



วิทยานิพนธ์

การศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก

**A STUDY OF GROUNDING FOR LIGHTNING PROTECTION
SYSTEM USING FOUNDATION EARTH ELECTRODE**

เรือเอก อนวัช วรรณศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก

A Study of Grounding for Lightning Protection System using Foundation Earth Electrode

نامผู้วิจัย เรือเอก อนวัช วรรณศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วินัย พุกกะวัน, Dr.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี, M.Eng.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก

A Study of Grounding for Lightning Protection System using Foundation Earth Electrode

โดย

เรือเอก อนวัช วรรณศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

อนวัช วรรณศรี, เรือเอก 2551: การศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้
รากสายดินฐานราก ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์
วินัย พงศ์ชะวัน, Dr.Ing. 179 หน้า

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกตามมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ.2543
กำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.) ประกอบด้วย
ส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือตัวนำล่อฟ้า (Air Terminal) ตัวนำลงดิน (Down Conductor) และระบบราก
สายดิน (Earth Termination System) การจัดระบบรากสายดินมี 2 แบบ คือการจัดระบบรากสายดิน
แบบ ก. ได้แก่ รากสายดินแนวรัศมีหรือแนวตั้ง และการจัดระบบรากสายดินแบบ ข. ได้แก่ราก
สายดินชนิดวงแหวน (หรือรากสายดินฐานราก) รากสายดินที่นิยมใช้ในประเทศไทยเป็นรากสาย
ดินแบบแนวตั้งหรือแนวรัศมีและรากสายดินชนิดวงแหวนร่วมกับรากสายดินแนวตั้ง ส่วนรากสายดิน
ฐานรากนั้นยังไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้เนื่องจากวิศวกรยังไม่คุ้นเคยทำให้เกิดความไม่แน่ใจว่า
ใช้ได้จริงหรือไม่

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณลักษณะทางไฟฟ้าของรากสายดินฐานรากด้วย
วิธีการวัดความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากของสิ่งปลูกสร้างทั่วไปในพื้นที่กรุงเทพฯ และ
ปริมณฑล จำนวน 23 โครงการ พบว่า (1) ความต้านทานดินทดสอบจากเหล็กแกนเสาภายใน
ฐานราก (Footing) มีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.344 – 7.170 โอห์ม (2) ความต้านทานดิน
ทดสอบจากเหล็กเสริมภายในคานคอดินมีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.010 – 0.727 โอห์ม
(3) ความต้านทานดินทดสอบจากเหล็กพื้นคอนกรีตมีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.026 – 0.114
โอห์ม

Anawat Wannasri, Lt. 2008: A Study of Grounding for Lightning Protection System using Foundation Earth Electrode. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Mr.Winai Plueksawan, Dr.Ing. 179 pages.

The External Lightning Protection System in the Standard of Lightning Protection for Building: 2000 as defined by The Engineering Institute of Thailand Under H.M. the King's Patronage (E.I.T) consists of three components namely air terminal down conductor and earth termination system. There are two types of earth electrode arrangement which are type A (i.e. horizontal or vertical earth electrode) and type B (i.e. ring or foundation earth electrode). In Thailand horizontal and vertical earth electrodes as well as ring earth electrode combined with vertical earth electrode are widely used. Foundation earth electrode is seldom used because engineers are not familiar with it and not sure of its application.

The objective of this research is to evaluate the electrical characteristic of the foundation earth electrode. The earth resistance measurements were performed on the earth resistance of foundation earth electrode of general building in Bangkok and Suburban Areas of 23 projects. The results show that (1) earth resistance of reinforcement steel in footing ranging from 0.344 - 7.170 Ohms (2) earth resistance of reinforcement steel in beam ranging from 0.010 - 0.727 Ohms (3) earth resistance of reinforcement steel in concrete slab ranging from 0.026 - 0.114 Ohms

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.วินัย พุกะวัน ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สันติ อัสวศรีพงศ์ธร และ ผศ.ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ดุสิตพิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ ประธานการสอบ และ ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ เป็นอย่างดี ขอกราบขอบคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณนางวาทรีประสิทธิ์ สิงหรวงศ์ พันจ่าเอกกวี แก้วหาญและผู้ประสานงานตามภาคผนวก ก ที่ให้ความช่วยเหลือและกรุณาอนุญาตให้เข้าทดสอบความต้านทานดิน

ประโยชน์และคุณค่าที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา ที่ได้อบรมและให้ความรัก ความห่วงใย ขอขอบคุณพี่สาวและน้องสาวที่ทำให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา

อนวัช วรรณศรี

พฤษภาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	90
อุปกรณ์	90
วิธีการ	91
ผลและวิจารณ์	116
ผล	116
วิจารณ์	128
สรุปและข้อเสนอแนะ	129
สรุป	129
ข้อเสนอแนะ	130
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	131
ภาคผนวก	134
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	179

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความต้านทานดินรวมที่ระยะห่างจากแท่งหลักดินขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 3 เมตร	18
2	ผลของปริมาณความชื้นต่อความต้านทานจำเพาะของดิน	24
3	ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน สำหรับ Sandy Loam ที่มีความชื้น 15.2 %	25
4	ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานจำเพาะของดิน	25
5	ผลของปริมาณเกลือที่มีต่อความต้านทานจำเพาะของดิน	27
6	ค่าตัวคูณความต้านทานแท่งหลักดินชุดเดียว	66
7	ค่าตัวคูณความต้านทานแท่งหลักดินชุดเดียว	67
8	ค่าของแฟกเตอร์ B สำหรับรูปแบบของรากสายดินต่าง ๆ	70
9	ความถูกต้องของความต้านทานกับระยะของขั้วกระแส	85
10	ระยะห่างขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าสำหรับระบบต่อลงดินขนาดเล็ก	85
11	ระยะห่างขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าสำหรับแท่งหลักดินหลายแท่ง	86
12	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม	93
13	ความยาวการทาบเหล็กสำหรับการต่อเหล็กข้ออ้อยสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดตั้งแต่ 200 กก./ซม. ²	93
14	ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม	94
15	ขนาดค่าที่สุดของวัสดุในระบบป้องกันฟ้าผ่า	95
16	ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กแกนเสาภายใน Footing	120
17	ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กเสริมภายในคานคอดิน	121
18	ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กเสริมภายในพื้นคอนกรีต	123
19	สมการถดถอยและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	141
2	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโฆว์มรณยนต์ โตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์	142
3	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบ พระชนมายุ จุฬารักษ์ (ศร.4) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	143
4	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรู๊ป	144
5	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโรงพยาบาลสวงาม ศัลยกรรมตกแต่ง	145
6	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2	146
7	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง	147
8	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโฆว์มรณยนต์มือสอง	148
9	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	149
10	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2	150
11	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก	151
12	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารบ้านพักข้าราชการ กรมทางหลวง	152
13	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารพาณิชย์ 4 ชั้น	153
14	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารสำนักงานบริษัททัวร์	154
15	ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารพาณิชย์ (จำหน่ายแอร์) สำนักงานและที่พักอาศัย	155

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
16 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโซว์รูมและศูนย์บริการ รถยนต์ฮอนด้า	156
17 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารคอนโดมิเนียม เมโทรปาร์คสาทร	157
18 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารที่ทำการสำนักงาน ข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี	158
19 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารพาณิชย์ ร่มรื่นราชพฤกษ์	159
20 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารคอนโดมิเนียม คชาบุรี (ชัยพร วิลล์ 1)	160
21 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารเรียนสถาบันกวดวิชา เดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า	161
22 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	162
23 ค่า D_p/D_c ของค่า μ ต่าง ๆ สำหรับวิธี Tagg Slope	171
24 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย	176
25 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)	177
26 สัมประสิทธิ์การถดถอย	178

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อคนที่อยู่ในบริเวณระบบต่อลงดิน	7
2	แบบจำลองของโลก	9
3	วงชั้นของดิน	10
4	วงจรสมมูลย์ของวงจรชั้นดิน	11
5	แบบจำลองของดิน	12
6	ส่วนประกอบของความต้านทานของการต่อลงดิน	13
7	ตำแหน่ง Remote Earth ของแท่งหลักดินขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 3 เมตร	17
8	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยวัดคร่อมผิวหน้าด้านตรงกันข้ามของดิน	19
9	ความต้านทานจำเพาะสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ	21
10	อิทธิพลของความอัดแน่นของเกรนต่อปริมาตรของช่องว่างในดิน	22
11	ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับความชื้น	23
12	ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ	26
13	ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับการเพิ่มเกลือ	28
14	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานดินตามฤดูกาลของท่อน้ำขนาด 3/4 นิ้ว ฝังในดินแบบ Stony Clay	29
15	การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามฤดูกาลในยุโรป	29
16	การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบ 3 จุด	32
17	การวัดความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธีสี่จุดระยะเท่ากัน	34
18	กราฟความต้านทานจำเพาะของดินโดยทั่วไป	34
19	การวัดความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธีสี่จุดระยะไม่เท่ากัน	35
20	โมเดลดินสองชั้น	36
21	รากสายดินที่มีอยู่แล้ว	40
22	รากสายดินแบบแท่งหลักดิน	42
23	รากสายดินแบบแถบและลวดตัวนำ	43
24	รากสายดินแบบแผ่นตัวนำ	43
25	การติดตั้งรากสายดินแบบแผ่นตัวนำ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	รากสายดินหุ้มคอนกรีต	45
27	การใช้รากสายดินแบบวงแหวนเป็นระบบรากสายดิน	46
28	ความยาวต่ำสุดของรากสายดินตามระดับการป้องกัน	48
29	การจัดระบบรากสายดินแบบ ก.	49
30	การจัดระบบรากสายดินแบบ ข.	50
31	ตัวอย่างการใช้ตัวนำโดยเฉพาะเป็นรากสายดินฐานราก	52
32	การยึดตัวนำด้วย Special Spacers ก่อนการเทคอนกรีต	52
33	การวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม	53
34	การวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก	54
35	ตัวอย่างการวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก	54
36	การยึดตัวนำกับเหล็กเสริม	55
37	ตัวอย่างการใช้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเป็นรากสายดินฐานราก	56
38	อุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเหล็กเสริมในโครงสร้าง Universal Clamping Plate	56
39	ตัวอย่างการใช้ Universal Clamping Plate	57
40	การไหลของกระแสจากรากสายดินลงดิน	58
41	ผลของขนาดแท่งหลักดินที่มีต่อความต้านทานดิน	61
42	ผลของความยาวแท่งหลักดินที่มีต่อความต้านทานดิน	61
43	ความต้านทานดินของแท่งหลักดินเป็นฟังก์ชันของความยาวรากสายดิน	63
44	ความต้านทานดินของแท่งหลักดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 เมตร ยาว 3 เมตร ในดินเนื้อเดียวที่มีความต้านทานจำเพาะต่าง ๆ	64
45	แท่งหลักดินที่วางขนานกัน	65
46	แท่งหลักดินวางแบบชุดเดียวหรือหลายชุดขนานกัน	66
47	ตัวคูณความต้านทานของแท่งหลักดินที่ขนานกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	68
48	ความต้านทานดินของรากสายดินแนวนอนเป็นฟังก์ชันของความยาวรากสายดิน	71
49	ไดอะแกรมของรากสายดินวงแหวนอย่างง่าย	73
50	ไดอะแกรมของแฟกเตอร์ $k = f(D/a)$	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ตัวอย่างของรากสายดินแบบเมฆ อธิบายวิธีคำนวณรัศมีสมมูลสำหรับรูปแบบรากสายดิน 2 รูปแบบ	75
52	การเปลี่ยนปริมาตรลูกบาศก์เป็นปริมาตรครึ่งทรงกลม	76
53	การวัดความต้านทานดินโดยวิธี Fall-of-Potential	79
54	การวัดความต้านทานดินเมื่อขั้วกระแสอยู่ใกล้รากสายดินมากเกินไป	80
55	การวัดความต้านทานดินเมื่อขั้วกระแสอยู่ห่างรากสายดินเพียงพอ	81
56	การวัดความต้านทานดินวิธี 62%	87
57	การวัดความต้านทานดินโดยวิธี 62%	88
58	กราฟความต้านทานดินวัดด้วยวิธี 62%	89
59	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	91
60	รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กแกนเสาเป็นรากสายดิน	96
61	รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมในคานคอดินเป็นรากสายดิน	97
62	รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมพื้นชั้นล่างสุดของสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดิน	97
63	การจัดรูปแบบการวัดความต้านทานดินโดยวิธี Intersecting Curve	99
64	กราฟความต้านทานดินของระบบรากสายดินขนาดใหญ่	100
65	กราฟที่สร้างขึ้นโดยวิธี Intersecting Curve	102
66	ตำแหน่งขั้วศักย์ไฟฟ้าสำหรับการใช้วิธี Slope	104
67	โครงร่างการทดสอบความต้านทานดินวิธี Star-Delta	105
68	โครงร่างการทดสอบความต้านทานดินวิธี Four Potential	108
69	ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก	115
70	สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้างที่เป็นกลุ่มตัวอย่างทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก	119
71	กราฟสมการถดถอยแบบ Logarithmic, Inverse, S และแบบ Power	126
72	กราฟสมการถดถอยแบบ Compound, Growth, Exponential และแบบ Logistic	127

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
1 โครงการก่อสร้างอาคารโชมรรณยนต์โตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์	163
2 โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชนษาจุฬารณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	163
3 โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรุป	163
4 โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาลสวงามสัลยกรรมตกแต่ง	164
5 โครงการก่อสร้างอาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2	164
6 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง	164
7 โครงการก่อสร้างโชมรรณยนต์มือสอง	165
8 โครงการก่อสร้างอาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	165
9 โครงการก่อสร้างอาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2	165
10 โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก	166
11 โครงการก่อสร้างอาคารบ้านพักข้าราชการกรมทางหลวง	166
12 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น	166
13 โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานบริษัททัวร์	167
14 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์จำหน่ายแอร์ สำนักงานและที่อยู่อาศัย	167
15 โครงการก่อสร้างอาคารโชมรรณยนต์และศูนย์บริการฮอนด้า	167
16 โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียมเมโทรพาร์คสาทร	168
17 โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำนักงานข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี	168
18 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ร่วมรื่นราชพฤกษ์	168
19 โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียมคชาบุรี (ชัยพร วิลล์ 1)	169
20 โครงการก่อสร้างอาคารเรียนสถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า	169
21 โครงการก่อสร้างอาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	169

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ระยะห่างระหว่างแท่งหลักดิน
A	=	พื้นที่หน้าตัดของรากสายดิน
A	=	พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยรากสายดิน
b	=	ความลึกของแท่งหลักดินที่ฝังดิน
b	=	ความกว้างของแถบตัวนำที่เป็นรากสายดิน
B	=	แฟกเตอร์สำหรับโครงสร้างรากสายดินชนิดต่าง ๆ
c	=	ระยะห่างระหว่างแท่งหลักดินกระแสดับกับแท่งหลักดินแรงดัน
C_1, C_2	=	ขั้วกระแสของเครื่องวัดความต้านทานดิน
d	=	ระยะห่างระหว่างแท่งหลักดินแรงดันกับแท่งหลักดินแรงดัน
d	=	ระยะทางจากรากสายดินถึงจุดที่พิจารณา
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางรากสายดิน
d_e	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางสมมูลประสิทธิภาพผลของรากสายดิน
d_0	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางรากสายดิน
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของรากสายดินวงแหวน
D_c	=	ระยะห่างระหว่างรากสายดินกับขั้วกระแส
D_d	=	ความยาวของเส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน
I	=	กระแสที่ไหลผ่านรากสายดิน
k	=	ตัวคูณความต้านทาน หรือ filling factor
K	=	องค์ประกอบการสะท้อน
L	=	ความยาวของรากสายดิน
L_t	=	ผลรวมของความยาวของรากสายดินทั้งหมด
l	=	ความยาวต่ำสุดของรากสายดินตามระดับการป้องกันฟ้าผ่า
l	=	ความยาวของรากสายดินแนวระดับ
l_v	=	ความยาวของรากสายดินแนวตั้ง
P_1, P_2	=	ขั้วศักย์ไฟฟ้าของเครื่องวัดความต้านทานดิน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

r	=	รัศมีของรากสายดิน
r_e	=	รัศมีสมมูลของรากสายดิน
R	=	ความต้านทานดิน
R_r	=	ความต้านทานดินที่ผิวรากสายดินครึ่งทรงกลม
R_t	=	ความต้านทานรวมของดิน
V	=	ปริมาตรของคอนกรีต
t	=	ระดับความลึกที่ฝังรากสายดิน
x	=	ตำแหน่งที่พิจารณาจากรากสายดิน
X	=	รัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่
$\hat{Y}$	=	ความต้านทานดิน
z	=	ความลึกที่ฝังรากสายดิน
$\ln$	=	Natural Log
ρ	=	ความต้านทานจำเพาะของดิน
ρ_1	=	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน
ρ_2	=	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง
ρ_{av}	=	ความต้านทานจำเพาะของดินเฉลี่ย
ρ_{max}	=	ความต้านทานจำเพาะของดินสูงสุด
ρ_{min}	=	ความต้านทานจำเพาะของดินต่ำสุด
ϕ	=	ฟังก์ชัน

การศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก

A Study of Grounding for Lightning Protection System using Foundation Earth Electrode

คำนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างอาจก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อน ทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกผ่า เกิดแรงกลบิดหรือแรงระเบิด และเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต การป้องกันฟ้าผ่าเป็นหนทางหนึ่งที่จะป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายอันเป็นผลจากฟ้าผ่าในรูปความร้อน แรงกลและผลทางไฟฟ้า สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ศ.ท.) ได้ออกมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 เพื่อให้วิศวกรและผู้เกี่ยวข้องได้ยึดถือและใช้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วประเทศ มาตรฐานดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของมาตรฐานนานาชาติ หรือ IEC และเป็นมาตรฐานสำหรับป้องกันฟ้าผ่าภายนอกเท่านั้น ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกเป็นแบบ Conventional Type ตามวิธีการของฟาราเดย์ ซึ่งประกอบด้วย ระบบตัวนำล่อฟ้า ระบบตัวนำลงดินและระบบบรากสายดิน

การจัดระบบบรากสายดินตามมาตรฐานดังกล่าวมี 2 แบบ คือ การจัดระบบบรากสายดินแบบ ก. ได้แก่ รากสายดินแนวรัศมีหรือแนวตั้ง และการจัดระบบบรากสายดินแบบ ข. ได้แก่ รากสายดินชนิดวงแหวนหรือรากสายดินแบบฐานราก ปัจจุบันรากสายดินที่นิยมใช้ในประเทศไทยเป็นรากสายดินแบบแนวตั้งหรือแนวรัศมีและรากสายดินชนิดวงแหวน ส่วนรากสายดินแบบฐานรากนั้นยังไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องจากวิศวกรยังไม่คุ้นเคยทำให้เกิดความไม่แน่ใจว่าใช้ได้จริงหรือไม่ จึงเป็นการสมควรอย่างยิ่งที่ระบบบรากสายดินแบบฐานรากจะได้รับการศึกษาวิจัยว่าสามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติได้หรือไม่ เพื่อให้วิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องเกิดความมั่นใจและนำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีความปลอดภัย ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางต่อไป

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการสำรวจคุณลักษณะทางไฟฟ้าของรากสายดินฐานราก ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมภายในสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดิน การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Earth Resistivity) และค่าความต่อเนื่องของเหล็กเสริมภายใน

สิ่งปลูกสร้างด้วยเครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน MEGGER รุ่น DET2/2 ที่มีความละเอียด $1\text{ m}\Omega$ ความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ ความถี่ทดสอบ 105 Hz ถึง 160 Hz ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากกับรัศมีเฉลี่ยที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ (พื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างที่ใช้เป็นรากสายดินฐานราก) ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลในการพิจารณาการออกแบบระบบรากสายดินโดยใช้ฐานรากอาคารเป็นรากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีความเหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินคุณลักษณะทางไฟฟ้าของรากสายดินฐานราก โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากของสิ่งปลูกสร้างทั่วไป
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากกับรัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยรากสายดิน

การตรวจเอกสาร

Julius (1975) แนวความคิดการฝังรากสายดินภายในคอนกรีตของโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างเกิดขึ้นอย่างอิสระในสหรัฐอเมริกาและยุโรป ด้วยสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในสหรัฐอเมริกาได้รับการแนะนำโดย Herbert G. Ufer ที่ปรึกษากองทัพบกสหรัฐอเมริการะหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากบริเวณที่ต้องการต่อลงดินเป็นอาคารเก็บวัตถุระเบิดตั้งอยู่ในทะเลทรายที่ไม่มีน้ำใต้ดินและฝนตกน้อยในพื้นที่ของ Flagstaff Arizona ซึ่งรากสายดินแบบเดิมไม่สามารถทำให้ความต้านทานดินต่ำลงได้ เทคนิคที่ Ufer เสนอ เรียกว่า Ufer Grounding มีหลักการทำง่ายแต่ได้ผลมากและราคาไม่แพง ถ้าติดตั้งระหว่างการก่อสร้างใหม่ โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดูดความชื้นได้รวดเร็วและสูญเสียความชื้นช้ามาก คุณสมบัติของแร่ที่เป็นส่วนผสมของคอนกรีต และความเป็นกรดด่าง (pH) คอนกรีตที่มีเหล็กอยู่จะนำกระแสได้ โดยคอนกรีตทำให้ pH ของดินสูงขึ้นและลดความต้านทานจำเพาะของดินโดยทั่วไปมีค่า 1000 โอห์ม-เมตร ซึ่งยากที่จะได้รับการต่อลงดินที่ดี ความชื้นที่อยู่ในคอนกรีตจะสูญเสียทำให้เป็นตัวนำที่ดีสำหรับกระแสไฟฟ้า วิธีการของ Ufer Grounding ใช้แท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว วางในแนวนอนและเชื่อมต่อเข้ากับเหล็กเสริม (Reinforcement) ของโครงสร้าง วิธีนี้ได้รับความต้านทานดินเฉลี่ย 2.5 – 5.0 โอห์ม ต่อมาวิธีการนี้ได้นำไปใช้ในการสร้างฐานราก พื้นคอนกรีต เสาวิทยุเสาโทรทัศน์ และเสาไฟแสงสว่าง โครงสร้างที่เป็นที่อยู่อาศัยรวมถึงโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม และในที่สุดได้กำหนดในมาตรฐาน National Electrical Code (NEC) ซึ่งแนะนำให้ใช้แท่งทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า No. 4/0 AWG (5.189 มม.) และยาวไม่น้อยกว่า 20 ฟุต ฝังไปตามผนังภายนอกของโครงสร้าง

ในปี 1960 แนวความคิดการฝังรากสายดินในคอนกรีตของโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างเกิดขึ้นในประเทศเยอรมนีและออสเตรียตามคำแนะนำของสมาคมของบริษัทไฟฟ้า โดยให้ความสำคัญกับโครงสร้างที่ไม่ใช้เหล็กเสริม ต่อมาได้ใช้เป็นมาตรฐานแห่งชาติในออสเตรีย วิธีแก้ปัญหาแตกต่างจากในสหรัฐอเมริกาที่ใช้รากสายดินฝังในชั้นล่างของโครงสร้าง และเดินเป็นวงรอบสิ่งปลูกสร้างทั้งหมด โดยวัสดุที่แนะนำให้ใช้ คือ เหล็กเคลือบสังกะสี สำหรับพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมมีขนาด 30 x 3.5 มิลลิเมตร หรือ 25 x 4 มิลลิเมตร สำหรับพื้นที่หน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จุดประสงค์หลักของการเดินเป็นวงรอบอาคารเกี่ยวข้องกับความต้านทานดิน แต่พบว่าการทำลักษณะดังกล่าวช่วยทำให้ศักย์ไฟฟ้าบนผิวดินเท่ากันด้วย

