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1.6.1 ศึกษาหลักการวัดค่าความต้านทานดินและเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน TERCA 2

1.6.2 ทำการวัดค่าความต้านทานดินบริเวณสนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง ระหว่างเดือนสิงหาคม 2546 – เดือนกุมภาพันธ์ 2547

1.6.3 ศึกษาขั้นตอนและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน

1.6.4 ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม ETAP

1.6.5 ศึกษาหลักการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

1.6.6 ศึกษาและสร้างชุดทดสอบตะแกรงต่อลงดินจำลอง

1.6.7 ทำการวัดค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดินจำลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มระดับความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน, การเพิ่มขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินและการเพิ่มจำนวนเมชในแต่ละด้านของตะแกรงต่อลงดินนั้น โดยจะใช้สเกลแฟคเตอร์ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ใช้ในการย่อส่วนของตะแกรงต่อลงดิน แล้วใช้สเกลแฟคเตอร์คูณกลับเพื่อหาค่าจริงของค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี

1.6.8 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบต่อลงดิน

2.1 ความจำเป็นของระบบการต่อลงดิน

การต่อลงดินคือการใช้ตัวนำต่อระหว่างวงจรไฟฟ้าหรือบริภัณฑ์ไฟฟ้ากับพื้นโลกหรือตัวนำอื่นที่มีขนาดใหญ่จนรับหน้าที่แทนโลกได้ การต่อลงดินจึงมีความหมายอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นการต่อเข้ากับโลกอย่างดีในทางไฟฟ้า การต่อลงดินมีจุดประสงค์เพื่อความปลอดภัยของสิ่งต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้า เช่นเมื่อเกิดการผิดปกติของลงดิน (Ground Fault) ขึ้นในระบบ รีเลย์ที่สถานีควบคุมการจ่ายไฟฟ้าจะได้ตรวจสอบพบและทำงาน ได้ผลดีขึ้น

2. บุคคล ป้องกันอันตรายมิให้เกิดขึ้นกับคนหรือสิ่งมีชีวิตขึ้น เช่น การถูกกระแสไฟฟ้าช็อต

3. บริภัณฑ์ไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อเกิดการผิดปกติหรือฟอลต์ขึ้นในระบบ

4. ทรัพย์สินอื่นๆ

5. การลดสัญญาณรบกวน

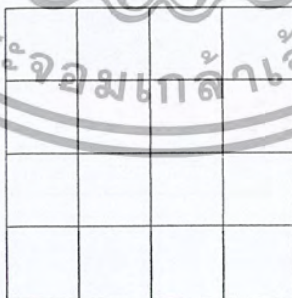
6. ความเชื่อถือได้

2.2 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าใช้เป็นแบบตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) ดังรูปที่ 2-1 เนื่องจากระบบต่อลงดินแบบตะแกรงมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแบบตะแกรงต่อลงดินนี้ สามารถทนต่อปริมาณกระแสที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินได้มากกว่าระบบต่อลงดินแบบอื่น

2. ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนี้จะมีค่าความต้านทานน้อย



รูปที่ 2-1 แสดงตะแกรงต่อลงขนาด 16 เมช

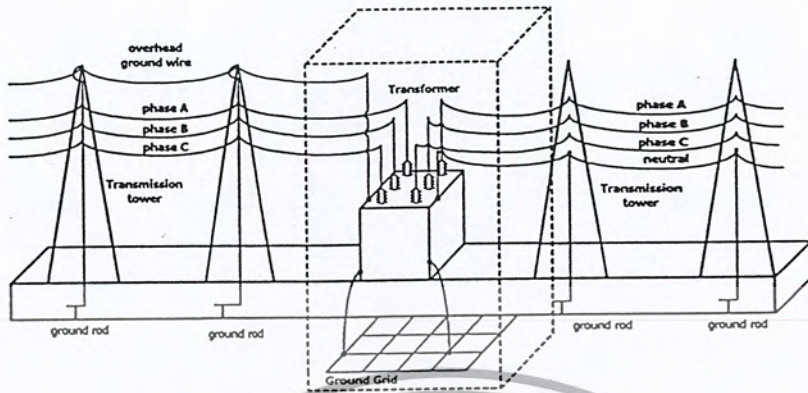
ในรูปที่ 2-1 นั้นเป็นตะแกรงต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี 16 เมช (Mesh)

โดยที่เมชคือช่องสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน สำหรับการใช้งานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้เป็นจุดต่อลงดินของ โครงสร้างที่เป็นโลหะที่ติดตั้งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ตัวถังของอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวก CT, PT, CB และยังใช้เป็นจุดต่อนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงการเชื่อมต่อระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย

สำหรับองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยมีดังต่อไปนี้

2.3.1 ร่างกายของมนุษย์

ร่างกายของมนุษย์เป็นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ตามสภาพแวดล้อม และมีค่าที่ต่างกันทุกๆ คนซึ่งในการทดสอบที่ผ่านมาในอดีต เพื่อที่จะหาค่าความต้านทานค่าสุดท้ายของร่างกายคนเรานั้นมีค่าตั้งแต่ 400-600 โอห์ม แต่เมื่อวัดความต้านทานทั้งหมดจากมือหนึ่ง ไปยังอีกมือหนึ่งจะมีค่าประมาณ 2300 โอห์ม และเมื่อวัดจากมือถึงเท้าจะมีค่าประมาณ 1100 โอห์ม เพื่อความเป็นแบบแผนเดียวกัน ดังนั้น IEEE STANDARD 80-2000 แนะนำให้ใช้ค่าความต้านทาน 1000 โอห์ม โดยประมาณสำหรับค่าความต้านทานของมนุษย์

ในสภาพความเป็นจริงนั้นค่าความต้านทานที่ผิวหนังหรือจุดสัมผัสเป็นตัวการสำคัญที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ว่าการสัมผัสจะผ่านอวัยวะส่วนใด ดังนั้นสภาพของผิวหนังบริเวณจุดสัมผัสจะมีผล โดยตรงต่ออันตรายที่จะเกิดขึ้น เช่น ผิวหนังที่เปียกชื้นจะมีโอกาสเกิดอันตรายได้ง่ายและรุนแรงกว่าผิวหนังที่แห้งสนิท

2.3.2 กระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์

สามารถแยกพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

- ความถี่

ที่ความถี่ 50 Hz นี้ค่าความต้านทานของร่างกายจะเป็นความต้านทานชนิด resistive แต่เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น ความต้านทานของร่างกายจะเริ่มทำหน้าที่คล้ายวงจร R-C ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานของร่างกาย

ต่อกระแสไฟฟ้าจะลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ความต้านทานที่จุดสัมผัสค่าลงมากอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขนาดของกระแสขนาดของกระแสจะมีผล โดยตรงต่อปฏิกิริยาการ โต้ตอบของร่างกายมนุษย์และอันตรายที่อาจเกิดขึ้นต่อร่างกายของคนเราที่ขนาดกระแสระดับต่างๆ กัน
- ระยะเวลาการถูกไฟฟ้าช็อต

ระยะเวลาในการถูกไฟฟ้าช็อตจะเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญมากอันหนึ่งในการที่จะกำหนดขนาดของกระแสที่ร่างกายสามารถทนได้ในช่วงเวลานั้นๆ โดยไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย ซึ่งช่วงเวลา ที่กระแสไหลผ่านร่างกายนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของอุปกรณ์ป้องกันในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่ เกิดขึ้น

ข้อมูลแสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกาย

1. ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 0.7 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด ไม่มีผลต่อร่างกาย ร่างกายไม่รับรู้ปริมาณกระแสขนาดนี้

2. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.7 – 2 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด เกิดความรู้สึกจี้จี้

3. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 - 8 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด มีผลกระทบต่อระบบประสาท เจ็บปวดอย่างรุนแรง เกิดอาการช็อคที่ไม่ถึงขั้นอันตราย

4. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 8 – 20 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท ไม่สามารถควบคุมการแบมือหรือกำมือ เนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อได้ ถ้าถูกกระแสขนาด 20 มิลลิแอมป์ โดยทันทีทันใดจะได้รับอันตราย จากการเกิดกล้ามเนื้อจี้

5. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 20 – 50 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาทคือ กล้ามเนื้อหน้าอกหดตัวอย่างรุนแรงและมี อากาศขบอยู่ในปอดมาคว่าปกติทำให้ปอดทำงานไม่เต็มที่ ไม่สามารถปล่อยมือออกมาได้ เกิดของเสียขึ้นที่ ในกระแสโลหิตมีผลให้เกิดความผิดปกติขึ้นในเซลล์สมอง ทำให้เสียชีวิตในเวลาเพียง 2 – 3 นาที

6. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 – 1,000 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท หัวใจเริ่มต้นในลักษณะไม่ประสานกันคือ ไม่ เป็นจังหวะตามปกติ มีผลให้การหมุนเวียนโลหิตหยุดลง แม้ใช้เวลาแค่ 0.1 วินาที ถ้ากระแสผ่านร่างกาย มากกว่า 1 วินาที หรือมากกว่านั้นทำให้หัวใจหยุดเต้นได้

7. ปริมาณกระแสไฟฟ้ามากกว่า 1,000 มิลลิแอมป์

ผลที่เกิด เนื้อเยื่อไหม้อย่างรุนแรงอย่างรวดเร็วและมี โอกาสเสียชีวิตอย่างทันทีทันใดอย่างมาก ถ้า มีโอกาสรอดต้องมีการดูแลรักษาจากแพทย์อย่างดี โดยให้ดื่ม Sodium Bicarbonate แต่ส่วนใหญ่ไม่ค่อย รอดเพราะภายในจะเกิดการรวมตัวของมายเฮโม โกลบิน ทำให้กล้ามเนื้อตาย

2.3.3 เส้นทางของกระแสที่ผ่านร่างกาย

โดยธรรมชาติแล้วกระแสไฟฟ้าจะเลือกไหลไปตามเส้นทางที่สะดวกที่สุด เช่นเดียวกันสำหรับ กระแสที่ไหลผ่านร่างกายของคนเรา กระแสก็จะเลือกเส้นทางที่จะลงสู่ดินที่สะดวกที่สุด ซึ่งการไหลของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าส่วนมากก็จะผ่านส่วนต่างๆ ของร่างกาย ซึ่งประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญ รวมทั้งหัวใจด้วย เส้นทางการไหลของกระแสผ่านร่างกายของคนเรานั้นมีได้หลายเส้นทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดสัมผัสของร่างกายกับบริเวณที่ความต่างศักย์เกิดขึ้น ซึ่งแต่ละเส้นทางก็มีผลอันตรายจากกระแสที่ไหลผ่านนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากการที่มีกระแสไหลผ่านในปริมาณที่ไม่เท่ากัน

2.3.4 ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในสภาวะผิดปกติ

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ผิวดินสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในบริเวณขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดินซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

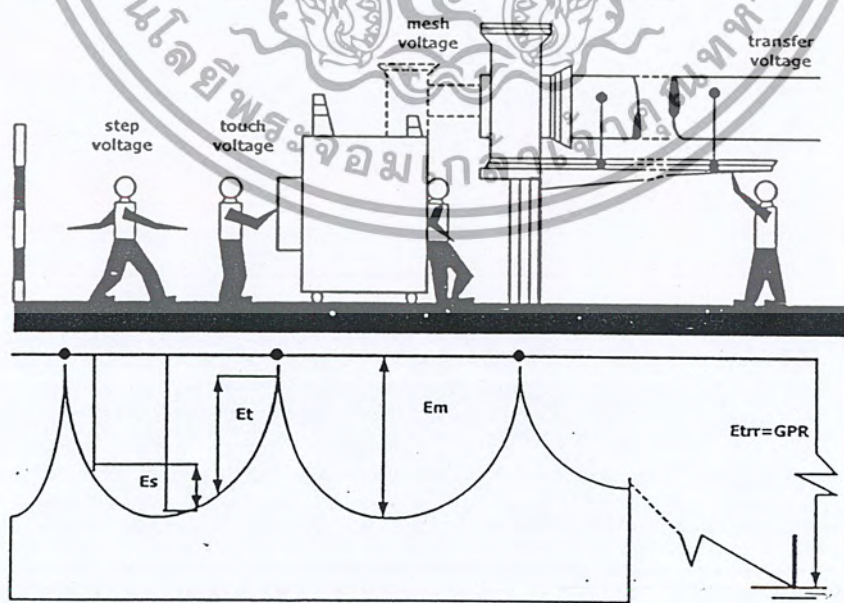
-แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Ground Potential Rise, GPR) คือค่าแรงดันสูงสุดหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงต่อลงดินเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากบริเวณที่ไฟฟ้า

-แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage, E_s) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวดินระหว่างจุดสองจุดที่เท้าทั้งสองข้างสัมผัสพื้นซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ 1 เมตร

-แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage, E_t) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดที่มนุษย์ยืนอยู่โดยที่มือมีการสัมผัสอยู่กับ โครงสร้างที่เป็นโลหะหรือตัวถังของอุปกรณ์ที่ทำการต่อลงดินไว้

-แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage, E_m) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในร่องคาน้ำของระบบต่อลงดิน

-แรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transfer Voltage, E_{tr}) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งจะเป็นกรณีย่อยกรณีหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2- 3 แสดงรูปแบบการเกิดแรงดันต่างๆที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีส่วนของร่างกายของคนเราเป็นสะพานไฟต่อเชื่อมระหว่างจุดสองจุดใดๆ สักคาไฟฟ้ามันจะเป็นต้นเหตุให้เกิดความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าคร่อมตัวคน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายเป็นอันตรายต่อผู้นั้นได้ ขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ว่ามากหรือน้อย และความต่างศักย์ก็ขึ้นอยู่กับศักคาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สักคาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ บริเวณพื้นผิวดินนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างด้วยกัน คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน กระแสผิดปกติลงดินที่อาจเกิดขึ้นได้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของตระแกรงต่อลงดิน ซึ่งแยกพิจารณาออกเป็นส่วนๆ ดังต่อไปนี้

- ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ground Resistivity)

ความต้านทานจำเพาะของดินภายในบริเวณที่จะทำการติดตั้งระบบ ไฟฟ้า มีความสำคัญต่อการกระจายของกระแสไฟฟ้าผิดปกติ และกระแสกระจายออกสู่พื้นดินบริเวณรอบๆ ตัวนำของกระแสต่อลงดินอย่างมาก ถ้าพื้นดินบริเวณนั้นมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กระแสผิดปกติจะกระจายออกสู่พื้นดินภายในพื้นผิวดินมีค่าสูง เป็นต้น ซึ่งค่าความต้านทานในพื้นที่หนึ่งๆ มักจะมีค่า ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นของดิน อุณหภูมิของดินและสารเคมีที่เจือปนอยู่ในดิน เป็นต้น

- กระแสผิดปกติ (Fault Current)

กระแสผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น ได้นี้ก็เป็นองค์ประกอบที่มีผลโดยตรงต่อศักคาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือถ้าขนาดของกระแสอันนี้สูงมาก ก็ย่อมจะทำให้ศักคาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวสูงขึ้นมากเช่นกัน

- รูปทรงเรขาคณิตของตระแกรงต่อลงดิน

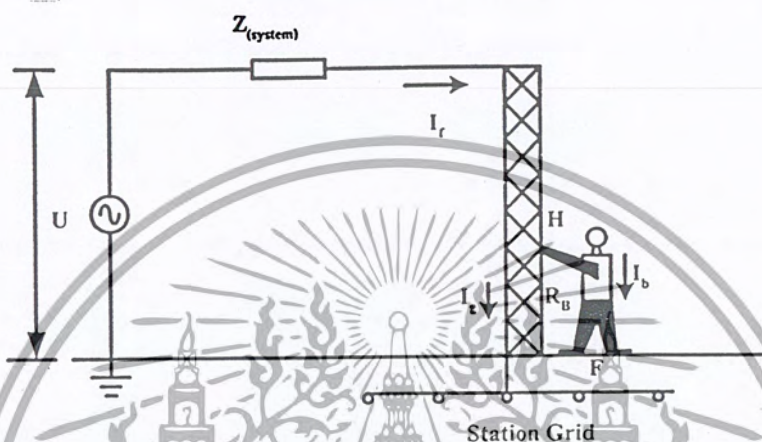
รูปทรงเรขาคณิตของตระแกรงต่อลงดินรวมถึงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำและระยะห่างระหว่างตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นตระแกรงต่อลงดิน ความลึกในการฝังตัวนำ การกระจายของกระแสตลอดตระแกรงต่อลงดิน และตำแหน่งของกระแสไหลลงสู่ตระแกรงต่อลงดินเป็นต้น เหล่านี้จะถูกนำมาใช้ควบคุมศักคาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ ทั้งภายในและรอบๆ ระบบ และให้อยู่ในขอบเขตที่จะไม่ก่อให้เกิดความต่างศักย์เกินค่าที่คนเราจะสามารถทนได้

2.3.5 ความต้านทานของตระแกรงต่อลงดิน

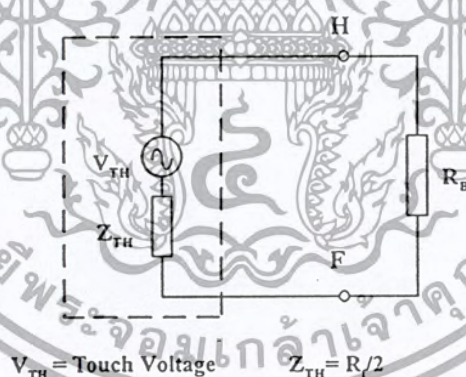
ความต้านทานของตระแกรงต่อลงดินนั้น จะถูกมอง ในแง่ของการวัดความสามารถของตระแกรงต่อลงดิน ในการกระจายกระแสผิดปกติลงสู่พื้นดิน ความต้านทานอันนี้ ไม่ได้เป็นลัวกำหนดความปลอดภัยในระบบ โดยตรง การที่ความต้านทานของระบบต่อลงดินอันนี้ มีค่าต่ำมากก็ไม่จำเป็นว่าต้องปลอดภัยเสมอไป ในทางตรงกันข้ามระบบที่มีความต้านทานของตระแกรงต่อลงดินสูง ก็อาจจะทำให้ปลอดภัยได้ โดยการออกแบบระบบต่อลงดินอย่างระมัดระวังและถูกต้องตามข้อกำหนด ในทางอุดมคติค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินควรมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยากมาก ความต้านทานของตระแกรงต่อลงดินจะสามารถยืนยันความปลอดภัยได้ก็ต่อเมื่อมีค่าต่ำจนกระทั่งกระแสผิดปกติสูงสุดไหลผ่านตัวตระแกรงต่อลงดินนี้ ทำให้เกิดการเพิ่มของค่าความต่างศักย์จนถึงค่าที่เป็นอันตรายต่อคน

2.4 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

เมื่อเกิดค่าศักดาไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวภายในสถานีไฟฟ้าเหนือระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้า จะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นในสถานีไฟฟ้า ผลของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะทำอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้าได้ จึงได้ใช้ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน ซึ่งก็คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้



รูปที่ 2-4 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2-5 แสดงวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

มนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับ โครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดังในรูปที่ 2- 4 โดยค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มีสัมผัสกับ โครงสร้างของอุปกรณ์ (H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน (F) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากมือข้างที่สัมผัสไปยังเท้าทั้งสองที่สัมผัสกับพื้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางให้สำหรับไหลลงดินของกระแส จากรูปที่ 2-4 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันได้ดังรูปที่ 2-5 และสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch Voltage) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

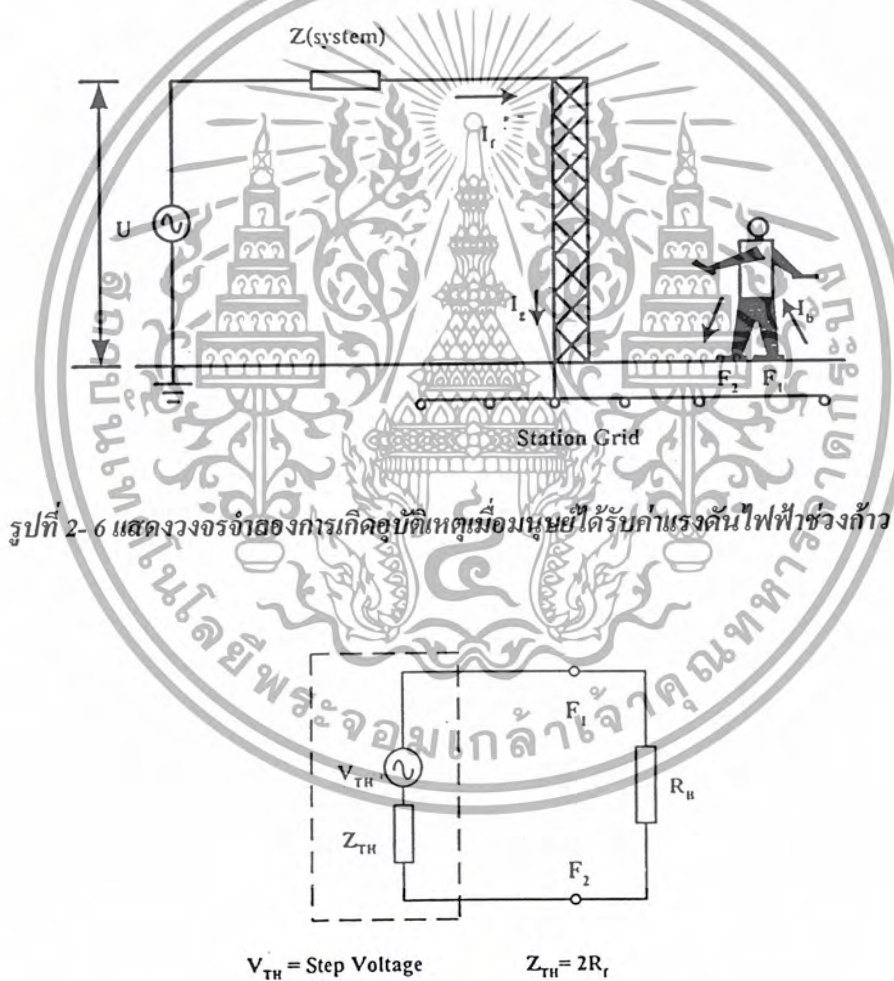
น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม

$$E_{\text{touch } 50} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม

$$E_{\text{touch } 70} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.2)$$

สำหรับค่าแรงดันช่วงก้านนั้นเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าสองเท้า ซึ่งผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง (F_1) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง (F_2) เพื่อใช้เป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินได้ ดังในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-7 แสดงวงจรสมมูลขณะที่มีมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าน

และสามารถหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านที่มนุษย์สามารถทนได้ (Step Voltage) ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม

$$E_{\text{step } 50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.3)$$

น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม

$$E_{\text{step } 70} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.4)$$

C_s คือ ค่าตัวคูณลดที่เกิดเนื่องจากความหนาของวัสดุที่โรยบนผิวดินหาได้จาก

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09}$$

โดยที่

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุโรยผิวดิน ($\Omega\text{-m}$)
 t_s คือ ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (วินาที)
 h_s คือ ความหนาของวัสดุโรยผิวดิน (m)