Kostic et al. (1990) ได้เสนอการวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินโดยใช้รากสายดินฐานราก โดยใช้ตัวนำรูปกริดแนวนอนวางอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม จากการวิเคราะห์ได้สูตรการประเมินความต้านทานดินของระบบต่อลงดิน โดยประมาณขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดิน ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีตและขนาดของโครงสร้างคอนกรีต และพบว่าผลที่ได้รับจากสูตรกับการทดลองย่อส่วนสอดคล้องกัน

Kostic and Shirkoohi (1993) ได้เสนอการวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินโดยใช้รากสายดินฐานราก โดยใช้ตัวนำรูปกริดแนวนอนวางอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยม และฝังอยู่ในดินสองชั้น จากการวิเคราะห์ได้สูตรการประเมินความต้านทานดินขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ความสูงของคอนกรีต และขนาดพื้นที่ของโครงสร้างคอนกรีต

Kostic (1993) ได้เสนอการวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินโดยใช้รากสายดินฐานราก โดยใช้ตัวนำรูปกริดแนวนอนวางอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมและเชื่อมต่อเข้ากับแท่งหลักดิน ที่ต่อขนานกันเป็นวงรอบ พบว่าการเพิ่มแท่งหลักดินแนวตั้งเข้ากับระบบต่อลงดินโดยใช้รากสายดินฐานรากที่มีอยู่แล้วไม่สามารถทำให้ความต้านทานดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Thapar et al. (1990) ได้ศึกษาความต้านทานดินของโครงสร้างคอนกรีตในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยประเมินความต้านทานดินของโครงสร้างคอนกรีต 4 รูปแบบ คือ โครงสร้างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมรูปเมฆอยู่ภายใน ฐานรากแนวตั้ง (Vertical Footing) ฐานรากรูปปิรามิด (Pyramidal Footing) และฐานรากที่กระจายกับพื้น (Spread Footing with Slab) จากการศึกษาได้รับสูตรการประมาณความต้านทานดินในแต่ละรูปแบบของโครงสร้างคอนกรีต

พื้นฐานการต่อลงดิน

การต่อลงดิน (Grounding หรือ Earthing) หมายถึงการต่อส่วนของระบบไฟฟ้า หรือส่วนที่เป็นโลหะเข้ากับดิน เพื่อให้ส่วนที่ต่อนั้นมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน

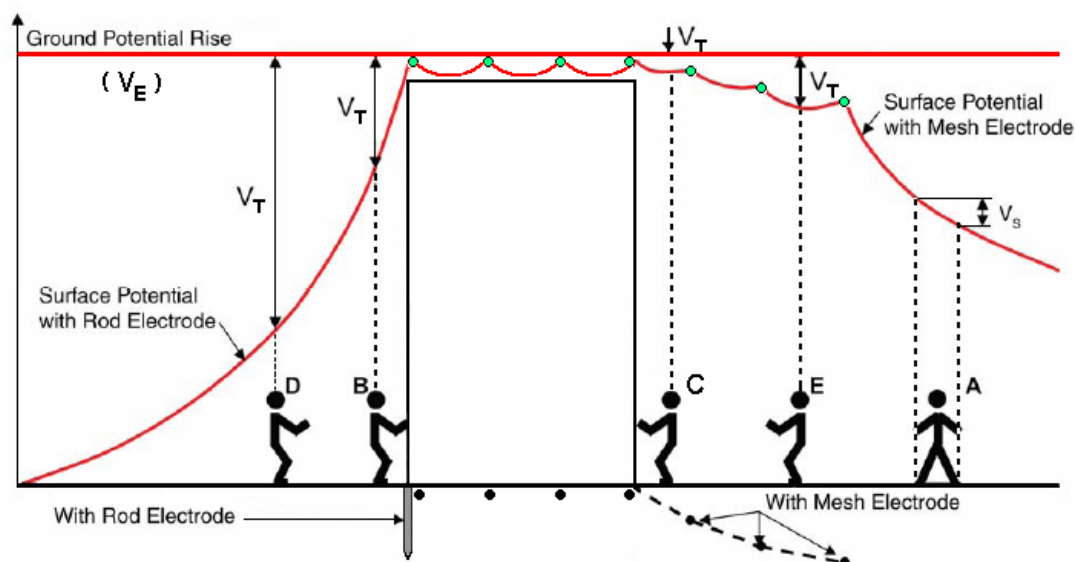
ชำนาญและเทพกัญญา (2549) การต่อลงดินมีหลายระบบแตกต่างกัน แต่ละระบบมีวัตถุประสงค์ของการต่อลงดินที่แตกต่างกัน การต่อลงดินโดยทั่วไปมีความเข้าใจว่าเป็นการต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งอันที่จริงแล้วการต่อลงดินมีวัตถุประสงค์หลายประการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเป็นการต่อลงดินของระบบใด แต่อย่างไรก็ตามการต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยยังเป็นพื้นฐานที่สำคัญ

วัตถุประสงค์ของการต่อลงดินในระบบใด ๆ มักเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อต่อไป นี้ และไม่ว่าการต่อลงดินจะทำเพื่อวัตถุประสงค์ใดก็ตาม จะต้องมีความปลอดภัยเป็นพื้นฐานสำคัญอยู่เสมอ

1. เพื่อความปลอดภัย
2. เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน
3. เพื่อให้มีคุณภาพไฟฟ้า
4. เพื่อให้เกิดความประหยัด

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรากสายดินเข้าสู่ดินจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเกรเดียนท์ (Potential Gradient) ขึ้นในดิน ขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นของรากสายดิน เรียกว่า Ground Potential Rise (GPR) และความสัมพันธ์ระหว่าง GPR กับกระแสที่ผ่านระบบต่อลงดิน เรียกว่า ความต้านทานการต่อลงดิน (Earth Resistance) การต่อลงดินในระบบป้องกันฟ้าผ่ามีไว้สำหรับให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงดินได้เร็วที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดเพลิงไหม้ภายในอาคารเนื่องจากอาร์กที่เกิดฟ้าผ่า และไม่อันตรายกับคนที่อยู่ภายในอาคารหรือสิ่งก่อสร้างนั้น ๆ

ศักย์ไฟฟ้ากระเด็นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ รากสายดินจะมีผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดที่ต่อลงดินและมีกระแสปริมาณสูงไหลผ่านรากสายดิน โดยทั่วไปจะหาค่าศักย์ไฟฟ้ากระเด็นในเทอมของศักย์ไฟฟ้าช่วงก้าวและศักย์ไฟฟ้าสัมผัส



ภาพที่ 1 ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อคนที่อยู่ในบริเวณระบบต่อลงดิน

ภาพที่ 1 แสดงเหตุการณ์บริเวณรอบๆ ระบบต่อลงดิน เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงระบบป้องกันฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าจะไหลผ่านรากสายดินและไหลลงดินทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นและศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินจะกระจายรอบรากสายดิน คนที่อยู่ในบริเวณระบบต่อลงดินจะได้รับศักย์ไฟฟ้าดังนี้

คน A จะได้รับศักย์ไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Potential: V_S) เป็นผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างเท้าทั้งสองข้างของคนซึ่งอยู่ห่างกัน 1 เมตร

คน B และ คน C จะได้รับศักย์ไฟฟ้าสัมผัส (Touch Potential: V_T) เป็นผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนระบบต่อลงดิน (GPR) กับศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวดินที่คนยืนอยู่และสัมผัสกับโครงสร้างที่มีการต่อลงดิน

คน D และคน E ยืนอยู่ห่างจากระบบต่อลงดินที่ระยะหนึ่งอาจได้รับศักย์ไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred Potential: V_T) ที่เกิดจากการสัมผัสกับวัตถุตัวนำที่สัมผัสกับระบบต่อลงดิน

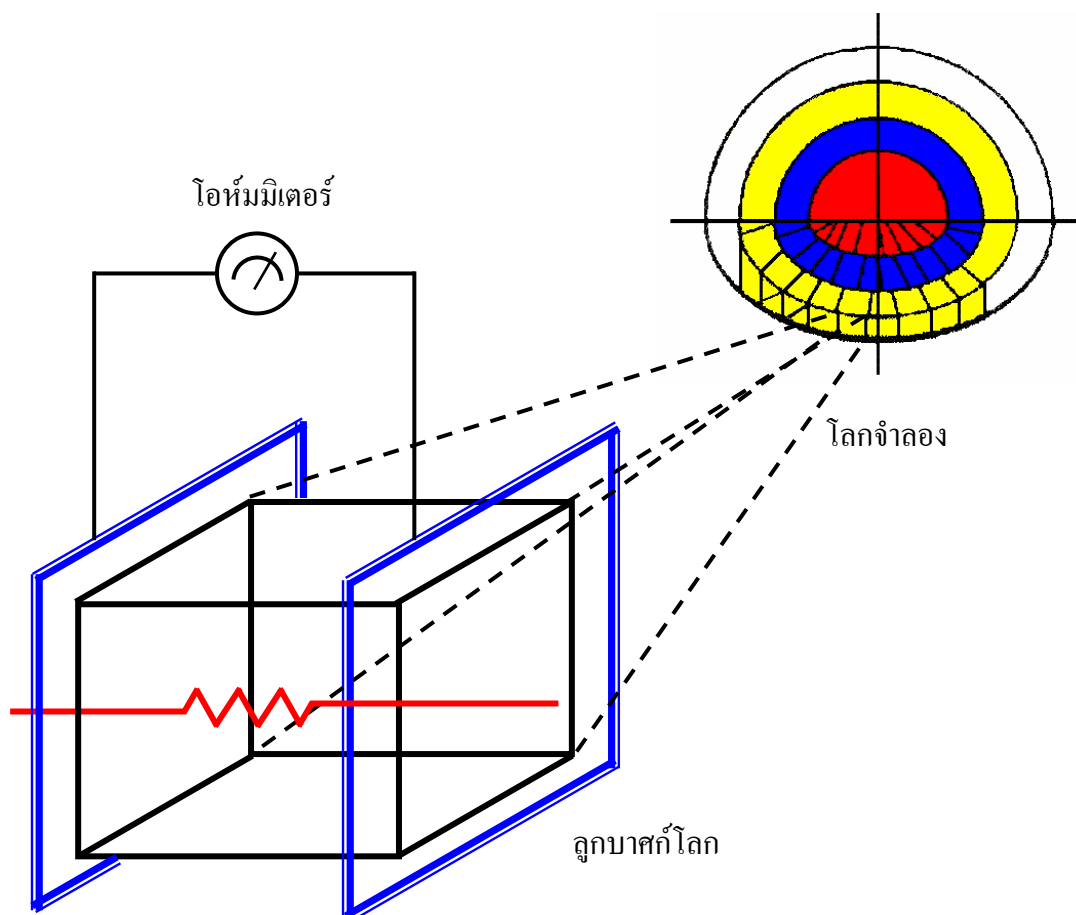
คำว่า “ดิน” ในระบบไฟฟ้า หมายถึง พื้นโลก หรือพื้นดินซึ่งส่วนใหญ่แล้วผิวโลกจะประกอบด้วยซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น สารละลายเกลือและความชื้นซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ในระบบไฟฟ้าใช้ดินเป็นจุดอ้างอิง โดยถือว่าดินมีศักดาเป็นศูนย์ และทำหน้าที่รองรับกระแสที่รั่วไหลลงดิน และเป็นที่ต่อของส่วนที่เป็นโลหะของสถานประกอบการต่าง ๆ เพื่อให้ส่วนของโลหะเหล่านั้นมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับดิน ถือเป็นศูนย์

คำว่า “Ground” หมายถึงการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยวงจรหรืออุปกรณ์ใด ๆ เข้ากับพื้นโลก เพื่อรักษาศักดาไฟฟ้าของวงจรส่วนนั้นให้เท่ากับพื้นโลกมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ระบบต่อลงดินประกอบด้วยสายตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสายดิน ตัวนำเชื่อมต่อต่าง ๆ รากสายดินและดินส่วนที่สัมผัสกับรากสายดินนั้น

ระบบต่อลงดิน (Earthing System) มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันความเสียหายจากสาเหตุหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นภัยธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ระบบต่อลงดินจะทำหน้าที่ถ่ายเทกระแสไฟฟ้าให้หมดก่อนที่จะทำอันตรายแก่มนุษย์และอุปกรณ์ต่าง ๆ

ในทางอุดมคติการรักษาศักดาไฟฟ้าของจุดอ้างอิงในระบบป้องกันอุบัติเหตุต่าง ๆ การป้องกันไฟฟ้าสถิต และการจำกัดศักดาไฟฟ้าที่ตัวถังเครื่องไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยแก่บุคคล ต้องการความต้านทานดินต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (คือศูนย์โอห์ม) แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้จริง ๆ ได้ แต่ความต้านทานที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ นี้ ถือว่าเพียงพอและจำเป็นสำหรับการผ่านมาตรฐานความปลอดภัยทางไฟฟ้าของหลาย ๆ สถาบัน เช่น OSHA, NEC ฯลฯ

วัฒนา (2547) ดินหรือโลก (Earth) ประกอบขึ้นมาจากมวลสารจำนวนมากมายมหาศาล โดยการรวมกันมิได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินจะพิจารณากันที่ระดับลูกบาศก์มวล์ หมายถึง การสุ่มสำรวจเพียงบางส่วนดังแสดงในภาพที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุทุกชนิดที่มีต่อไฟฟ้า วัสดุนั้น ๆ ย่อมมีความสามารถในการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าอยู่ค่าหนึ่งเสมอ เรียกว่าค่าความต้านทาน (พิจารณาภายใต้เงื่อนไขความถี่ต่ำ) หรือเรียกว่าค่าอิมพีแดนซ์ (พิจารณาภายใต้เงื่อนไขความถี่สูง)

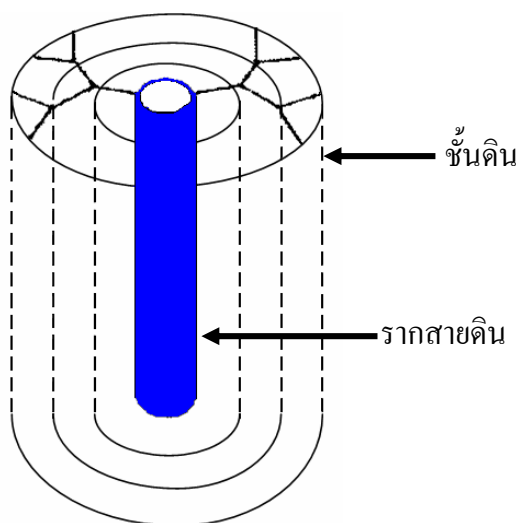


ภาพที่ 2 แบบจำลองของโลก

ที่มา: ปรับปรุงจากวัฒนา (2547)

ลูกบาศก์มวล หรือลูกบาศก์โลกที่ถูกแยกออกมาวิเคราะห์ ไม่ได้หมายความว่าลักษณะของเนื้อดินลูกบาศก์มวลจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันเสมอไป การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของลูกบาศก์มวล ทำได้โดยการใช้แผ่นตัวนำประกบเข้าทั้งสองด้านและต่อเข้ากับโหม้มมิเตอร์ในจุดที่เหมาะสม

เมื่อแท่งหลักดิน (Ground Rod) ถูกฝังลงไปในดินตามแนวดิ่ง ด้วยคุณสมบัติของความเป็นตัวนำของแท่งหลักดินจะส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณโดยรอบแท่งหลักดินมีค่าต่ำลง ลักษณะการลดลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จะพิจารณาในลักษณะเป็นวงชั้นดิน (Earth Shells) แสดงดังภาพที่ 3

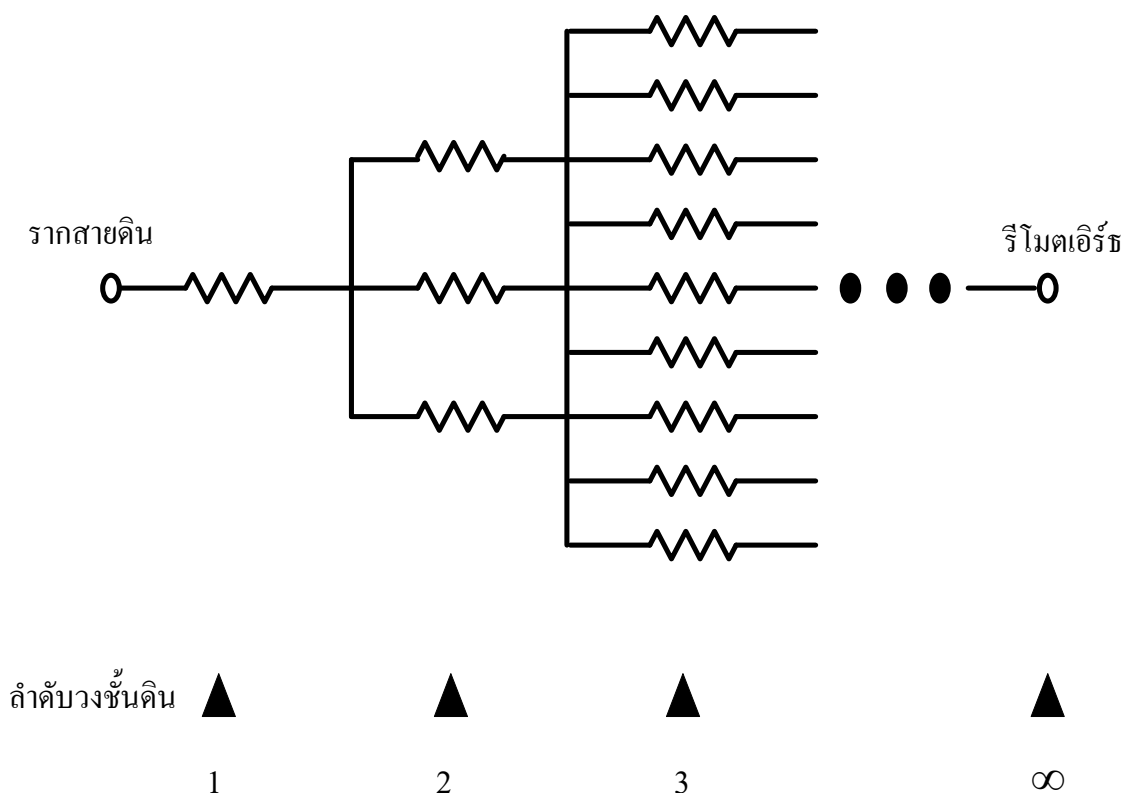


ภาพที่ 3 วงชั้นของดิน

ที่มา: ปรับปรุงจากวัฒนา (2547)

วงชั้นแรกหรือวงชั้นที่สัมผัสกับแท่งหลักดิน จะมีความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด และความสามารถในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงชั้นดินต่อ ๆ ไปจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ หากมีการฝังแท่งหลักดินที่ลึกมากขึ้น อิทธิพลของแท่งหลักดินจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดต่ำลงเป็นรัศมีที่กว้างมากยิ่งขึ้นจนรัศมีถึงระยะ ๆ หนึ่งหรือจุด ๆ หนึ่ง ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะมีค่าเท่ากับศูนย์

การฝังแท่งหลักดินลงไปในดินแนวดิ่งจะมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ โดยพิจารณาภาพที่ 4 โครงสร้างวงสมมูลย์ของวงชั้นดินประกอบไปด้วยค่าความต้านทานจำเพาะของดินจำนวนมากมาผสมผสาน โดยจะต่ออยู่ในลักษณะอนุกรมและขนานผสมกันไป จากวงจรสมมูลย์จะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินตั้งแต่ช่วงชั้นที่ $-2 -3 \dots \infty$ จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงวงชั้นอนันต์ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เรียกวงชั้นดินนี้ว่า รีโมตเอิร์ธ (Remote Earth) ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานดินหรือระบบต่อลงดินโดยเทียบไปยังรีโมตเอิร์ธ จะหมายถึงการวัดค่าความต้านทานรวมของวงจรสมมูลย์ดังที่แสดงในภาพที่ 4 หากเปรียบเทียบกลับมาสู่การวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินแบบ Fall-of-Potential จุดที่ให้ผลการวัดค่าความต้านทานคงที่ (แรงดันคงที่ กระแสคงที่ ค่าความต้านทานคงที่) จะถูกอุปมาว่าเป็นตำแหน่งรีโมตเอิร์ธ

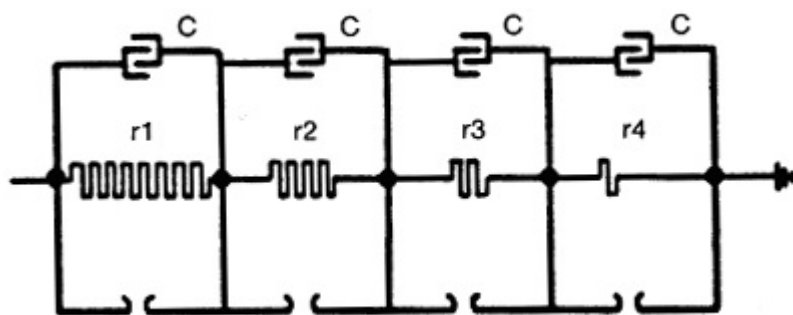


ภาพที่ 4 วงจรสมมูลของวงจรชั้นดิน

ที่มา: ปรับปรุงจากวัฒนา (2547)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงระบบป้องกันฟ้าผ่าตำแหน่งที่ฟ้าผ่าจะมีกระแสไฟฟ้าไหล และผ่านระบบรากสายดินและกระจายภายในเนื้อดิน (Gradient Current) โดยทั่วไปจะคุ้นเคยกับคำว่า การกระจายสนามแรงดันไฟฟ้า (Gradient Voltage) มากกว่า การกระจายสนามแรงดันไฟฟ้าในดินจะพบว่า มีรัศมีการกระจายบนผิวดินระยะหนึ่ง หากคนยืนอยู่นอกรัศมีการกระจาย ก็จะได้รับความปลอดภัย แต่ถ้ายืนอยู่ภายในรัศมีการกระจายก็เกิดอันตรายขึ้นได้

รากสายดินที่ฝังในดินสามารถแทนได้ด้วยแบบจำลอง (Model) แสดงในภาพที่ 5 ดินอาจทำหน้าที่เป็นความต้านทานหรือบางครั้งทำหน้าที่เป็นฉนวน ยกเว้นสำหรับสัญญาณความถี่สูงหรือสัญญาณหนักรุ่นชั้นมากก็ทะลุทะลวงดินลงไปได้เร็วและมาก กระแส Charging จะไม่สนใจเมื่อเทียบกับ Leakage current ทำให้ความเป็นความจุของดินน้อยลง จะสามารถแทนดินด้วยความต้านทาน (IEEE 80, 2000)



ภาพที่ 5 แบบจำลองของดิน

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 80 (2000)

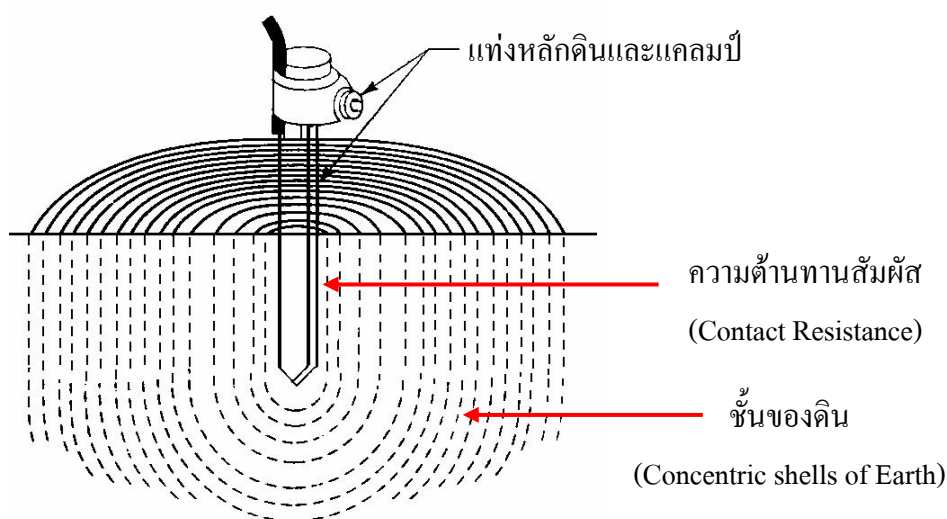
แรงดันเกรเดียนท์จะไม่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน ยกเว้นแรงดันเกรเดียนท์มากเกินไปกว่าค่าวิกฤติ ค่าวิกฤติเปลี่ยนแปลงกับวัสดุที่ประกอบเป็นดิน โดยปกติมีขนาดหลายร้อยกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เมื่อแรงดันเกรเดียนท์เกินค่าวิกฤติจะทำให้ดินเกิดการแตกตัวและทำให้เหมือนกับแท่งหลักดินมีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งแรงดันเกรเดียนท์ลดลงต่ำกว่าค่าวิกฤติซึ่งดินสามารถทนได้ สภาวะการณดังกล่าวแสดงด้วยช่องว่างในภาพที่ 5 ระบบการต่อลงดินที่พิจารณาเรื่องแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส แรงดันเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้นนั้นจะน้อยกว่าค่าแรงดันเกรเดียนท์วิกฤติมาก

กระแสที่ไหลผ่านแท่งหลักดินมีผลกับความต้านทานจำเพาะบริเวณใกล้ ๆ แท่งหลักดิน คุณลักษณะความร้อนและปริมาณความชื้นของดินเป็นตัวกำหนดว่าขนาดกระแสและระยะเวลาที่ไหลทำให้ดินแห้งและความต้านทานจำเพาะสูงขึ้นหรือไม่ ความหนาแน่นของกระแสไม่ควรเกิน 200 แอมแปร์/ตารางเมตร ที่ระยะเวลานาน 1 วินาที

ความต้านทานของการต่อลงดิน

ความต้านทานของการต่อลงดิน (Grounding Resistance) ประกอบด้วยความต้านทานของส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความต้านทานของโลหะที่เป็นรากสายดินและรอยต่อระหว่างโลหะต่าง ๆ
2. ความต้านทานสัมผัสระหว่างรากสายดินกับดินที่อยู่รอบ ๆ
3. ความต้านทานของเนื้อดินรอบ ๆ รากสายดินซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของความต้านทานของการต่อลงดิน

พิจารณารากสายดินที่เป็นแท่งหลักดิน คุณสมบัติหลัก ๆ ของแต่ละส่วนประกอบ เป็นไปตามนี้ (Anonymous, 1997)

ก) ความต้านทานของแท่งหลักดิน (Ground Rods) แท่งหลักดินปกติใช้โลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่พอเพียงที่จะไม่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานของแท่งหลักดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $5/8$ นิ้ว ยาว 2.40 เมตร เมื่อทำจากทองแดง จะมีความต้านทาน 0.00026 โอห์ม จากการคำนวณความต้านทานดินสำหรับแท่งหลักดินที่มีเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 2.40 เมตร และ 4.80 เมตร ในดินที่มีความต้านทานจำเพาะต่าง ๆ กัน พบว่าความต้านทานดินที่ได้รับเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานของแท่งหลักดินเองมีค่า 600 ถึง มากกว่า 10,000 เท่าของความต้านทานแท่งหลักดิน ดังนั้นความต้านทานของแท่งหลักดินเป็นส่วนที่ไม่คำนึงถึงของความต้านทานทั้งหมดของระบบบรากสายดิน

ข) ความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างแท่งหลักดินกับดินที่อยู่รอบ ๆ จากการศึกษาค้นคว้าโดย National Bureau of Standards (NBS) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างแท่งหลักดินกับดินรอบ ๆ มีค่าต่ำจนตัดทิ้งไปไม่พิจารณาได้ หากแท่งหลักดินปราศจากสี่เหลี่ยม ไชมัน หรือ วัตถุเคลือบผิวอื่น ๆ และดินบริเวณนั้นแน่นและแข็ง

ค) ความต้านทานของเนื้อดินรอบ ๆ แท่งหลักดินนั้น พิจารณาง่าย ๆ ได้เป็นชั้นของเนื้อดินทรงกระบอกที่มีแกนศูนย์กลางร่วมกัน ณ จุดที่แท่งหลักดินปักอยู่ โดยเนื้อดินแต่ละชั้นมีความหนาเท่า ๆ กัน ชั้นดินที่อยู่ใกล้แท่งหลักดินจะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าจะมีความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า ชั้นดินที่อยู่ถัดไปจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าและให้ความต้านทานน้อยกว่า เมื่อพิจารณาชั้นต่าง ๆ ของดินเหล่านี้เรื่อย ๆ ไปจนกว่าจะถึงชั้นที่ความต้านทานต่ำจนไม่ต้องพิจารณาอีก จะได้ระยะทางจากแท่งหลักดินถึงจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงและพื้นที่ผิวดินที่ส่งผลกับความต้านทานไฟฟ้า พื้นที่ที่ส่งผลกับความต้านทานไฟฟ้านี้จะมีขนาดใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับความลึกของแท่งหลักดินด้วย

ในทางทฤษฎี ความต้านทานดินอาจเขียนในรูปสมการง่าย ๆ ได้ดังนี้

$$\text{Resistance} = \text{Resistivity} \times \frac{\text{Length}}{\text{Area}} \quad (1)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

L คือ ความยาวของด้านข้างหนึ่งด้านของลูกบาศก์ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดในส่วน of กระแสไฟฟ้าไหล (ตารางเมตร)

จากสมการที่ (1) สามารถแสดงให้เห็นถึงความต้านทานของดินแต่ละชั้นได้ดังนี้

$$R = \text{ความต้านทานของเนื้อดิน} \times \frac{\text{ความหนาของชั้นดิน}}{\text{พื้นที่ผิวของชั้นดิน}} \quad (3)$$

$$R_i = \rho \frac{L_i}{A_i} \quad (4)$$

โดยที่

- R_i คือ ความต้านทานของดินชั้นที่ i
- ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน
- L_i คือ ความหนาของดินชั้นที่ i
- A_i คือ พื้นที่กระแสไหลผ่านของดินชั้นที่ i

สมการของค่าความต้านทานรวมของดิน คือ

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_\infty \quad (5)$$

$$R_t = \rho L \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} + \dots + \frac{1}{A_\infty} \right) \quad (6)$$

ภาพที่ 6 แสดงแท่งหลักดินที่ปักลงไปในดินที่นำกระแสไฟฟ้าได้ทุกทิศทาง เมื่อกำหนดให้ ความต้านทานจำเพาะของดินคงที่ ความต้านทานดินถูกแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ที่มีความหนาเท่ากัน (L) ชั้นดินที่อยู่ใกล้แท่งหลักดินที่สุดจะมีค่าความต้านทานมากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่น้อยที่สุด ชั้นดินที่ห่างแท่งหลักดินออกไป ระยะห่างจากแท่งหลักดินของชั้นดินเพิ่มขึ้น พื้นที่ของชั้นดินจะเพิ่มขึ้นทำให้ ความต้านทานลดลง จนในที่สุดเมื่อระยะห่างของชั้นดินจากแท่งหลักดินมากพอ ค่าความต้านทานของชั้นดินส่วนที่เหลือจะมีค่าน้อยมากจนไม่มีผลต่อความต้านทานดินรวม ในทางปฏิบัติระยะห่างดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวแท่งหลักดินนั้น ๆ

ในการพิจารณาความต้านทานดินนี้เป็นการพิจารณาแบบประมาณ โดยคิดว่าความต้านทานจำเพาะของดินในทุกชั้นดินเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งตามธรรมชาติจะเป็นเช่นนั้นน้อยมาก

IEEE 142 (1991) ภาพที่ 7 แสดงแท่งหลักดินขนาด 5/8 นิ้ว (16 มม.) ยาว 3 เมตร ฝังอยู่ในดิน ทิศทางของกระแสที่ออกจากผิวของแท่งหลักดินประกอบด้วยชั้นดินทรงกลมและครึ่งทรงกลมซ้อนกัน เมื่อระยะทางจากแท่งหลักดินเพิ่มขึ้นพื้นที่หน้าตัดของดินแต่ละชั้นจะเพิ่มขึ้น ขณะที่พื้นที่เพิ่มขึ้นความต้านทานจะลดลงผกผันกับพื้นที่ การวิเคราะห์หาระยะห่างจากแท่งหลักดินไปยังจุดที่มีความต้านทานน้อยมาก จะพิจารณาจากรากสายดินครึ่งทรงกลมที่มีรัศมี r

ความต้านทานดินจากผิวรากสายดินไปยังจุดใด คือ

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d} \right) \quad (7)$$

ความต้านทานดินที่ผิวของรากสายดินรัศมี r คือ

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (8)$$

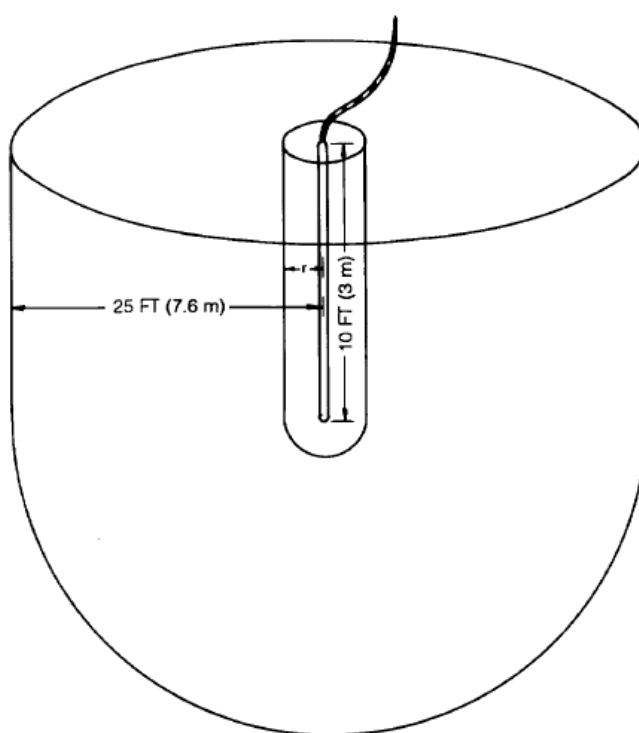
ความต้านทานดินที่จุดใด ๆ เทียบกับความต้านทานดินที่ผิวของรากสายดินคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ คือ

$$\frac{R}{R_r} = \frac{\frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d} \right)}{\frac{\rho}{2\pi r}} \times 100 \quad (9)$$

$$\frac{R}{R_r} = \left(1 - \frac{r}{d} \right) \times 100 \quad (10)$$

ถ้ารัศมีรากสายดินครึ่งทรงกลม คือ 0.7937 เซนติเมตร และระยะห่างจากรากสายดิน คือ 7.6 เมตร

$$\begin{aligned}\frac{R}{R_r} &= \left(1 - \frac{0.007937}{7.6}\right) \times 100 \\ &= 99.90\% \\ &\approx 100\%\end{aligned}$$



ภาพที่ 7 ตำแหน่ง Remote Earth ของแท่งหลักดินขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 3 เมตร

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 142 (1991)

ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณซึ่งคิดบนพื้นฐานระยะ 25 ฟุต (7.62 เมตร) แทนความต้านทานรวม 100% ในตารางแสดงว่าในระยะ 0.1 ฟุต (0.03 เมตร) ห่างจากแท่งหลักดินมีความต้านทานรวม 25% ของความต้านทานรวมที่เกิดขึ้น ในระยะ 0.5 ฟุต (0.15 เมตร) และในระยะ 1 ฟุต (0.3 เมตร) จึงมี 52% และ 68% ของความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความต้านทานดินรวมที่ระยะห่างจากแท่งหลักดินขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 3 เมตร

ระยะจากแท่งหลักดิน		ความต้านทานรวม
ฟุต	เมตร	(%)
0.1	0.03	25
0.2	0.06	38
0.3	0.09	46
0.5	0.15	52
1.0	0.30	68
5.0	1.50	86
10.0	3.00	94
15.0	4.60	97
20.0	6.10	99
25.0	7.60	100
(100.0)*	30.50	(104)
(1000.0)*	305.00	(117)

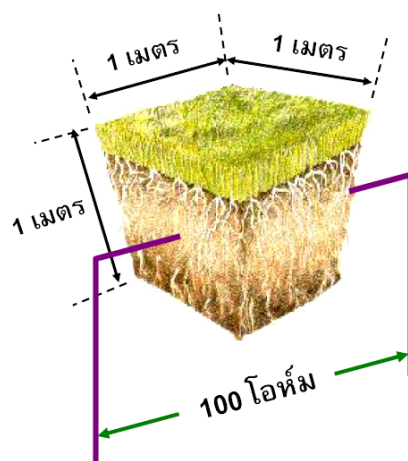
* ตัวเลขนี้แสดงเหตุผลในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ ส่วนสำคัญของความต้านทานดินกับ Remote earth เกิดขึ้นภายใน 7.60 เมตร จากแท่งหลักดิน นั่นคือ ความต้านทานในระยะ 305 เมตร มีค่าสูงกว่าความต้านทานดินในระยะ 7.60 เมตร 17%

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 142 (1991)

ความต้านทานจำเพาะของดิน

การออกแบบระบบต่อลงดิน สิ่งสำคัญที่ต้องนำมาใช้ในการคำนวณ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ด้วยสภาพพื้นฐานของปริมาตรดินขนาดใหญ่เกิดขึ้นจากปริมาตรดินขนาดเล็กมาต่อรวมกัน การกำหนดความหมายของความต้านทานจำเพาะของดินในรูปความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะมีลักษณะเป็นปริมาตรแบบลูกบาศก์ที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของดิน แสดงลักษณะพิเศษด้วยความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินวัดได้โดยวัดคร่อมผิวหน้าด้านตรงกันข้ามของดินที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์หน่วย ความต้านทานของดินจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานจำเพาะและความยาวของลูกบาศก์ และเป็นปฏิภาคผกผันกับพื้นที่ของลูกบาศก์



ภาพที่ 8 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยวัดคร่อมผิวหน้าด้านตรงกันข้ามของดิน

ที่มา: ชำนาญ (ม.ป.ป.)

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีหน่วยการวัดเป็น โอห์ม-เมตร , โอห์ม-เซนติเมตร หรือ โอห์ม-นิ้ว เมื่อพิจารณาในหน่วยเมตร ความต้านทานจำเพาะของดิน หมายถึง ความต้านทานที่วัดได้จากด้านตรงกันข้ามของลูกบาศก์ของดินที่มีแต่ละด้านยาวหนึ่งเมตร จากสมการที่ (1) เนื่องจากรูปทรงแบบลูกบาศก์ทำให้ $L/A = 1$ ดังนั้นความหมายของความต้านทานดินจะเทียบเท่ากับ ความต้านทานจำเพาะ $R = \rho$ (ohm = ohm-m) มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร ต่างกันที่ผลของความต้านทาน

จำเพาะได้จากพื้นฐานบนสภาพปริมาตร (Volume) พิจารณาด้วยรูปทรงลูกบาศก์ ขณะที่สภาพความต้านทาน (Resistance) ที่มีในตัวต้านทาน (Resistor) นั้น พิจารณาในรูปความยาวต่อพื้นที่ (ชัยมงคล, 2543)

การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นงานที่ยาก ด้วยเหตุผลหลักคือ พื้นดินมีโครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวและความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละชนิดมีค่าแปรเปลี่ยนอย่างกว้าง โครงสร้างดินอาจจะเป็นดินชั้นเดียว (Single-layer) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ หรืออาจจะมีค่าต่างกันเป็นชั้นๆ เรียกว่า เป็นดินหลายชั้น (Multi-layer) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การกำหนดโครงสร้างของดินเป็นชั้นเดียวนั้น เพื่อให้การคำนวณง่ายแต่อาจจะทำให้การออกแบบผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณถูกต้องยิ่งขึ้นอาจกำหนดให้ดินเป็นดินสองชั้น จึงต้องมีการประเมินค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้นซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ชั้นล่าง และความลึกของดินชั้นบน

1. ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน

ดินที่พบอาจจะมีดินชนิดต่าง ๆ ปนกันอยู่ ประกอบไปด้วย ดิน อิฐ ทราย กรวดหรือหิน การถมหรือฝังด้วยวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าบางชนิดลงไปดินจะทำให้ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะที่แตกต่างกันมากอาจอยู่ระหว่าง 2 ถึง 30,000 โอห์ม-เมตร นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะเป็นไปทางลดลง เมื่ออุณหภูมิ ความชื้นหรือปริมาณเกลือที่มีอยู่ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น

ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ก. ชนิดของเนื้อดิน ขนาดของเม็ดดิน

ข. ความอัดแน่นของเนื้อดิน

ค. ปริมาณความชื้นในดิน

ง. อุณหภูมิของดิน

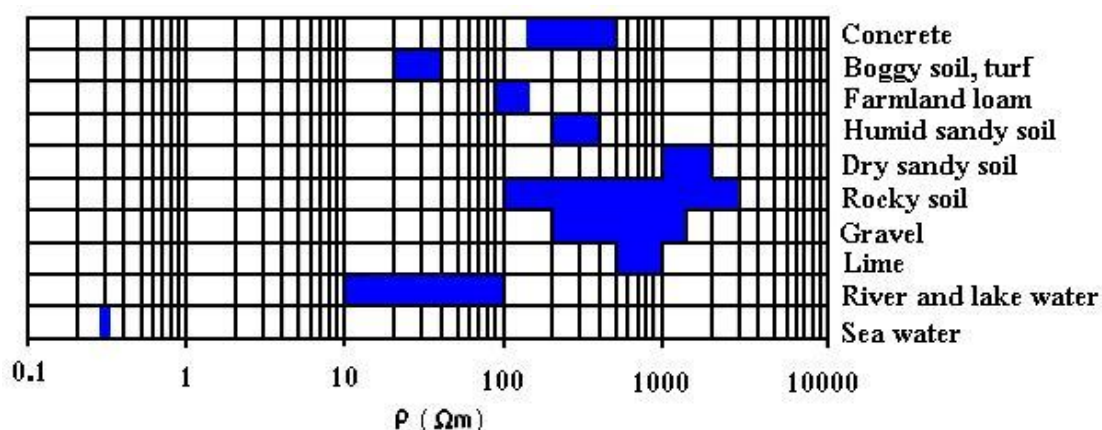
จ. ส่วนประกอบของแร่ธาตุในดิน

ฉ. ชนิดของแท่งหลักดิน และรูปแบบของการปักแท่งหลักดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามชนิดของดินเท่านั้นแต่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณเกลือและความอัดแน่นด้วย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 ถึง 1 โอห์ม-เมตร สำหรับน้ำทะเลและถึง 10^9 โอห์ม-เมตร สำหรับหินทราย ความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 25°C ถึง 0°C ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในดินที่เป็นน้ำแข็ง เช่นชั้นผิวดินในฤดูหนาว ความต้านทานจำเพาะของดินอาจจะสูงอย่างผิดปกติ (IEEE 81,1983)

1.1 ชนิดของเนื้อดิน ขนาดของเม็ดดิน

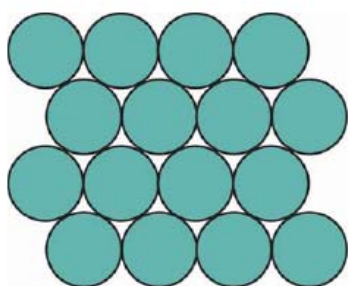
ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน คือ ชนิดของเนื้อดิน การผสมกันระหว่างเนื้อดินต่างชนิดกัน เป็นปัจจัยที่กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และขนาดเม็ดดิน (Grain Size) จะมีอิทธิพลในการนำความชื้น ตัวอย่างเช่น ดินเหนียว (Clay) จะรักษาความชื้นและละลายสารเคมี เมื่อเปรียบเทียบกับดินทราย ดินเหนียวจะมีความต้านทานจำเพาะคงที่ซึ่งเปลี่ยนแปลงในระดับ 10 โอห์ม-เมตร ในช่วงความชื้น 0-20% ในขณะที่กรวดหยาบ (Coarse Gravel) ที่มีขนาดสม่ำเสมอมีความต้านทานจำเพาะสูงมาก



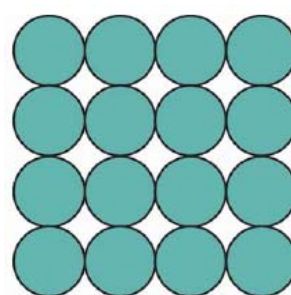
ภาพที่ 9 ความต้านทานจำเพาะสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

1.2 ความอัดแน่นของเนื้อดิน

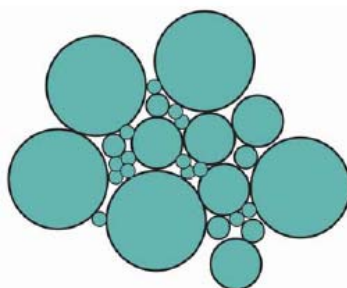
ลักษณะที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน คือ จำนวนของช่องว่างระหว่างเกรนของดิน ช่องว่างระหว่างเกรนนี้เป็นตัวกำหนดระดับความชื้นที่ดินอึดตัว ช่องว่างนี้เป็นตำแหน่งที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำ ขนาดของช่องว่างในดินขึ้นอยู่กับความอัดแน่นของดินซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างที่กระจายของเกรนในดิน แสดงในภาพที่ 10



(ก) ดินที่อัดแน่นมาก (ช่องว่าง 26%)



(ข) ดินที่อัดแน่นน้อย (ช่องว่าง 48%)



(ค) อิทธิพลของขนาดและรูปร่างของเกรนที่กระจายในดิน

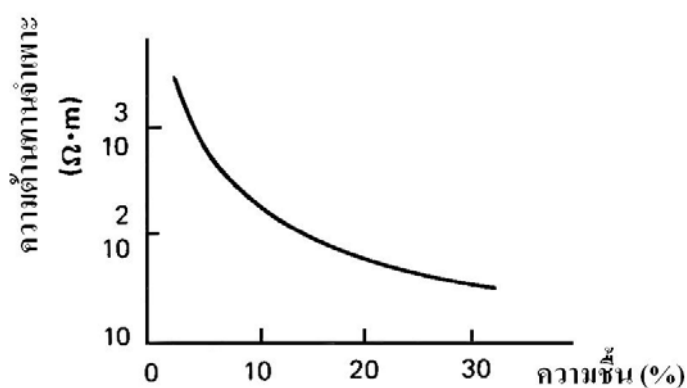
ภาพที่ 10 อิทธิพลของความอัดแน่นของเกรนต่อปริมาณของช่องว่างในดิน

ดินที่อัดแน่นมากปริมาณของช่องว่างประมาณ 26% ของปริมาณทั้งหมด และในดินที่อัดแน่นน้อยปริมาณของช่องว่างประมาณ 48% ของปริมาณทั้งหมด สำหรับดินทั่วไปเกรนจะไม่เป็นทรงกลมแน่นอนหรือขนาดไม่สม่ำเสมอทำให้ปริมาณช่องว่างมีน้อย แสดงว่าปริมาณของช่องว่างในดินสามารถจะแปรเปลี่ยนจาก 25% สำหรับกรวด 8 - 15% สำหรับดินเหนียวปกติ และ 0.2–2 % สำหรับหิน

1.3 ปริมาณความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดินเนื่องจากความนำไฟฟ้าของดินขึ้นอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และความชื้นเป็นตัวละลายเกลือต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน ทำให้ดินนำไฟฟ้าได้มากขึ้น