สำหรับการออกแบบในประเทศไทยจะคิดที่น้ำหนักเฉลี่ยมนุษย์ 50 กิโลกรัม

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของการวัดค่าความต้านทานดิน

2.5.1 จุดประสงค์ในการวัดค่าความต้านทานดิน

1. ใช้เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในงานสำรวจทางธรณีวิทยาใต้ดินเพื่อค้นหาตำแหน่งของสินแร่, ความลึกของชั้นหินใต้ดินและอื่นๆ

2. ค่าความต้านทานของดินเป็นตัวพ้องปริมาณการสุกก่อนของท่อโลหะใต้ดิน ความต้านทานจะลดลงเมื่อท่อเป็นสนิมมากขึ้น ใช้เป็นตัวกำหนดเวลาซ่อมบำรุงท่อโลหะใต้ดินได้อย่างแม่นยำ

3. การวัดค่าความต้านทานของดินแต่ละแห่งเป็นปัจจัยหลักและเป็นขั้นตอนแรกในการออกแบบระบบกราวด์

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยธรรมชาติแล้วไม่สามารถเป็นเอกพันธ์ได้ที่บริเวณเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินต่าง ๆ และความชื้นของดินที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินก่อนการวางแผนติดตั้งระบบต่อลงดินย่อมจะ ได้ผลที่ดีกับเทคนิคและความ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหยัคของแผนโครงการ นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาถึงชั้นของดินในการตัดสินใจเลือกชนิดของแห่งสายดินที่เหมาะสม รวมทั้งระยะความลึกที่มีประสิทธิผลที่สุดสำหรับการติดตั้งแห่งสายดินแบบแห่ง

2.5.2 ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านทานของเนื้อดิน

ความต้านทานของดินก็ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สามารถพิจารณาได้ง่ายๆ ได้จากองค์ประกอบของเนื้อดินนั้น ตามลักษณะและปริมาณความชื้นในเนื้อดิน, สารละลายในดินและแร่ธาตุธรรมชาติ สรุปคร่าวๆ ได้ดังตารางที่ 2-1

ชนิดของดิน	ความต้านทาน Ω -cm.		
	Min.	Average.	Max.
เถ้า, ดินดาน, ถ่าน	590	2,370	7,000
ดินเหนียว	340	4,060	16,300
ดินเหนียวปนทรายและกรวด	1,020	15,800	135,000
หินกรวดทรายที่มีเนื้อดินปนอยู่เล็กน้อย	59,000	94,000	458,000

ตารางที่ 2-1 แสดงค่าความต้านทานของดินแต่ละชนิด

ตารางที่ 2-2 แสดงตัวอย่างของดิน 2 ชนิดที่ถูกนำมาใส่ความชื้นออกไปหมดจะกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีได้เลย เพราะความต้านทานได้ขึ้นไปถึง $10^9 \Omega$ -cm. และดินจะนำไฟฟ้าได้ขึ้นมากที่ความชื้นระดับ 20%

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน ตามน้ำหนัก	ความต้านทานดิน	
	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทราย
0	$>10^9$	$>10^9$
2.5	250,000	150,000
5	165,000	43,000
10	53,000	18,500
15	19,000	10,500
20	12,000	6,300
30	6,400	4,200

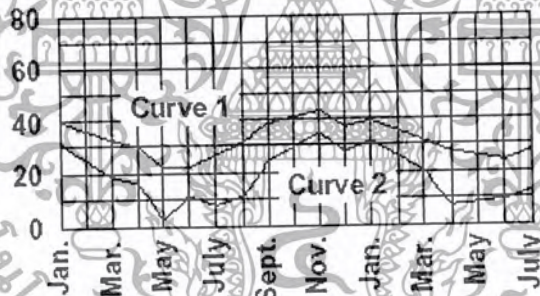
ตารางที่ 2-2 แสดงค่าความต้านทานดินตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตามน้ำหนัก

ความต้านทานของดินยังเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ด้วย ตารางที่ 2-3 เป็นความต้านทานของดินเหนียวปนทราย ที่มีความชื้น 15.2% และเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่าง 20°C ถึง -15°C ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้กว้างในช่วง 7,200 ถึง 330,000 โอห์ม-เซนติเมตร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ		ความต้านทานดิน
°C	°F	Ω -cm.
20	68	7,200
10	50	9,900
0	32 (Water)	13,800
0	32 (Ice)	30,000
-5	23	79,000
-15	14	330,000

ตารางที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของดินเหนียวปนทรายตามอุณหภูมิ

เนื่องจากความต้านทานของเนื้อดินเปลี่ยนแปลงได้ตามความชื้นและอุณหภูมิ จึงอาจสรุปได้ว่าความต้านทานของระบบกราวด์ทุกระบบเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลในแต่ละช่วงเวลาของปีเช่นกัน รูปที่ 2-8 แสดงกราฟความเปลี่ยนแปลงความต้านทานดังกล่าวในแต่ละเดือนของปี ของกราวด์ 2 ระบบที่มีความลึกต่างกัน



รูปที่ 2-8 แสดงกราฟ ความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของความต้านทานดินของท่อโลหะขนาด 3/4 นิ้วฝังในดินเหนียวปนหิน Curve 1 เป็นกราฟที่มีความลึก 3 ฟุต Curve 2 ที่ความลึก 1 ฟุต

และเนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิจะลดความเปลี่ยนแปลงในดินระดับตื้นๆ จึงพบว่า กราวด์ที่ตอกลึกถึงระดับที่มากพอจะมีเสถียรภาพในทุกฤดูกาลและจะมีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อตอกถึงจนถึงระดับน้ำใต้ดิน

ในบางพื้นที่ ความต้านทานของดินจะสูงมากจนต้องลงทุนสูงและใช้ความพิถีพิถันมากในการสร้างระบบกราวด์ให้ได้ความต้านทานต่ำ ทางออกที่ประหยัดกว่าคือการ ใช้สารเคมีช่วยปรับความต้านทานของเนื้อดินเป็นประจำ ตารางที่ 2-4 แสดงค่าความต้านทานของเนื้อดินเหนียวปนทรายที่เพิ่มสารละลายของเกลือลงไปปริมาณต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของปริมาณเกลือ ที่มีต่อความต้านทานดิน (ดินเหนียวปนทราย, ความชื้น 15% คำนวณน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส)	
เปอร์เซ็นต์ของเกลือ	ความต้านทาน (Ω -cm.)
0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5	190
10	130
20	100

ตารางที่ 2-4 แสดงค่าความต้านทานของเนื้อดินเหนียวปนทรายที่เพิ่มสารละลายของเกลือลงไปปริมาณต่างๆ กัน

การปรับสภาพด้วยสารเคมีวิธีนี้จะทำให้ความต้านทานของเนื้อดินบริเวณนั้นแปรไปตามอุณหภูมิอย่างมาก ตารางที่ 2-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว และวิธีนี้ยังต้องการแท่งกรวดที่ทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีได้อีกด้วย

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความต้านทานของดินปนเกลือ (ดินเหนียวปนทราย, ความชื้น 20%)	
อุณหภูมิ	ความต้านทาน (Ω -cm.)
20	110
10	142
0	190
-5	312
-13	1440

ตารางที่ 2-5 แสดงค่าความต้านทานของดินเหนียวปนทรายแปรตามอุณหภูมิเมื่อมีการปรับสภาพดินด้วยสารเคมี

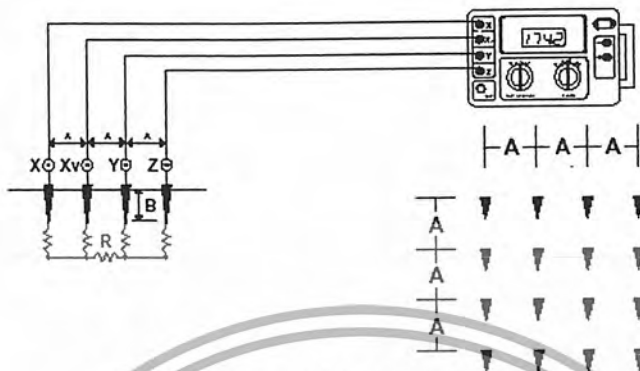
2.5.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

วิธีการใช้แท่งขั้วไฟฟ้า 4 จุด (FOUR-POINT METHOD)

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบ 4 จุด หรือวิธีการวัดแบบ Wenner โดยใช้แท่ง

ขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 ขั้ว ไปปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการวัดหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 4 จุดที่ระยะเท่าๆ กัน เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ๆ กันเท่ากับ A ดังรูปที่ 2-9, 2-10 และเป็นแนวเส้นตรงเดียวกัน และปักลึกลงไปไม่เกิน 1/20 ของระยะห่าง A แห่งขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัด ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้คือ CHAUVIN ARNOUX รุ่น TERCA 2 (AEMC MODEL 4500) ซึ่งมีขั้วต่อสาย 4 ขั้วเช่นกัน



รูปที่ 2-9 แสดงวงจรการวัดความต้านทานดินแบบ 4 จุด

A = ระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดแต่ละอัน ซึ่งห่างเท่ากันทุกแห่ง (m)

B = ความลึกของแท่งอิเล็กโทรดที่ตอกลงไปในดิน (m)

กระแสจากวงจรจ่ายกระแสที่ I ภายในเครื่องวัดจะจ่ายออกมาสู่หลักนอกสุด 2 หลัก ไหลลงสู่ใต้ดินและทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หลักใน 2 หลัก U (ศักดาไฟฟ้าแปรตามความต้านทานดิน) แล้วแสดงผลจากสัดส่วนของ U/I ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทาน R ออกมาเป็นหน่วยโอห์ม และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏจากการวัด ρ_s ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ สามารถหาได้โดยสมการที่ (2.5)

$$\rho_s = 2\pi \cdot aR \tag{2.5}$$

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของการทดสอบความต้านทานระบบต่อลงดิน

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งระบบต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่าค่าที่ได้ติดตั้งแล้วที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาจากระบบต่อลงดินที่ติดตั้งแล้วเสร็จ เสมือนเป็นแท่งอิเล็กโทรดที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งวิธีวัดสามารถวัดได้จากหลายวิธีเช่น

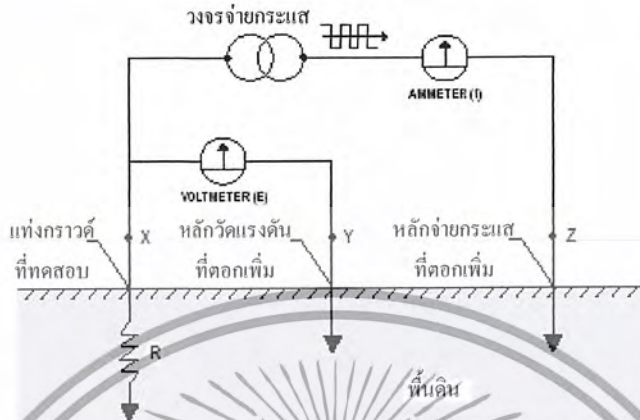
1. Two-Point Method (Ammeter-Voltmeter Method)
2. Three-Point Method
3. Ratio Method
4. Staged-Fault Tests
5. Fall of Potential Method

แต่ที่นิยมและสามารถใช้กับการวัดค่า Ground Impedance ในทุกๆ แบบคือวิธี Fall of Potential Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 วงจรการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่ง X และ Y เราใช้โวลต์มิเตอร์วัด จากนั้นวัดกระแสที่ไหลระหว่างแท่ง X และ Z ด้วยแอมมิเตอร์ ดังรูปที่ 2-10

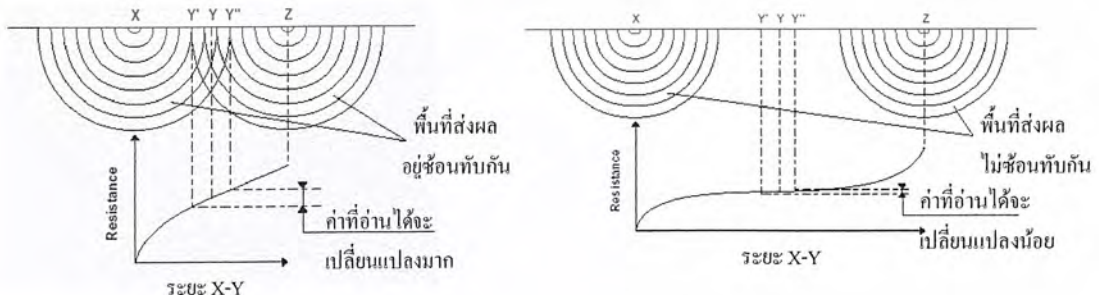


รูปที่ 2-10 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

ตามกฎของโอห์มสามารถหาค่าความต้านทานได้เมื่อทราบค่าแรงดันและกระแสดังกล่าว แต่สำหรับเครื่องวัดความต้านทานที่ใช้ในปริญญานี้พรุนั้นจะได้ค่าความต้านทานเป็นโอห์มโดยตรงเพราะภายในเครื่องวัดนั้นมีทั้งตัวจ่ายกระแสและวัดแรงดันบรรจุอยู่ในเรียบร้อยแล้ว

2.6.2 ตำแหน่งการตอกหลักเพิ่มเพื่อวัดความต้านทานระบบต่อลงดิน

การวัดความต้านทานระบบต่อลงดินให้แม่นยำ ต้องตอกหลักกระแส Z ให้ไกลพอสมควรจากแท่งกราวด์ที่ต้องการทราบค่าเพื่อให้แท่ง Y อยู่นอกพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของแท่ง X และ Z วิธีที่ดีที่สุดที่จะพิสูจน์ว่าแท่ง Y อยู่นอกพื้นที่ดังกล่าวแน่ ๆ ก็คือลองขยับแท่ง Y ย้ายตำแหน่งไป-มาในแนว X-Z ดู หากแท่ง Y อยู่ในพื้นที่ดังกล่าว (ของ X หรือ Z หรือทั้ง X และ Z ในกรณีที่พื้นที่ส่งผลอยู่ซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2-11) ค่าของความต้านทานที่อ่านได้เมื่อย้ายแท่ง Y ไป Y' และ Y'' จะแตกต่างกันมาก และไม่มีค่าใดเลยที่เป็นความจริง



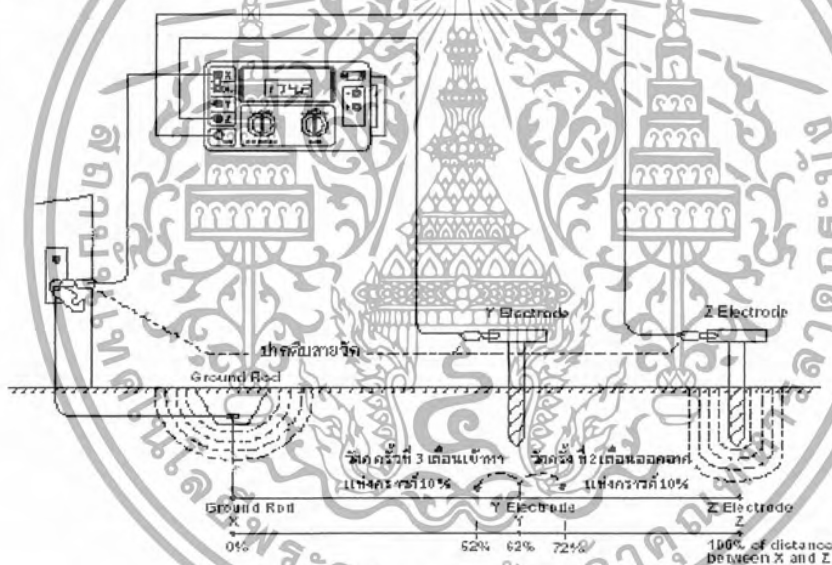
รูปที่ 2-11 ,2-12 แสดงการทับซ้อนกันและไม่ทับซ้อนกันของพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของ

แท่ง X และ Z ตามลำดับ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

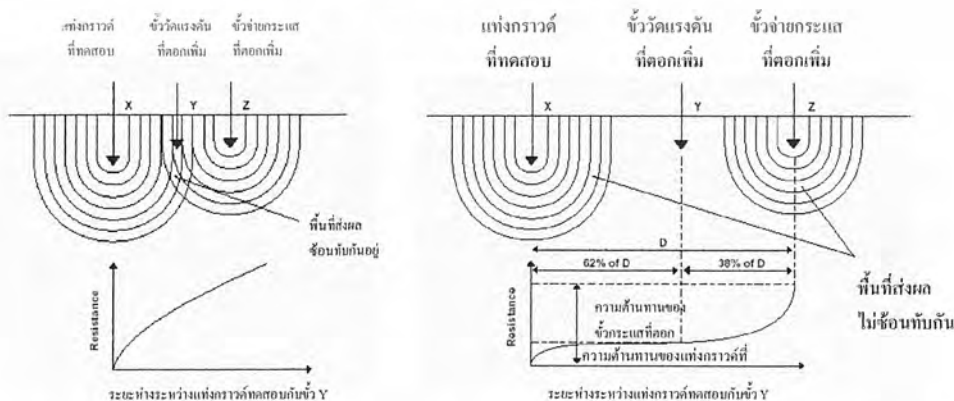
ในทางกลับกัน หากแท่ง Y อยู่นอกพื้นที่ส่งผลฯ (ดังรูปที่ 2-12) อยู่ก่อนแล้ว การเลื่อนตำแหน่งมายัง Y' และ Y'' จะให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเป็นค่าที่แท้จริงของความต้านทานดิน ณ แท่ง X ถ้าจะให้แน่นอนยิ่งขึ้น ควรวัดค่าความต้านทานเมื่อย้ายจุด Y ไปหลายๆ ค่า แล้วพลอตกราฟค่าความต้านทานกับระยะทางออกมา ค่าความต้านทานที่แท้จริงจะอยู่ในช่วงเอนลาด (เกือบเป็นเส้นนอน) ของกราฟ และมีอยู่ในช่วง 62% ของระยะทางระหว่าง X-Z

2.6.3 การวัดความต้านทานของแท่งกรวดด้วยวิธี 62% (Fall of Potential Method)

วิธี 62% เป็นวิธีที่ยอมรับกันทั่วไปว่าแม่นยำที่สุดจากการทดลองกันหลายต่อหลายครั้งกับพื้นที่สารพัดแบบ ดังรูปที่ 2-13 หากคอกแท่งวัด Z ไม่ยาวพอจะเกิดการซ้อนทับของพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของแท่ง X และ Z ดังที่กล่าวมาแล้ว ทางแก้คือ เพิ่มระยะ X-Z ออกไปจนไม่เกิดการซ้อนทับของพื้นที่ส่งผลฯ ตามรูปที่ 2-14 พิสูจน์โดยการย้ายแท่ง Y ไปมาในแนวเส้นตรงระหว่าง X-Z จนได้ค่าไม่ต่างกันมาก ค่าความแตกต่างของความต้านทานดังกล่าวควรไม่เกินค่า tolerance ที่กำหนดไว้ในความต้องการ



รูปที่ 2- 13 แสดงการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยวิธี 62 %



รูปที่ 2-14 แสดงระยะห่างระหว่างแท่งกรวดทดสอบกับขั้ว Y ที่ให้ค่าความต้านทานที่ถูกต้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ผู้ที่อยู่เหนือพื้นที่ลิขสิทธิ์นี้ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 ระยะทางที่เหมาะสมสำหรับแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอกเพิ่มลงไป

ระยะทางระหว่าง X (ซึ่งเป็นแท่งกราวด์ที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน) กับ Z (ซึ่งตอกเพิ่มเพื่อทำการวัดค่าของ X) ไม่มีค่าที่แน่นอนตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความโตของแท่งกราวด์, ความยาวของแท่งกราวด์, ลักษณะของเนื้อดิน, และความกว้างของพื้นที่ส่งผลฯ แต่ก็มีผู้ประมาณค่าระยะทางคร่าวๆ สำหรับใช้กับดินเนื้อเดียว และใช้แท่งกราวด์ขนาดโต 1 นิ้ว (หากใช้แท่งกราวด์โต ½ นิ้ว ให้ลดระยะในตารางลง 10%, หากใช้แท่งกราวด์โต 2 นิ้ว ให้เพิ่มระยะให้มากขึ้น 10%)

ระยะทางโดยประมาณสำหรับตอกแท่งอิเล็กทรอนิกส์ Y และ Z		
ด้วยวิธีวัดแบบ 62 %		
ความลึกในการตอก (ฟุต)	ระยะห่าง Y (ฟุต)	ระยะห่าง Z (ฟุต)
6	45	72
8	50	80
10	55	88
12	60	96
18	71	115
20	74	120
30	86	140

ตารางที่ 2-6 แสดงระยะทางโดยประมาณสำหรับตอกแท่งอิเล็กทรอนิกส์ Y และ Z ด้วยวิธีวัดแบบ 62 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินและ การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP

3.1 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นจะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินให้มีความเหมาะสมและจะต้องทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน และค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน

3.1.1 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

ตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าความนำไฟฟ้า(Conductivity) สูง เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าภายใน บริเวณที่ทำการติดตั้งตัวนำนั้น
2. สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากจะต้องทนกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ที่ไหลผ่านในช่วงเวลาสั้นๆ
3. มีความแข็งแรงทางกลสามารถทนต่อการศุกร่อน
4. สามารถใช้งานได้อย่างปกติ เมื่อได้มีการศุกร่อนของผิววัสดุและอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

3.1.2 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน

1. ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้ในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี และไม่มีปัญหาในเรื่องของการศุกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบ(Cathodic) เมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2. เหล็กชุบทองแดง(Copper-Clad Steel)

เหล็กชุบทองแดงนั้นนิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน(Ground Rod) และเป็นตะแกรงต่อลงดินเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการถูกกัดขโมยตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินนำไปขาย

3. อลูมิเนียม(Aluminium)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินเนื่องจาก ศุกร่อนง่าย

4. เหล็ก(Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้ในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งหลักดิน แต่ในการนำไปใช้งานนั้น จะต้องทำการแก้ปัญหาการศุกร่อนของแท่งวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

การเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินนั้นมีความสำคัญต่อการออกแบบ เนื่องจากตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะต้องมีขนาดที่จะสามารถทนต่อกระแสปริมาณมากที่สุดไหลลงสู่ระบบลงดินได้ภายในระยะเวลาสั้นๆ โดยไม่เกิดการหลอมละลายและสามารถทนต่อการผุกร่อน จากคุณสมบัติของตัวนำดังกล่าว ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามต้องการ และใช้เหล็กชุบทองแดงเป็นแท่งหลักดิน การเลือกขนาดสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1)

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{tc \alpha_r \rho_r} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (3.1)$$