ความต้านทานจำเพาะของดินส่วนใหญ่มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณความชื้นต่ำกว่า 15% ของน้ำหนักดิน และเมื่อความชื้นมากกว่า 22% ความต้านทานจำเพาะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ปริมาณความชื้นขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดิน และความหลากหลายของขนาดดิน รวมทั้งความอัดแน่นของดินด้วย



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับความชื้น

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 81 (1983)

ดินที่ไม่มีความชื้นอยู่เลย เปรียบเสมือนกับฉนวนไฟฟ้า จากการทดสอบตัวอย่างดิน 2 ตัวอย่างที่ถูกนำมาไล่ความชื้นออกไปจนหมดจะกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี เพราะมีความต้านทานจำเพาะขึ้นไปถึง 10^7 โอห์ม-เมตร และดินจะนำไฟฟ้าดีขึ้นอย่างมากที่ความชื้นระดับ 20% ตัวอย่างลักษณะดินแบบ Sandy Loam ซึ่งเป็นดินที่มีลักษณะสามารถนำมาปั้นให้ขึ้นรูปได้ (ดินเหนียว) แต่จะมีทรายเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย เมื่อควบคุมความชื้นของดินชนิดนี้ไว้ที่ 0% ของน้ำหนักดิน จะมีความต้านทานจำเพาะมากกว่า 10^7 โอห์ม-เมตร แต่ถ้าควบคุมความชื้นไว้ที่ 30% ของน้ำหนักดินจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าเท่ากับ 42 โอห์ม-เมตร

ตารางที่ 2 ผลของปริมาณความชื้นต่อความต้านทานจำเพาะของดิน

ส่วนประกอบของความชื้นในดิน (% ของน้ำหนัก)	ความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)	
	ดินชั้นบน (Top soil)	ดินเหนียวปนทราย (Sandy Loam)
0	$> 10^7$	$> 10^7$
2.5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

ที่มา: คัดแปลงจากมาตรฐาน IEEE 142 (1982)

1.4 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน ดังนั้นอุณหภูมิจะมีผลต่อความต้านทานของดินด้วย อุณหภูมิจะมีผลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและค่าความชื้นของดิน ตัวอย่างลักษณะของดินแบบ Sandy Loam ที่ควบคุมความชื้นไว้ที่ 15.2% ของน้ำหนักดิน เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิจาก -15°C ถึง 20°C พบว่าที่อุณหภูมิ -15°C ดินลักษณะนี้จะมีค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 3300 โอห์ม- เมตร แต่เมื่อปรับอุณหภูมิไว้ที่ 20°C ค่าความต้านทานจำเพาะจะลดลงเหลือ 72 โอห์ม-เมตร (IEEE 142 ,1982)

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน สำหรับดิน Sandy Loam ที่มี
ความชื้น 15.2 %

อุณหภูมิ		ความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
20	68	72
10	50	99
0 (น้ำ)	32	138
0 (น้ำแข็ง)	32	300
- 5	23	790
- 15	14	3300

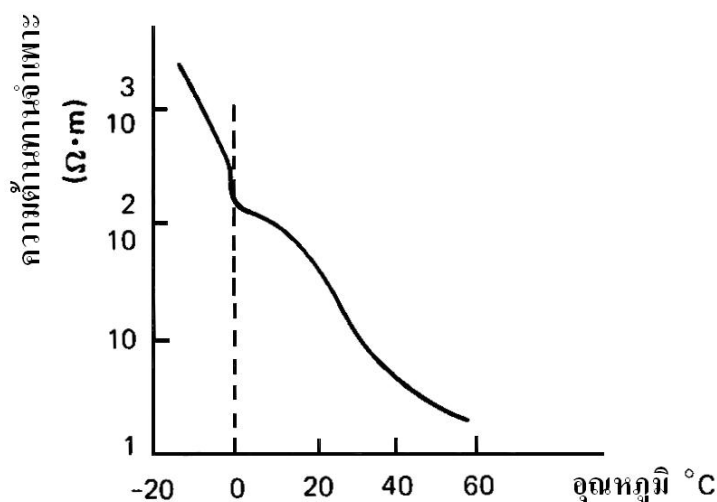
ที่มา: คัดแปลงจากมาตรฐาน IEEE 142 (1982)

IEEE 142 (1991) ได้ปรับปรุงผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานจำเพาะของดินจาก
ตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -5°C ถึง 50°C ส่งผลให้ความต้านทานจำเพาะ
เปลี่ยนแปลงได้กว้างในช่วง 700 โอห์ม-เมตร ไปเป็น 40 โอห์ม-เมตร

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานจำเพาะของดิน

อุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}$	ความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)
-5	700
0 (น้ำแข็ง)	309
0 (น้ำ)	100
10	80
20	70
30	60
40	50
50	40

สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็งไม่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะมากนัก ที่ 0°C น้ำในดินเริ่มแข็งตัวและความต้านทานจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 81 (1983)

1.5 ส่วนประกอบทางเคมีของดิน

การนำของกระแสไฟฟ้าของดินส่วนมากเป็นการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจำนวนและชนิดของเกลือที่ละลายน้ำในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดความต้านทานจำเพาะของดิน จำนวนเกลือที่ละลายมีอิทธิพลต่อความต้านทานจำเพาะอย่างมากโดยเฉพาะความเข้มข้นของเกลือต่ำ นอกจากนี้ชนิดของเกลือจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ เช่น เกลือทะเล (NaCl) เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าที่ดีกว่าโซเดียมซัลเฟตและคอปเปอร์ซัลเฟตในขณะที่กรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid) เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าดีกว่าเกลือทะเลที่ความเข้มข้นเดียวกัน

สำหรับปัจจัยของส่วนประกอบทางเคมีของดิน ที่จะนำมากล่าวถึง คือ เกลือ (NaCl) เมื่อดินมีส่วนผสมของเกลือเป็นจำนวนมาก จะส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำลง ตัวอย่าง ดิน Sandy Loam เมื่อควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 17°C และควบคุมความชื้นไว้ที่ 15% ของน้ำหนักดิน เมื่อเพิ่มเกลือเข้าไปในเนื้อดิน 0.1% โดยน้ำหนักของความชื้น (Add Salt % by Weight

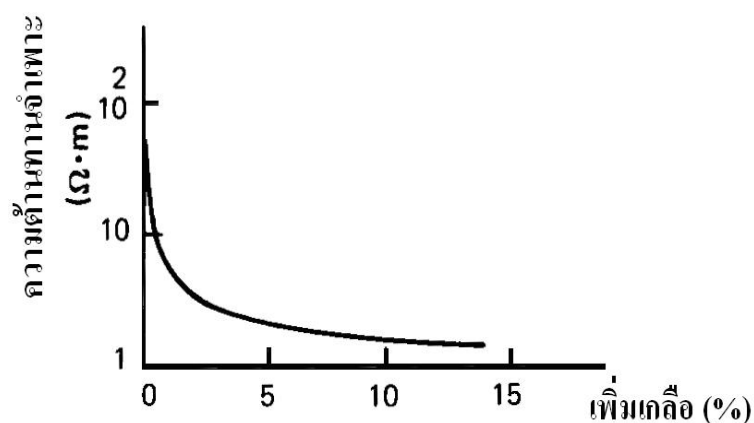
of Moisture) ส่งผลให้ดินมีความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 18 โอห์ม- เมตร แต่เมื่อเพิ่มเกลือเป็น 20% โดยน้ำหนักของความชื้นจะส่งผลให้ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะลดลงเท่ากับ 1 โอห์ม-เมตร (วัฒนา, 2547)

ตารางที่ 5 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน Sandy Loam ที่เพิ่มสารละลายเกลือลงไปปริมาณต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าเมื่อดินมีองค์ประกอบของเกลือมากขึ้น จะทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำลง

ตารางที่ 5 ผลของปริมาณเกลือที่มีต่อความต้านทานจำเพาะของดิน

ปริมาณเกลือที่เพิ่ม (% น้ำหนักของความชื้น)	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
0	107
0.1	18
1.0	4.6
5.0	1.9
10	1.3
20	1.0

IEEE 81 (1983) การรวมตัวกันและปริมาณสารละลายเกลือ กรด หรือด่างที่อยู่ในดิน อาจจะมีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน พิจารณาภาพที่ 13 แสดงผลของเกลือ (NaCl) ต่อความต้านทานจำเพาะของดินที่มีปริมาณความชื้น 30% โดยน้ำหนัก เมื่อมีสารละลายเกลือมากขึ้นทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าน้อยลง



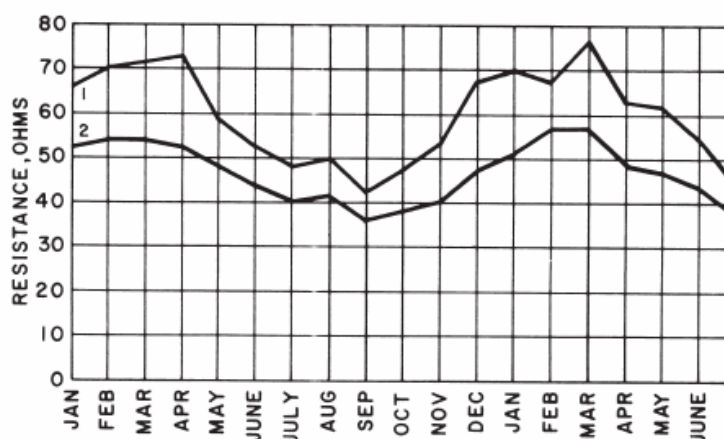
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะกับการเพิ่มเกลือ

ที่มา: มาตรฐาน IEEE 81 (1983)

ดินในบางพื้นที่ที่มีความต้านทานดินสูงมาก การสร้างระบบต่อลงดินต้องลงทุนสูงและใช้ความพิถีพิถันมากเพื่อให้ได้ความต้านทานดินต่ำ วิธีที่ประหยัดคือการใช้สารเคมีช่วยปรับความต้านทานของดินเป็นประจำ การปรับสภาพโดยใช้สารเคมีจะทำให้ความต้านทานดินบริเวณนั้นแปรไปตามอุณหภูมิอย่างมาก แต่ปัจจุบันถือว่าเป็นแนวทางที่ไม่ดีสำหรับการใช้เกลือเป็นสารเคมีเพื่อลดค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพราะว่าเกลือที่เพิ่มไปในดินจะสลายไปตามธรรมชาติอย่างรวดเร็วพร้อมกับสารเคมีอย่างอื่นที่อยู่รอบ ๆ ดินหลังจากระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นความต้านทานจำเพาะของดินจะกลับมีค่าสูงเหมือนเดิม นอกจากนี้สารเคมีจะส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบต่อลงดินสั้นลง

1.6 ฤดูกาล

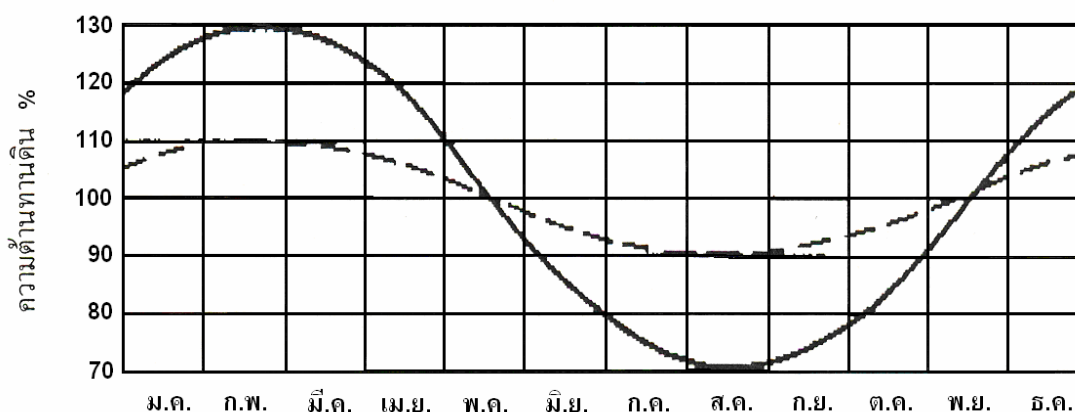
เนื่องจากความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น อุณหภูมิ และปริมาณแร่ธาตุในดิน จึงสรุปได้ว่าความต้านทานของระบบต่อลงดินทุกระบบเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลในแต่ปี โดยเฉพาะในพื้นที่ซึ่งมีอุณหภูมิร้อนหรือหนาวมาก เช่น ฝนตกหนักหรืออากาศแห้งในระยะเวลาหนึ่ง และการแปรเปลี่ยนฤดูกาลอื่น ๆ ภาพที่ 14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานดินในแต่ละเดือนของระบบต่อลงดิน 2 ระบบ คือ ท่อน้ำขนาด 3/4 นิ้ว ฝังในดิน Stony Clay Soil กราฟที่ 1 เป็นกราฟที่ความลึก 3 ฟุต และกราฟที่ 2 ที่ความลึก 10 ฟุต



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานดินตามฤดูกาลของท่อน้ำขนาด 3/4 นิ้ว ฝังในดินแบบ Stony Clay Soil กราฟที่ 1 เป็นกราฟที่ความลึก 3 ฟุต กราฟที่ 2 ที่ 10 ฟุต

ที่มา: Megger (2005)

ในยุโรปสรุปว่าความต้านทานดินจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลมีลักษณะกราฟเป็นรูปไซน์ (Sine) ซึ่งมีค่าความต้านทานดินสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์ และต่ำสุดในเดือนสิงหาคม ค่าเฉลี่ยอยู่ในเดือนพฤษภาคมและพฤศจิกายน ค่าสูงสุดในเดือนกุมภาพันธ์มากกว่าค่าเฉลี่ยประมาณ 30% และค่าต่ำสุดในเดือนสิงหาคมน้อยกว่าค่าเฉลี่ย 30%



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานดินตามฤดูกาลในยุโรป

ที่มา: ปรับปรุงจากวิวัฒน์ (2548)

2. การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินไม่สามารถบอกได้ด้วยชนิดของดินเนื่องจากความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง การหาความต้านทานจำเพาะของดิน โดยพิจารณาจากชนิดของดินจะได้ค่าความต้านทานจำเพาะโดยประมาณเท่านั้น จะไม่ทราบความต้านทานจำเพาะของดินที่แน่นอน การหาความต้านทานจำเพาะของดินที่ถูกต้องได้จากการวัดในแต่ละพื้นที่และควรมีการวัดหลาย ๆ จุดภายในบริเวณที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน และควรวัดในแต่ละฤดูกาลด้วย

โดยทั่วไปดินมักมีสภาพเป็นดินหลายชั้นและดินแต่ละชั้นมีความต้านทานจำเพาะต่างกัน ลักษณะของดินทั้งทางด้านข้างและด้านลึกอาจมีการเปลี่ยนแปลง แต่โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะน้อย

การวัดความต้านทานจำเพาะของดินจะต้องหาให้ได้ว่า ความต้านทานจำเพาะของดินมีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกหรือไม่ ถ้าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานจำเพาะของดินมีมาก จำนวนจุดที่วัดต้องมากขึ้น ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงตามความลึก จะต้องเพิ่มระยะห่างของหลักทดสอบ เพื่อหาความต้านทานจำเพาะของดินที่ลึกลงไป เพราะถ้าเพิ่มระยะห่างของหลักทดสอบมากขึ้นกระแสจากเครื่องวัดที่ไหลลงไปดินจะลึกมากขึ้นและลงไปในดินชั้นล่าง ๆ

IEEE 81 (1983) เทคนิคการวัดความต้านทานจำเพาะของดินเป็นสิ่งที่สำคัญ แต่การแปลความหมายของข้อมูลที่วัดได้มีความสำคัญมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อดินมีความต้านทานจำเพาะไม่สม่ำเสมอ ความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของดินและมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินคงที่เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น การวัดความต้านทานจำเพาะของดินส่วนใหญ่จะแสดงความต้านทานจำเพาะ ρ เป็นฟังก์ชันของความลึก z

$$\rho = \phi(z) \quad (11)$$

โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

ϕ คือ ฟังก์ชัน

z คือ ความลึกของดิน (เมตร)

ธรรมชาติของฟังก์ชัน ϕ โดยทั่วไปไม่ยุ่งยาก ดังนั้นการแปลความหมายของการวัดจะประกอบด้วยฟังก์ชันสมมูลอย่างง่ายที่ให้การประมาณที่ดีที่สุดในกรณีของวงจรไฟฟ้ากำลังและสื่อสาร โครงสร้างดินแนวนอน 2 ชั้น และ Exponential Earth ได้พิสูจน์ว่าเป็นการประมาณที่ดีและเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบ

ในทางปฏิบัติไม่แนะนำให้พิจารณาความต้านทานจำเพาะของดินจากค่าความต้านทานดินที่วัดได้ระหว่างด้านตรงกันข้ามของตัวอย่างดิน เนื่องจากไม่ทราบความต้านทานระหว่างหน้าดินที่อยู่รอบ ๆ ตัวอย่างดินและรากสายดินที่รวมอยู่ในค่าที่วัด การหาความต้านทานจำเพาะของดินคือการวัดความต้านทานแบบสี่ขั้ว หลักทดสอบควรมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินและอยู่ในระยะที่เพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอตลอดตัวอย่างดิน

วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

2.1 วิธีเปลี่ยนความลึก (Variation of Depth Method)

วิธีนี้บางครั้งเรียกว่าวิธีสามจุด เป็นการทดสอบความต้านทานจำเพาะของดินที่ทำการวัดหลายครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะเพิ่มความลึกของหลักทดสอบตามที่กำหนด จุดประสงค์ของการวัดนี้คือการเพิ่มกระแสทดสอบให้มากขึ้นผ่านดินที่ลึกขึ้น ค่าความต้านทานดินที่วัดได้สะท้อนการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจำเพาะที่ความลึกเพิ่มขึ้น ปกติหลักทดสอบที่ใช้ทดสอบแบบแท่งหลักดินจะนิยมมากกว่าหลักดินแบบอื่นเพราะว่ามีข้อดี คือ ค่าของความต้านทานของแท่งหลักดินง่ายต่อการคำนวณด้วยความแม่นยำที่พอเพียง และการปักแท่งหลักดินลงไปในดินทำได้ง่าย

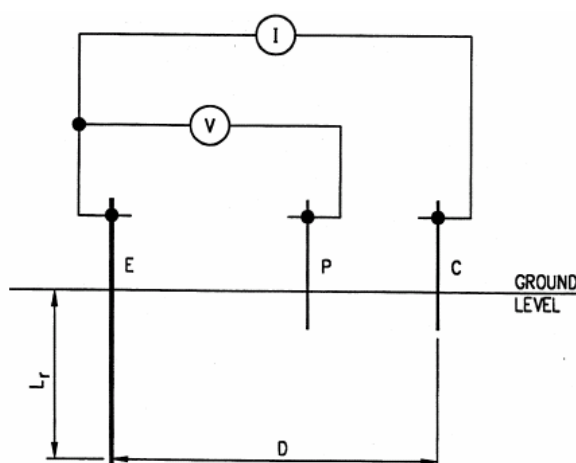
การวัดด้วยวิธีเปลี่ยนความลึกสามารถดำเนินการตามวิธีวัดความต้านทานดินแบบ Fall-of-Potential โดยเปลี่ยนความลึกของแท่งหลักดิน ส่วนหลักทดสอบสำหรับแรงดัน P และกระแส C ให้ฝังดินในแนวเดียวกับรากสายดินที่ต้องการวัดความต้านทานดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินคำนวณได้ตามสมการ

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1} \quad (12)$$

โดยที่	L	คือ	ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน (เมตร)
	R	คือ	ความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

การวัดด้วยวิธีเปลี่ยนความลึกให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับธรรมชาติของดินที่อยู่ใกล้กับแท่งหลักดิน (5 ถึง 10 เท่าของความยาวแท่งหลักดิน) ถ้าต้องตรวจสอบปริมาณดินขนาดใหญ่นิยมใช้วิธีสี่จุดเนื่องจากการปักแท่งหลักดินที่ยาวไม่สามารถปฏิบัติได้



ภาพที่ 16 การวัดความต้านทานดินแบบ 3 จุด

2.2 วิธีสี่จุด (Four-Point-Method)

การวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีสี่จุดเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุดในการวัดความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของปริมาณดินขนาดใหญ่ วิธีการวัด คือ นำหลักทดสอบขนาดเล็ก 4 แท่งปักลงไปดินที่ความลึก b และระยะห่างช่วงละ a เท่ากัน (ในแนวเส้นตรง) ผ่านกระแสทดสอบ I ระหว่างหลักทดสอบ 2 หลักที่อยู่ด้านนอกและวัดศักย์ไฟฟ้า V ระหว่างหลักทดสอบ 2 หลักที่อยู่ด้านในด้วยโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) หรือโวลต์มิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้น V/I จะให้ความต้านทานดิน R เป็นโอห์ม

การใช้วิธีสี่จุดมีวิธีที่ใช้แตกต่างกัน 2 วิธี คือ

2.2.1 การจัดแบบระยะเท่ากันหรือแบบเวนเนอร์ (Wenner Arrangement)

วิธีของเวนเนอร์ (Wenner) เป็นวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานจำเพาะโดยมีหลักทดสอบสี่ชุดวางห่างกันด้วยระยะ a เมตร ลึก b เมตร โดยทั่วไปแนะนำให้ฝังลึก 0.3–0.5 เมตร โดยอาศัยหลักการปรับเทียบ กับแรงดันของ Bridge Meter ของเครื่องวัดความต้านทานดิน (Earth Resistance) ค่าแรงดันระหว่างหลักทดสอบคู่ในจะถูกวัดขณะมีกระแสไหลระหว่างหลักทดสอบคู่ นอก ค่าอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแสคือ ค่าความต้านทานของดินซึ่งสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่องวัดและหาความต้านทานจำเพาะของดินในเทอมของหน่วยความยาว a และ b จากสมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (13)$$

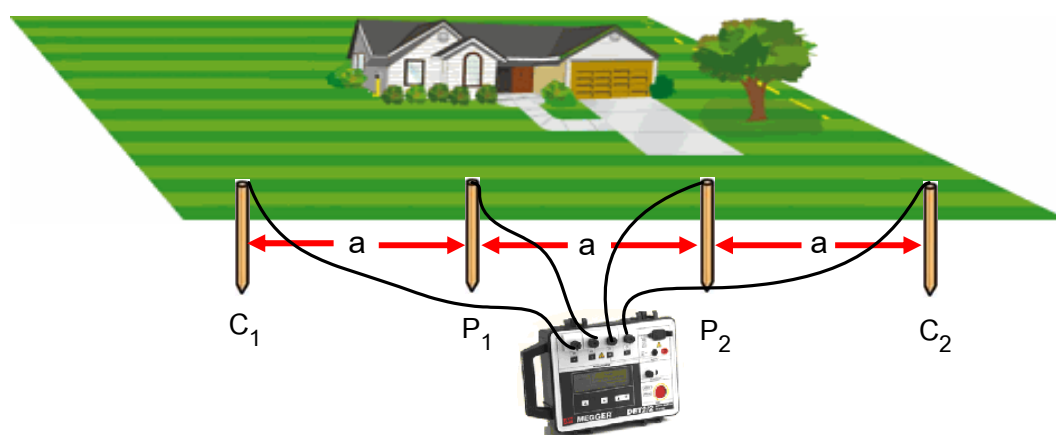
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
a	คือ	ระยะห่างระหว่างแท่งหลักดิน (เมตร)
b	คือ	ความลึกของหลักทดสอบที่ฝังดิน (เมตร)
R	คือ	ความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

ในทางปฏิบัติหลักทดสอบทั้งสี่ที่วางในแนวเส้นตรงระยะห่าง a ปักที่ความลึกไม่เกิน $0.1a$ กรณีนี้ระยะห่าง a มีค่ามากกว่าความลึก b มาก ($a \gg b$) สมการที่ (13) สามารถเขียนได้ใหม่ตามสมการที่ (14) ให้ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินโดยประมาณที่ความลึก a

$$\rho = 2\pi aR \quad (14)$$

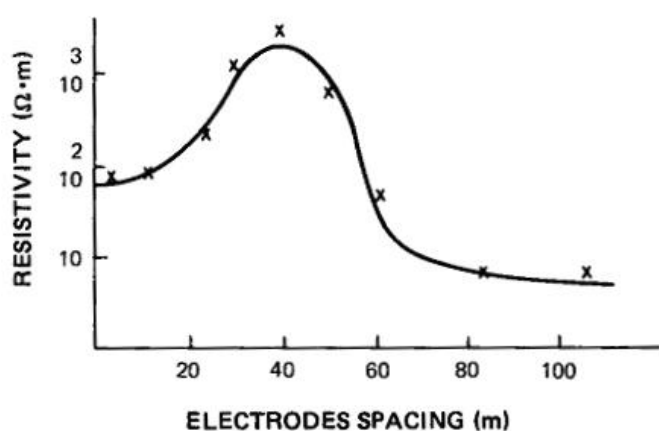
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
a	คือ	ระยะห่างระหว่างหลักทดสอบ (เมตร)
R	คือ	ความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

การเพิ่มระยะ a มากขึ้นทำให้กระแสทดสอบไหลลึกกลงไปในดินมากขึ้น ดังนั้นค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดินของชั้นที่กระแสไหลผ่าน โดยทั่วไประยะห่างของหลักทดสอบเป็นตัวกำหนดความลึกของดินที่ต้องการวัดความต้านทานจำเพาะ เช่น ระยะ a เท่ากับ 3 เมตร เป็นการวัดความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินด้านบนที่ลึก 3 เมตร



ภาพที่ 17 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธีสี่จุดระยะเท่ากัน

ค่าที่อ่านได้ตามระยะห่างของหลักทดสอบต่างกันจะได้ชุดของความต้านทานจำเพาะของดิน เมื่อนำมาเขียนกราฟความต้านทานจำเพาะของดินกับระยะห่างของหลักทดสอบ แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าชั้นที่แตกต่างกันของดินหรือหินจะให้แนวคิดของความต้านทานจำเพาะและความลึกตามลำดับ

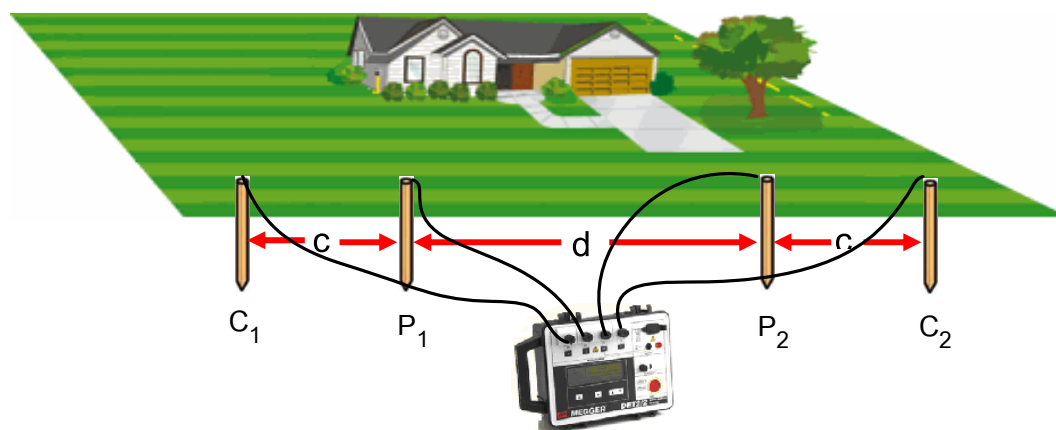


ภาพที่ 18 กราฟความต้านทานจำเพาะของดินโดยทั่วไป

2.2.2 การจัดแบบระยะไม่เท่ากันหรือแบบชัลมเบอร์เจอร์พาล์มเมอร์

(Schalumberger- Palmer)

วิธีวัดของเวนเนอร์ คือ การลดขนาดของศักย์อย่างรวดเร็วระหว่างหลักทดสอบ 2 หลักที่อยู่ด้านใน เมื่อระยะระหว่างหลักทดสอบเพิ่มขึ้น บ่อยครั้งเครื่องมือวัดไม่ละเอียดพอที่จะวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำได้ เพื่อให้สามารถวัดความต้านทานจำเพาะของดินที่มีระยะห่างระหว่างหลักทดสอบกระแสมาก การจัดรูปแบบการวัดแสดงในภาพที่ 19 สามารถใช้ได้เป็นอย่างดี หลักทดสอบศักย์ไฟฟ้าจะอยู่ใกล้กับหลักทดสอบกระแสมากกว่า ซึ่งค่าของศักย์ไฟฟ้าที่วัดจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 19 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธีสี่จุดระยะไม่เท่ากัน

สูตรที่ใช้ในกรณีนี้พิจารณาได้โดยง่าย ถ้าความลึกของหลักทดสอบที่ฝัง b มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะห่าง d และ c ดังนั้นความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (15)$$

โดยที่

c คือ ระยะห่างระหว่างหลักทดสอบกระแสกับหลักทดสอบแรงดัน (เมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างหลักทดสอบแรงดันกับหลักทดสอบแรงดัน (เมตร)

R คือ ความต้านทานดินที่อ่านได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

3. การสรุปค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้

การวัดความต้านทานจำเพาะของดินในงานสนาม จำเป็นต้องวัดหลายจุดในพื้นที่เดียวกัน และค่าที่ได้อาจมีความแตกต่างกัน รวมถึงอาจแตกต่างกันตามความลึกของแท่งหลักดินด้วย จึงมีความลำบากในการสรุปค่าความต้านทานจำเพาะของดินว่าควรใช้ค่าเท่าใด

โมเดลดินที่ใช้สำหรับการหาความต้านทานจำเพาะของดินที่ใช้ส่วนใหญ่มีสองแบบ คือ แบบดินสม่ำเสมอ และแบบดินสองชั้น โดยทั่วไปมักใช้โมเดลของดินสองชั้นเพราะเป็นโมเดลประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดีที่สุด หรือบางครั้งอาจใช้โมเดลดินหลายชั้นสำหรับกรณีที่ต้องการรายละเอียดหรือค่าที่วัดได้มีความหลากหลายจนไม่สามารถแทนได้ด้วยโมเดลดินสองชั้น

โมเดลความต้านทานจำเพาะของดินสม่ำเสมอใช้ได้ก็ต่อเมื่อค่าที่วัดได้แต่ละครั้งไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักไม่ค่อยพบ ถ้าค่าที่วัดได้แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันมากและยังใช้ความต้านทานดินสม่ำเสมอทำให้เกิดความผิดพลาดมาก

โมเดลดินสองชั้นประกอบด้วยดินชั้นบนที่มีความหนาแน่นและมีความต้านทานจำเพาะค่าหนึ่ง ส่วนดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะอีกค่าหนึ่งดังแสดงในภาพที่ 20 โมเดลดินสองชั้นสามารถหาได้โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานดินและความลึกของแท่งหลักดินที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับการวัดแบบสามจุด หรือพิจารณาจากความต้านทานดินที่วัดได้และระยะห่างระหว่างหลักทดสอบสำหรับการวัดแบบสี่จุด



ภาพที่ 20 โมเดลดินสองชั้น

3.1 ดินสม่ำเสมอ

โมเดลดินสม่ำเสมอสามารถใช้ได้ถ้าไม่มีเครื่องมือวิเคราะห์โมเดลดินแบบหลายชั้น โมเดลดินสม่ำเสมอใช้ได้ดีเมื่อความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกันไม่มากและค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยหาได้จากค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตดังสมการที่ (16)

$$\rho_{av} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n}{n} \quad (16)$$

ρ_{av} คือ ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน

ρ_i คือ ความต้านทานจำเพาะที่วัดได้แต่ละครั้ง i ไม่ว่าจะเป็นการวัดแบบสามจุด โดยการเปลี่ยนความลึกของแท่งหลักดินหรือการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหลักทดสอบในการวัดแบบสี่จุด

n คือ จำนวนครั้งที่วัดความต้านทานจำเพาะ

สมการที่ (16) ใช้สำหรับความต้านทานจำเพาะของดินสม่ำเสมอซึ่งในทางปฏิบัติไม่ค่อยพบ ความต้านทานจำเพาะของโมเดลดินสม่ำเสมอโดยคิดความต้านทานจำเพาะค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดเป็นไปตามสมการที่ (17)

$$\rho_{av} = \frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2} \quad (17)$$

โดยที่ ρ_{max} คือ ความต้านทานจำเพาะของดินสูงสุด

ρ_{min} คือ ความต้านทานจำเพาะของดินต่ำสุด

แท่งหลักดินที่มีความลึกใกล้เคียงกับความลึกของหลักทดสอบที่ใช้ในการวัด ได้มีงานวิจัยมากมายที่พยายามจำลองหรือประมาณดินไม่สม่ำเสมอด้วยโมเดลดินที่สม่ำเสมอ และวิธีหนึ่งที่มีการใช้กัน คือ ใช้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนในการคำนวณแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างใช้คำนวณความต้านทานดิน

3.2 ดินไม่สม่ำเสมอ

การวัดความต้านทานจำเพาะของดินที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึกของแท่งหลักดิน ในการวัดแบบสามจุด หรือมีค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างหลักทดสอบ ในการวัดแบบสี่จุดทำให้ทราบว่าดินในพื้นที่ดังกล่าวเป็นดินไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นต้องหาโมเดลของดินไม่สม่ำเสมอมาใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานจำเพาะของดิน

โมเดลดินสองชั้นของดินไม่สม่ำเสมอประกอบด้วยดินชั้นบนที่มีความหนาค่าหนึ่ง และมีความต้านทานจำเพาะค่าหนึ่ง ส่วนดินชั้นล่างมีความต้านทานจำเพาะอีกค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้ค่าองค์ประกอบการสะท้อน (Reflection Factor) K ดังสมการ

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (18)$$

โดยที่

K คือ องค์ประกอบการสะท้อน (Reflection Factor)

ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (โอห์ม-เมตร)

ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (โอห์ม-เมตร)

โมเดลที่ถูกต้องที่ใช้แทนคุณลักษณะของดินจะต้องสามารถจำลองค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดตามจุดต่างๆ ได้ แต่ในทางปฏิบัติการหาโมเดลดังกล่าวยากมาก และโมเดลดินสองชั้นที่ใช้แทนคุณลักษณะของดินถือว่าเพียงพอสำหรับการออกแบบการต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วบางวิธีใช้โมเดลดินสม่ำเสมอแทนการใช้โมเดลดินสองชั้นโดยใช้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนในการคำนวณหาแรงดันช่วงก้ำและแรงดันสัมผัส และใช้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างในการคำนวณความต้านทานของดิน

ระบบรากสายดิน

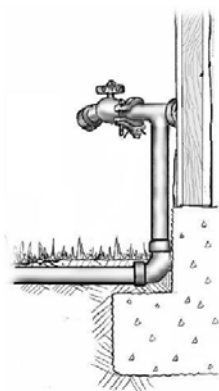
การเลือกชนิดของรากสายดินที่ดีที่สุดสำหรับอาคารก่อสร้างที่จะป้องกันฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินอย่างมาก นั่นคือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของดิน ความต้านทานของดินแต่ละชั้น ระดับน้ำใต้ดินและความนำไฟฟ้าของน้ำ

รากสายดิน (Earth Electrode) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รากสายดินที่มีอยู่แล้ว (Existing Electrodes) และรากสายดินที่ทำขึ้น (Made Electrodes) (IEEE 142 ,1991)

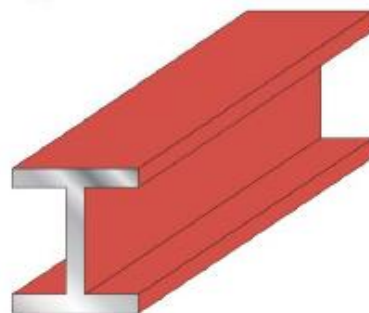
1. รากสายดินที่มีอยู่แล้ว

รากสายดินที่มีอยู่แล้ว คือ รากสายดินที่สิ่งปลูกสร้างมีอยู่แล้วและทำขึ้น เพื่อจุดประสงค์อย่างอื่น ซึ่งไม่ใช่เพื่อการต่อลงดิน รากสายดินที่มีอยู่แล้วประกอบด้วย

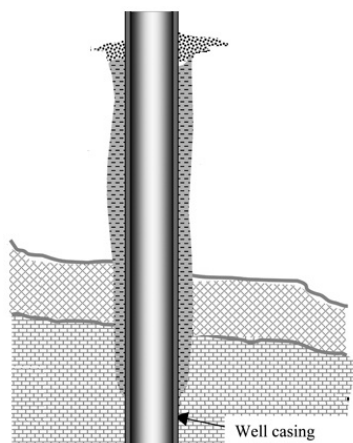
- ท่อน้ำโลหะใต้ดิน (Underground Metallic Piping)
- โครงโลหะของอาคาร (Metal Building Frameworks)
- ปลอกบ่อโลหะ (Well Casings)
- แผ่นเหล็กกั้นดิน (Steel Piling)
- เสาเข็มหลัก
- โครงโลหะใต้ดินอื่น ๆ ซึ่งจุดประสงค์สำหรับการติดตั้งเพื่อทำหน้าที่อื่นมากกว่าที่จะเป็นรากสายดิน



(ก) ท่อน้ำโลหะใต้ดิน



(ข) โครงโลหะของอาคาร



(ค) ปลอกบ่อโลหะ



(ง) แผ่นเหล็กกันดิน

ภาพที่ 21 รากสายดินที่มีอยู่แล้ว

ระบบท่อน้ำหรือท่อแก๊สใต้ดิน ปลอกของบ่อน้ำที่เป็นโลหะและสิ่งอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันซึ่งมีความต้านทานต่ำ สำหรับการต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยและระบบจำหน่ายขนาดเล็กที่มีขนาดกระแสดินต่ำ รากสายดินรูปแบบนี้นิยมใช้เพราะว่าประหยัด สำหรับโครงอาคารโลหะปกติจะยึดด้วยสมอบแบบ โบลต์ (Anchor Bolt) ขนาดยาวเข้ากับฐานรากคอนกรีต ซึ่งสมอบแบบ โบลต์ในคอนกรีตทำหน้าที่เป็นรากสายดิน และโครงอาคารโลหะเป็นตัวนำลงดิน

2. รากสายดินที่ทำขึ้น

รากสายดินที่ทำขึ้น คือ รากสายดินที่จัดเตรียมและติดตั้งสำหรับงานระบบการต่อลงดิน โดยเฉพาะ รากสายดินประเภทนี้ ประกอบด้วย

- แท่งหลักดิน (Ground Rod)
- เหล็กเสริมในคอนกรีตที่อยู่ใต้ดิน (Steel Reinforcing Bars)
- แถบตัวนำ (Strip) หรือเคเบิล (Cable) ที่ฝังดิน
- ตะแกรง (Grids)
- แผ่นตัวนำฝังดิน (Plate)
- การต่อลงดินกระจายในแนวรัศมี (Counterpoise)

แท่งหลักดินเป็นรากสายดินที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะราคาถูกใช้ได้กับดินที่มีชั้นหินอยู่ลึกกว่า 3 เมตร ขณะที่รากสายดินแบบตะแกรง แถบตัวนำ หรือเคเบิลที่ฝังดินมักใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยหรือสถานีผลิตไฟฟ้าเพื่อให้พื้นที่มีศักย์เท่ากันตลอดทั้งสถานี ในที่ซึ่งมีอันตรายถึงชีวิตและทรัพย์สินที่อาจมีราคาสูง ซึ่งต้องการจำนวนวัสดุฝังดินน้อยสำหรับความต้านทานดินที่กำหนด แผ่นตัวนำฝังดินไม่ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในปีหลัง ๆ เนื่องจากมีราคาแพงเมื่อเทียบกับแท่งหลักดินหรือแถบโลหะ เมื่อใช้ในจำนวนน้อยจะเป็นรากสายดินที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด เกล็นเตอร์-พอยส์เป็นรูปแบบของเคเบิลที่ฝังดินที่ใช้ต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

เมื่อใช้แท่งหลักดินหลายแท่ง ระยะห่างที่น้อยกว่า 3 เมตร อาจจะไม่ประหยัดในการใช้วัสดุ การเลือกจำนวนและขนาดของขั้วต่อลงดิน ต้องจำไว้ว่าการจำกัดกระแสดีสชาร์จถ้ากระแสมากเกินไป ดินรอบแท่งหลักดินอาจจะเปิดโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นหรืออาจทำให้ดินรอบ ๆ แห้งและไม่นำกระแส ในที่สุด

2.1 แท่งหลักดิน (Ground Rod)

แท่งหลักดินปกติมีลักษณะเป็นแท่งเป็นรากสายดินที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะราคาถูกและติดตั้งง่าย ใช้ได้ดีกับดินที่มีชั้นหินอยู่ลึกเกิน 3 เมตร ขนาดที่ใช้ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า $5/8$ นิ้ว (16 มม.) และความยาวไม่น้อยกว่า 2.4 เมตร การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางจะช่วยลดความต้านทานดินได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลและทนต่อการกัดกร่อน แท่งหลักดินที่ตอกลึกเพียงไม่กี่แท่งจะได้ผลดีกว่าแท่งหลักดินสั้นหลายแท่ง เนื่องจากความต้านทานจำเพาะของดินจะลดลงที่ระดับลึก ๆ เพราะความชื้นมีมากกว่า ทองแดงเป็นโลหะที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นแท่งหลักดิน เพราะทนต่อการกัดกร่อน



ภาพที่ 22 รากสายดินแบบแท่งหลักดิน

2.2 แถบตัวนำ ลวดและเคเบิลฝังดิน (Buried Strip , Wire and Cable)

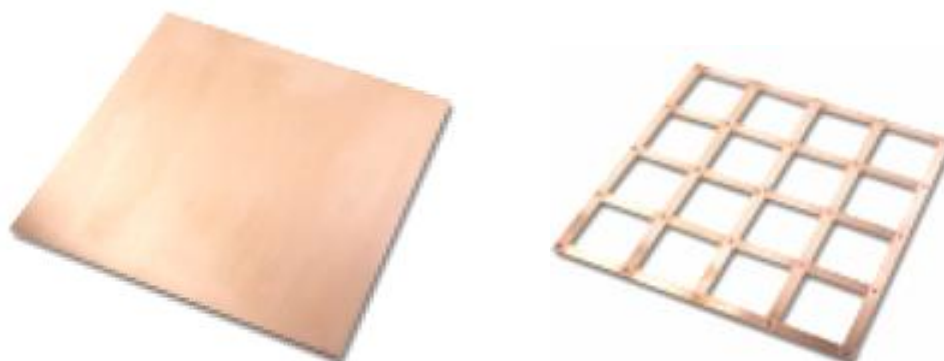
เมื่อพบชั้นหินหรือทรายอยู่ใกล้ผิวดินโดยบังเอิญ ดินจะแห้งมากและมีความต้านทานจำเพาะสูง จึงจำเป็นต้องขยายการต่อลงดิน ภายใตสภาวะนี้การใช้แถบตัวนำ ลวด หรือเคเบิลฝังดินเป็นการแก้ปัญหาที่ประหยัดมาก ประสิทธิภาพของรากสายดินชนิดนี้สำหรับกระแสฟ้าผ่าคือทำหน้าที่เป็นอินดักเตนซ์ การใช้แถบโลหะสั้น ๆ ด้วยระยะห่างที่เหมาะสมดีกว่าการใช้แถบโลหะยาว ๆ เพียงหนึ่งหรือสองแถบ ความลึกที่ฝังไม่ใช่สิ่งสำคัญ เมื่อความลึกที่ฝังเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เมตรเป็น 1.0 เมตร ในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอความต้านทานจะลดลงประมาณ 5% เท่านั้น เช่นเดียวกับขนาดของตัวนำมีอิทธิพลต่อความต้านทานดินน้อย



ภาพที่ 23 รากสายดินแบบแถบและลวดดัดนำ

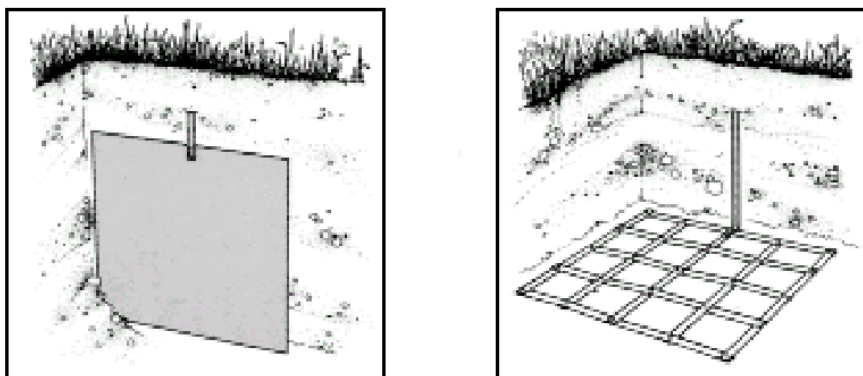
2.3 แผ่นดัดนำ (Plates)

รากสายดินที่เป็นแผ่นดัดนำจะใช้เมื่อไม่ต้องการขุดดินลงไปลึก ๆ แผ่นดัดนำต้องเป็นชนิดกันการกัดกร่อน มีพื้นที่ผิวสัมผัสไม่น้อยกว่า 0.18 ตารางเมตร ในกรณีที่เป็นเหล็กอาบสังกะสี ชนิดกันการกัดกร่อนต้องหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หากเป็นโลหะกันการกัดกร่อนชนิดอื่นที่ไม่ใช่เหล็กต้องหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร ความลึกที่ฝังคือ 1.52 – 2.4 เมตร



ภาพที่ 24 รากสายดินแบบแผ่นดัดนำ

ปัจจุบันแผ่นดัดนำที่ใช้เป็นรากสายดินนั้นไม่ควรจะใช้สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าเพราะใช้โลหะเปลืองมาก และยากที่จะให้แผ่นโลหะทั้งสองหน้าสัมผัสกับดินสนิท ในโค้ดคานาดายอมให้ใช้เป็นรากสายดินรอง (Auxiliary Electrode) และถ้าหากจะใช้งานจริงต้องวางในแนวคิ่งเช่นที่กำหนดในโค้ดสวิส (ชำนานู, 2526)



ภาพที่ 25 การติดตั้งรากสายดินแบบแผ่นตัวนำ

ที่มา: Trevor (n.d.)