โดยที่

A_{mm^2}	คือ	ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (mm^2)
I	คือ	ค่าของกระแสลัดวงจรลงดินสูงสุดแบบสมมาตร (kA)
T_m	คือ	อุณหภูมิสูงสุดที่สายตัวนำสามารถทนได้ ($^{\circ}\text{C}$)
T_a	คือ	อุณหภูมิที่สายตัวนำใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)
T_r	คือ	อุณหภูมิอ้างอิงเป็นค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิด ($^{\circ}\text{C}$)
α_r	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิอ้างอิง ($1/^{\circ}\text{C}$)
α_0	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิ 0°C ($1/^{\circ}\text{C}$)
ρ_r	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง ($\mu\Omega - \text{cm}$)
K_0	คือ	$1/\alpha_0$ หรือ $(1/\alpha_r) - T_r(0^{\circ}\text{C})$
T_c	คือ	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลสู่ระบบต่อลงดิน (วินาที)
TCAP	คือ	thermal capacity per unit volume ($\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำต่อลงดินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-1 ค่าคงที่ของสายตัวนำดิน

Description	Material Conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (°C)	Fusing Temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega$ - cm)	TCAPThermal Capacity (J/cm ³ .°C)
Copper, Annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum EC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated Steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินในทางอุดมคติควรจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากมาก การจะทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินจะต้องทำการวัดจริงหลังจากติดตั้งระบบเรียบร้อยแล้ว แต่ในการออกแบบจะอาศัยการประมาณค่าความต้านทานของระบบ โดยใช้สมการที่ (3.2)

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3.2)$$

โดยที่	R_g	คือ	ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Ω)
	L_T	คือ	ค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
	h	คือ	ความลึกจากผิวดินที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน (m)
	A	คือ	ขนาดพื้นที่ของระบบต่อลงดิน (m^2)

3.1.5 ค่ากระแสกริด (Grid Current)

ค่ากระแสกริด คือ กระแสลัดวงจรลงดินที่ไหลสู่ดินโดยผ่านระบบต่อลงดิน ค่ากระแสกริดนี้จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้น, ตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร, การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินภายนอกเป็นต้น สำหรับค่ากระแสกริดที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะต้องพิจารณาจากค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร เนื่องจากขณะเกิดการลัดวงจรลงดินนั้นค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรนั้นจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรเพราะมีผลของ dc-offset เข้ามาเกี่ยวข้อง

3.2 การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้

เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินเบื้องต้นไปแล้ว จะต้องทำการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อที่จะนำมาพิจารณาทดสอบถึงความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด (Mesh Voltage) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_g}{L_M} \quad (3.3)$$

K_m คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆหาได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_{ii} = 1$ เมื่อตะแกรงต่อลงดินมีการเชื่อมต่อกับแท่งตัวนำต่อลงดิน (Ground rod) บริเวณรอบนอกของตะแกรงหรือที่มุมของตะแกรงต่อลงดินหรือบริเวณรอบของตะแกรงต่อลงดินและกระจายทั่วตะแกรงต่อลงดิน

แต่ถ้าไม่มีการติดตั้ง Ground rod หรือมีการติดตั้งเพียงเล็กน้อยที่ไม่ใช่บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดินแล้วจะสามารถหาค่า K_{ii} ได้จากสมการ

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

และ
$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$
 โดยที่ $h_0 = 1 \text{ m.}$

และ
$$K_i = 0.6444 + 0.148 \cdot n$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

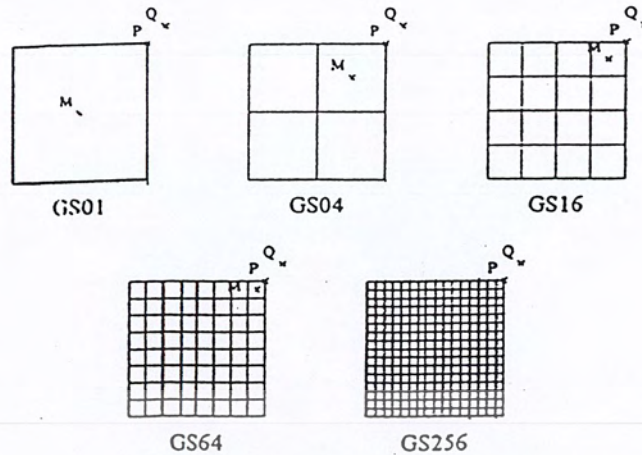
$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \tag{3.4}$$

K_s คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวหาได้จาก

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

- โดยที่
- D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (m)
 - h คือ ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน (m)
 - d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่เลือกใช้ระบบต่อลงดิน (m)
 - I_G คือ ค่ากระแสกริดสูงสุด (A)
 - L_M คือ ความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
 - L_s คือ ความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
 - K_{ii} คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากการจัดวางของตัวนำ
 - K_h คือ ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการฝังตะแกรงต่อลงดิน
 - K_i คือ ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน
 - n คือ จำนวนตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันช่วงก้ำวสูงสุด

รูปที่ 3-1 แสดงตะแกรงต่อลงดินและจุดที่เกิดแรงดันไฟฟ้าเมฆ (จุด M ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของ ร่องดาข่ายที่มุมทั้ง 4 ของตะแกรงต่อลงดิน) และ จุดที่เกิดแรงดันช่วงก้ำวสูงสุด (ระหว่างจุด P และ Q ระยะห่าง 1 เมตร ตามแนวเส้นทแยงมุมของตะแกรงต่อลงดิน)

ข้อจำกัดในการออกแบบ

- ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน $0.25 < h < 2.5$ m
- ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ทำกริดวางขนานกัน $D > 2.5$ m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ทำกริดวงรี $d < 0.25h$
- จำนวนของตัวนำที่ใช้ทำกริดที่วางขนานกันในแต่ละทิศทาง $n \leq 25$

หลังจากทำการออกแบบระบบต่อลงดินแล้ว ซึ่งการออกแบบในประเทศไทยจะคิดที่น้ำหนักเฉลี่ยมนุษย์ 50 กิโลกรัม ต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบไว้ ระบบต่อลงดินหรือระบบกราวด์ที่ติดตั้งนั้นต้องพยายามออกแบบให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์สามารถทนได้ นั่นคือ

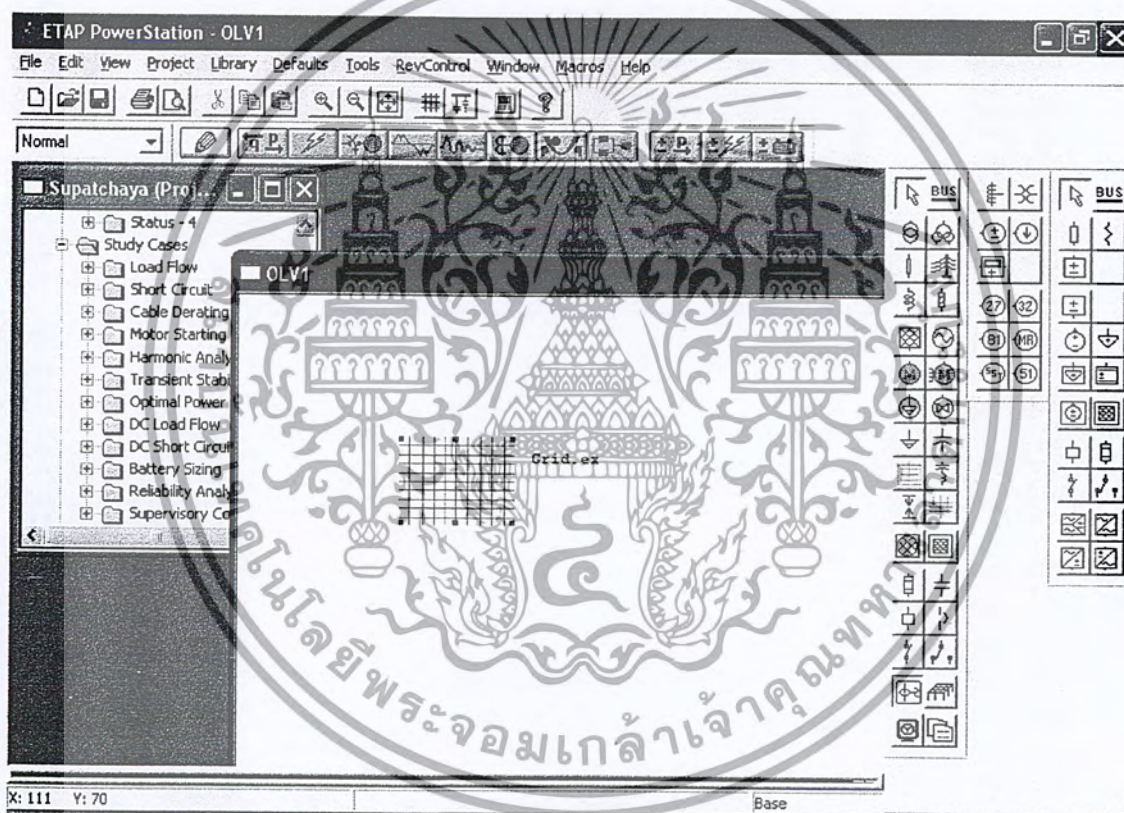
$$E_m < E_{\text{touch5}}$$

$$E_s < E_{\text{step50}}$$

3.3 การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP

โปรแกรม ETAP เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความสะดวกและรวดเร็ว ผู้ออกแบบเพียงแต่ป้อนข้อมูลลงไป โปรแกรมจะทำการประมวลผลสำเร็จของการออกแบบและแสดงผลทั้งจำนวนตัวนำและจำนวนแท่งหลักดินที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่ได้ป้อนให้กับโปรแกรม พร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน, ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส, ค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน นอกจากนี้โปรแกรมยังมีการเตือนเมื่อเงื่อนไขในการออกแบบไม่เหมาะสมและระบบต่อลงดินที่ได้ไม่มีความปลอดภัย เพื่อนำไปพิจารณาติดตั้งระบบต่อลงดินจริงให้มีความปลอดภัย ซึ่งจะนำเสนอการใช้งาน โปรแกรมดังต่อไปนี้

3.3.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ETAP



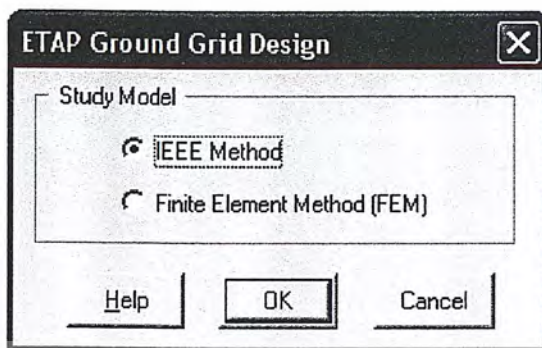
รูปที่ 3-2 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม ETAP

คลิก Ground Grid component จากแป้น AC toolbar วางไว้ตำแหน่งใดก็ได้ในหน้าต่างหลัก

Double click ที่รูปเพื่อเลือกวิธีการออกแบบซึ่งมี 2 วิธี คือ IEEE Method และ Finite Element Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 หน้าต่างแสดงวิธีการออกแบบระบบต่อลงดิน



รูปที่ 3-3 แสดงหน้าต่างวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของโปรแกรม ETAP

ข้อแตกต่างของ 2 วิธีนี้คือ วิธี IEEE Method การคำนวณจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 80-2000, IEEE 80-1986 และ IEEE 665-1995 ส่วนวิธี FEM method จะเหมาะกับการออกแบบระบบต่อลงดินเล็กๆ ที่ไม่สลับซับซ้อนมากนักและผู้ออกแบบสามารถสั่งให้โปรแกรมแสดงกราฟการกระจายของ Absolute Voltage, Touch Voltage และ Step Voltage ได้

3.3.3 หน้าต่างการออกแบบของวิธี IEEE Method



รูปที่ 3-4 แสดงหน้าต่างการออกแบบของวิธี IEEE Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Editor)

	Resistivity ohm-m	Material	Depth m
Surface Material	3000	Crushed rock	0.1
Top Layer	10	Wet organic soil	2.5
Lower Layer	100	Moist soil	

Buttons: Help, OK, Cancel

รูปที่ 3-5 แสดงหน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ออกแบบจะต้องทำการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ดังนี้

วัสดุที่ใช้โรยผิวดิน (Surface Material)

- ชนิดของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน
- ความหนาของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน (m)
- ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน (Ω -m)

ดินชั้นบน (Top Layer)

- ชนิดของดินชั้นบน
- ความลึก (m)
- ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (Ω -m)

ดินชั้นล่าง (Lower Layer)

- ชนิดของดินชั้นล่าง
- ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (Ω -m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับตัวนำ (Conductor Page)

รูปที่ 3-6 แสดงหน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับตัวนำ

สำหรับหน้าต่างข้อมูลตัวนำนี้จะให้ผู้ใช้โปรแกรมทำการป้อนและเลือกข้อมูลเกี่ยวกับตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ดังนี้ คือ

1. ความยาวของตะแกรงต่อลงดินในแนวแกน X และในแนวแกน Y
2. จำนวนสายตัวนำในแนวแกน X และ ในแนวแกน Y
3. ชนิด, ขนาด, ความลึก ของสายตัวนำ

สำหรับค่า Material Constants ซึ่งประกอบด้วย Conductivity (%), Thermal Coefficient of Resistivity at 20 °C ($1/^{\circ}\text{C}$), K0 Factor ($^{\circ}\text{C}$), Fusing Temperature ($^{\circ}\text{C}$), Resistivity of the Ground Conductor at 20 0C in $\text{mW}\cdot\text{cm}$, the Thermal Capacity Factor in $\text{J}/\text{cm}^3/0\text{C}$. จะเป็นค่าคงที่ ที่เกิดขึ้นเมื่อเลือกชนิดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินซึ่ง โปรแกรมจะทำการคำนวณและกำหนดให้เมื่อมีการเลือกชนิดของสายตัวนำที่ใช้งานในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 หน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับแท่งหลักดิน (Rods Page)

The screenshot shows the IEEE Group Editor software interface. The window title is "IEEE Group Editor". There are two tabs: "Conductors" and "Rods", with "Rods" selected. The "Rods" section contains the following fields and controls:

- # of Rods: 4
- Diameter: 2 cm
- Length: 10 m
- Arrangement: Rods Throughout Grid Area (dropdown menu)
- Type: Copper-clad steel wire 1 (dropdown menu)
- Cost: 100 \$/Rod

The "Material Constants" section contains the following fields:

- Conductivity: 40.0
- Alpha Factor: 0.00378
- Ko Factor: 245
- Fusing Temperature: 1084
- Resistivity @ 20 C: 4.40
- Thermal Capacity: 3.85

At the bottom of the window, there are three buttons: "Help", "OK", and "Cancel".

รูปที่ 3-7 แสดงหน้าต่างข้อมูลเกี่ยวกับแท่งหลักดิน

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ออกแบบต้องเลือกและป้อนข้อมูลดังนี้

1. ชนิดของแท่งหลักดิน
2. ตำแหน่งที่จะติดตั้งแท่งหลักดิน
3. ความยาว, จำนวน, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของแท่งหลักดิน

สำหรับค่า Material Constants Material ซึ่งประกอบด้วย Material Conductivity (%), Thermal Coefficient of Resistivity at 20 °C (1/°C), K0 Factor (°C), Fusing Temperature (°C), Resistivity of the Ground Conductor at 20 °C in mW·cm, Thermal Capacity Factor in J/cm³/0C. จะเป็นค่าคงที่ ที่เกิดขึ้น เมื่อเลือกชนิดของแท่งหลักดินซึ่ง โปรแกรมจะทำการคำนวณและกำหนดให้เมื่อเลือกชนิดของแท่งหลักดินที่ใช้งานในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 หน้าต่างข้อมูลการออกแบบ (Study Case Editor)

รูปที่ 3-8 แสดงหน้าต่างข้อมูลการออกแบบ

ผู้ออกแบบจะต้องทำการป้อนข้อมูลต่างๆ ดังนี้

Options

- น้ำหนักเฉลี่ยของผู้ปฏิบัติงานบนพื้นที่ ที่ติดตั้งระบบต่อลงดิน (50 kg , 70 kg)
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

Method

- มาตรฐาน IEEE ที่ใช้ในการคำนวณ

Fault Durations

- Fault Duration: tf ระยะเวลาการเกิดการลัดวงจรลงดินก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน (sec.)
- Fault Current : tc ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลสู่ระบบต่อลงดิน (sec.)
- Shock Duration: ts ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (sec.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

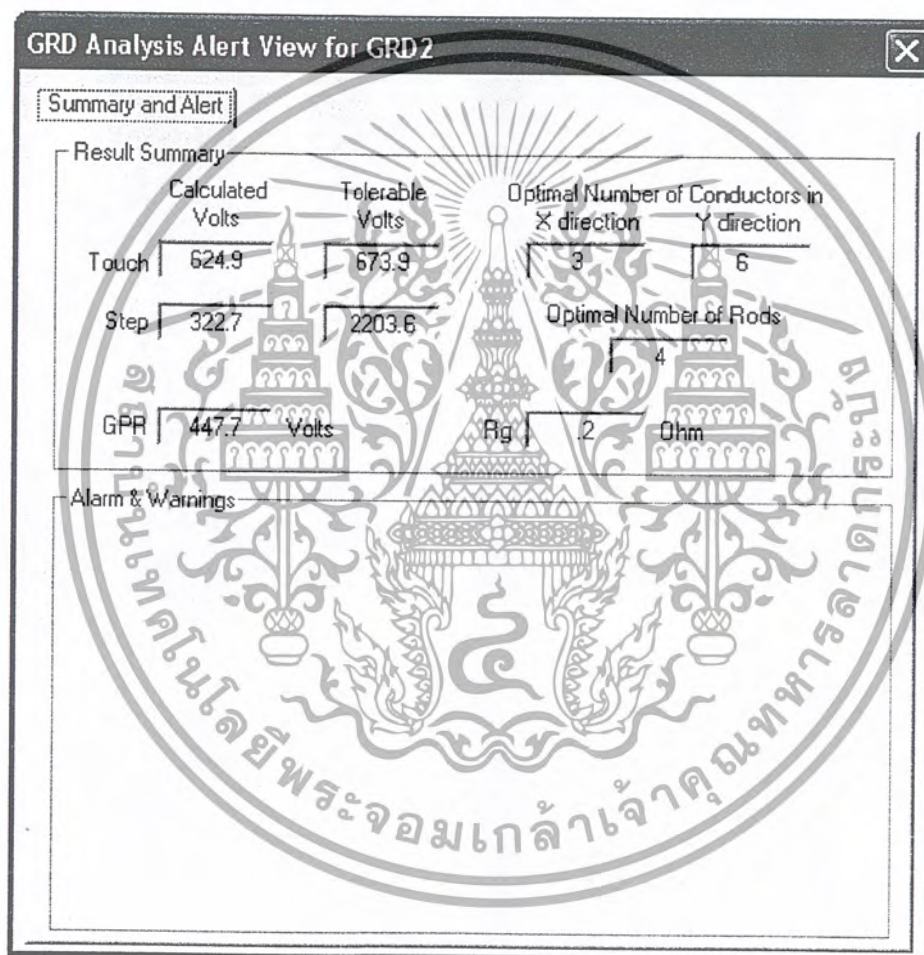
Grid Current Factors

- Corrective Projection Factor : C_p
- Current Division Factor : S_f ค่าอัตราส่วนของกระแสกริดต่อค่ากระแสแล็คคองจรลงดิน

Ground Short-Circuit Current

- rms value of zero-sequence fault current : $3I_0$
- the ratio of Inductive to Resistance : X/R

3.3.8 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ



รูปที่ 3-9 แสดงหน้าต่างแสดงผลการคำนวณและออกแบบ

จะเห็นได้ว่า โปรแกรมประมวลผลข้อมูลให้ทราบ ดังนี้

1. จำนวนสายตัวนำในแนวแกน X
2. จำนวนสายตัวนำในแนวแกน Y
3. จำนวนแท่งหลักดินที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (Calculated Touch Voltages)
5. ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Tolerable Touch Voltages)
6. ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (Calculated Step Voltages)
7. ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Tolerable Step Voltages)
8. ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Ground Potential Rise : GPR)
9. ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Ground Resistance : Rg)

3.3.9 หน้าจอแสดงการเตือนเมื่อผลการออกแบบไม่มีความปลอดภัย (Alarm & Warning)

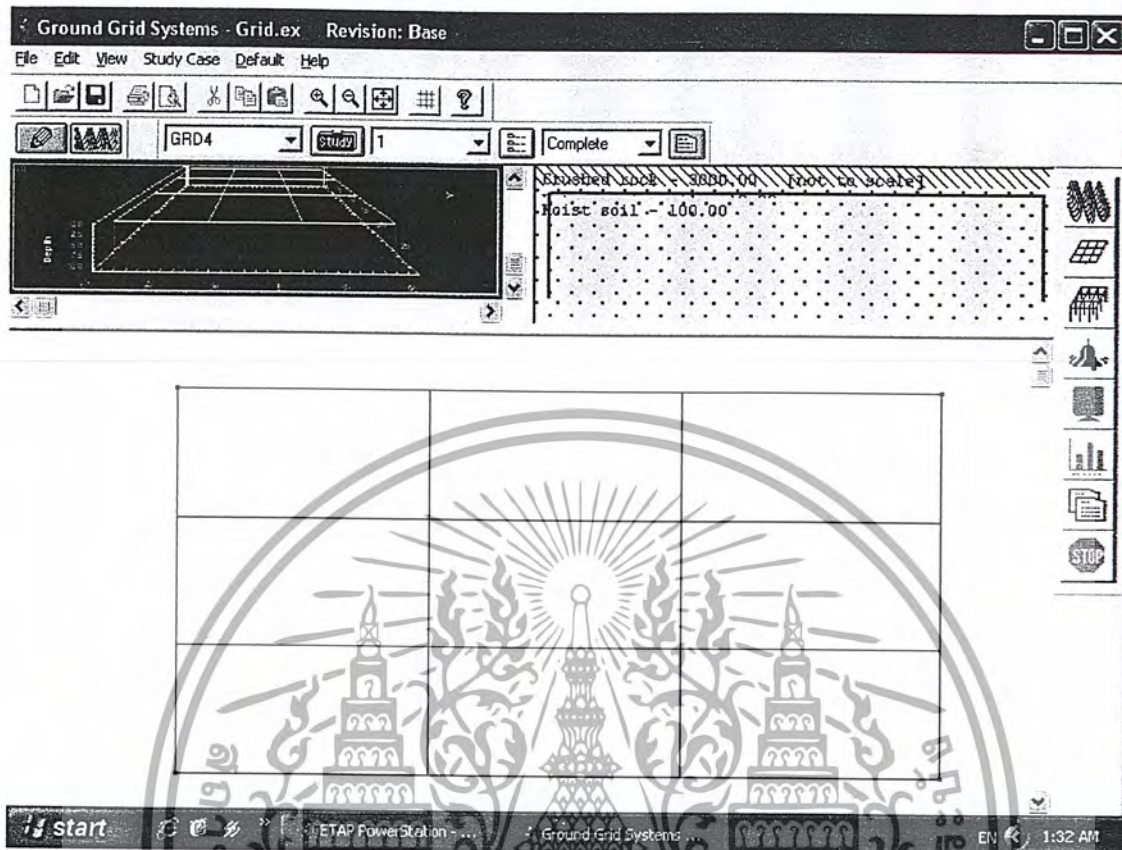


รูปที่ 3-10 แสดงตัวอย่างหน้าจอการเตือนเมื่อผลการออกแบบไม่มีความปลอดภัย

หน้าจอแสดงการเตือนนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อเงื่อนไขในการออกแบบที่ผู้ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมไม่มีความเหมาะสมหรือผลการออกแบบระบบต่อลงดินไม่มีความปลอดภัย ผู้ใช้งานต้องกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบใหม่เพื่อให้ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.10 หน้าต่างแสดงผลการออกแบบ