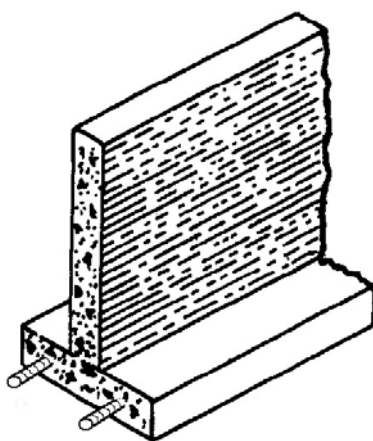
การปฏิบัติที่นิยมของรากสายดินแบบแผ่นตัวนำ คือฝังตามแนวตั้งเพราะการขุดดินน้อยกว่าและเป็นไปได้ที่จะได้รับการสัมผัสที่ดี และความต้านทานดินเมื่อฝังในแนวราบกับฝังแนวตั้งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

2.4 รากสายดินหุ้มคอนกรีต (Concrete Encased Electrode)

คอนกรีตที่อยู่ต่ำกว่าระดับดินซึ่งมีความชื้นอยู่รอบ ๆ จะเป็นวัตถุกึ่งตัวนำและมีค่าความต้านทานจำเพาะ 30 โอห์ม-เมตร ที่ 20°C ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์เฉลี่ยของดินทั่วไป ดังนั้นในดินที่มีค่าเฉลี่ยความต้านทานจำเพาะสูง การหุ้มรากสายดินหรือลวดในคอนกรีตมีผลทำให้ความต้านทานดินต่ำกว่ารากสายดินที่มีลักษณะเหมือนกันที่วางในดินโดยตรง เนื่องจากการลดความต้านทานของวัสดุที่อยู่ใกล้กับรากสายดินที่สุด ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการบำบัดทางเคมีของดินที่เกิดปฏิกิริยาใกล้รากสายดิน เพียงแต่เจาะรูสำหรับเติมคอนกรีตเท่านั้น ในบางสถานที่ใช้เหล็กเสริมที่กระจายทั่วไปในโครงสร้างคอนกรีตและฐานรากเป็นรากสายดิน เพียงแต่ต้องมีการต่อทางไฟฟ้า (Connector) เข้ากับเหล็กเสริมของแต่ละฐานรากแล้วนำออกมาด้วยสายดิน

รากสายดินหุ้มคอนกรีตจะใช้เหล็กเส้นที่ฝังอยู่ในคอนกรีตหนาไม่น้อยกว่า 2 นิ้ว (50 มิลลิเมตร) มีความยาวไม่น้อยกว่า 20 ฟุต (6 เมตร) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 12.7 มิลลิเมตร เป็นรากสายดิน ถ้าใช้สายทองแดงเปลือยต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 25 ตารางมิลลิเมตรและ

ยาวไม่น้อยกว่า 20 ฟุต (6 เมตร) เนื่องจากรอยต่อระหว่างพื้นผิวของเหล็กเสริมกับคอนกรีตต่อกัน
 อย่างดี ส่วนคอนกรีตมีพื้นที่ขนาดใหญ่ต่อเข้ากับพื้นดิน และเหล็กเสริมเสมือนว่าต่อขนานกันด้วย
 ดังนั้นระบบรากสายดินนี้จึงมีความต้านทานดินต่ำจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด



ภาพที่ 26 รากสายดินหุ้มคอนกรีต

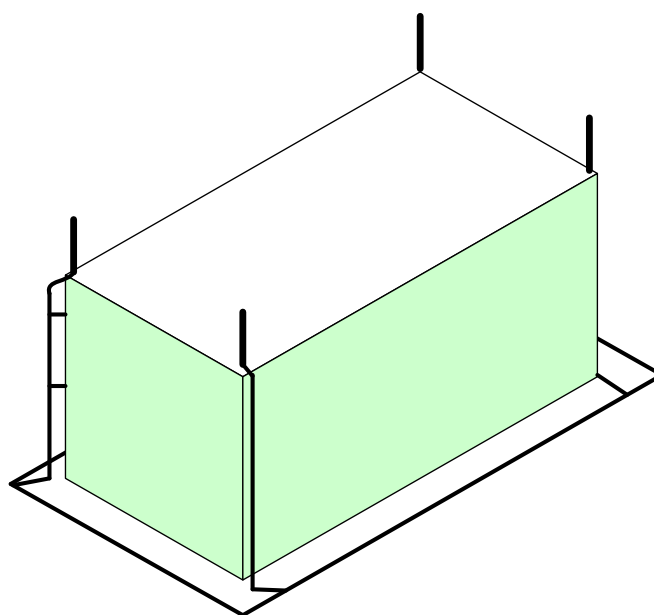
รากสายดินฐานรากแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือฐานรากต่อเนื่องรอบอาคารหรือฐานราก
 ของเสาที่กระจายรอบนอก ซึ่งมีชิ้นส่วนในแนวดิ่งที่ต่อกับด้านบน (เหนือดิน) กับกำแพง สำหรับ
 ฐานรากแบบแรกสามารถผูกเหล็กเสริมแนวดิ่งภายในผนังเข้ากับเหล็กเสริมแนวราบในฐานราก
 เพื่อให้เป็นวงรอบที่ต่อเนื่องรอบอาคาร เสาแต่ละต้นที่ติดกันหรือสลับเสากัน เหล็กเสริมในแนวดิ่ง
 สามารถเชื่อมต่อด้วยวัสดุที่คล้ายกัน ด้วยวิธีนี้การใช้เหล็กเสริมโครงสร้างที่มีอยู่แล้วสามารถทำให้
 ค่าความต้านทานดินที่ต่ำกว่าเทียบกับการฝังนอกฐานราก

รากสายดินฐานรากอีกชนิดหนึ่ง คือ ฐานรากเสาหรือฐานรากที่กระจายสามารถใช้ได้
 คล้ายกันแต่ไม่มีประโยชน์จากเหล็กเสริมรอบอาคารที่ต่ำกว่า รากสายดินที่อยู่ภายในฐานรากที่เป็น
 วงรอบควรติดตั้งภายในกำแพงหรือใต้ระดับดิน รากสายดินอาจใช้เหล็กเสริมหรือตัวนำทองแดง

รากสายดินฐานรากแต่ละชุดจะมีความต้านทานดินเท่ากับหรือต่ำกว่าแท่งหลักดินที่มี
 ความลึกเท่ากัน ด้วยจำนวนฐานรากที่มีมากจะให้ความต้านทานดินรวมต่ำกว่าที่ได้จากรากสายดิน
 ที่ทำขึ้นอื่น ๆ โดยทั่วไปต่ำกว่า 1 โอห์ม และบ่อยครั้งที่อยู่ในระดับ 0.25 โอห์ม

2.5 รากสายดินแบบวงแหวน (Ring)

รากสายดินแบบวงแหวนเป็นรากสายดินที่ใช้สายตัวนำทองแดงเปลือยยาวไม่น้อยกว่า 20 ฟุต (6 เมตร) ขนาดไม่ต่ำกว่า 35 ตารางมิลลิเมตร มาขดเป็นวงแหวนและฝังลึกใต้ดินไม่น้อยกว่า 2.5 ฟุต (0.76 เมตร) ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การใช้รากสายดินแบบวงแหวนเป็นระบบรากสายดิน

2.6 ตะแกรง (Grid)

รากสายดินแบบตะแกรงส่วนมากใช้กับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยครอบคลุมทั่วสถานีไฟฟ้า และบางครั้งก็เลยรั้วออกไป ระบบตะแกรงประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าฝังดินลึกประมาณ 0.15 เมตร และจัดเป็นรูปตาข่ายสี่เหลี่ยมโดยช่วงห่างระหว่างตัวนำจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปประมาณ 3.0 - 3.7 เมตร จุดตัดของตัวนำทุกแห่งจะต้องเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้ากับอุปกรณ์ทั้งหมดบริเวณสถานี รวมถึงรั้วและโครงสร้างโลหะด้วย ผิวดินในบริเวณของสถานีไฟฟ้า นอกจากนี้ยังจะต้องใช้หินกรวดโรยทั่วบริเวณ เพื่อลดอันตรายจากแรงดันช่วงก้ำวของคนที่ทำงานในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย ในกรณีเกิดการลัดวงจรลงดินอย่างรุนแรง

3. ระบบรากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระบบรากสายดิน เป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก ทำหน้าที่กระจายกระแสฟ้าผ่าลงดินโดยไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินอันตราย รูปร่างและขนาดของระบบรากสายดินมีความสำคัญมากกว่าค่าความต้านทานของรากสายดิน อย่างไรก็ตามควรมีความต้านทานดินต่ำ

ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรใช้ระบบโครงสร้างรากสายดินแบบร่วมชุดเดียวและเหมาะสมสำหรับทุกวัตถุประสงค์ เช่น ระบบป้องกันฟ้าผ่า ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ ระบบสื่อสาร ถ้าระบบรากสายดินที่มีความจำเป็นต้องแยกออกจากกันเนื่องด้วยเหตุผลอื่น ต้องมีการต่อเข้าระบบร่วมโดยใช้การประสานให้ศักย์เท่ากัน การจัดระบบรากสายดินตามมาตรฐานป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้างมี 2 แบบ คือ (ว.ส.ท., 2546)

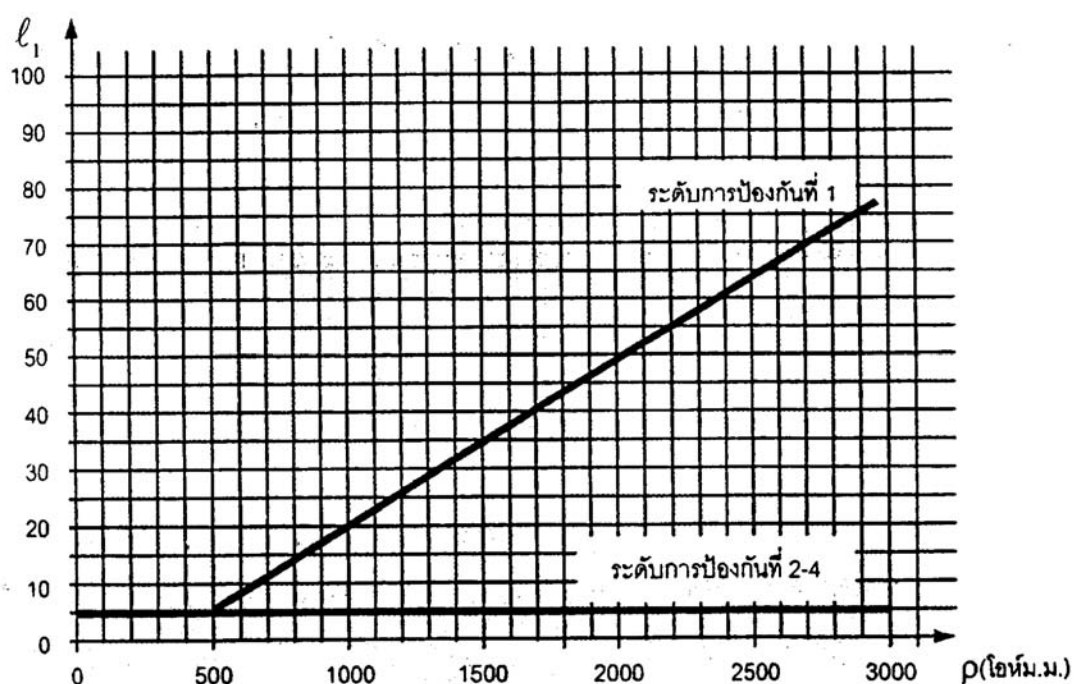
3.1 การจัดระบบรากสายดินแบบ ก.

การจัดระบบรากสายดินแบบ ก. การจัดระบบนี้ประกอบด้วยรากสายดินแนวรัศมีหรือแนวตั้ง ตัวนำลงดินแต่ละเส้นต้องต่อกับรากสายดินที่แยกอิสระอย่างน้อย 1 ชุด ซึ่งอาจจะเป็นรากสายดินแบบรัศมีหรือแนวตั้ง (หรือแนวเอียง) จำนวนรากสายดินต้องมีอย่างน้อย 2 ชุด โดยรากสายดินแต่ละชุดยาวอย่างน้อยดังนี้

- สำหรับรากสายดินแนวราบชนิดแนวรัศมียาว 4
- สำหรับรากสายดินแนวตั้งหรือแนวเอียงยาว 0.5 4

โดยที่ 4 คือ ความยาวอย่างน้อยของรากสายดินแนวรัศมีตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 28

รากสายดินแบบนี้ต้องมีมาตรการพิเศษ ถ้าพื้นที่ดังกล่าวเกี่ยวพันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์หรือสัตว์ ในดินที่ความต้านทานจำเพาะต่ำไม่ต้องพิจารณาความยาวต่ำสุด ถ้าสามารถทำให้ความต้านทานดินต่ำกว่า 10 โอห์ม



ภาพที่ 28 ความยาวต่ำสุด l_1 ของรากสายดินตามระดับการป้องกัน (ระดับการป้องกันที่ 2 ถึง 4 ไม่ขึ้นกับความต้านทานจำเพาะของดิน)

ที่มา: ว.ส.ท. (2546)

3.2 การจัดระบบรากสายดินแบบ ข.

การจัดระบบรากสายดินแบบ ข. ประกอบด้วย รากสายดินวงแหวน หรือรากสายดินฐานราก รัศมีเฉลี่ย r ของพื้นที่ที่รากสายดินวงแหวนนี้ล้อมรอบต้องไม่น้อยกว่า l_1

$$r \geq l_1 \quad (19)$$

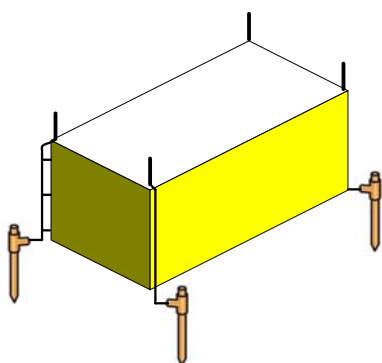
โดยที่ l_1 คือ ความยาวอย่างน้อยของรากสายดินวงแหวน หรือรากสายดินฐานราก ตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 28 ตามระดับการป้องกัน 1 และ 2 ถึง 4 ตามลำดับ ในทางปฏิบัติเมื่อค่า r มีค่าไม่ถึง l_1 ที่ต้องการ ต้องเพิ่มรากสายดินขึ้นโดยอาจใช้รากสายดินแนวดิ่งหรือแนวเอียง หรือ รากสายดินแนวรัศมีก็ได้ ซึ่งความยาวรากสายดินที่ต้องเพิ่มเป็นดังนี้

$$l_r = l_1 - r \quad (20)$$

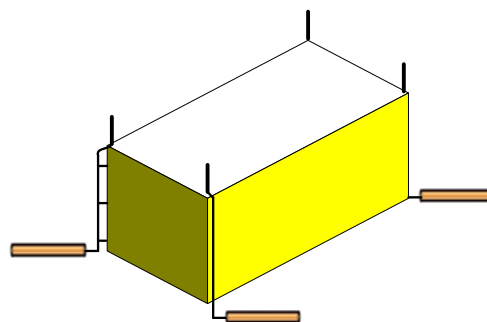
$$l_v = \frac{l_r}{2} \quad (21)$$

โดยที่ l_r คือ ความยาวรากสายดินแนวรัศมี (เมตร)
 l_v คือ ความยาวรากสายดินแนวตั้ง (เมตร)

ระบบรากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าสามารถใช้รากสายดินแนวตั้ง รากสายดินแนวรัศมี รากสายดินวงแหวนหรือรากสายดินฐานรากก็ได้ รากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าแสดงในภาพที่ 29 และภาพที่ 30 มีใช้กันทุกแบบ ถ้าเป็นอาคารขนาดเล็กมักใช้รากสายดินแนวตั้ง สำหรับพื้นที่ที่ไม่สามารถใช้รากสายดินแนวตั้งได้ จะใช้รากสายดินแนวรัศมี ส่วนรากสายดินวงแหวนมักใช้กับอาคารขนาดใหญ่ เพราะนอกจากทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำแล้ว ยังทำหน้าที่ลดแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) ได้ และมักนิยมใช้ร่วมกับรากสายดินแนวตั้ง ส่วนรากสายดินฐานรากเริ่มนิยมใช้มากขึ้นเพราะไม่ต้องกังวลกับความต้านทานดินภายนอกอาคารแต่อาจต้องเดินรากสายดินวงแหวนที่ภายนอกสำหรับพื้นที่ที่พื้นดินเป็นกรวดเพื่อลดแรงดันช่วงก้าว (ชำนานูและเทพกัญญา, 2549)

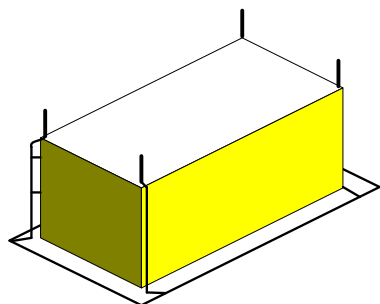


(ก) รากสายดินแนวตั้ง

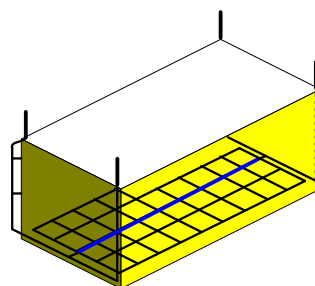


(ข) รากสายดินแนวรัศมี

ภาพที่ 29 การจัดระบบรากสายดินแบบ ก.



(ก) รากสายดินวงแหวน



(ข) รากสายดินฐานราก

ภาพที่ 30 การจัดระบบรากสายดินแบบ ข.

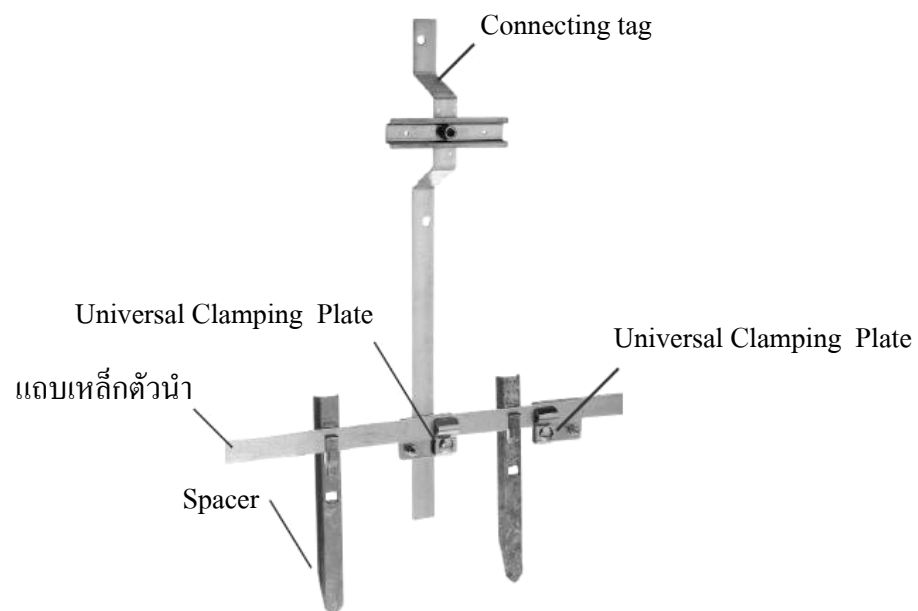
รากสายดินฐานราก

รากสายดินฐานราก คือ ส่วนของตัวนำโลหะที่ฝังอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างอาคาร คอนกรีตที่ฝังโดยตรงในพื้นดินมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติและสามารถพิจารณาเป็นสารตัวนำ ด้วยสภาพการนำไฟฟ้าที่คล้ายกับดิน และเนื่องจากพื้นที่ขนาดใหญ่ของรากสายดินชนิดนี้ สามารถได้รับความต้านทานดินที่ต่ำ นอกจากนี้คอนกรีตจะป้องกันตัวนำโลหะต่อการกัดกร่อนและเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไม่ต้องการการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มเติมใดๆ ปัจจุบันรากสายดินฐานรากได้รับการแนะนำว่าเป็นการแก้ปัญหาสำหรับการต่อลงดินของอาคารส่วนใหญ่ รูปแบบของรากสายดินฐานรากมี 2 รูปแบบ คือ

- รากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม
- รากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่มีเหล็กเสริม

1. รากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม

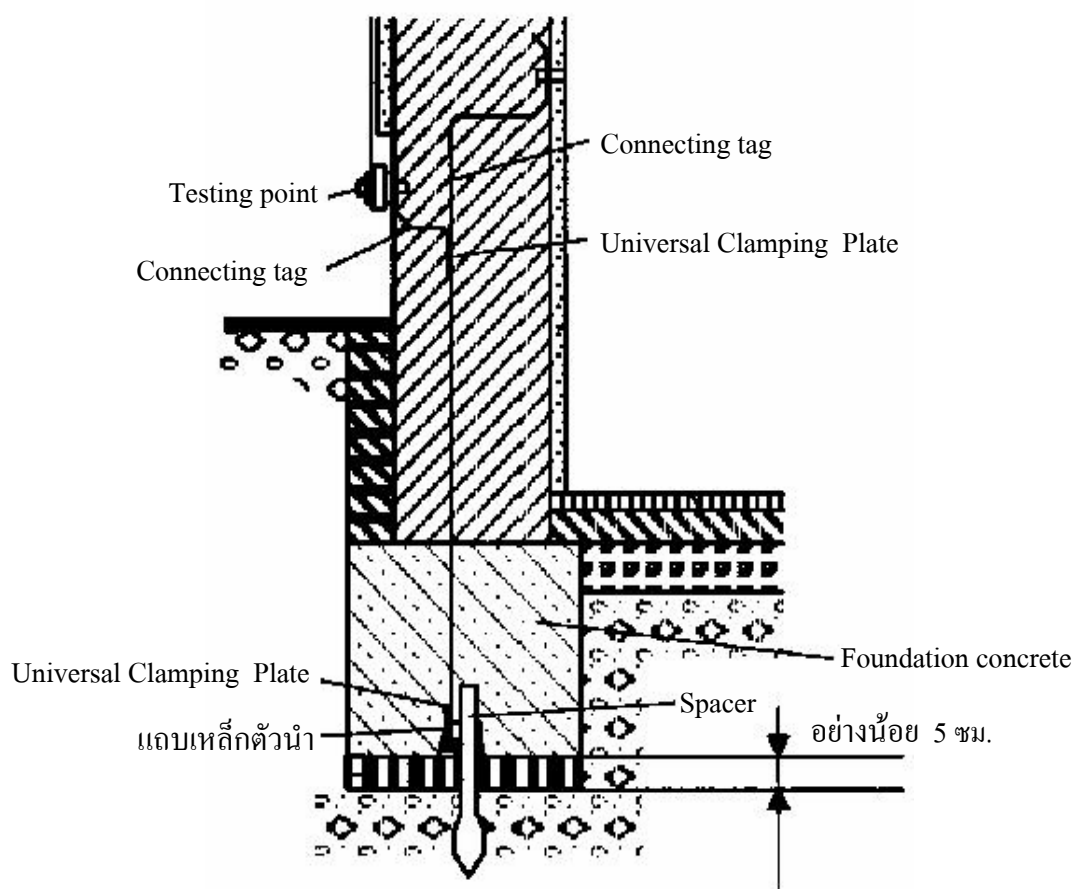
เมื่อโครงสร้างคอนกรีตไม่มีเหล็กเสริม หรือเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าที่ต้องการ จะต้องใช้ตัวนำที่ออกแบบโดยเฉพาะวางในโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนปิด ตัวนำที่ออกแบบโดยเฉพาะประกอบด้วย แถบเหล็กขนาด 30 x 3 มิลลิเมตร หรือแท่งเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อยที่สุด 10 มิลลิเมตร อาจใช้เหล็กเคลือบด้วยสังกะสี แต่ไม่จำเป็นถ้าชั้นของคอนกรีตครอบคลุมรากสายดินมากกว่า 50 มิลลิเมตร เนื่องจากคอนกรีตทำให้แน่ใจว่าเพียงพอต่อการป้องกันการกัดกร่อน ตัวนำที่ออกแบบโดยเฉพาะนี้ต้องอยู่ห่างจากส่วนล่างสุดของโครงสร้างขึ้นมาประมาณ 50 มิลลิเมตร เพื่อให้ตัวนำถูกปิดล้อมด้วยคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี เพื่อป้องกันตัวนำเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างเทคอนกรีต จะต้องยึดตัวนำด้วย Special Spacers โดยวางที่ระยะห่างที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อมต่อของตัวนำเป็นรูปวงแหวนปิดรอบ ๆ อาคารใช้ Universal Clamping Plate



ภาพที่ 31 ตัวอย่างการใช้ตัวนำโดยเฉพาะเป็นรากสายดินฐานราก



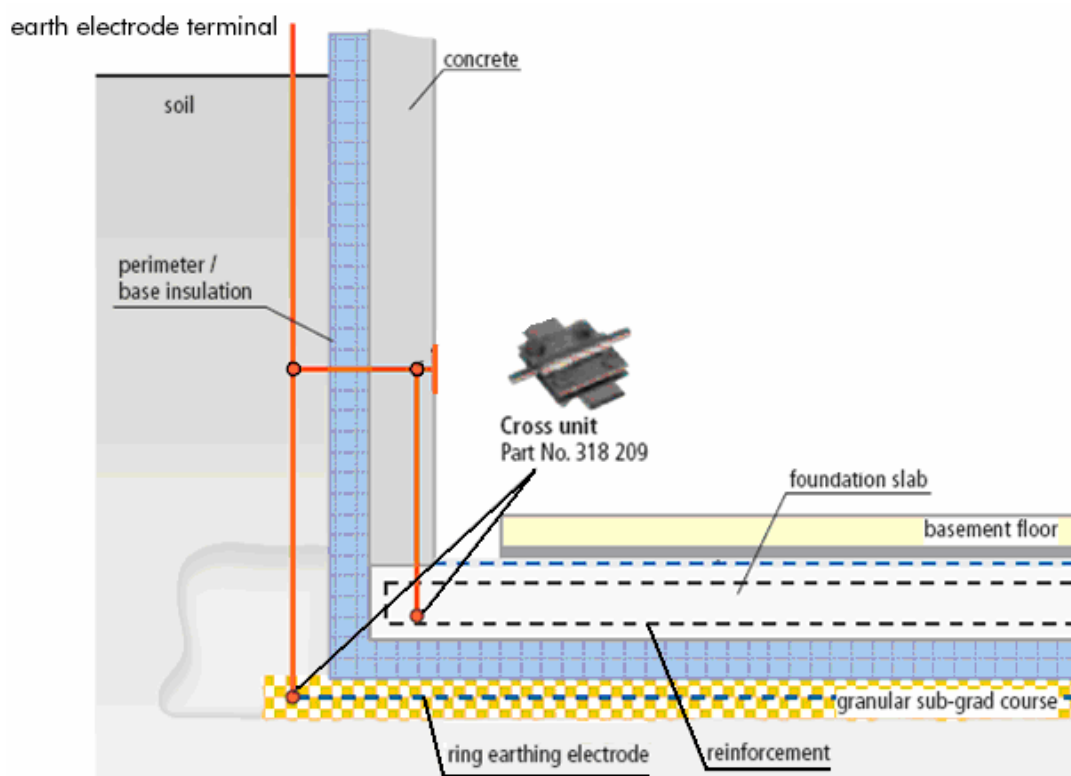
ภาพที่ 32 การยึดตัวนำด้วย Special Spacers ก่อนการเทคอนกรีต



ภาพที่ 33 การวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่ไม่มีเหล็กเสริม

2. รากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่มีเหล็กเสริม

ในโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก รากสายดินจะวางอยู่บนชั้นด้าที่สุดของเหล็กเสริมตะแกรง (Wire-Mesh Reinforcement) เพื่อให้แน่ใจว่าการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับรากสายดินเพียงพอ รากสายดินควรยึดให้แน่นเข้ากับเหล็กเสริมตะแกรงด้วยลวดที่เป็นสแตนเลส (Wire Stand) ที่ระยะไม่เกิน 2 เมตรตลอดความยาวของรากสายดิน ไม่จำเป็นต้องทำให้การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่ดีในแต่ละจุดเพราะว่าการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าหลักผ่านคอนกรีต ถ้าโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่แยกออกเป็นส่วน ๆ การเชื่อมต่อแต่ละส่วนเข้าด้วยกันจะใช้ข้อต่อขยาย (Expansion Joints) รากสายดินของแต่ละส่วนควรเชื่อมต่อกันด้วยการกัลวานไนซ์ การเชื่อมต่อเหล่านี้ต้องมีความยืดหยุ่นและต้องอยู่ในตำแหน่งที่สามารถเข้าถึงสำหรับการทดสอบและการบำรุงรักษา

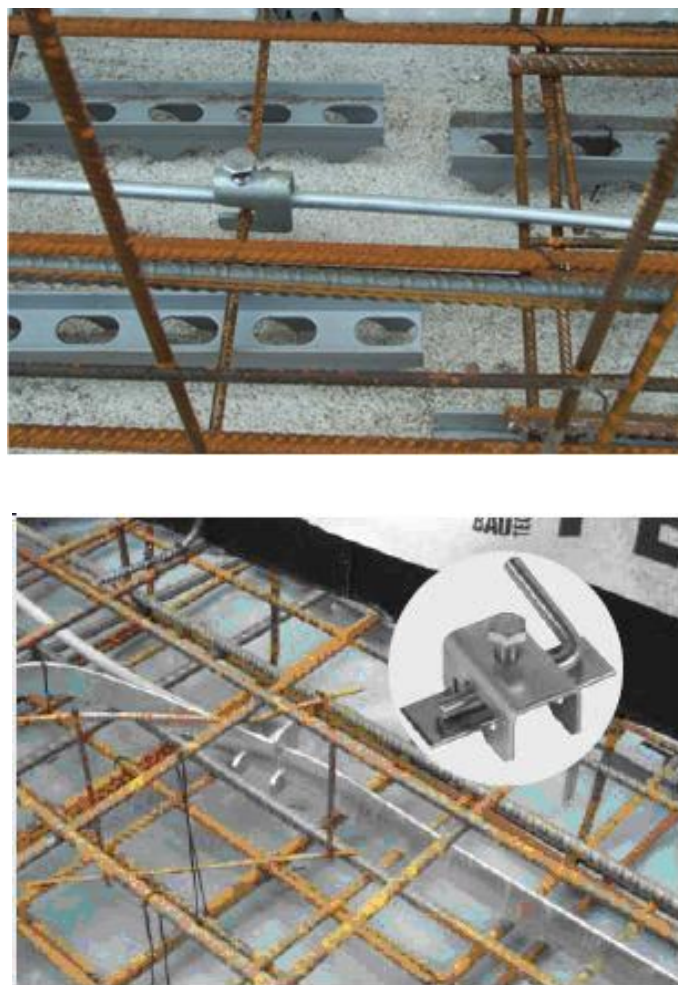


ภาพที่ 34 การวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ส่วนปลายของรากสายดินฐานรากควรจะมีขนาดยาวอย่างน้อยที่สุด 150 เซนติเมตร เหนือระดับพื้น ควรวางให้อยู่ใกล้ปลายรากสายดินหลักของสิ่งปลูกสร้างที่ติดตั้งเท่าที่จะเป็นไปได้ การเชื่อมต่อรากสายดินฐานรากของการป้องกันฟ้าผ่าควรวางภายนอกอาคาร



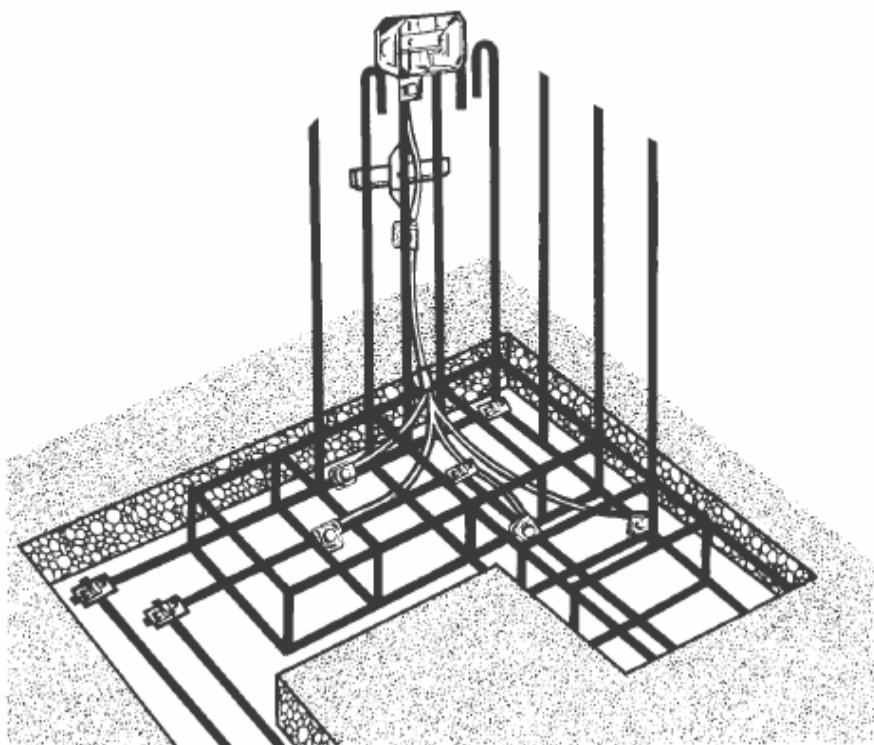
ภาพที่ 35 ตัวอย่างการวางรากสายดินฐานรากในโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 36 การยึดตัวนำกับเหล็กเสริม

เหล็กเสริมในโครงสร้างสามารถใช้เป็นรากสายดิน เมื่อเหล็กเสริมในโครงสร้างมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีและเชื่อมต่อเป็นรูปวงแหวนรอบ ๆ สิ่งปลูกสร้าง เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรขึ้นไปใช้เพียง 1 เส้น ก็เพียงพอ ถ้าเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรและไม่น้อยกว่า 8 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่หน้าตัด 72 ตารางมิลลิเมตรตามที่ต้องการ เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรอย่างน้อย 2 เส้น ต้องเชื่อมต่อกันเป็นวงแหวนรอบสิ่งปลูกสร้าง เมื่อมีความจำเป็นต้องเชื่อมเหล็กเสริมเข้าด้วยกัน อุปกรณ์ที่เหมาะสม คือ Universal Clamping Plate เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถดัดแปลงได้กับทุกตำแหน่ง เป็นอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมต่อที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ดี สำหรับรากสายดินฐานรากที่เชื่อมต่อกันโดยใช้ลวดผูก (Binding Wire) ยังไม่ได้รับการพิสูจน์ยืนยันว่าให้ผลที่ดี (Woertz, n.d.)

Universal Clamping Plate ที่เป็นตัวเชื่อมต่อที่มีการนำไฟฟ้าที่ดีกับแถบเหล็ก (Steel Strip) ขนาด 25 x 3 มิลลิเมตร ถึง 40 x 3 มิลลิเมตร และเหล็กเสริมของโครงสร้างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ถึง 25 มิลลิเมตร



ภาพที่ 37 ตัวอย่างการใช้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเป็นรากสายดินฐานราก



ภาพที่ 38 อุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเหล็กเสริมในโครงสร้าง Universal Clamping Plate



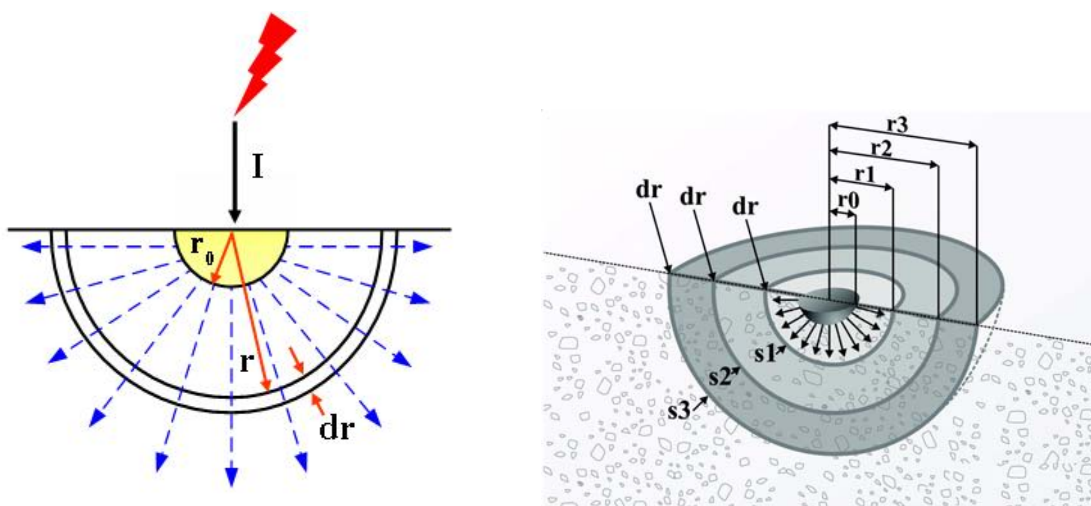
ภาพที่ 39 ตัวอย่างการใช้ Universal Clamping Plate

เหล็กเสริมที่ใช้สำหรับตอมลงดินต้องวางอยู่ในตำแหน่งด้านนอกของโครงสร้างเสมอ เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานดินน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ถ้าสิ่งปลูกสร้างมีแอ่งหรือร่องผ่าน จะต้องทำให้แน่ใจว่ารากสายดินฐานรากอยู่ในตำแหน่งด้านนอกของแอ่งหรือร่อง

การคำนวณความต้านทานดิน

ความต้านทานไฟฟ้าของดินส่วนต่าง ๆ ในโลกเป็นตามกฎเกณฑ์ของความต้านทานจำเพาะ และรูปทรงของรากลสายดิน กล่าวคือ ความต้านทานไฟฟ้าของดินเกิดจากสภาพที่เป็นผลรวมจากเนื้อดินทุกชนิดที่มีอยู่ต่อเชื่อมกันทั้งหมด ความต้านทานดินสามารถประมาณได้โดยวิธีการคำนวณรูปแบบหนึ่งของการคำนวณที่ง่ายคือแบบจำลองรากลสายดินครึ่งทรงกลม

แบบจำลองพื้นฐานของการจัดวางระบบรากลสายดินเพื่อแสดงพื้นฐานคุณสมบัติทางไฟฟ้า พิจารณารากลสายดินรูปครึ่งทรงกลมที่อยู่ในดิน กระแสไหลผ่านรากลสายดินและกระจายลงดิน ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็น ρ สมมติการไหลของกระแสเป็นแนวรัศมี ผิวของครึ่งทรงกลมเหมือนพื้นที่หน้าตัดครึ่งทรงกลม dr ของดิน กระแสที่ไหลผ่านรากลสายดินลงดินนั้นจะไหลออกไปทุกทิศทางและมีเส้นศักย์เท่ากัน (Equipotential Line) ดังจากกับทิศทางการไหลของกระแส ภายใต้สภาวะเหล่านี้ความต้านทานครึ่งทรงกลมที่หนา dr และรัศมี r จากจุดกึ่งกลางของครึ่งทรงกลมจะเป็นดังนี้ (Henryk and Antoni , 2004)



ภาพที่ 40 การไหลของกระแสจากรากลสายดินลงดิน

$$dR = \frac{\rho}{2\pi r^2} dr \quad (22)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{r^2} dr \quad (23)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{1}{\infty} \right] \quad (24)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (25)$$

โดยที่ R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
r_0	คือ	รัศมีของรอกสายดิน (เมตร)

การคำนวณหาความต้านทานของรอกสายดิน สามารถทำได้โดยตรงตามความเป็นจริง ถ้ารอกสายดินเป็นทรงกลม แท่งหลักดิน วงแหวน และแถบโลหะ แต่ถ้าเป็นรอกสายดินรูปแบบอื่น ๆ การคำนวณจะยุ่งยาก สามารถหาค่าได้โดยการสร้างแบบจำลอง (Model) หรือทำการทดสอบจากการจำลอง กล่าวคือ สร้างแบบจำลองของรอกสายดินให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่อาจจะทำการย่อส่วนลงและใช้น้ำแทนดิน การใช้น้ำแทนดินจะสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานจำเพาะของดินได้ เสร็จแล้วทำการวัดสนามไฟฟ้าในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแบบจำลองรอกสายดินดังกล่าว

ถ้าดินมีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ (Uniform Resistivity) ค่าความต้านทานดินอาจคำนวณได้ตามรูปแบบรอกสายดินต่าง ๆ ดังนี้

1. แท่งหลักดิน (Ground Rod)

แท่งหลักดินเป็นแท่งโลหะยาวหรือท่อที่วางแนวตั้งในดิน เพื่อให้ผ่านชั้นดินที่ลึก เนื่องจากความชื้นจะสูงในชั้นดินที่ลึก แท่งหลักดินจะสัมผัสกับชั้นดินที่ลึกทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินต่ำลง และเป็นรอกสายดินที่ต้องการพื้นที่การติดตั้งน้อย ดังนั้นแท่งหลักดินจะได้รับการแนะนำให้ใช้ในพื้นที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นหรือผิวดินปกคลุมด้วยแอสฟัลท์ (Asphalt) หรือคอนกรีต

แท่งหลักดินมีใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ ระบบโทรศัพท์ ส่วนสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงหรือระบบสื่อสาร ใช้แท่งหลักดินหลายแท่งวางห่างกันอย่างเหมาะสมและต่อขนานกัน สำหรับระบบต่อลงดินที่ยู่ยกขึ้นไปอาจใช้ทั้งแท่งหลักดินและสายตัวนำในแนวระดับร่วมกัน

สมการสำหรับแท่งหลักดินเดี่ยวที่แพร่หลายที่สุดเป็นของศาสตราจารย์ H.R. Dwight แห่ง MIT มีรูปแบบดังนี้

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{r} - 1 \right] \quad (26)$$

โดยที่

R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
L	คือ	ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
r	คือ	รัศมีของแท่งหลักดิน (เมตร)
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

พิจารณาจากสมการของแท่งหลักดินเดี่ยวพบว่าขนาดและความยาวของแท่งหลักดินมีผลต่อความต้านทานดิน

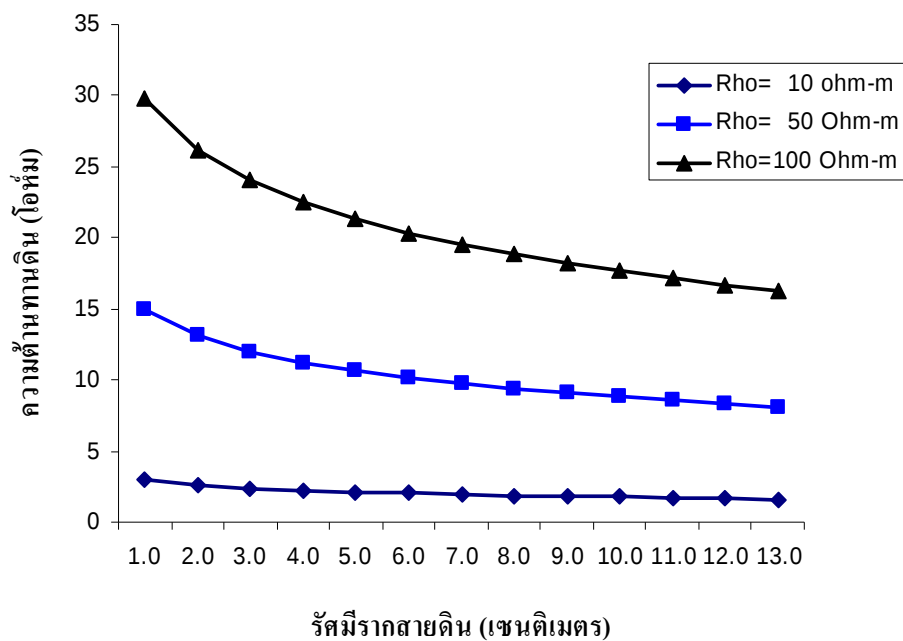
ขนาด

เมื่อพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน การเพิ่มขนาดของแท่งหลักดินจะไม่ทำให้ความต้านทานดินลดลงมากนัก การเพิ่มขนาดแท่งหลักดินขึ้น 2 เท่า สามารถลดความต้านทานลงได้เพียง 10% เท่านั้น

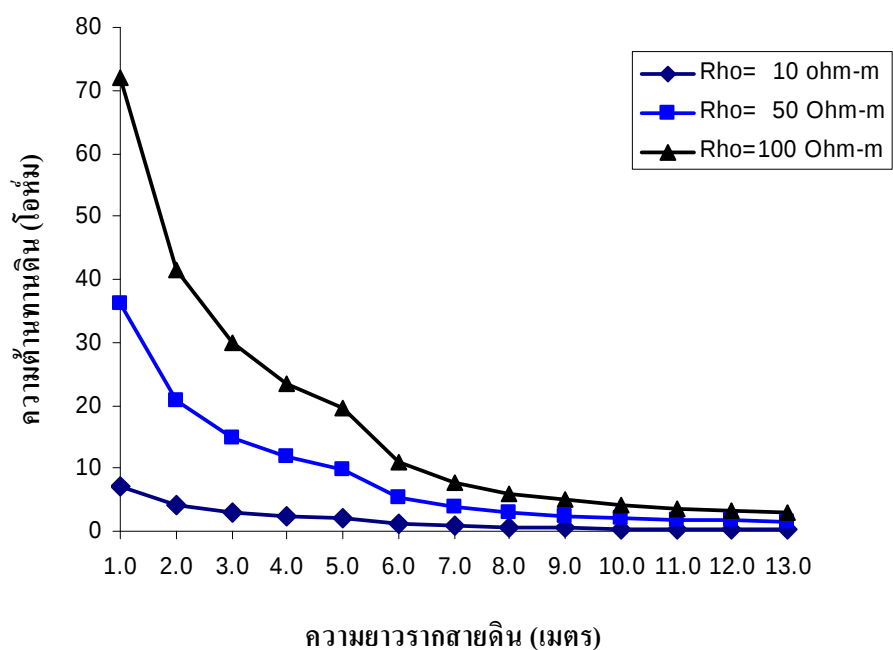
ความลึก

เมื่อตอกแท่งหลักดินลงลึกกว่าเดิมจะลดความต้านทานของดินโดยรวมลงได้มาก โดยปกติเมื่อเพิ่มความยาวของแท่งหลักดินขึ้น 2 เท่า จะลดความต้านทานดินลงได้ถึง 40% ดังภาพที่ 42 มาตรฐาน NEC แนะนำให้ปักแท่งหลักดินลึกอย่างน้อย 8 ฟุต (2.4 เมตร) ปกตินิยมปักที่ 10 ฟุต (3 เมตร) เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน NEC กำหนด สำหรับแท่งหลักดินกลมขนาดที่เหมาะสม

อย่างน้อยต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว (1.6 ซม.) และแท่งหลักดินทองแดงต้องอย่างน้อย 1/2 นิ้ว (1.27 ซม.) (แท่งหลักดินโลหะเคลือบทองแดงให้ใช้ค่าเดียวกัน)



ภาพที่ 41 ผลของขนาดแท่งหลักดินที่มีต่อความต้านทานดิน



ภาพที่ 42 ผลของความยาวแท่งหลักดินที่มีต่อความต้านทานดิน

หากต้องการใช้ความลึก 10 ฟุตเป็นมาตรฐาน ให้พิจารณาเพิ่ม-ลดขนาดแท่งหลักดินตามชนิดของดิน ดังนี้

1/2 นิ้ว สำหรับดินทั่วไป

5/8 นิ้ว สำหรับดินและ

3/4 นิ้ว สำหรับดินแข็ง

ความต้านทานดินแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของแท่งหลักดิน ภาพที่ 42 แสดงผลของความยาวแท่งหลักดินกับความต้านทานดินฝัง ในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอค่าต่าง ๆ กัน ค่าความต้านทานดินลดลงอย่างมากในช่วงแรกเมื่อความยาวแท่งหลักดินมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0 ถึง 2 เมตร หลังจากความยาวแท่งหลักดินยาวตั้งแต่ 2 – 3 เมตรขึ้นไป ความต้านทานดินไม่ได้ลดลงมากและในช่วงความยาวดังกล่าว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดินที่ใหญ่กว่า 1.25 ซม. ก็ไม่ได้ทำให้ความต้านทานดินลดลงมาก