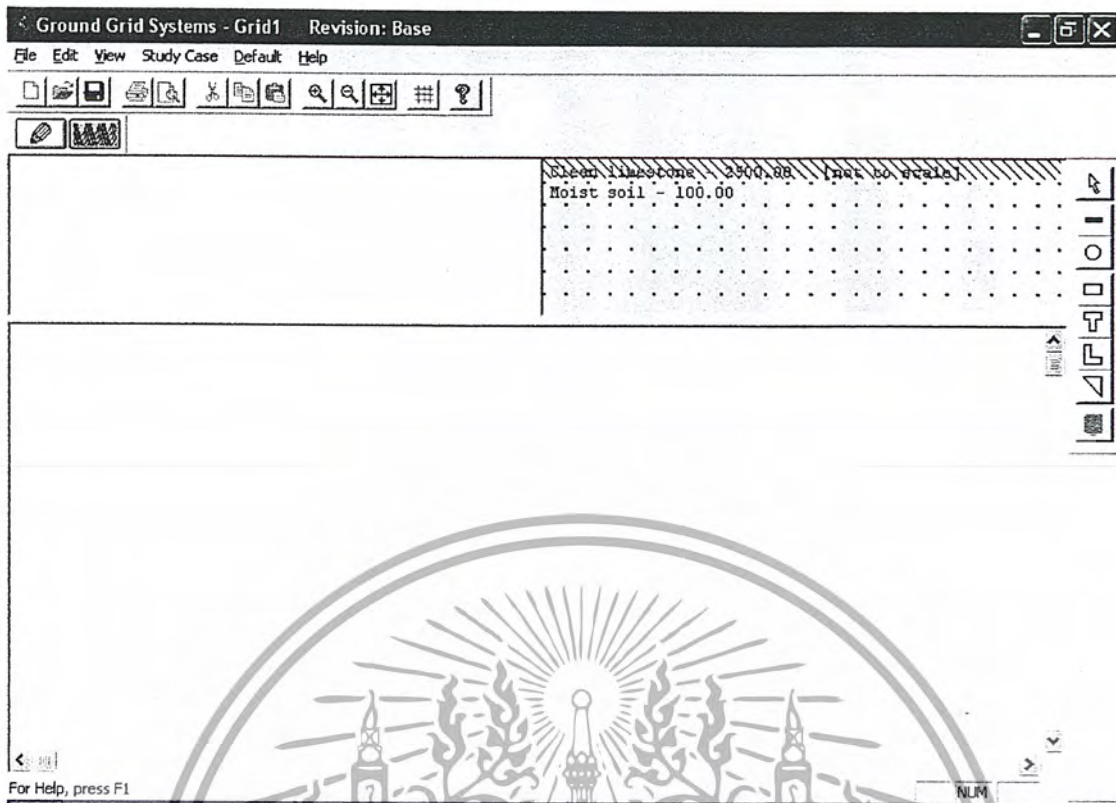
รูปที่ 3-11 แสดงหน้าต่างแสดงผลการออกแบบ

ภายในหน้าต่างนี้ โปรแกรมจะแสดงภาพสามมิติและภาพตัดขวางของระบบต่อลงดินที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ผู้ออกแบบป้อนข้อมูลให้

3.3.11 ข้อแตกต่างของโปรแกรมส่วน Finite Element Method (FEM)

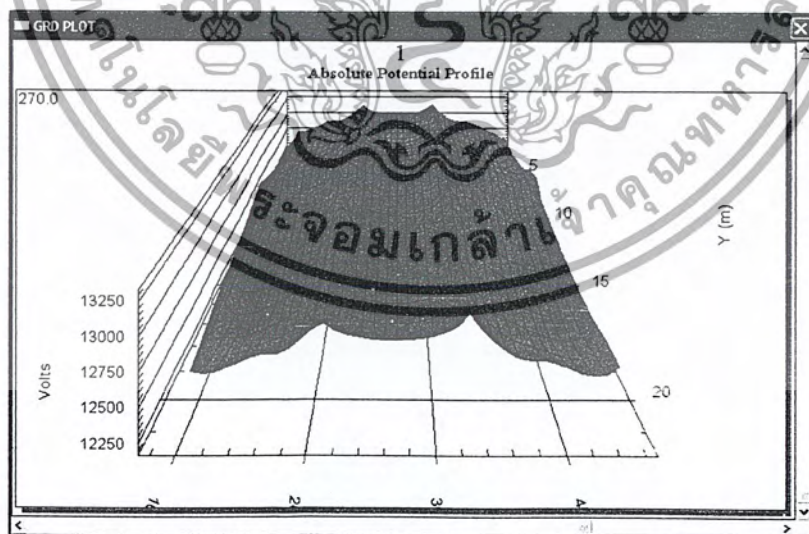
วิธี FEM นี้หน้าจอกการออกแบบจะมี Conductor และ Rod Component เพิ่มเข้ามา ผู้ออกแบบจะต้องทำการวางตำแหน่งของตัวนำและแท่งหลักดินเอง รวมทั้ง กำหนดขนาด, กำหนดจำนวน ตามความเหมาะสม นอกจากนี้ ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่ง คือ วิธี FEM ผู้ออกแบบสามารถสั่งให้โปรแกรมแสดงกราฟการกระจายของ Absolute Voltage, Touch Voltage และ Step Voltage ได้ ดังได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 แสดงหน้าจอการออกแบบของวิธี *Finite Element Method*

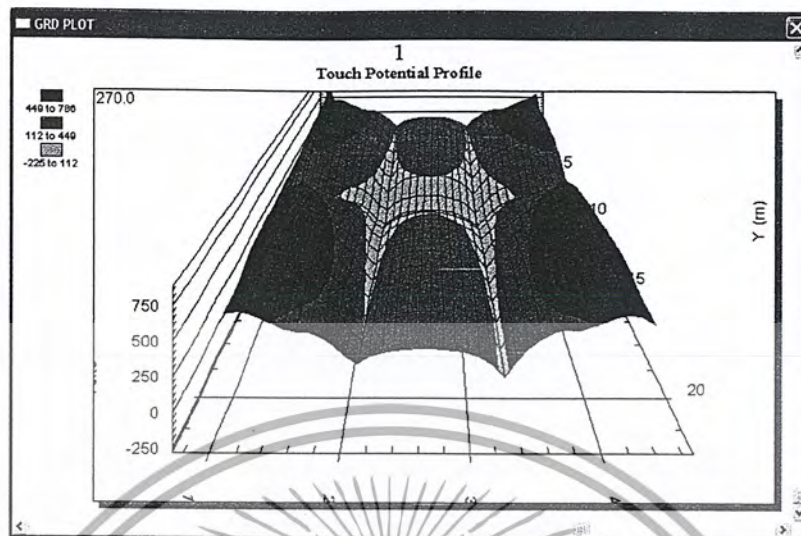
- กราฟแสดงการกระจายตัวของ Absolute Voltage



รูปที่ 3-13 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Absolute Voltage

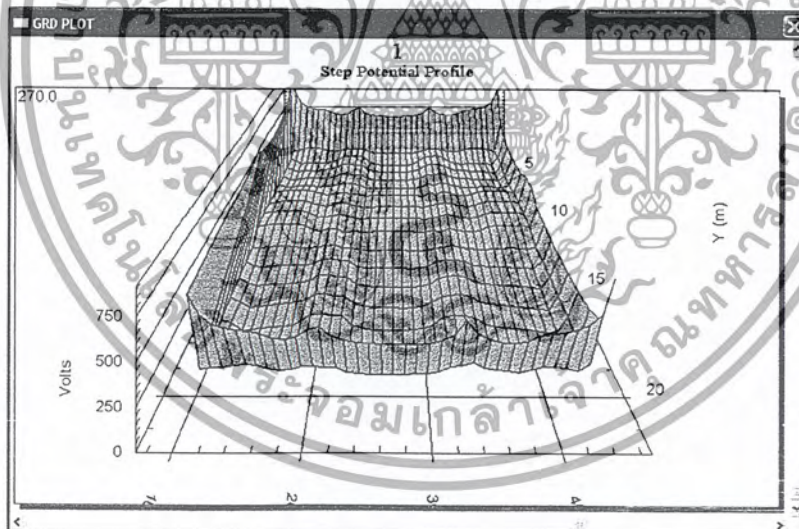
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟแสดงการกระจายตัวของ Touch Voltage



รูปที่ 3-14 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Touch Voltage

- กราฟแสดงการกระจายตัวของ Step Voltage



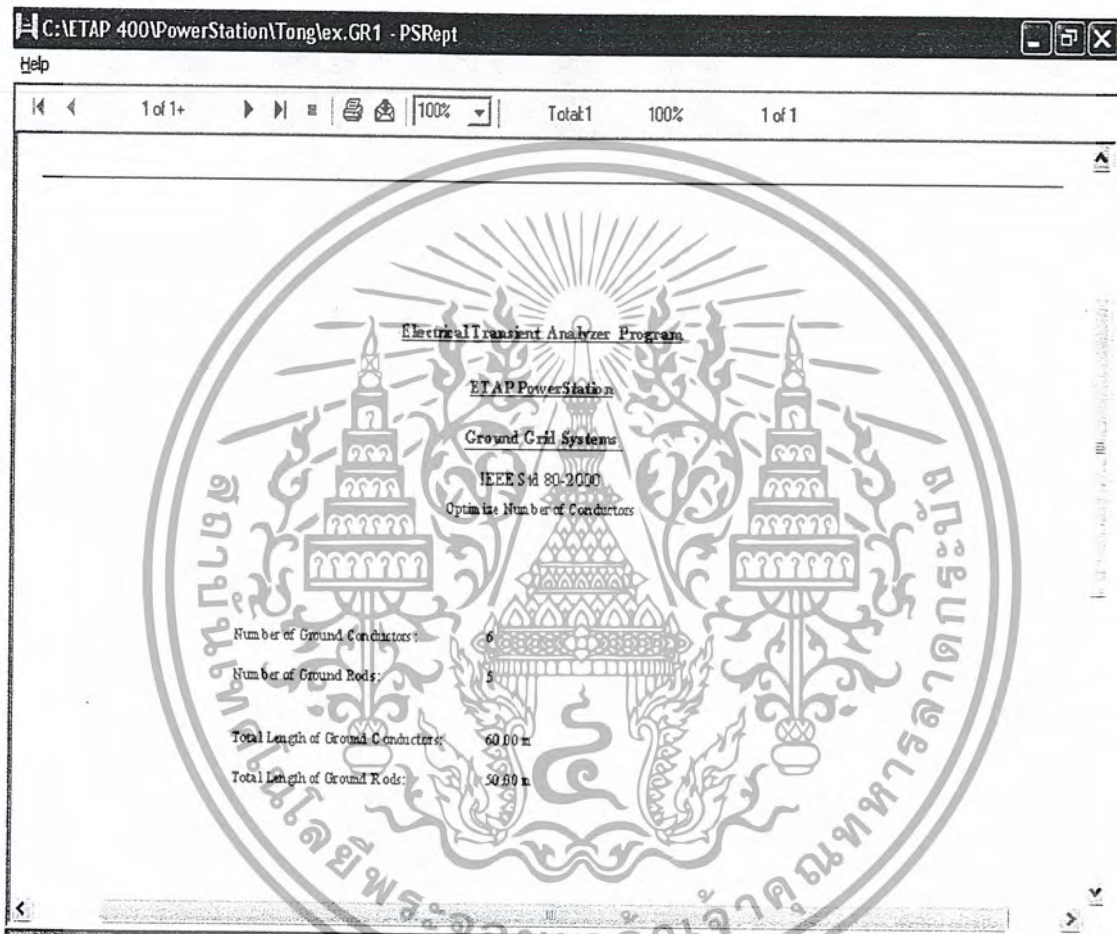
รูปที่ 3-15 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายตัวของ Step Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.12 หน้าต่างแสดงรายงานการออกแบบ (Report Manager)

ในหน้าต่างนี้จะรายงานผลการออกแบบให้ทราบ ดังนี้

- จำนวนตัวนำที่เหมาะสมกับเงื่อนไขในการออกแบบที่เราป้อนให้กับ โปรแกรม
- จำนวนแท่งหลักดินที่เหมาะสมกับเงื่อนไขในการออกแบบที่เราป้อนให้กับ โปรแกรม
- ความยาวทั้งหมดของตัวนำที่จะต้องใช้
- ความยาวทั้งหมดของแท่งหลักดินที่จะต้องใช้



รูปที่ 3-16 แสดงหน้าต่างรายงานผลการออกแบบ

3.3.13 หน้าต่างแสดงผลสรุปการคำนวณ

ในหน้าต่างนี้จะรายงานผลการคำนวณให้ทราบ ดังนี้

- ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน
- ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน
- ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส
- ค่าแรงดันไฟฟ้าย่างก้าว
- Total Fault Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Maximum Grid Current
- Reflection Factor (K)
- Surface Layer Derating Factor (C_s)
- Decrement Factor (D_i)
- ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ Kim, Kir, Km, Ki, Kii, K1 และ K2

C:\NETAP 400PowerStation\Tonglex.GR1 - PSRept

Help

1 of 1 100% Total:1 100% 1 of 1

Rg Ground Resistance Ohm	CPR Ground Potential Rise Volts	Touch Potential			Step Potential			
		Tolerable Volts	Calculated Volts	Calculated %	Tolerable Volts	Calculated Volts	Calculated %	
2.218	4483	383.3	48.9	11.7	180.2	49.2	3.7	
Total Fault Current:		2,000 kA			Reflection Factor (K):			0.995
Maximum Grid Current:		2,005 kA			Surface Layer Derating Factor (C _s):			0.690
					Decrement Factor (D _i):			1.003
Report of Intermediate Constants for IEEE 80 Methods								
- Correction factor for grid geometry regarding touch voltage (Km): 1.038								
- Correction factor for grid geometry regarding step voltage (Kis): 1.088								
- Spacing factor for touch voltage (Km): 0.828								
- Spacing factor for step voltage (Ks): 0.408								
- Corrective weighting factor that adjusts for the effects of inner conductors on the corner mesh (Kii): 1.000								
- Constants 1 related to the geometry of system (K1): 1.368								
- Constants 2 related to the geometry of system (K2): 5.625								

รูปที่ 3-17 แสดงหน้าต่างสรุปผลการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวัดค่าความต้านทานดิน และ การสร้างชุดจำลองการทดสอบตะแกรงต่อลงดิน

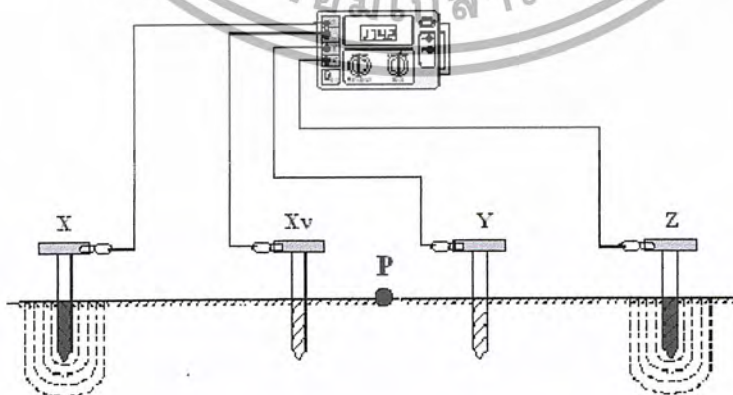
4.1 ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานดิน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน CHAUVIN ARNOUX รุ่น TERCA 2	1	เครื่อง
2. อุปกรณ์เสริม	1	ม้วน
- ม้วนสายไฟสีดำ		
- ม้วนสายไฟสีแดง	3	ม้วน
- แท่งหลักดิน	4	แท่ง
3. ตลับเมตร	1	ตลับ

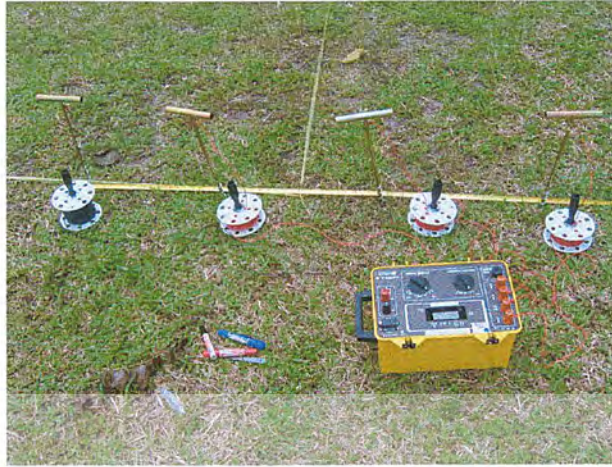
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

1. ถอดแผ่นโลหะที่อยู่ระหว่างขั้ว X , X_v , Y และ Z ออก
2. ปักแท่งหลักดิน X , X_v , Y และ Z ห่างเป็นระยะทาง a เท่ากัน และมีความลึกเท่ากับ b ดังรูป
3. ต่อสายไฟเข้ากับแท่งหลักดิน X , X_v , Y และ Z ให้ตรงกับขั้วตามลำดับ
4. ปรับ Range selector ที่ 2Ω และ Current selector ที่ 50 mA
5. กดปุ่ม Test
6. ถ้ามีเลข 1 ปรากฏ หรือตัวเลขกระพริบ ให้ปรับ Range selector และ Current selector ใหม่จนกว่าจะได้ Range ที่เหมาะสมสามารถอ่านค่าได้
7. อ่านค่าความต้านทานที่ได้และบันทึกผล
8. เปลี่ยนจุด P ที่ทำการวัดให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ทำการวัด



รูปที่ 4-1 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 แสดงการวัดค่าความต้านทานดินด้วยเครื่องมือวัด TERCA 2

4.2 รายละเอียดของชุดทดสอบตะแกรงต่อลงดินจำลอง

จุดประสงค์ในการจำลองระบบต่อลงดินมาทดสอบก็เนื่องจากขนาดจริงนั้นมีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นเพื่อการศึกษาจึงได้นำสเกตนแพดเคอร์มาใช้ในการย่อส่วนระบบต่อลงดินเพื่อใช้ในการทดสอบความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยจำลองระบบเป็นดินแบบสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) เพื่อใช้ทดลอง ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองกับค่าในทางทฤษฎีด้วยและเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง โมเดลควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. สารที่ใช้เป็นตัวกลางในการทดสอบควรจะเป็นเนื้อเดียวกันสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานจำเพาะได้ ซึ่งสารที่มีคุณสมบัตินี้ได้แก่ น้ำ
2. สารที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวกลางในการทดสอบเพราะง่ายในการวัดศักดาไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนและแทนที่โมเดลของตะแกรงต่อลงดินได้ง่ายและยังสัมพันธ์กับลวดต่างๆ ที่ใช้ทำโมเดลของตะแกรงต่อลงดินได้เหมาะสม
3. ขนาดของอิเล็กโทรไลติกแท็งก์ (Electrolytic Tank) ควรจะใหญ่พอเพื่อลดผลของพื้นที่ที่จำกัด (Boundary Effects)

เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการด้านบน ในปริภูมิงานฉบับนี้ได้ใช้แท็งก์ทดสอบขนาด $1 \times 1 \times 0.8$ เมตร ใช้น้ำสมมติแทนดินที่มีความสม่ำเสมอ ใช้เกลือ NaCl เปลี่ยนค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำ และเพื่อที่จะลดผลของขนาดของแท็งก์ที่จำกัด โมเดล (Model) ของระบบต่อลงดินควรจะน้อยกว่า $1/5$ เท่าของขนาดแท็งก์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นขนาดสูงสุดของตะแกรงต่อลงดินที่ใช้ในการทดสอบ คือ 20×20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 แสดงชุดจำลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

4.2.1 สเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor)

ตัวจำกัดสูงสุดของสเกลแฟคเตอร์ โดยปกติทั่วไปจะคำนวณจากขนาดของตัวนำที่ใช้ในการทำตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งปกติแล้วขนาดของตัวนำที่ใช้ในการทำตะแกรงต่อลงดินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งถ้าขนาดของลวดที่จะใช้ในการทำโมเดลมีขนาด 0.1 มิลลิเมตร ดังนั้นขนาดของสเกลแฟคเตอร์ที่ใช้ได้มีค่าเท่ากับ 150 อย่างไรก็ตามขนาดของลวดที่ใช้ก็ไม่ได้สร้างความแตกต่างอย่างมากในการหาค่าความต้านทานของโมเดล และสเกลแฟคเตอร์เท่ากับ 300 กับขนาดต่ำสุดของขดลวดที่ใช้ทำโมเดลเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร สามารถใช้ได้โดยปราศจากค่า Error ที่มากนัก ดังนั้นสเกลแฟคเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้คือ 150-300 ซึ่งในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ค่า 150

4.2.2 ความถูกต้องของโมเดลที่ใช้ทดสอบ

ความถูกต้องของโมเดลในการทดสอบนั้น ปัจจัยสำคัญในการทำให้การทดสอบผิดพลาดได้มีดังนี้

1. ขนาดที่จำกัดของแท่งลวดที่ใช้
2. รูปร่างของแท่งลวด

ขนาดที่จำกัดของแท่งลวดถูกคาดว่าจะเป็นตัวทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ดังนั้น เพื่อประมาณค่าความผิดพลาด (error) ให้พิจารณาแท่งลวดที่ใช้เป็นรูปร่างครึ่งทรงกลม (hemisphere) ที่มีรัศมี R และโมเดลของตะแกรงที่กำลังศึกษาเป็นรูปร่างแผ่นตัวนำทรงกลมที่มีรัศมี r วางในแนวระนาบบนพื้นผิวหน้าตรงกลางแท่งลวด ความแม่นยำ (Accuracy: A) ของโมเดล สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (4.1)

$$A = (R_p - R_l) / R_p \quad (4.1)$$

เมื่อ R_p = ความต้านทานของแผ่นตัวนำทรงกลม (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \text{ความต้านทานของแท่งที่พิจารณารูปร่างเป็น hemisphere } (\Omega) \\ = \rho/2\pi R$$

$$\rho = \text{ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวกลาง } (\Omega\cdot\text{m})$$

แท่งที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด $1 \times 1 \times 0.8$ เมตรแต่ระดับน้ำที่เติมในแท่งเพื่อใช้ในการทดสอบมีความลึกประมาณ 60 เซนติเมตร ดังนั้นรัศมี hemisphere เฉลี่ยของแท่ง: R ,มีค่าประมาณ 60 เซนติเมตรและ โมเดลของตะแกรงต่อลงดินขนาดใหญ่สุดที่ใช้ทดสอบมีขนาด 20×20 เซนติเมตร ดังนั้นรัศมีเฉลี่ยของแผ่นตัวนำทรงกลม : r เท่ากับ 10 เซนติเมตร จะมีค่าเท่ากับ 0.894 (89.4 %)

4.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

1. แท่ง ก๊าซที่ใช้ในการทดสอบ โดยการจำลองขนาดจริงลงมา มีขนาดดังนี้

ความยาว	1	เมตร
ความกว้าง	1	เมตร
ความลึก	0.8	เมตร

2. ของเหลว ในการจำลองจะใช้น้ำแทนดินด้วยเหตุผลดังนี้

- น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่หาได้ง่ายที่สุดและมีราคาถูกที่สุด
- น้ำมีคุณสมบัติเป็นสารเอกพันธ์ (Homogeneous Substance)
- การเปลี่ยนระดับความลึกของตะแกรงต่อลงดินทำได้ง่ายกว่าการใช้ดินจริงๆ
- สามารถมองเห็นผลที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองได้เพราะน้ำเป็นตัวกลางโปร่งใส

3. ตะแกรงที่ใช้ทำเป็นระบบกราวด์ในแบบจำลอง ตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบนี้ทำจากลวดทองแดงที่ไม่หุ้มฉนวน ซึ่งมีขนาดต่างๆ ดังนี้

3.1 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.0 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.13 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 1

3.2 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.0 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.13 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 4

3.3 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.0 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.13 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 9

3.4 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.0 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.13 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 16

3.5 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.38 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 1

3.6 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.38 mm และจำนวนร่องคายเท่ากับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.38 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.8 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 1.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.38 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 16

3.9 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.78 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.10 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.78 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.11 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.78 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.12 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2 , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 1.78 mm และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 16

ตะแกรงที่ได้สร้างขึ้นมาทั้ง 12 โมเดลนั้นกำหนดขึ้นเองตามความเหมาะสม

รูปที่ 4-4 แสดงตะแกรงต่อลงดินขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 2.5 mm^2

4.เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน CHAUVIN ARNOUX รุ่น TERCA 2	1	เครื่อง
พร้อมอุปกรณ์เสริม		
- ม้วนสายไฟสี่สี	1	ม้วน
- ม้วนสายไฟสีแดง	3	ม้วน
- แท่งหลักดิน	4	แท่ง

4.2.4 วิธีการทดสอบค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจำลอง

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วิธี Two-Point Method (Ammeter-Voltmeter Method) ในการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน เพราะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าวิธีอื่น เนื่องจากพื้นที่ของแท่งทดสอบมีขนาดจำกัด ไม่สามารถปักแท่งหลักดินที่ใช้ทำการวัดตามวิธีการวัดแบบ Fall of Potential Method ได้ และภายในเครื่องวัด TERCA 2 นั้นมีทั้งตัวจ่ายกระแสและวัดแรงดันบรรจุอยู่ในเรียบร้อยแล้ว ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 สมการที่ใช้ในการแปลงค่าแบบจำลองให้เป็นค่าจริง

ในการแปลงค่าที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง (Model) ให้เป็นค่าจริง (Real) ที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง มีสมการที่สำคัญอยู่ 5 สมการด้วยกัน คือ สมการที่ (4.2) - (4.6)

$$\mu_L = L_{\text{Real}} / L_{\text{Model}} \quad (4.2)$$

โดยที่ μ_L = สเกลแฟคเตอร์ของความยาว
 L_{Real} = ความยาวของตะแกรงในทางปฏิบัติจริง (เมตร)
 L_{Model} = ความยาวของตะแกรงที่เป็นแบบจำลอง (เมตร)

$$\mu_p = \rho_{\text{Real}} / \rho_{\text{Model}} \quad (4.3)$$

โดยที่ μ_p = สเกลแฟคเตอร์ของค่าความต้านทานจำเพาะ
 ρ_{Real} = ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในทางปฏิบัติจริง ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_{Model} = ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำในแบบจำลอง ($\Omega\text{-m}$)

$$\mu_I = I_{\text{Real}} / I_{\text{Model}} \quad (4.4)$$

โดยที่ μ_I = สเกลแฟคเตอร์ของค่ากระแส
 I_{Real} = ค่ากระแสในทางปฏิบัติจริง (A)
 I_{Model} = ค่ากระแสที่ใช้ในแบบจำลอง (A)

$$R_{\text{Real}} = R_{\text{Model}} \cdot \mu_p / \mu_L \quad (4.5)$$

โดยที่ R_{Real} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินในทางปฏิบัติจริง (Ω)
 R_{Model} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่เป็นแบบจำลอง (Ω)

$$V_{\text{Real}} = V_{\text{Model}} \cdot \mu_I \cdot \mu_p / \mu_L \quad (4.6)$$

โดยที่ V_{Real} = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง (V)
 V_{Model} = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในแบบจำลอง (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาควมคู่ไปกับการทดสอบในปริณญาณัพนธ์ฉบับนี้คือ

1. ค่า μ_r มีค่าเท่ากับ 150
2. ค่า μ_p มีค่าเท่ากับ 1 โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

3. กำหนดให้ค่าของกระแสจริงเท่ากับ 1 kA
ดังนั้นจะได้ว่า

$$1. R_{\text{Real}} = R_{\text{Model}} / 150$$

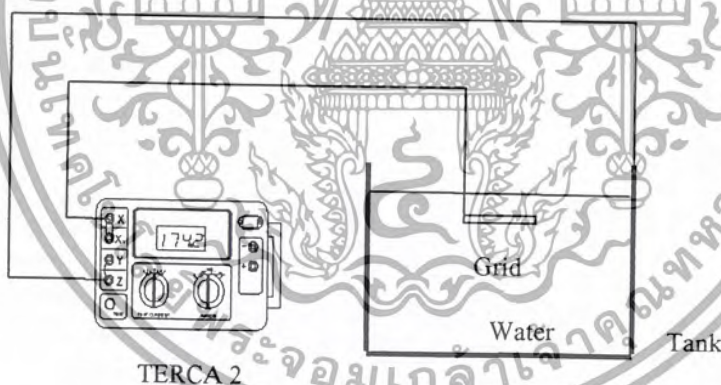
$$2. V_{\text{Real}} = V_{\text{Model}} \cdot \mu_r / 150$$

ค่าต่างๆ ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบและจากสูตรการคำนวณนั้นเป็นค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นเมื่อได้ผลจากการทดสอบแล้วจำเป็นต้องแปลงให้เป็นค่าจริงเสียก่อน โดยการใช้ข้อสรุป 2 ข้อ จึงนำไปเปรียบเทียบกับสูตรการคำนวณ

4.2.6 การวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

วิธีการวัด

1. ตัวอย่างรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 แสดงวงจรการวัดค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน

2. วางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินลงที่ความลึก 0.5 เซนติเมตร
3. ปรับ Range selector และ Current selector ให้เหมาะสม แล้วกดปุ่ม Test ของเครื่องวัด TERCA 2 อ่านค่าความต้านทานที่ได้
4. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากข้อ 3 หารด้วย μ_r ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 จะได้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากสูตรการคำนวณ โดยในสูตรการคำนวณขนาดของตะแกรงและขนาดของตัวนำที่ใช้ต้องคูณด้วย μ_r ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 เพื่อให้ได้ขนาดของตะแกรงต่อลงดินจริงก่อนที่จะทำการแทนค่าในสูตรการคำนวณ

6. ทำการเปลี่ยนระดับความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน โดยวางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินในน้ำที่ความลึก 1 เซนติเมตร, 2 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ จากผิวน้ำ หลังจากนั้นกลับไปทำขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 ใหม่

7. ทำการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงและจำนวนร่องตาข่ายของ โมเดลอีก 11 โมเดลที่เหลือ แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 1-6 ใหม่



รูปที่ 4-6 แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงด้วยเครื่องมือวัด TERCA 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 การวัดค่าความต้านทานดิน

ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานดิน ระหว่างเดือนสิงหาคม 2546-เดือนกุมภาพันธ์ 2547 แสดงได้ดังตารางที่ 5.1-ตารางที่ 5.7 ดังนี้

ตารางที่ 5-1 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนสิงหาคม 2546

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน
วันที่ทดสอบ : 24 สิงหาคม 2546
สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง
อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและตลับเมตร
วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	3.22	1.36	0.34	0.12	0.043	
	Py	3.38	1.26	0.33	0.16	0.041	
P2	Px	5.54	2.29	0.82	0.25	0.050	
	Py	5.67	1.86	0.53	0.22	0.080	
P3	Px	4.12	1.44	0.28	0.14	0.050	
	Py	3.91	1.65	0.43	0.20	0.056	
P4	Px	3.71	1.43	0.39	0.19	0.055	
	Py	3.67	1.46	0.44	0.25	0.057	
$\sum R$		33.22	12.75	3.56	1.53	0.396	
$R_{av} = \sum R / N$		4.15	1.59	0.45	0.19	0.432	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		13.04	9.99	5.65	3.58	1.696	$\sum \rho = 33.96$
$\rho_{av} = \sum \rho_{av} / N$						$\rho_{av} = 6.79 \Omega - m.$	

หมายเหตุ : ลักษณะของพื้นที่ - ดินมีความชื้นสูง เพราะฝนตกหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนกันยายน 2546

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน

วันที่ทดสอบ : 20 กันยายน 2546

สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและคลับเมตร

วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	5.32	2.61	0.72	0.44	0.13	
	Py	5.41	2.25	0.69	0.39	0.15	
P2	Px	5.97	2.56	0.92	0.42	0.22	
	Py	4.46	2.48	0.86	0.47	0.25	
P3	Px	6.12	3.03	1.23	0.71	0.27	
	Py	6.19	2.09	0.97	0.81	0.31	
P4	Px	4.65	1.10	1.01	0.50	0.23	
	Py	4.53	1.98	1.15	0.37	0.18	
ΣR		42.65	18.10	7.55	4.11	1.74	
$R_{av} = \Sigma R / N$		5.33	2.26	0.94	0.51	0.22	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		16.74	14.19	11.85	9.61	6.83	$\Sigma \rho = 59.22$
$\rho_{av} = \Sigma \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 11.84 \Omega - m.$

หมายเหตุ : ปริมาณน้ำฝนน้อย ความชื้นในดินไม่สูงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนตุลาคม 2546

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน
 วันที่ทดสอบ : 18 ตุลาคม 2546
 สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและคลับเมตร
 วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	6.18	3.19	0.74	0.45	0.17	
	Py	6.24	2.97	0.86	0.38	0.22	
P2	Px	5.27	2.57	1.13	0.43	0.27	
	Py	5.69	2.24	0.98	0.49	0.31	
P3	Px	6.19	2.31	1.34	0.69	0.33	
	Py	5.97	1.92	1.18	0.80	0.25	
P4	Px	6.11	2.47	1.07	0.67	0.19	
	Py	5.89	2.66	0.87	0.79	0.21	
$\sum R$		47.54	20.33	8.17	4.70	1.95	
$R_{av} = \sum R / N$		5.94	2.54	1.02	0.59	0.24	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		18.67	15.97	12.83	11.07	7.66	$\sum \rho = 66.20$
$\rho_{av} = \sum \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 13.24 \Omega - m.$

หมายเหตุ : ปริมาณน้ำฝนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-4 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนพฤศจิกายน 2546

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน
 วันที่ทดสอบ : 16 พฤศจิกายน 2546
 สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและคลับเมตร
 วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	6.93	2.39	1.11	0.65	0.32	
	Py	6.47	2.32	0.93	0.51	0.15	
P2	Px	6.92	3.45	1.10	0.93	0.35	
	Py	6.51	4.13	1.93	0.75	0.39	
P3	Px	6.71	3.47	0.98	0.21	0.20	
	Py	6.77	2.51	1.31	0.19	0.14	
P4	Px	6.53	2.71	0.91	0.89	0.57	
	Py	6.91	2.29	1.67	0.73	0.30	
ΣR		53.8	23.27	9.89	5.25	2.43	
$R_{av} = \Sigma R / N$		6.73	2.91	1.24	0.66	0.30	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		21.12	18.27	15.53	12.37	9.56	$\Sigma \rho = 76.85$
$\rho_{av} = \Sigma \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 15.37 \Omega - m.$

หมายเหตุ : ความชื้นของพื้นที่ๆ ใช้วัดมีค่าไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-5 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนธันวาคม 2546

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน

วันที่ทดสอบ : 10 ธันวาคม 2546

สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและคลับเมตร

วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	6.93	2.76	1.29	0.87	0.31	
	Py	7.31	2.65	1.41	0.91	0.40	
P2	Px	7.53	2.94	1.43	0.93	0.42	
	Py	7.76	3.13	1.54	0.85	0.39	
P3	Px	7.11	3.53	1.21	0.89	0.37	
	Py	6.97	3.29	1.17	0.78	0.31	
P4	Px	6.65	3.22	1.20	0.71	0.31	
	Py	6.63	3.37	1.18	0.62	0.13	
ΣR		56.89	24.89	10.43	6.56	2.64	
$R_{av} = \Sigma R / N$		7.11	3.11	1.30	0.82	0.33	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		22.33	19.51	16.39	15.46	10.37	$\Sigma \rho = 84.06$
$\rho_{av} = \Sigma \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 16.81 \Omega - m.$

หมายเหตุ: ไม่มีฝน อากาศไม่ร้อนมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-6 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนมกราคม 2547

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน

วันที่ทดสอบ : 26 มกราคม 2547

สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและคลับเมตร

วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	10.22	5.24	2.02	0.53	0.19	
	Py	9.93	4.37	1.93	0.41	0.15	
P2	Px	10.53	5.41	1.73	0.57	0.17	
	Py	10.21	5.02	2.12	0.51	0.15	
P3	Px	9.87	4.57	1.41	0.31	0.11	
	Py	9.98	3.93	1.37	0.41	0.03	
P4	Px	9.75	3.57	1.23	0.43	0.16	
	Py	8.97	4.10	0.59	0.50	0.09	
ΣR		79.46	36.21	12.4	3.67	1.05	
$R_{av} = \Sigma R / N$		9.93	4.53	1.55	0.45	0.13	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		31.19	28.43	19.47	8.65	4.11	$\Sigma \rho = 91.85$
$\rho_{av} = \Sigma \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 18.37 \Omega - m.$

หมายเหตุ : อากาศแห้ง ความชื้นในดินน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-7 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานดินในเดือนกุมภาพันธ์ 2547

หัวข้อ : การวัดค่าความต้านทานดิน
 วันที่ทดสอบ : 19 กุมภาพันธ์ 2547
 สถานที่ทำการวัด : สนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 อุปกรณ์ในการวัด : TERCA 2 พร้อมอุปกรณ์เสริมและตลับเมตร
 วิธีการวัด : Four Points Method (Wenner Method)

Point	R = Measured value of resistance (Ω)						Remark
	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px	12.65	5.18	2.11	0.78	0.37	
	Py	11.97	4.37	1.67	0.51	0.21	
P2	Px	13.12	5.17	2.10	0.79	0.30	
	Py	12.97	5.02	1.93	0.63	0.25	
P3	Px	11.57	4.31	1.51	0.65	0.19	
	Py	10.67	3.97	1.27	0.61	0.17	
P4	Px	11.33	4.28	1.51	0.63	0.21	
	Py	11.41	5.19	0.74	0.54	0.11	
ΣR		95.69	37.49	12.84	5.14	0.80	
$R_{av} = \Sigma R / N$		11.96	4.68	1.61	0.64	0.23	
$\rho = 2\pi AR_{av}$		37.56	29.43	20.17	12.10	7.09	$\Sigma \rho = 106.35$
$\rho_{av} = \Sigma \rho_{av} / N$							$\rho_{av} = 21.27 \Omega - m.$

หมายเหตุ : ลักษณะของพื้นที่- ดินมีความชื้นต่ำ อากาศร้อนจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดินของระบบจำลอง

ตารางที่ 5-8 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.499	0.587	17.64
30 × 30	4	0.394	0.473	20.05
30 × 30	9	0.366	0.444	21.31
30 × 30	16	0.349	0.410	17.48

ตารางที่ 5-9 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.438	0.547	24.89
30 × 30	4	0.382	0.450	17.80
30 × 30	9	0.354	0.423	19.49
30 × 30	16	0.338	0.393	16.27

ตารางที่ 5-10 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.419	0.523	24.82
30 × 30	4	0.363	0.430	18.46
30 × 30	9	0.335	0.398	18.81
30 × 30	16	0.319	0.373	16.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-11 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.386	0.483	25.13
30 × 30	4	0.330	0.389	17.89
30 × 30	9	0.303	0.360	18.81
30 × 30	16	0.286	0.331	15.73

ตารางที่ 5-12 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.499	0.546	13.03
30 × 30	4	0.394	0.487	23.60
30 × 30	9	0.366	0.423	15.57
30 × 30	16	0.349	0.418	19.77

ตารางที่ 5-13 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.438	0.533	21.69
30 × 30	4	0.382	0.463	21.20
30 × 30	9	0.354	0.407	14.97
30 × 30	16	0.338	0.402	18.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-14 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2
ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.419	0.507	21.01
30 × 30	4	0.363	0.443	22.03
30 × 30	9	0.335	0.389	16.12
30 × 30	16	0.319	0.381	19.44

ตารางที่ 5-15 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2
ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.386	0.467	20.98
30 × 30	4	0.330	0.403	22.12
30 × 30	9	0.303	0.351	15.84
30 × 30	16	0.286	0.341	19.23

ตารางที่ 5-16 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm^2
ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.499	0.570	14.23
30 × 30	4	0.394	0.447	13.45
30 × 30	9	0.366	0.424	15.85
30 × 30	16	0.349	0.419	20.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-17 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.438	0.525	19.86
30 × 30	4	0.382	0.429	12.30
30 × 30	9	0.354	0.408	15.25
30 × 30	16	0.338	0.393	16.27

ตารางที่ 5-18 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.419	0.492	17.42
30 × 30	4	0.363	0.409	12.67
30 × 30	9	0.335	0.388	15.82
30 × 30	16	0.319	0.371	16.30

ตารางที่ 5-19 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm^2
ความลึก ในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร ความต้านทานจำเพาะของน้ำ $20 \text{ } \Omega\text{-m}$

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1	0.386	0.451	16.84
30 × 30	4	0.330	0.367	11.21
30 × 30	9	0.303	0.350	15.51
30 × 30	16	0.286	0.327	14.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 การวัดค่าความต้านทานดิน

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นมีค่าไม่คงที่เนื่องจากองค์ประกอบภายในดินจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม, ความชื้นและอุณหภูมิ จึงสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล



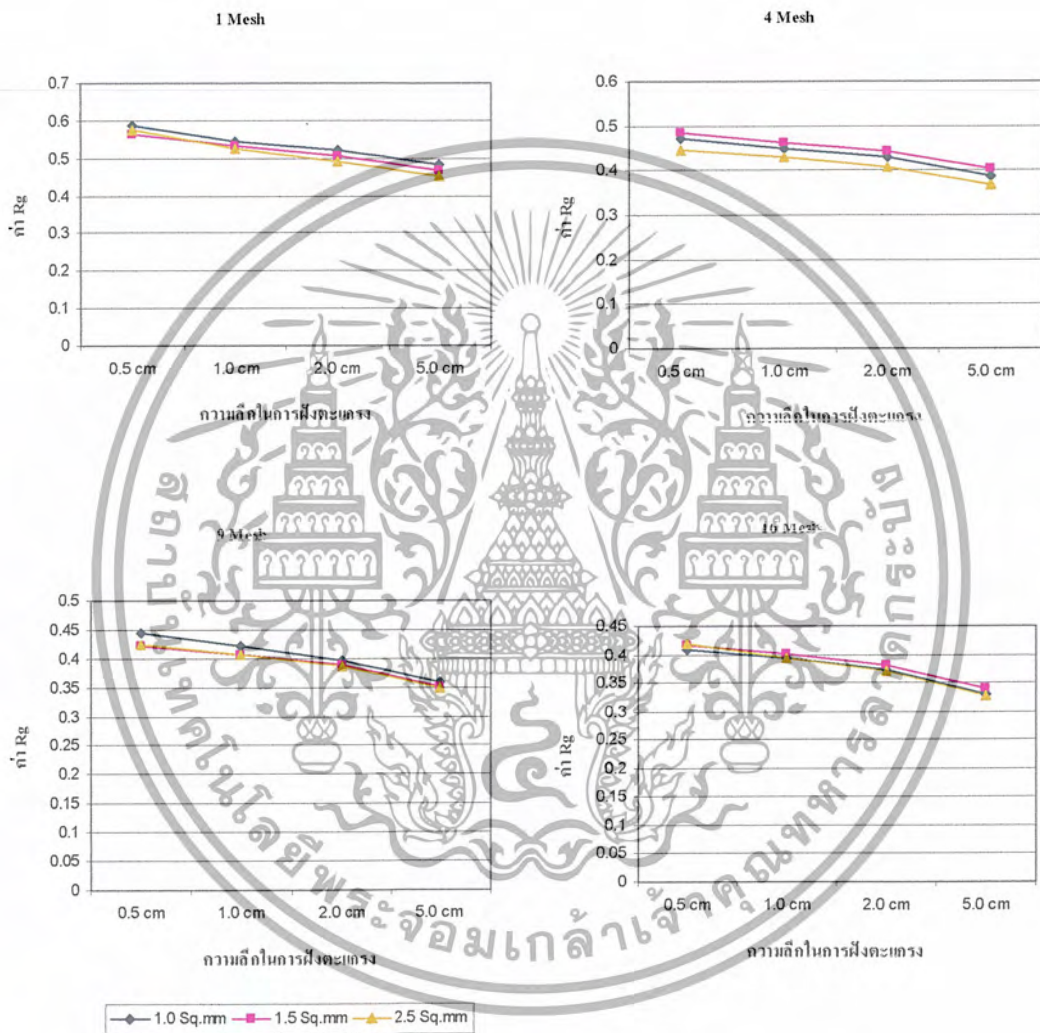
รูปที่ 6-1 แสดงกราฟความต้านทานจำเพาะของดินบริเวณสนามหญ้า ศูนย์กีฬาพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ระหว่าง เดือนสิงหาคม 2546 – เดือนกุมภาพันธ์ 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจำลอง

6.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน

การปรับระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินนั้น จะพบว่า เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินแล้วจะทำให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินมีค่าลดลง

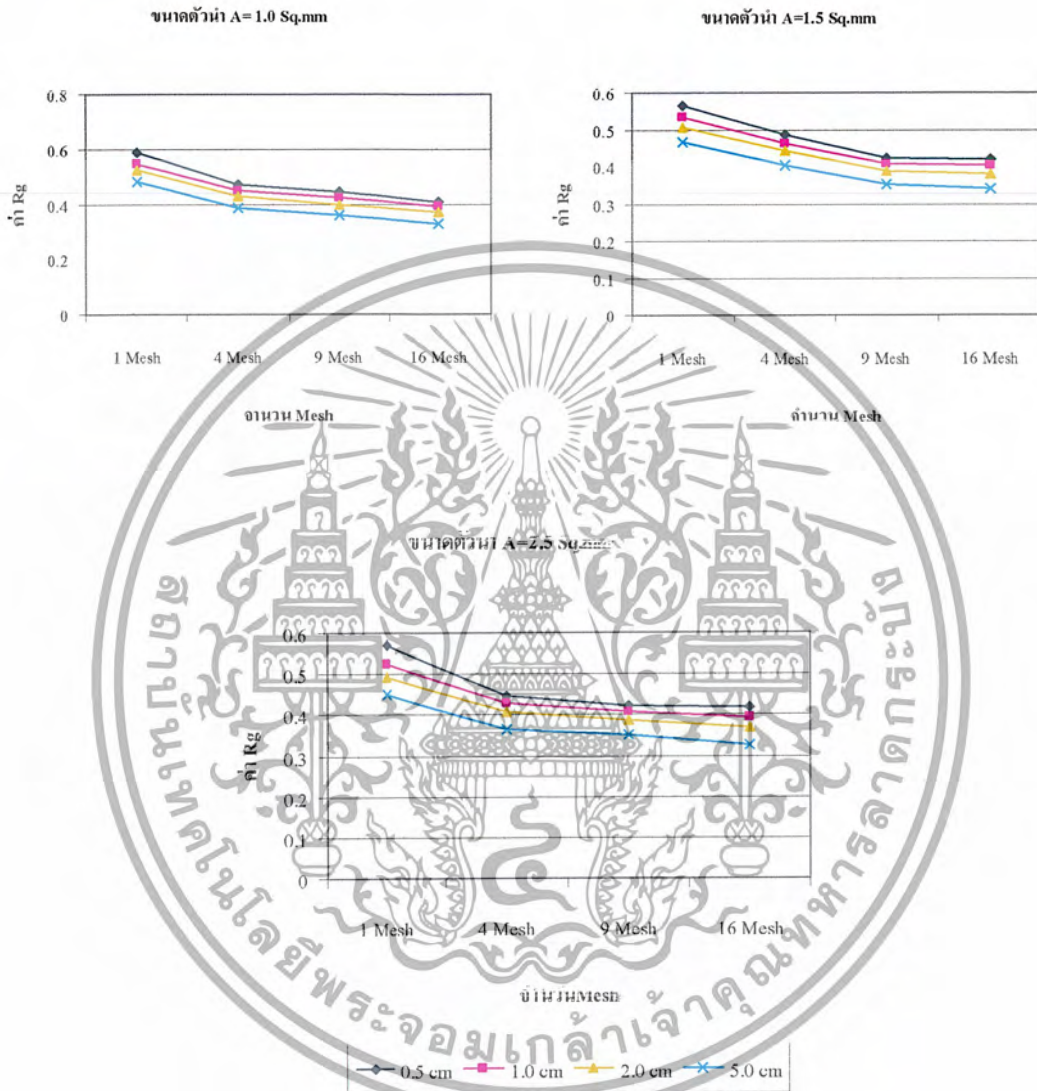


รูปที่ 6-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเมชภายในตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน

การเปลี่ยนแปลงจำนวนเมชภายในตะแกรงต่อลงดินนั้นจะพบว่าเมื่อจำนวนเมชภายในตะแกรงต่อลงดินมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินมีค่าลดลง

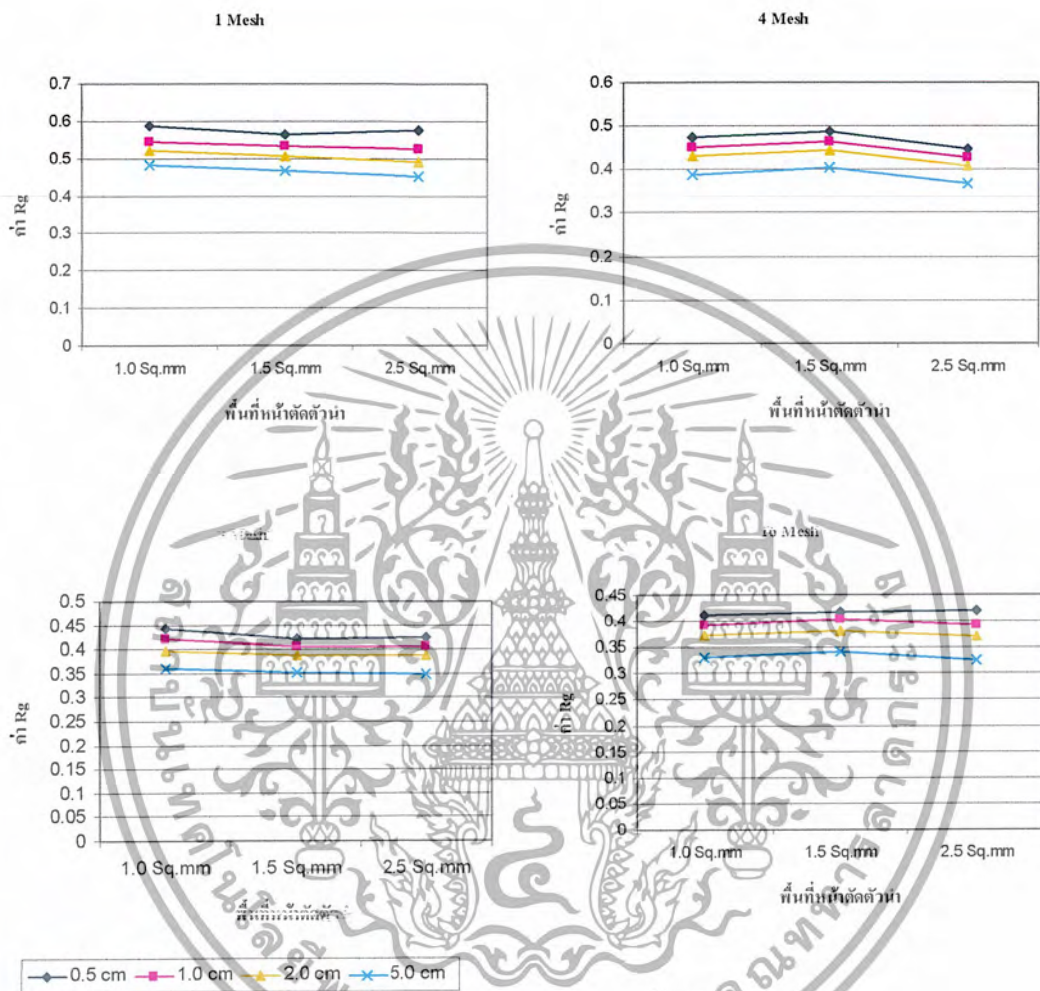


รูปที่ 6-3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเมชในแต่ละด้านของตะแกรงกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน

การปรับเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินนั้นจะพบว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำ จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลงเล็กน้อย



แบบที่ 6-4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองวัดค่าจากแบบจำลองจะมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากสูตรการคำนวณ ทั้งนี้เนื่องมาจาก

1. น้ำที่ใช้ในการทดลองนั้นยังคงมีข้อเสีย คือ น้ำที่ใช้ อาจจะมีสารแขวนลอยรวมอยู่และน้ำที่ใช้ จะเกิดการแตกตัวเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีผลทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ขณะที่ทำการวัดค่าอยู่นั้นน้ำอาจเกิดการกระเพื่อมได้ง่ายจึงทำให้ความลึกในการฝังแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินเป็นไปอย่างไม่แน่นอนและทำการวัดค่าได้ยาก ต้องรอให้น้ำหยุดกระเพื่อมเสียก่อน
2. การวางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดิน อาจไม่ได้อยู่ในแนวระดับเดียวกันตามที่ต้องการ อันเนื่องมาจากการปรับให้ไครระดับนั้นไม่สามารถปรับให้เที่ยงตรงได้ด้วยสายตา ถึงแม้ปรับระดับความลึกจะมีสเกลบอกระดับแล้วก็ตาม ทำให้ค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างออกไป
3. แบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินที่ใช้ อาจเกิดการสึกกร่อนในขณะที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการไหลของกระแส โดยการแตกตัวของไอออนทำให้เกิดออกไซด์และสารประกอบอื่นมาเกาะที่ลวดตัวนำ ทำให้การกระจายของกระแสเกิดการคลาดเคลื่อนไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2000: "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" 2000
- [2] ANSI/IEEE Std 81-1983: "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of a Ground System" 1983
- [3] B. Thapar, S.L. Goyal: "Scale Model Studies of Grounding Grids in Non-Uniform Soils" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2 (October 1987), pp 1060-1066
- [4] Ross Caldecott, Donald G. Kasten: "Scale Model Studies of Station Grounding Grids" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS-102 No.3 (March 1983), pp 558-566
- [5] J.M. Nahman, V.B. Djordjevic: "Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh and Step Voltages of Ground Grids and Combined Ground Electrodes" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10 No.3 (July 1995), pp 1263-1269
- [6] Jinliang He, Rong Zenge: "Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18 No.3 (July 2003), pp 788-794
- [7] Y L Chow, M M Elsherbiny, M M A Salama: "Resistance Formulars of Grounding System in Two-Layer Earth" " IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11 No.3 (July 1996), pp 1330-1337
- [8] ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย: "การวัดค่าความต้านทานดินและการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย"
- [9] บริษัทแอสราส จำกัด: "Understanding Ground Resistance Testing" 2003

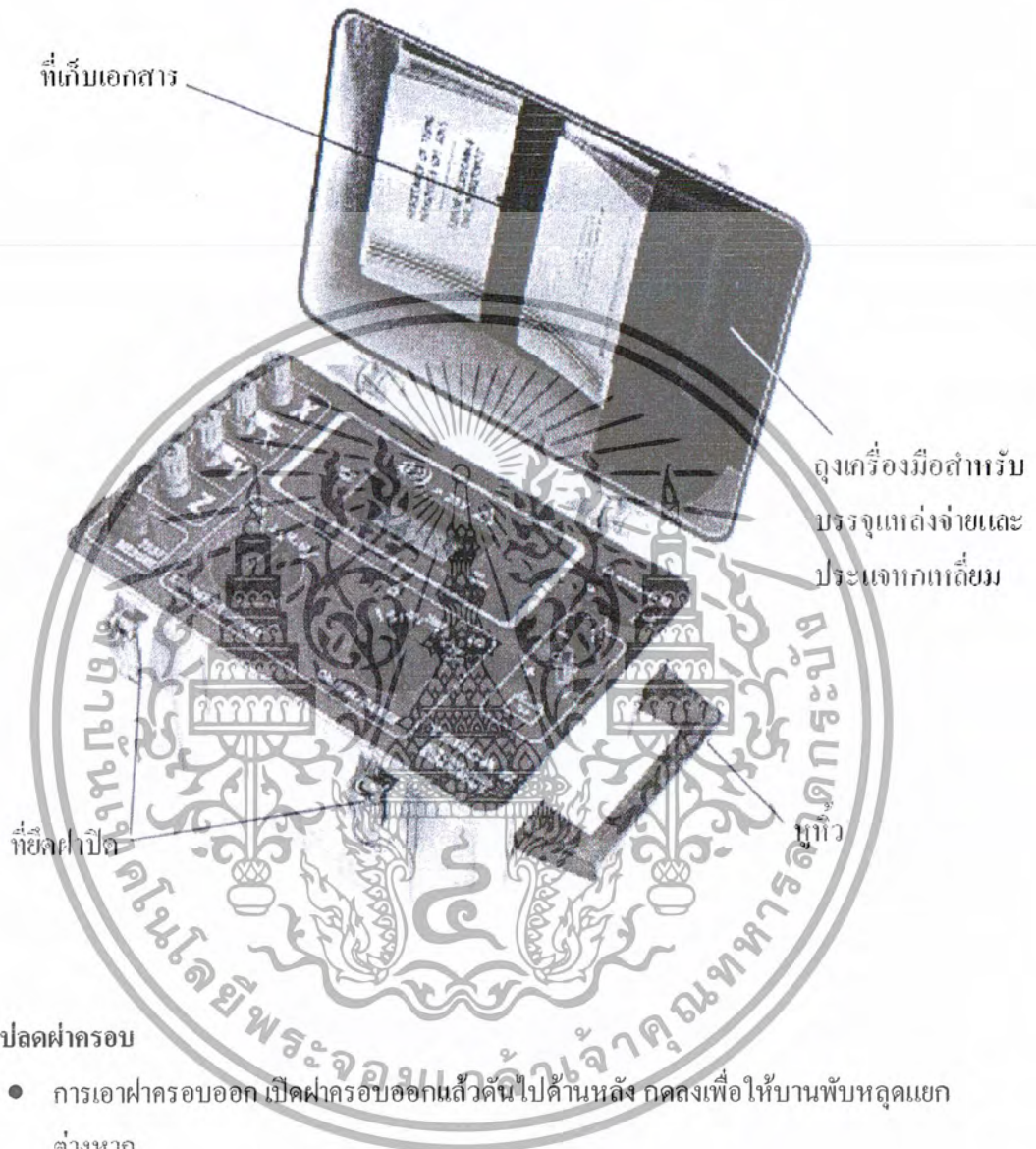
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือเครื่องวัดค่าความต้านทานดิน TERCA 2

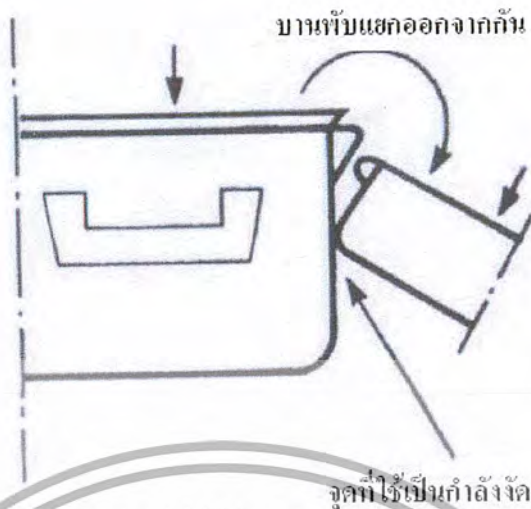
บทนำ



การปลดฝาครอบ

- การเอาฝาครอบออก เปิดฝาครอบออกแล้วดันไปด้านหลัง กดลงเพื่อให้บานพับหลุดแยกต่างหาก
- การปิดฝาครอบ ตั้งบานพับให้ตรงกับที่ล็อกแล้วกดลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายละเอียดทั่วไป

- โครงสร้างเป็นพลาสติกความต้านทานสูง
- ป้องกันน้ำและฝุ่นละอองที่ IP 54
- ฟาครอบเคลื่อนย้ายได้และมีหูหิ้ว
- ขนาด กว้าง 400 มม. ยาว 260 มม. สูง 250 มม.
- น้ำหนัก 6.2 กก.
- ค่าแรงดันทดสอบฉนวน 2000 V rms/50 Hz ระหว่าง 4 ขั้วสาย input
- กระแสทดสอบ - Square wave AC ,2 mA ,10 mA or 50 mA
- ความถี่ 128 Hz
- แรงดันทดสอบสูงสุด 50 Vrms
- โครงสร้างภายในและภายนอกของเครื่องมือถูกสร้างขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่ามีค่าความต้านทานที่ดีที่สุดที่หิ้ว ซึ่งจะขรุขระเล็กน้อย
- จะมีเสียงสัญญาณแสดงขึ้นมาเมื่อค่าแรงดันมีค่ามากกว่า 20 Vpeak (AC/DC) ซึ่งเป็นค่าที่เครื่องวัดจะไม่สามารถแสดงผลได้และในขณะเดียวกันจะมีสัญญาณเตือนขึ้นมา ดังนั้น ถ้าเมื่อใดก็ตามมีสัญญาณเตือนรวมทั้งมีไฟแสดงขึ้นมา นั่นแสดงว่าค่าแรงดันระหว่าง X และ Y หรือ X และ Z มีค่ามากกว่า 20 Vpeak ให้ตรวจสอบการติดตั้งเครื่อง และการทำการวัดอีกครั้ง
- อย่างไรก็ตามถ้ากด “Test” แล้ว ไฟสีเขียวในเครื่องจะป้องกันเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางาน

การแสดงผล

- จอ LCD 7-segment, ความสูงตัวอักษร 18 มม.
- อ่านค่าได้เป็น Ω หรือ $k\Omega$
- มีไฟแสดงเมื่อแบตเตอรี่ต่ำ ดังรูปหมายเลข 11.จะมีไฟแสดงเมื่อมีการชาร์จแบตเตอรี่ภายในเครื่อง
- หากไม่สามารถอ่านค่าได้ จอแสดงผลจะมีลูกศรกระพริบขึ้น
- เมื่อปรับเรนจ์ที่สูงเกินไปจอแสดงผลจะแสดงเป็น 1

แหล่งจ่ายไฟ

- เครื่องวัดใช้แบตเตอรี่ นิกเกิล/แคดเมียม 12 V(DC)
 - แรงดันที่ยอมรับได้ 11 ถึง 14 V
 - สามารถชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 187 V ถึง 253 V หรือ 94 V ถึง 127 V ที่ความถี่ 47 ถึง 450 Hz ได้
 - อุปกรณ์ชาร์จที่มาพร้อมกับเครื่องมือขนาด 220 V

- สามารถใช้แบตเตอรี่จากภายนอกได้ขนาด 12 V / 1 A

การเชื่อมต่อ : การเชื่อมต่อขั้วสาย (สำหรับสายเบ็ดขั้วใช้ขนาด 6 มม.และเส้นผ่านศูนย์กลางของปลั๊ก 4 มม.)

สภาวะแวดล้อม :

สภาวะพิจารณา	อ้างอิง	การทํางาน	การเก็บรักษาแบตเตอรี่
อุณหภูมิ	23 °C +/- 3 °C	-5 °C ถึง +50 °C	-20 °C ถึง +50 °C
ความชื้น	30 ถึง 50 % RH	0 ถึง 80 % RH	0 ถึง 90 % RH



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) .
 - 2) .
 - 3) .
 - 4) .
- } ขั้วสาย
INPUT
- 5) .ปุ่มกดเพื่อทดสอบระบบ
 - 6) .ปุ่มปรับเพื่อเลือกกระแสทดสอบ
 - 7) .ตัวปรับเรนจ์
 - 8) .ขั้วสายสำหรับต่อเข้ากับแบตเตอรี่ภายนอก
 - 9) .จอแสดงผล LCD
 - 10) .ไฟแสดงสถานะการชาร์จแบตเตอรี่
 - 11) .ไฟเตือนเมื่อแบตเตอรี่อ่อน
 - 12) .ไฟแสดงสถานะว่าไม่ควรใช้งานต่อไป
 - 13) .ช่องเสียบสายไฟสำหรับชาร์จกับไฟบ้าน
 - 14) .ฉลากแสดงการเลือกแรงดันที่จะใช้งาน
 - 15) .แผ่นตัวนำสำหรับขอร์ดขั้วสายดิน
 - 16) .สัญญาณเตือนเมื่อแรงดันทดสอบสูงกว่า 20 Vpeak
 - 17) .แผ่นตัวนำสำหรับขอร์ดเพื่อใช้ในระบบ 2 Point

แหล่งจ่าย-พิวส์ของเครื่องวัด

การทดสอบแบตเตอรี่

- ขอร์ดขั้วสาย X และ Z
- ปรับเรนจ์กระแสที่ 50 mA
- ปรับเรนจ์ความต้านทานที่ 20 Ω
- ทำการกดปุ่มทดสอบ

ถ้าไม่มีเครื่องหมาย โคลอนขึ้นแสดงว่า

- แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้เพียงพอ
- สามารถทำการวัดได้
 - ช่วงเวลาที่สามารถทำการวัดได้เมื่อชาร์จแบตเตอรี่เต็ม
- 700 ครั้งเมื่อใช้ที่ 15 วินาที 50 mA
- 1300 ครั้งเมื่อใช้ที่ 15 วินาที 2 และ 10 mA

ถ้ามีเครื่องหมาย โคลอนขึ้นแสดงว่า

- แบตเตอรี่ชาร์จไม่เต็ม หลังจากที่เครื่องหมาย โคลอนขึ้นครั้งแรก
 - สามารถใช้เครื่องได้ 100 ครั้ง ที่ระยะเวลา 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารใหม่หรือใช้แบตเตอรี่จากภายนอกนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชาร์จแบตเตอรี่

- ต่อสายไฟสำหรับชาร์จที่ตัวเครื่อง
- เสียบสายเข้าที่แหล่งจ่ายที่เหมาะสม
- ไฟสีแดงจะแสดงขึ้นมา และสว่างไปเรื่อยๆ ระยะเวลาในการชาร์จ 14 ชั่วโมง
- ไม่แนะนำให้ใช้เครื่องในขณะที่ชาร์จอยู่ เพราะจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง

การเชื่อมต่อแบตเตอรี่ภายนอก

- การเชื่อมต่อแบตเตอรี่ภายนอกจะต้องพิจารณาให้ตรงกัน
 - ไม่จำเป็นจะต้องเอาแบตเตอรี่ภายในออก

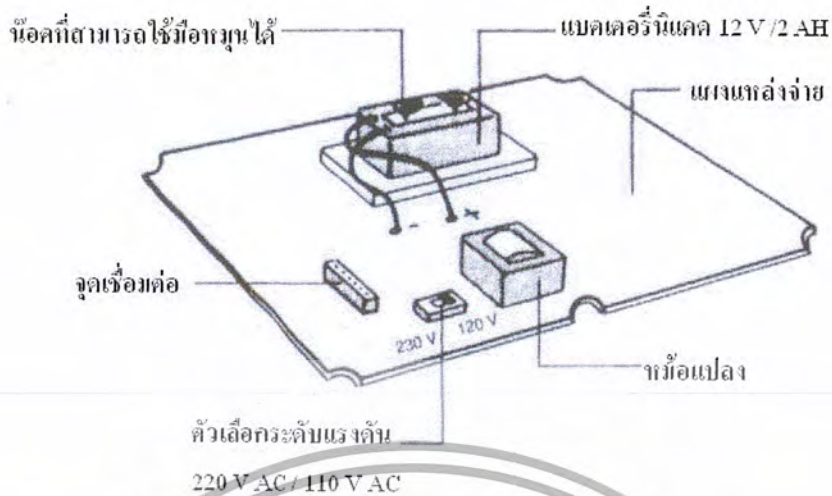
การเปลี่ยนแบตเตอรี่

- ใช้ประแจหกเหลี่ยมหมุนสกรูที่อยู่ใต้เครื่องออกมา
- ระวังอย่าให้สายเคเบิลที่เชื่อมต่อแผงอุปกรณ์กับแหล่งจ่าย



- แยกสายสีเส้นที่ต่อแบตเตอรี่เข้ากับตัวเครื่องออก
- หมุนน็อตออกและปลดแบตเตอรี่ออกมา
- ดำเนินการเปลี่ยนแบตเตอรี่
- ติดตั้งแบตเตอรี่ใหม่ หมุนน็อตและสกรูเข้าให้มั่นคง
- ต่อสายแบตเตอรี่เข้าให้เหมือนเดิม พิจารณาขั้วสายด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเลือกค่าแรงดัน INPUT

- เลื่อนสวิตช์เพื่อเลือกแหล่งจ่ายที่ต้องการ
หมายเหตุ :
 - ปรับเลือกแรงดัน 220 V สำหรับใช้กับ 220 V โดยเฉพาะ และ 110 เพื่อใช้กับค่าอื่นๆ
 - สามารถแน่ใจได้ว่า ค่าที่เลือกจะตรงกับค่าที่ต้องการ

สิ่งที่น่าเป็นห่วง

- ถ้าเลือกค่าแรงดัน 110 V และเครื่องวัดต่ออยู่ที่ 220 V แผงควบคุมจะมีไฟปรากฏขึ้น ชั่วขณะและดับลง
 - ถ้าเลือกค่าแรงดัน 220 V และเครื่องวัดต่ออยู่ที่ 110 V แผงควบคุมจะไม่มีไฟแสดง
- หมายเหตุ :
- อย่างไรก็ตาม ทั้งสองเหตุการณ์จะไม่อันตรายมากนักเพราะมีระบบป้องกันภายในอยู่แล้ว

การเปลี่ยนฟิวส์ภายในเครื่องวัด

เครื่องวัดมีระบบป้องกันการผิดปกติภายใน โดยฟิวส์ที่อยู่ภายในตัวเครื่อง ซึ่งจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่ค่าสูงกว่า 500 V

- ถอดโครงภายในออกมา
- พลิกด้านล่างขึ้นมา
- เปลี่ยนฟิวส์
- ใส่โครงภายในกลับเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ซอร์ตซ์ว้าย X และ Xv โดยใช้แผ่นฉนวนสำหรับซอร์ตซ์ว้าย ส่วน Y และ Z ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปีกแห่งหลักดิน Z (ซึ่งจะเป็นระยะที่ไกลที่สุด ตามตัวอย่างใช้ระยะ 30 m จากหลักดิน X)
- ปีกแห่งหลักดิน Y ระหว่างแห่ง X และ Z โดยห่างจาก X 18 m (ระยะห่าง X Z 62 %)
- จะมีสัญญาณเตือนเมื่อค่าแรงดันที่ตีที่สูงสุดมีค่าสูงกว่า 20 V peak ซึ่งจะต้องไม่กดปุ่มทดสอบ และตรวจสอบการติดตั้งใหม่ ถ้าเสียงสัญญาณหยุดดังก็ทำการวัดต่อไปได้
- กดปุ่มทดสอบ
- บันทึกค่าความต้านทานที่แสดงขึ้นมา
- ย้ายแห่งหลักดิน Y ไปที่ระยะ 21 m จาก X (ระยะห่าง X Z 72 %) และระยะ 15 m จาก X (ระยะห่าง X Z 52 %)
- บันทึกค่าความต้านทานของแต่ละตำแหน่ง
- ถ้าค่าทั้งสองเหมือนกันหรือ ใกล้เคียงกันแสดงว่าการวัดถูกต้อง
- ถ้าค่าที่ออกมาไม่ถูกต้องให้เพิ่มระยะห่างระหว่าง X และ Z และทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ใช้อัตราส่วนเหมือนเดิมคือ 52%, 62% และ 72%

การเลือกกระแสทดสอบและเรนจ์

- เลือกเรนจ์ความต้านทาน ซึ่งเครื่องจะแสดงค่าได้ที่ 200 และ 1999
- ปรับไปที่ค่ากระแสสูงสุด ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพของเครื่องวัดมีค่าสูง

เครื่องขับออกการปรับเรนจ์สูงเกินไป

- “1” จะแสดงขึ้นมา หรือตัวเลขจะกระพริบไปมา ซึ่งแสดงว่าการวัด ไม่ถูกต้อง

ความไม่ถูกต้องของเครื่องวัด

- การแสดงผล ไม่ถูกต้องนั้นอาจมีสาเหตุมาจาก
 - กระแสทดสอบมีค่าสูงเกินไป
 - ค่าความต้านทาน $R_x + R_z$ มีค่าสูงเกินไป
 - พื้นดินนำกระแสมากเกินไป

การแก้ปัญหาในกรณีที่การอ่านค่าไม่ถูกต้อง

- ลดค่ากระแสทดสอบลง
- ปรับปรุงคุณภาพของแห่งหลักดิน Y และ Z
 - เช็ครอยต่อของแห่งหลักดิน
 - เช็คการปักแห่งหลักดินว่าดีหรือเปล่า

- เคลื่อนย้ายแห่งหลักดิน Y และ Z ให้ห่างจากกระแสเหนี่ยวนำจากพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

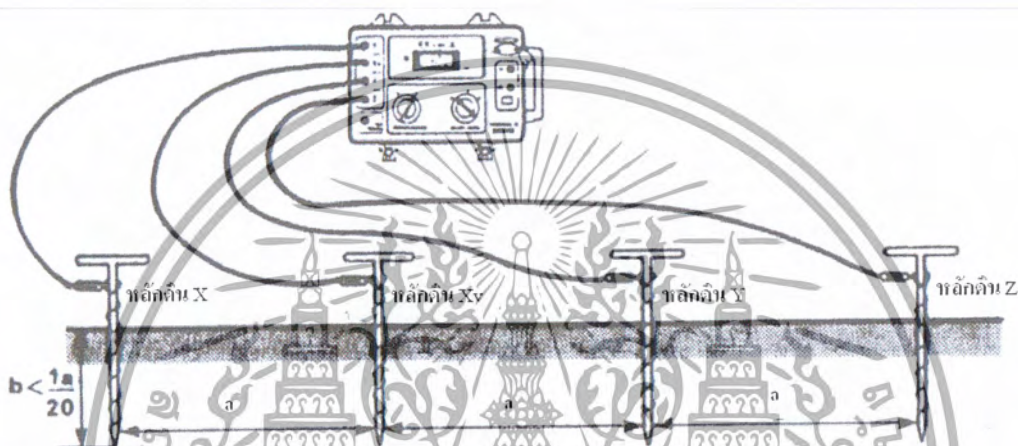
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้องแม่นยำ

ความถูกต้องแม่นยำนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับแท่งหลักดินและสัญญาณรบกวนต่างๆ

การวัดค่าความต้านทานดิน

- เอาแผ่นขอร์ดซี่สายออก
- นำแท่งหลักดินทั้งสี่แท่งมาปักในแนวเดียวกัน



- ปักแท่งหลักดินให้ลึกลงไป 15 cm ความลึกจะต้องน้อยกว่า 1/20 ของระยะห่างระหว่างแต่ละแท่ง
- เลือกเรานจ์ที่จะใช้ทำการวัด
- กดปุ่มทดสอบ
- บันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1 การวัดค่าความต้านทานดิน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ นักศึกษามีความรู้และเข้าใจวิธีการวัดค่าความต้านทานดิน อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 81-1983
2. เพื่อให้ นักศึกษาได้ฝึกปฏิบัติการ ใช้งานเครื่องมือวัด

ทฤษฎี

ความต้านทานจำเพาะของดิน หมายถึง ความต้านทานที่วัดได้จากด้านตรงข้ามกันของลูกบาศก์ของดินที่มีแต่ละด้านยาวหนึ่งหน่วย เช่น ความต้านทานจำเพาะของดินหน่วยเป็น Ω - เมตร

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความต้านทานของเนื้อดิน ความต้านทานจำเพาะของดินก็ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน สามารถพิจารณาได้ง่ายๆ ได้จากองค์ประกอบของเนื้อดินนั้น ตามลักษณะและปริมาณความชื้นในเนื้อดิน, สารละลายในดินและแร่ธาตุธรรมชาติสรุปคร่าวๆ ได้ดังตาราง

ชนิดของดิน	ความต้านทาน Ω -cm.		
	Min.	Average.	Max.
เถ้า, ดินดาน, ถ่าน	590	2,370	7,000
ดินเหนียว	340	4,060	16,300
ดินเหนียวปนทรายและกรวด	1,020	15,800	135,000
หินกรวดทรายที่มีเนื้อดินปนอยู่เล็กน้อย	59,000	94,000	458,000

ถ้านำดินมาไล่ความชื้นออกไปหมดจะกลายเป็นฉนวนที่ดี เพราะจะพบว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าสูงมาก และดินจะนำไฟฟ้าได้ขึ้นมากที่ความชื้นระดับ 20% ดังตาราง

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน ตามน้ำหนัก	ความต้านทานดิน	
	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทราย
0	>10 ⁹	>10 ⁹
2.5	250,000	15,000
5	165,000	43,000
10	53,000	18,500
15	19,000	10,500
20	12,000	6,300
30	6,400	4,200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าความต้านทานของดินยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังเช่นตารางต่อไปนี้ เป็นความต้านทานของดินเหนียวปนทราย ที่มีความชื้น 15.2 % และเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่าง 20°C ถึง -15°C ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้กว้างในช่วง 7,200 ถึง 330,000 โอห์ม-เซนติเมตร

อุณหภูมิ		ความต้านทานดิน $\Omega\text{-cm.}$
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
20	68	7,200
10	50	9,900
0	32 (Water)	13,800
0	32 (Ice)	30,000
-5	23	79,000
-15	14	330,000

จะพบว่าค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิ ดังนั้นค่าความต้านทานของระบบกราวด์ที่ระบบเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในแต่ละช่วงเวลาและเนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิจะลดความเปลี่ยนแปลงในดินระดับลึกๆ จึงพบว่ากราวด์ที่ตอกลึกถึงระดับที่มากพอจะมีเสถียรภาพในทุกฤดูกาลและจะมีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อตอกถึงจนถึงระดับน้ำใต้ดิน

ในบางพื้นที่ความต้านทานของดินจะสูงมากจนต้องลงทุนสูงและใช้ความพิถีพิถันมากในการสร้างระบบกราวด์ให้มีความต้านทานต่ำ ทางออกที่ประหยัดที่สุดก็คือการใช้สารเคมีช่วยปรับความต้านทานของเนื้อดินเป็นประจำ ดังตารางต่อไปนี้ซึ่งแสดงค่าความต้านทานของเนื้อดินเหนียวปนทรายที่เพิ่มสารละลายของเกลือลงไปปริมาณต่างๆ

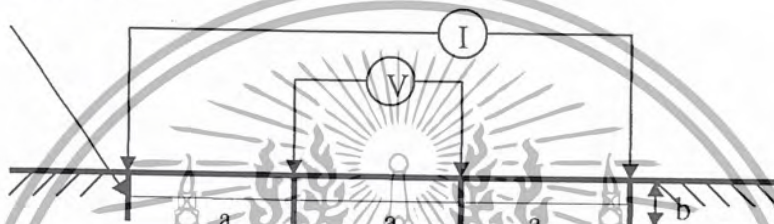
ผลของปริมาณเกลือ ที่มีต่อความต้านทานดิน (ดินเหนียวปนทราย, ความชื้น 15% ความนำหนัก ที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส)	
เปอร์เซ็นต์ของเกลือ	ความต้านทาน($\Omega\text{-cm.}$)
0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5	190
10	130
20	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบ 4 จุด (Four-Point Method) หรือวิธีการวัดแบบ Wenner จะทำการวัดโดยใช้แท่งขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 ขั้ว ไปปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการวัดหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 4 จุดที่ระยะเท่า ๆ กันเท่ากับ a ดังรูป (ปักให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน) และปักลึกลงไปไม่เกิน $1/20$ ระยะห่าง a กระแสทดสอบจากเครื่องวัด I จะจ่ายออกมาสู่หลักนอกสุด 2 หลัก ไหลลงสู่ใต้ดินและทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หลักใน 2 หลัก V) สักคาไฟฟ้าแปรตามความต้านทานดิน (ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้จะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับกระแส (V/I) ที่ป้อน ค่าความต้านทาน R มีหน่วยเป็น โอห์ม

Rod Electrode



รูปแสดง วิธีการวัดค่าความต้านทานดินด้วยวิธี Four-point method

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

เนื่องจากระยะความลึก b มีค่าไม่เกิน $0.05 a$ ซึ่งมีค่าน้อยมาก สมการจึงลดรูปลงเป็น

$$\rho = 2\pi a R$$

เมื่อ	ρ	คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega \cdot m$)
	R	คือ ค่าความต้านทานดินที่วัดได้ (Ω)
	a	คือ ระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดแต่ละอัน ซึ่งห่างเท่ากันทุกแห่ง (m)
	b	คือ ความลึกของแท่งอิเล็กโทรดที่ตอกลงไปในดิน(m)

ค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของพิกัดความต้านทานของเนื้อดินที่ความลึกจากผิวลงไปเท่ากับระยะ “a” ของแท่ง

อิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามก่อนการทดลอง

1. นักศึกษาคิดว่า การวัดค่าความต้านทานดินมีความจำเป็นมากหรือน้อยเพียงใด จงอธิบาย

2. นักศึกษาคิดว่า ค่าความต้านทานดิน เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยใดบ้าง อย่างไร จงอธิบาย



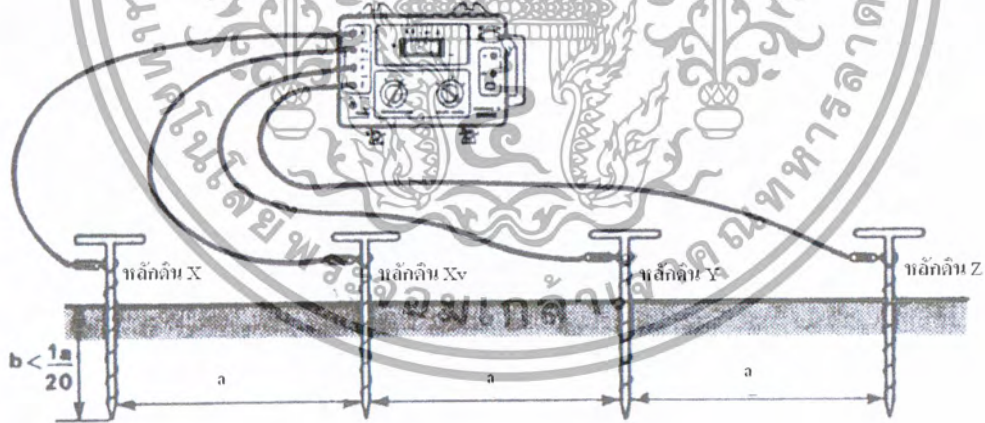
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 -ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน CHAUVIN ARNOUX รุ่น TERCA 2 เครื่อง			1
2. อุปกรณ์เสริม	- ม้วนสายไฟสีดำ	1	ม้วน
	- ม้วนสายไฟสีแดง	3	ม้วน
	- แท่งหลักดิน	4	แท่ง
3. คลิปเมตร		1	คลิป

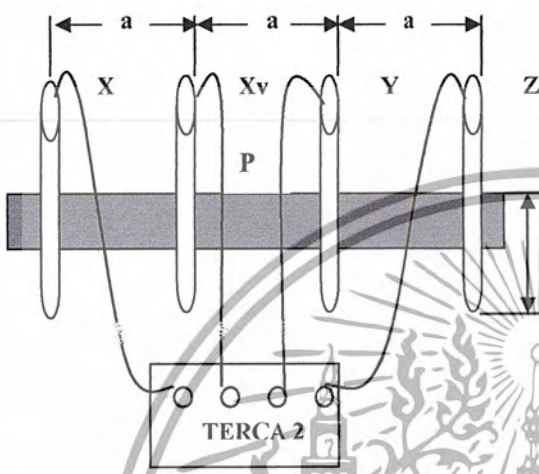
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

9. ถอดแผ่นโลหะที่อยู่ระหว่างขั้ว X , X_v , Y และ Z ออก
10. ปักแท่งหลักดิน X , X_v , Y และ Z ห่างเป็นระยะทาง a เท่าๆ กัน และมีความลึกเท่ากับ b ดังรูป
11. ต่อสายไฟเข้ากับแท่งหลักดิน X , X_v , Y และ Z ให้ตรงกับขั้ว ตามลำดับ
12. ปรับ Range selector ที่ 2Ω และ Current selector ที่ 50 mA
13. กดปุ่ม Test
14. ถ้ามีเลข 1 ปรากฏ หรือตัวเลขกระพริบ ให้ปรับ Range selector และ Current selector ใหม่จนกว่าจะสามารถอ่านค่าได้
15. อ่านค่าความต้านทานที่ได้และบันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผล

Soil Resistivity Test							
Date :			Test By :				
Location :			Confirmed By :				
 <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;"> <p>b = Depth of electrodes (m.)</p> <p>R = Measured value of resistance (Ω)</p> <p>P = Measured point</p> <p>ρ = Apparent resistivity of soil (Ω - m.)</p> <p>$\rho = 2\pi AR$</p> <p>a = Distance between adjacent electrodes (m.)</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Wenner Method or Four Point Method</p>							
Point	A (m.)	0.50	1.00	2.00	3.00	5.00	Remark
	B (m.)	0.025	0.050	0.100	0.150	0.250	
P1	Px						
	Py						
P2	Px						
	Py						
P3	Px						
	Py						
P4	Px						
	Py						
$\sum R$							
$R_{av} = \sum R / N$							
$\rho = 2\pi AR_{av}$							$\sum \rho =$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทราบถึงองค์ประกอบและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 80-2000
2. เพื่อให้นักศึกษาทราบถึงขั้นตอนและวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP

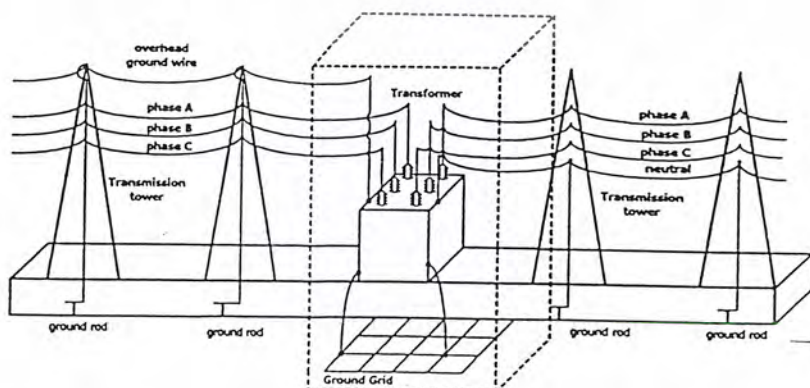
ทฤษฎี

ระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าใช้เป็นแบบตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) ดังรูปที่ 1 เนื่องจากระบบต่อลงดินแบบตะแกรงมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแบบตะแกรงต่อลงดินนี้ สามารถทนต่อปริมาณกระแสที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินได้มากกว่าระบบต่อลงดินแบบอื่น
2. ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนี้จะมีค่าความต้านทานน้อย

รูปที่ 1 แสดงตะแกรงต่อลงขนาด 16 เมฆ

ในรูปที่ 2 นั้นเป็นตะแกรงต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี 16 เมฆ (Mesh) โดยที่เมฆคือช่องสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน สำหรับการใช้งานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจะใช้เป็นจุดต่อลงดินของโครงสร้างที่เป็นโลหะที่ติดตั้งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ตัวถังของอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวก CT, PT, CB และยังใช้เป็นจุดก่อนิวทอลของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2 แสดงการเชื่อมต่อระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดในสภาวะผิดปกติ

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ผิวดินสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในบริเวณขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดินซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

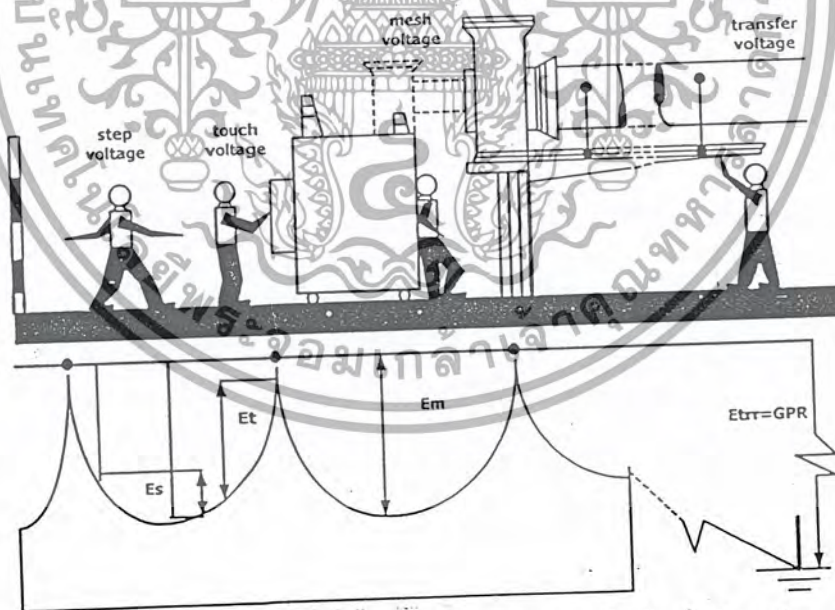
-แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Ground Potential Rise, GPR) คือค่าแรงดันสูงสุดหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงต่อลงดินเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากบริเวณที่ไฟฟ้า

-แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage, E_s) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวดินระหว่างจุดสองจุดที่เท้าทั้งสองข้างสัมผัสพื้นซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ 1 เมตร

-แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage, E_t) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดที่มนุษย์ยืนอยู่โดยที่มือมีการสัมผัสอยู่กับ โครงสร้างที่เป็นโลหะหรือตัวถังของอุปกรณ์ที่ทำการต่อลงดินไว้

-แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage, E_m) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในร่องคาน้ำของระบบต่อลงดิน

-แรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transfer Voltage, E_{tr}) คือค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งจะเป็นกรณีย่อยกรณีหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบการเกิดแรงดันต่างๆที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินให้มีความเหมาะสมและจะต้องทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่ากระแสกริดที่เพิ่มขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นเกิดขึ้น เพื่อที่จะนำมาตรวจสอบความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

1. การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

การเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินนั้นมีความสำคัญต่อการออกแบบ เนื่องจากตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะต้องมีขนาดที่จะสามารถทนต่อกระแสปริมาณมากที่สุดไหลลงสู่ระบบลงดินได้ภายในระยะเวลาสั้นๆ โดยไม่เกิดการหลอมละลาย คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้พิจารณาคือ ต้องมีค่าความนำไฟฟ้าสูง เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าภายในบริเวณที่ทำการติดตั้งตัวนำนั้น มีความแข็งแรงทางกลสามารถทนต่อการถูกร่อน จากคุณสมบัติของตัวนำดังกล่าว ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามต้องการ และใช้เหล็กชุบทองแดงเป็นแท่งหลักดิน การเลือกขนาดสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (1)

$$A_{mm}^2 = I \frac{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{tc \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}{\quad} \quad (1)$$

โดยที่

A_{mm}^2	คือ	ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (mm^2)
I	คือ	ค่าของกระแสลัดวงจรลงดินสูงสุดแบบสมมาตร (kA)
T_m	คือ	อุณหภูมิสูงสุดที่สายตัวนำสามารถทนได้ ($^{\circ}C$)
T_a	คือ	อุณหภูมิที่สายตัวนำใช้งาน ($^{\circ}C$)
T_r	คือ	อุณหภูมิอ้างอิงเป็นค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิด ($^{\circ}C$)
α_r	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิอ้างอิง ($1/^{\circ}C$)
α_0	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ($1/^{\circ}C$)
ρ_r	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง ($\mu\Omega - cm$)
K_0	คือ	$1/\alpha_0$ หรือ $(1/\alpha_r) - T_r(0^{\circ}C)$
T_c	คือ	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลสู่ระบบต่อลงดิน (วินาที)
TCAP	คือ	thermal capacity per unit volume ($J/cm^3 \cdot ^{\circ}C$)

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำต่อลงดินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของสายตัวนำดิน

Description	Material Conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (°C)	Fusing Temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega$ -cm)	TCAPThermal Capacity (J/cm ³ .°C)
Copper, Annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum EC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated Steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

ในสภาวะปกติร่างกายมนุษย์มีค่าความต้านทาน 500-3000 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของร่างกาย ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์นี้ ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2000 โอห์มเพื่อนำไปใช้พิจารณาหาค่า Touch Voltage และ Step Voltage สำหรับการออกแบบในประเทศไทยจะคิดที่น้ำหนักเฉลี่ยมนุษย์ 50 กิโลกรัม

ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$E_{\text{touch } 50} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$E_{\text{step } 50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

C_s คือ ค่าตัวคูณที่เกิดเนื่องจากความหนาของวัสดุที่โรยบนผิวดินหาได้จาก

$$C_s = 1 + \frac{0.09 \left(\frac{1 - \rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09}$$

โดยที่

ρ	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)
ρ_s	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุโรยผิวดิน ($\Omega\text{-m}$)
t_s	คือ	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (วินาที)
h_s	คือ	ความหนาของวัสดุโรยผิวดิน (m)

3. ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grounding system resistance)

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินในทางอุดมคติควรจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากมาก การจะทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินจะต้องทำการวัดจริงหลังจากติดตั้งระบบเรียบร้อยแล้ว แต่ในการออกแบบจะอาศัยการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยใช้สมการที่ (4)

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{Lr} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	R_g	คือ	ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Ω)
	L_T	คือ	ค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
	h	คือ	ความลึกจากผิวดินที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน (m)
	A	คือ	ขนาดพื้นที่ของระบบต่อลงดิน (m^2)

4. การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้

เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินเบื้องต้นไปแล้ว จะต้องทำการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในสถานีไฟฟ้า เพื่อที่จะนำมาพิจารณาตรวจสอบถึงความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด (Mesh Voltage) สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

(5)

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_g}{L_M}$$

จาก K_m คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆหาได้

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

$K_{ii} = 1$ เมื่อตะแกรงต่อลงดินมีการเชื่อมต่อกับแท่งตัวนำต่อลงดิน (Ground rod) บริเวณรอบนอกของตะแกรงหรือที่มุมของตะแกรงต่อลงดินหรือบริเวณรอบของตะแกรงต่อลงดินและกระจายทั่วตะแกรงต่อลงดิน

แต่ถ้าไม่มีการติดตั้ง Ground rod หรือมีการติดตั้งเพียงเล็กน้อยที่ไม่ใช่บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดินแล้วจะสามารถหาค่า K_{ii} ได้จากสมการ

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2 \cdot n}}$$

และ

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{โดยที่ } h_0 = 1 \text{ m.}$$

และ

$$K_i = 0.6444 + 0.148 \cdot n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step Voltage) สามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_g}{L_s} \quad (6)$$

K_s คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างค้วนำที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวหาได้จาก

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

โดยที่

D	คือ	ระยะห่างระหว่างค้วนำที่ขนานกัน (m)
h	คือ	ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน (m)
d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของค้วนำที่เลือกใช้ระบบต่อลงดิน (m)
I_g	คือ	ค่ากระแสแอมป์สูงสุด (A)
L_M	คือ	ความยาวของค้วนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
L_s	คือ	ความยาวของค้วนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)
K_{ii}	คือ	ค่าตัวคูณเนื่องจากการจัดวางของค้วนำ
K_{ii}	คือ	ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการฝังตะแกรงต่อลงดิน
K_i	คือ	ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน
n	คือ	จำนวนค้วนำที่วางขนานกันอยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน

หลังจากทำการออกแบบระบบต่อลงดินแล้ว ต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบไว้ ระบบต่อลงดินหรือระบบกราวด์ที่ดีที่ติดตั้งนั้นต้องพยายามออกแบบให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้นั้นคือ

$$E_m < E_{\text{touch}50}$$

$$E_s < E_{\text{step}50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำถามก่อนการทดลอง

1. นักศึกษาจงอธิบายถึงความสำคัญและความจำเป็นของระบบต่อลงดิน



2. นักศึกษาคิดว่าระบบต่อลงดินที่ดีควรมีลักษณะอย่างไร จงอธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ให้นักศึกษาทำการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้ข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

- | | | |
|---|------------------|--------------|
| 1. พื้นที่ของกราวด์กริด | = 30×30 | m^2 |
| 2. ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนลึก 3 m: ρ (จากการทดลองที่ 1) | = | $\Omega - m$ |
| 3. ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง: ρ_1 - Moist soil | = 100 | $\Omega - m$ |
| 4. ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด: ρ_s - Crushed rock resistivity | = 3000 | $\Omega - m$ |
| 5. ความหนาของชั้นหินกรวด: h_s | = 0.1 | m |
| 6. ระยะเวลาของกระแสลัดวงจร: t_f | = 0.5 | s |
| 7. ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน | = 30 | kA |
| 8. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม | = 40 | $^{\circ}C$ |
| 9. X/R ratio | = 3.33 | |
| 10. Current division factor : S_f | = 60 | % |
| 11. จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน X | = 3 | |
| 12. จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน Y | = 2 | |

ข้อจำกัดในการออกแบบ

- ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน $0.25 < h < 2.5$ m
- ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ทำกริดวางขนานกัน $D > 2.5$ m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ทำกรวดกริด $d \leq 0.25h$
- จำนวนของตัวนำที่ใช้ทำกริดที่วางขนานกันในแต่ละทิศทาง $n \leq 25$

Square grid without ground rods

2.1 ให้นักศึกษาออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP โดยป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ให้มาลงในโปรแกรมและกำหนดชนิดของตัวนำที่ใช้เป็นแบบ Commercial Hard-Drawn ขนาด 120 mm² และความลึกของตัวนำตะแกรงกริดคือ 0.5 เมตร บันทึกผลค่า R_g , Touch Voltage, Step Voltage ที่ได้

ผลการทดลอง

R_g	=	Ω
$E_{touch50}$	=	Volts
E_{step50}	=	Volts

2.2 ให้นักศึกษาทำการออกแบบระบบต่อลงดินในหัวข้อ 2.1 ใหม่ โดยทำการเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน ดังตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ให้นักศึกษาทำการออกแบบระบบต่อลงดินในหัวข้อ 2.1 ใหม่ โดยทำการเปลี่ยนความลึกในการฝัง ตะแกรงต่อลงดิน ดังตารางบันทึกผลการทดลอง

Square grid with ground rods

2.4 ให้นักศึกษาทำการออกแบบระบบต่อลงดินในหัวข้อ 2.1 ใหม่ โดยทำการเพิ่ม ground rod ชนิด Copper-Clad Steel wire 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ตำแหน่งในการติดตั้ง คือ ทั่วทั้งตะแกรง (Rods throughout Grid Area) โดยเพิ่มจำนวนของ ground rod จาก 4 แห่ง บันทึกผลในตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

Changing Conductor size

Conductor size (mm ²)	R _g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		หมายเหตุ
		Tolerable	Calculate d	Tolerable	Calculate d	
95						
120						
150						
185						
240						

Changing Depth of Ground grid

Depth of Ground grid (m)	R _g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		หมายเหตุ
		Tolerable	Calculate d	Tolerable	Tolerable	
0.25						
0.5						
1.0						
1.5						
2.0						
2.5						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Changing Number of rods

Number of rods	R_g (Ω)	Touch Voltage (Volts)		Step Voltage (Volts)		หมายเหตุ
		Tolerable	Calculated	Tolerable	Calculated	
4						
8						
12						
16						
20						
24						
28						

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



คำถามท้ายการทดลอง

1. จากผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ระบบล่อลงดินมีความปลอดภัยหรือไม่ อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.จากการทดลองในหัวข้อ 2.2, 2.3, 2.4 มีผลกระทบอย่างไรกับค่า R_{θ} , Touch Voltage, Step Voltage ที่ได้ในแต่ละกรณี จงอธิบาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3 การวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ นักศึกษาทราบถึงข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 81-1983
2. เพื่อให้ นักศึกษาทราบถึงขั้นตอนและวิธีการวัดค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน โดยใช้ชุดทดสอบ

ทฤษฎี

การวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน(Ground Impedance) จะทำการวัดหลังจากติดตั้งระบบต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้ทราบค่าความต้านทานจริง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่า ค่าที่ได้ติดตั้งแล้วที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาจากระบบต่อลงดินที่ติดตั้งแล้วเสร็จเป็นเสมือนแท่งอิเล็กโทรดที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน

วิธีการใช้แท่งขั้วไฟฟ้า 3 จุด (TREE-POINT METHOD)

วิธีการวัดค่าความต้านทานของดินโดยใช้แท่งขั้วไฟฟ้า 3 แท่ง เป็นที่นิยมมากในการวัดค่าความต้านทานแต่ละกระจายของระบบต่อลงดินด้วยสายดินแบบแท่งและสายดินแบบเส้น การต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าและระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าหน่วยย่อย

ทฤษฎีพื้นฐานของการทดสอบความต้านทานกราวด์

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่ง X และ Y เราใช้โวลต์มิเตอร์วัด จากนั้นวัดกระแสที่ไหลระหว่างแท่ง X และ Z ด้วยแอมมิเตอร์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการวัดค่าความต้านทานกราวด์

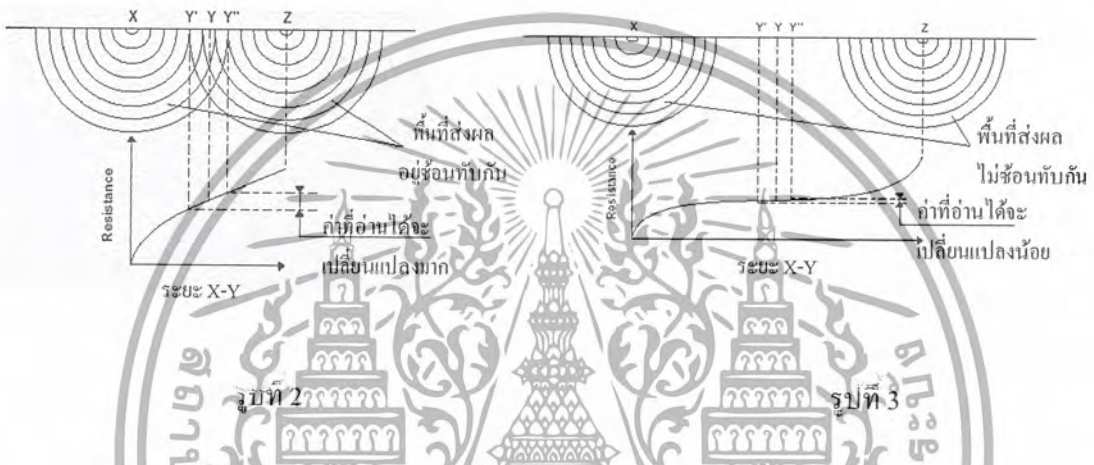
ตามกฎของ โอห์มสามารถหาค่าความต้านทานได้เมื่อทราบค่าแรงดันและกระแสดังกล่าว แต่

สำหรับเครื่องวัดความต้านทานกราวด์เราจะได้ค่าความต้านทานเป็น โอห์ม โดยตรงเพราะภายในเครื่องวัดนั้นเป็นเอกสารถ่ายแปลงแรงดันที่วัดได้เป็นโอห์ม โดยตรงเพราะภายในเครื่องวัดนั้นมีทั้งตัวจ่ายกระแสและวัดแรงดันบรรจุอยู่ในเรียบร้อยแล้ว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการตอกหลักเพิ่มเพื่อวัดความต้านทานกราวด์

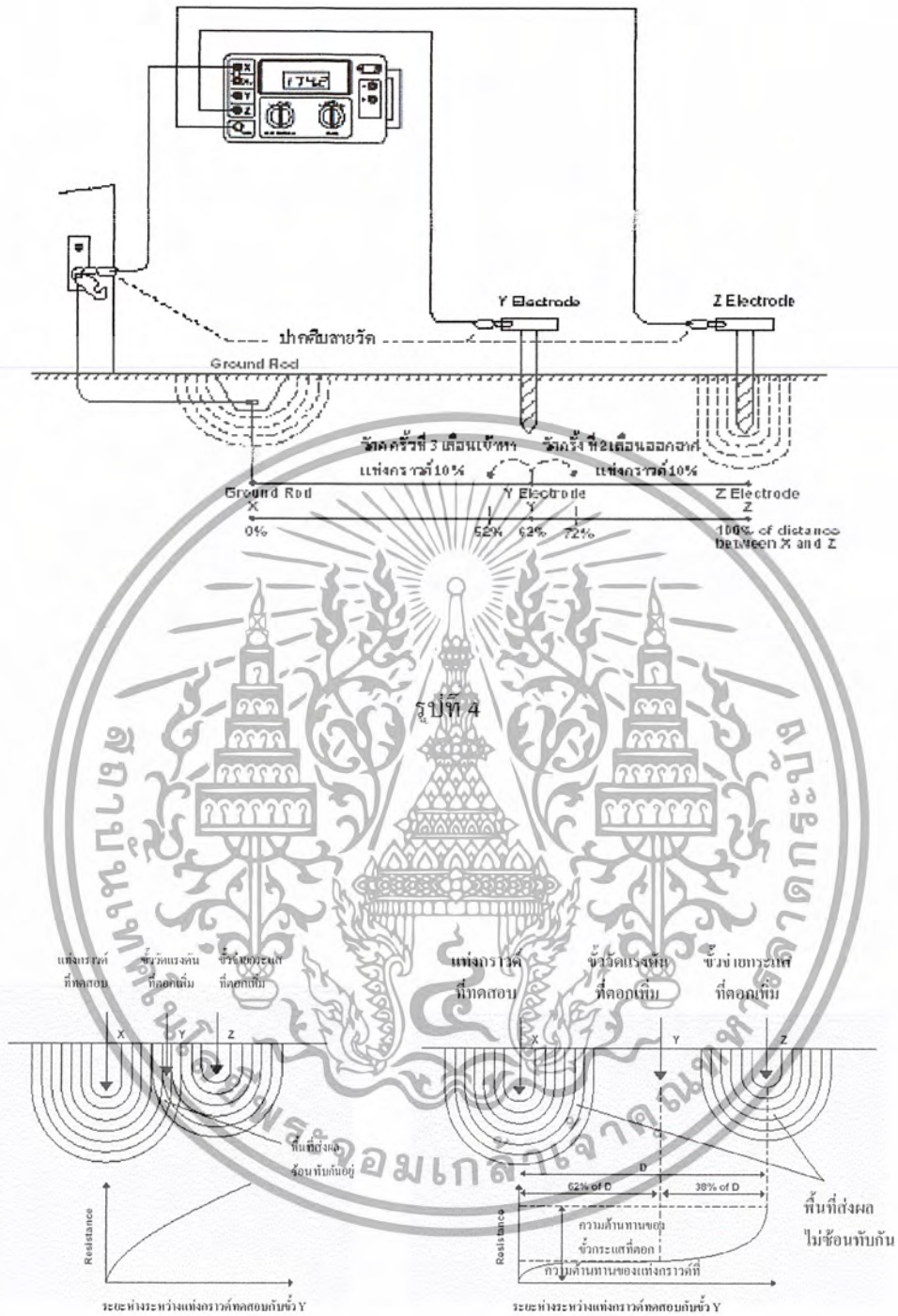
การวัดความต้านทานกราวด์ให้แม่นยำ ต้องตอกหลักกระแส Z ให้ไกลพอสมควรจากแท่งกราวด์ที่ต้องการทราบค่าเพื่อให้แท่ง Y อยู่บนพื้นที่ที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของแท่ง X และ Z วิธีที่ดีที่สุดที่จะพิสูจน์ว่าแท่ง Y อยู่บนพื้นที่ดังกล่าวแน่ ๆ ก็คือลองขยับแท่ง Y ย้ายตำแหน่งไป-มาในแนว X-Z ดู หากแท่ง Y อยู่ในพื้นที่ดังกล่าว (ของ X หรือ Z หรือทั้ง X และ Z ในกรณีที่พื้นที่ส่งผล อยู่ซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2) ค่าของความต้านทานที่อ่าน ได้เมื่อย้ายแท่ง Y ไป Y' และ Y'' จะแตกต่างกันมาก และไม่มีค่าใดเลยที่เป็นความจริง



ในทางกลับกัน หากแท่ง Y อยู่บนพื้นที่ส่งผล (ดังรูปที่ 3) อยู่ก่อนแล้ว การเลื่อนตำแหน่งมายัง Y' และ Y'' จะให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเป็นค่าที่แท้จริงของความต้านทานดิน ณ แท่ง X ถ้าจะให้แน่นอนยิ่งขึ้น ควรวัดค่าความต้านทานเมื่อย้ายจุด Y ไปหลายๆ ค่าแล้วพลอตกราฟค่าความต้านทานกับระยะทางออกมา ค่าความต้านทานที่แท้จริงจะอยู่ในช่วงเอนลาด (เกือบเป็นเส้นนอน) ของกราฟ และมักอยู่ในช่วง 62% ของระยะทางระหว่าง X-Z

การวัดความต้านทานของแท่งกราวด์ด้วยวิธี 62% (Fall of Potential Method)

วิธี 62% เป็นวิธีที่ยอมรับกันทั่วไปว่าแม่นยำที่สุดจากการทดลองกันหลายต่อหลายครั้งกับพื้นที่สารพัดแบบ ดังรูปที่ 4 หากตอกแท่งวัด Z ไม่ยาวพอจะเกิดการซ้อนทับของพื้นที่ส่งผลฯ ตามรูปที่ 5 ดังที่กล่าวมาแล้ว ทางแก้คือ เพิ่มระยะ X-Z ออกไปจนไม่เกิดการซ้อนทับของพื้นที่ส่งผลฯ ตามรูปที่ 6 พิสูจน์ โดยการย้ายแท่ง Y ไป-มาในแนวเส้นตรงระหว่าง X-Z จนได้ค่าไม่ต่างกันมาก ค่าความแตกต่างของความต้านทานดังกล่าวควรไม่เกินค่า tolerance ที่กำหนดไว้ในความต้องการ



รูปที่ 5

รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้ในการแปลงค่าแบบจำลองให้เป็นค่าจริง

ในการแปลงค่าที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง (Model) ให้เป็นค่าจริง (Real) ที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง มีสมการที่สำคัญอยู่ 5 สมการด้วยกัน คือ

$$\mu_L = L_{\text{Real}} / L_{\text{Model}}$$

โดยที่ μ_L = สเกลแฟคเตอร์ของความยาว
 L_{Real} = ความยาวของตะแกรงในทางปฏิบัติจริง (เมตร)
 L_{Model} = ความยาวของตะแกรงที่เป็นแบบจำลอง (เมตร)

$$\mu_\rho = \rho_{\text{Real}} / \rho_{\text{Model}}$$

โดยที่ μ_ρ = สเกลแฟคเตอร์ของค่าความต้านทานจำเพาะ
 ρ_{Real} = ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในทางปฏิบัติจริง ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_{Model} = ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำในแบบจำลอง ($\Omega\text{-m}$)

$$\mu_I = I_{\text{Real}} / I_{\text{Model}}$$

โดยที่ μ_I = สเกลแฟคเตอร์ของค่ากระแส
 I_{Real} = ค่ากระแสในทางปฏิบัติจริง (A)
 I_{Model} = ค่ากระแสที่ใช้ในแบบจำลอง (A)

$$R_{\text{Real}} = R_{\text{Model}} \cdot \mu_\rho / \mu_L$$

โดยที่ R_{Real} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินในทางปฏิบัติจริง (Ω)
 R_{Model} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่เป็นแบบจำลอง (Ω)

$$V_{\text{Real}} = V_{\text{Model}} \cdot \mu_L \cdot \mu_\rho / \mu_I$$

โดยที่ V_{Real} = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง (V)
 V_{Model} = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในแบบจำลอง (V)

ข้อกำหนดต่างๆ

1. ค่า μ_L มีค่าเท่ากับ 150
 2. ค่า μ_ρ มีค่าเท่ากับ 1 โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ
 3. กำหนดให้ค่าของกระแสจริงเท่ากับ 1 kA
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดสอบตะแกรงต่อลงดินจำลอง	1	ชุด
2. เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน CHAUVIN ARNOUX รุ่น TERRCA 2	1	เครื่อง
3. อุปกรณ์เสริม - ม้วนสายไฟสีดำ	1	ม้วน
- ม้วนสายไฟสีแดง	3	ม้วน
- แท่งหลักดิน	4	แท่ง
4. ตะแกรงต่อลงดินจำลอง	12	โมเดล

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

วิธีการวัด

1. ตัวอย่างจรวดรูป



2. วางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินลงที่ความลึก 0.5 เซนติเมตร

3. ปรับ Range selector และ Current selector ให้เหมาะสม แล้วคลิกปุ่ม Test ของเครื่องวัด TERRCA 2 อ่านค่าความต้านทานที่ได้

4. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากข้อ 3 มาคูณด้วย μ_r ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 จะได้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงในทางปฏิบัติ

5. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากสูตรการคำนวณ (สมการที่ 4 ในการทดลอง ที่ 2) โดยในสูตรการคำนวณขนาดของตะแกรงและขนาดของตัวนำที่ใช้ต้องคูณด้วย μ_r ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 เพื่อให้ได้ขนาดของตะแกรงต่อลงดินจริงก่อนที่จะทำการแทนค่าในสูตรการคำนวณ

6. ทำการเปลี่ยนระดับความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน โดยวางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินในน้ำที่ความลึก 1 เซนติเมตร, 2 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ จากผิวน้ำ หลังจากนั้นกลับไปทำขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 ใหม่

7. ทำการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงและจำนวนร่องตาข่ายของโมเดลอีก 11

โมเดลที่เหลือ แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 1-6 ใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.0 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 1.5 mm^2 ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm² ความลึกในการทดสอบ 0.5 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm² ความลึกในการทดสอบ 1.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm² ความลึกในการทดสอบ 2.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

- พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ 2.5 mm² ความลึกในการทดสอบ 5.0 เซนติเมตร

Grid Size (m)	Number of Mesh	Ground Resistance (Ω)		
		Calculated	Model Test	% Error
30 × 30	1			
30 × 30	4			
30 × 30	9			
30 × 30	16			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

คำถามท้ายการทดลอง

1. นักศึกษาคิดว่าการใช้น้ำแทนดินที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous Soil) ในการทดสอบมีข้อดี ข้อเสียอย่างไร

2. นักศึกษาคิดว่า error ที่เกิดขึ้นในการทดลองเป็นผลมาจากอะไร จงอธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากผลการทดลองที่ได้ให้นักศึกษาวาดกราฟแนวโน้มค่าความต้านทานดินเปรียบเทียบกับจำนวนเมช และความลึกที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้