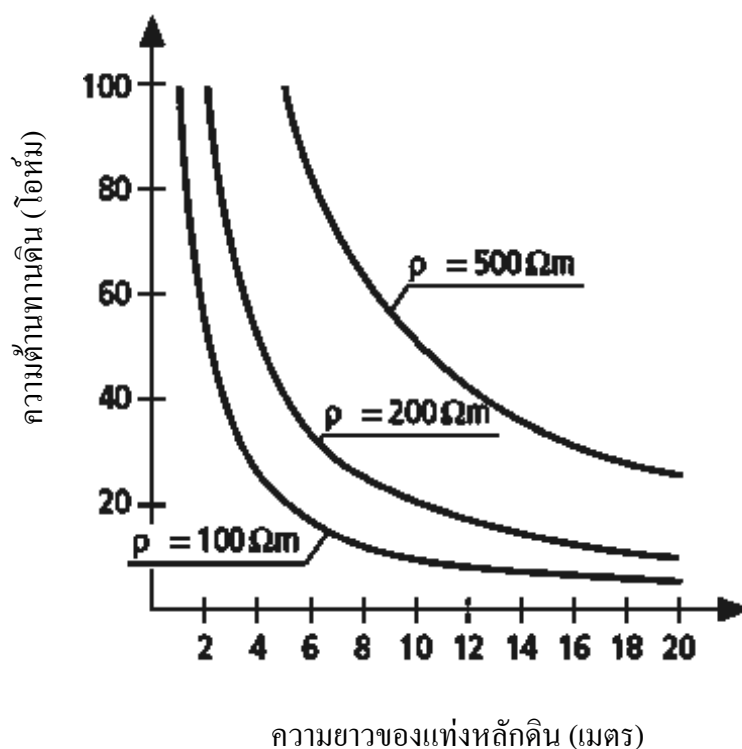
DEHN (n.d.) ความต้านทานดินของรากสายดินแบบแท่งหลักดิน คำนวณโดยใช้สมการที่ (27) และความต้านทานดินโดยประมาณ คำนวณโดยสมการที่ 28

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{2L}{d} \right] \quad (27)$$

$$R = \frac{\rho}{L} \quad (28)$$

โดยที่

R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
L	คือ	ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (เมตร)
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)



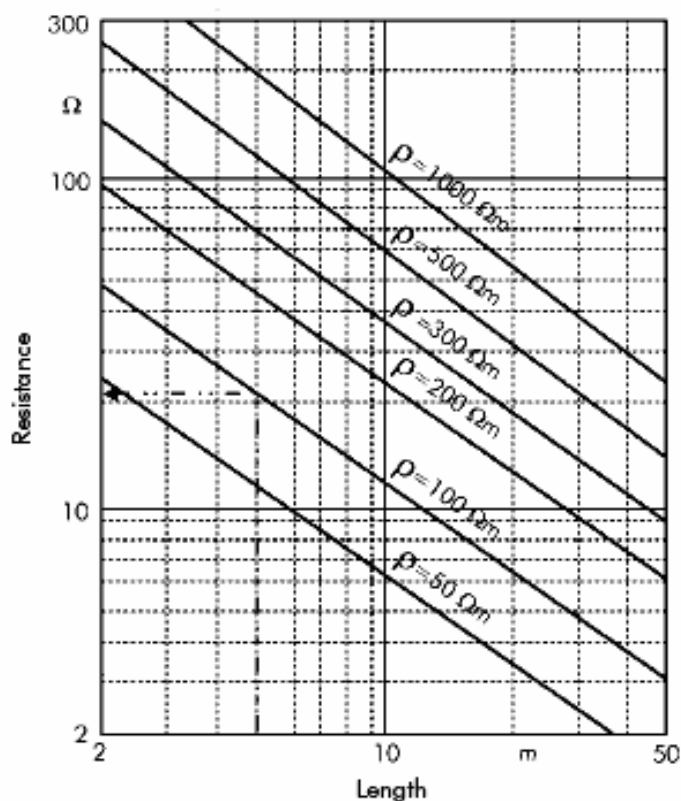
ภาพที่ 43 ความต้านทานดินของแท่งหลักดินเป็นฟังก์ชันของความยาวรากสายดิน

ความต้านทานดินของแท่งหลักดิน สามารถพิจารณาความสัมพันธ์โดยประมาณตามสมการที่ (29) และภาพที่ 44 แสดงความต้านทานดินกับความยาวของแท่งหลักดิน สำหรับรากสายดินในดินที่มีความต้านทานจำเพาะต่าง ๆ (Henryk and Antoni, 2004)

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{4L^2}{r^2} \quad (29)$$

โดยที่

R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
L	คือ	ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
r	คือ	รัศมีของรากสายดิน (เมตร)
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)



ภาพที่ 44 ความต้านทานดินของแท่งหลักดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 เมตร ยาว 3 เมตร
ในดินเนื้อเคียวที่มีความต้านทานจำเพาะต่าง ๆ

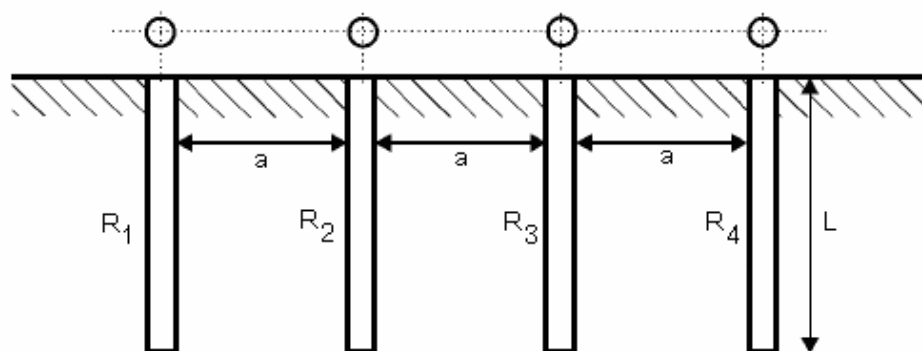
ที่มา: Henryk and Antoni (2004)

ความต้านทานแท่งหลักดินหลายชุดขนานกัน

เมื่อใช้แท่งหลักดินเดี่ยวแล้วความต้านทานดินที่ได้ยังสูงเกินค่าที่กำหนดต้องใช้แท่งหลักดินหลายแท่งต่อขนานกัน การต่อขนานกันของแท่งหลักดินมีหลายรูปแบบ กรณีแท่งหลักดินจำนวน n แท่ง ติดตั้งเป็นแนวตรงโดยมีระยะห่างระหว่างแต่ละแท่งสม่ำเสมอ ความต้านทานดินของแท่งหลักดินหลายแท่งที่ขนานกัน คือ

$$\frac{1}{R} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right) k \quad (30)$$

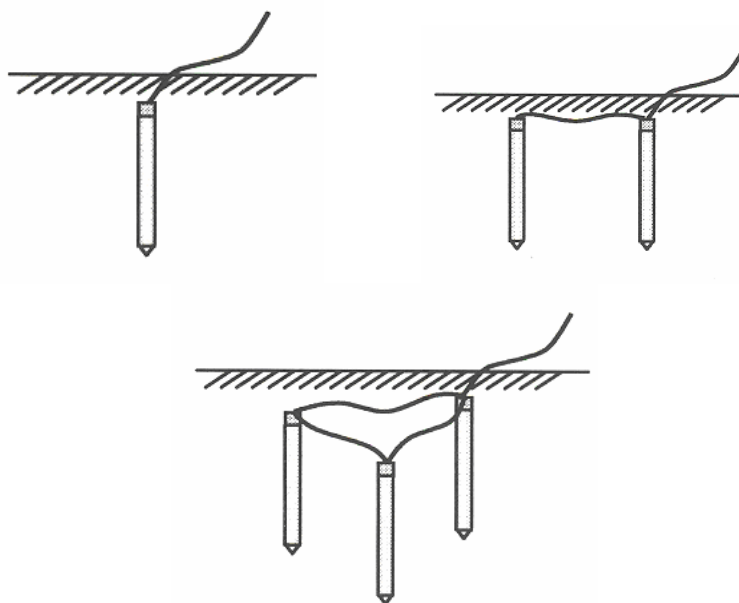
เมื่อ $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ คือ ความต้านทานดินที่คำนวณได้สำหรับแท่งหลักดินแต่ละแท่ง สมมติว่าแท่งหลักดินแต่ละแท่งไม่มีอิทธิพลต่อการปรากฏของแท่งหลักดินอื่น ๆ และ k เรียกว่า แฟกเตอร์ filling หรือ duty และ $k \geq 1$



ภาพที่ 45 แท่งหลักดินที่วางขนานกัน

ค่าของ k มากกว่า 1 เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าร่วมที่สร้างขึ้นโดยแท่งหลักดินที่อยู่ติดกัน อิทธิพลของกระแสที่ไหลจากแท่งหลักดินแต่ละแท่งทำให้สนามไฟฟ้าผิดรูป (Deform) และความหนาแน่นกระแสในผิวดินจะเปลี่ยนแปลง ค่าแฟกเตอร์ k ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแท่งหลักดินที่ขนานกัน สำหรับการจัดวางแท่งหลักดินแสดงในภาพที่ 45 ค่าของแฟกเตอร์ k คือ สำหรับ $a \geq 2L$, $k = 1.25$ และสำหรับ $a \geq 4L$, $k = 1$

แท่งหลักดินที่ปักลงในดินหลายชุดขนานกัน โดยทั่วไปจะปักให้มีระยะห่างของแท่งหลักดินเท่ากับ $1 - 1.5$ เท่าของความยาวแท่งหลักดิน เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเรื่องคับปลิง (Coupling) ค่าความต้านทานของแท่งหลักดินหลายชุดขนานกันเป็นไปตามตารางที่ 6 โดยแท่งหลักดินที่ขนานกันเป็นจำนวนมากนั้นจะวางเรียงเป็นแนวยาวหรือล้อมรอบเป็นวงกลมก็ได้ ตัวคูณความต้านทานแท่งหลักดินตามตารางที่ 6 มีประโยชน์ คือ ทำให้ทราบหรือคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่า กรณีมีแท่งหลักดินหนึ่งแท่งซึ่งมีค่าความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งแล้ว ถ้าต้องการเพิ่มแท่งหลักดินมากขึ้นค่าความต้านทานที่ได้จะเป็นอย่างไร (ชำนาญและเทพกัญญา, 2549)



ภาพที่ 46 แท่งหลักดินวางแบบชุดเดียวหรือหลายชุดขนานกัน

ตารางที่ 6 ค่าตัวคูณความต้านทานแท่งหลักดินชุดเดียว

จำนวนแท่งหลักดินขนานกัน	ค่าตัวคูณ (k)
2	0.60
3	0.40
5	0.25
10	0.13

ที่มา: ชำนาญและเทพกัญญา (2549)

แท่งหลักดินขนานกันจะให้ความต้านทานดินต่ำกว่าแท่งหลักดินเดี่ยว การเพิ่มแท่งหลักดินแท่งที่สองไม่ได้ทำให้ความต้านทานดินลดลงครึ่งหนึ่งของความต้านทานดินแท่งหลักดินเดี่ยว ถ้าแท่งหลักดินหลายแท่งอยู่ห่างกันไม่เพียงพอ กฎที่มีประโยชน์คือระบบต่อลงดินของแท่งหลักดิน 2 – 24 แท่งที่วางห่างกันเท่ากับความยาวของแท่งหลักดินในแนวเส้นตรง รูปสามเหลี่ยม รูปวงกลม หรือรูปสี่เหลี่ยม จะให้ค่าความต้านทานดินเท่ากับค่าความต้านทานดินของแท่งหลักดินเดี่ยวหารด้วยจำนวนของแท่งดินและคูณด้วยแฟกเตอร์ F ที่ได้จากตารางที่ 7 (IEEE 142, 1982)

ตารางที่ 7 ค่าตัวคูณความต้านทานแท่งหลักดินชุดเดียว

จำนวนแท่งหลักดินขนานกัน	ค่าตัวคูณ (F)
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

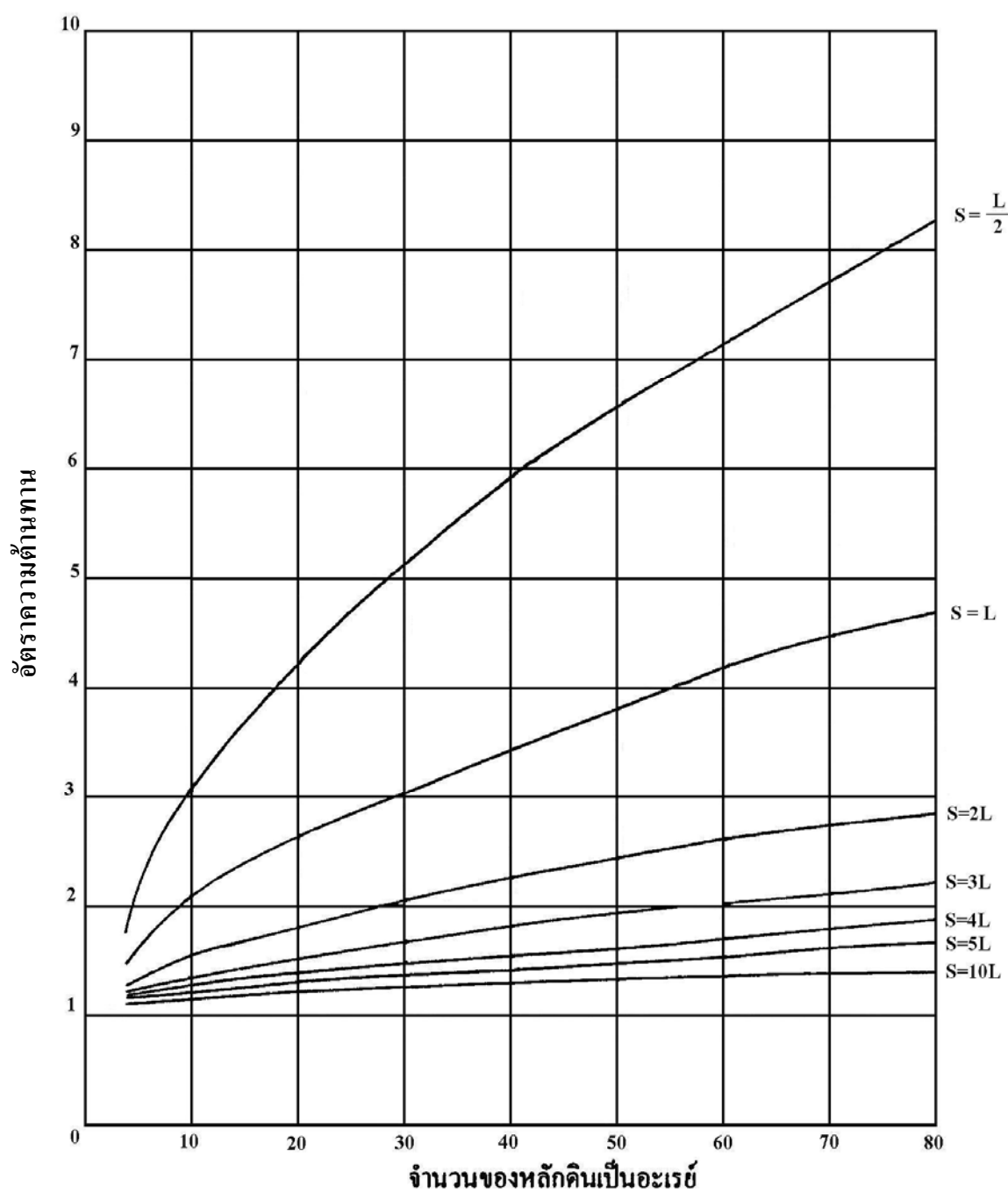
ที่มา: มาตรฐาน IEEE 142 (1982)

ความต้านทานดินของแท่งหลักดินที่ขนานกันวางเรียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากับ ความต้านทานดินของแท่งหลักดินเดี่ยวหารด้วยจำนวนแท่งหลักดินทั้งหมด และคูณด้วยตัวคูณความต้านทาน (วิวัฒน์, 2548)

$$R = \frac{R_{\text{หนึ่งหลัก}}}{N} \bullet k \quad (31)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทานดินของแท่งหลักดินที่ขนานกัน (โอห์ม)
 $R_{\text{หนึ่งหลัก}}$ คือ ความต้านทานดินของแท่งหลักดินเดี่ยว (โอห์ม)
 k คือ ตัวคูณความต้านทาน

ค่าของ k สำหรับแท่งหลักดินที่วางเรียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยระยะห่างที่เท่ากันตั้งแต่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวของแท่งหลักดินถึง 10 เท่าของความยาวแท่งหลักดินแสดงในภาพที่ 45 เมื่อ S คือระยะห่างของแท่งหลักดินที่อยู่ติดกันและ L คือ ความยาวของแท่งหลักดิน



ภาพที่ 47 ตัวคูณความต้านทานของแท่งหลักดินที่ขนานกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ที่มา: วิวัฒน์ (2548)

2. รากสายดินแนวนรัศมี

รากสายดินที่มีผิวอย่างง่าย คือ แท่งโลหะ (Metal Rods) แถบโลหะ (Strip) หรือท่อที่วางแนวนอนใต้ผิวดินที่ความลึกที่กำหนด (t) โดยปกติความยาวของรากสายดิน (L) มากกว่าความลึกตามข้อสมมตินี้ ความต้านทานดินของท่อธรรมดาที่วางในดิน สามารถคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{td} \quad (32)$$

เมื่อ	R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
	L	คือ	ความยาวของรากสายดิน (เมตร)
	d	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากสายดิน (เมตร)
	t	คือ	ระดับความลึกที่ฝังดิน (เมตร)

โดยปกติรากสายดินแนวนอน ทำจากแถบตัวนำ (Strip) ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม กว้าง 30 - 40 มิลลิเมตร และหนา 4 - 5 มิลลิเมตร กรณีนี้เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลประสิทธิภาพ d_e คำนวณได้จาก

$$d_e = \frac{2b}{\pi} \quad (33)$$

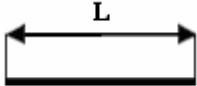
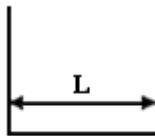
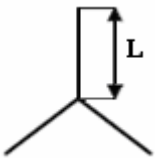
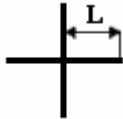
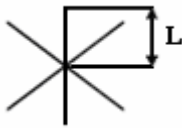
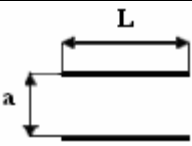
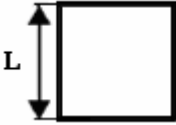
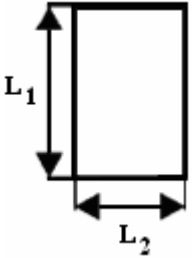
เมื่อ b คือ ความกว้างของแถบโลหะที่เป็นรากสายดิน (เมตร)

บางบทความแนะนำว่า $d_e = b/2$ ดังนั้นความต้านทานของโครงสร้างต่าง ๆ ของรากสายดินอย่างง่ายที่วางแนวนอน สามารถคำนวณโดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_t} \ln \frac{BL^2}{td_e} \quad (34)$$

เมื่อ	B	คือ	แฟกเตอร์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของรากสายดิน
	L_t	คือ	ผลรวมของความยาวของรากสายดินทั้งหมด (เมตร)

ตารางที่ 8 ค่าของแฟกเตอร์ B สำหรับรูปแบบของรากสายดินต่าง ๆ

Earth electrode		Factor B
Name	Horizontal projection	
Line		1
Two – arm , square		1.46
Three-arm , symmetrical		2.38
Four-arm , symmetrical		8.45
Six-arm , symmetrical		192
Two-arm , parallel		$\frac{L^2}{4a^2}$
Square		5.53
Rectangle , with various relations L_1/L_2 (1.5 ; 2 ; 3 ; 4)		1.5 5.81
		2 6.42
		3 8.17
		4 10.4

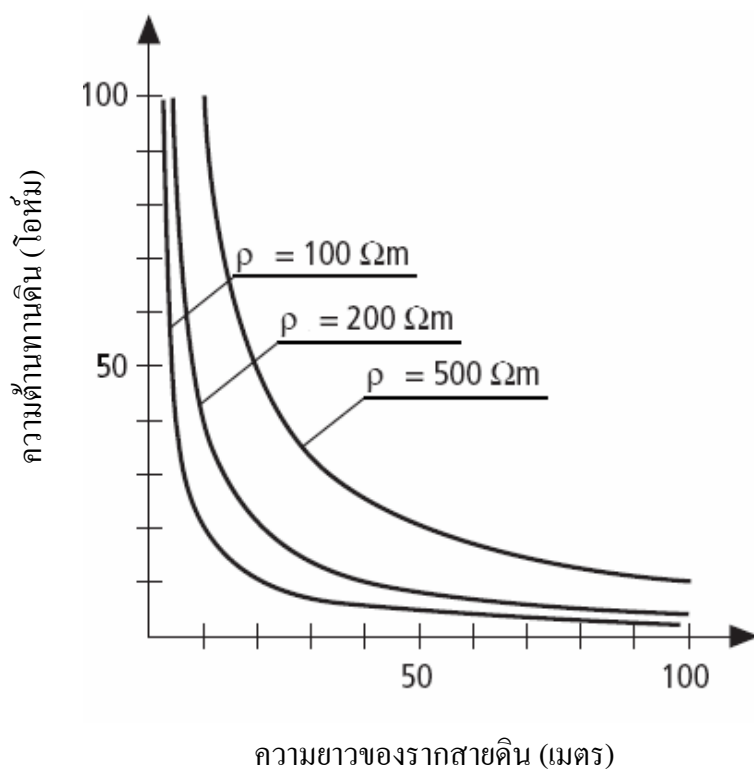
ที่มา: Henryk and Antoni (2004)

DEHN (n.d.) รากสายดินที่วางตามผิวดิน โดยทั่วไปฝังในแนวนอนในพื้นดินที่มีความลึก 0.5 – 1 เมตรจากชั้นของผิวดินที่ครอบคลุมรากสายดิน ความต้านทานดินของรากสายดินสามารถคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad (35)$$

เมื่อ	R	คือ	ความต้านทานดิน (โอห์ม)
	ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
	L	คือ	ความยาวของรากสายดิน (เมตร)
	d	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากสายดิน (เมตร)

จากสมการรากสายดินแนวนอน ความต้านทานดินจะเป็นฟังก์ชันของความยาวของรากสายดิน



ภาพที่ 48 ความต้านทานดินของรากสายดินแนวนอนเป็นฟังก์ชันของความยาวรากสายดิน

สำรวจ (2528) รากสายดินแท่งแบนฝังแนวนอน รากสายดินแท่งแบนมักใช้ร่วมกับรากสายดินแท่งกลมในกรณีที่ดินมีความต้านทานจำเพาะสูง โดยทั่วไปจะฝังแนวนอนลึกจากผิวดินลงไปประมาณ 0.5 ถึง 1 เมตร ความต้านทานของรากสายดิน เมื่อ $h < L/4$ คำนวณได้จาก

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{2L}{d_0} + \ln \frac{L}{2h} \right] \quad (36)$$

โดยที่	L	คือ	ความยาวของรากสายดินที่วางแนวนอน (เมตร)
	h	คือ	ความลึกของรากสายดินที่ฝังในดิน (เมตร)
	d_0	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลาง กรณีเป็นรากสายดินแท่งกลม (เมตร)
หรือ	d_0	คือ	$\sqrt{ab}$ กรณีเป็นรากสายดินแท่งแบน
	a	คือ	ความหนาของรากสายดินแท่งแบน (เมตร)
	b	คือ	ความกว้างของรากสายดินแท่งแบน (เมตร)

ถ้าฝังลึกมาก ๆ คือ $h \gg L$ ความต้านทานดินจะเป็น

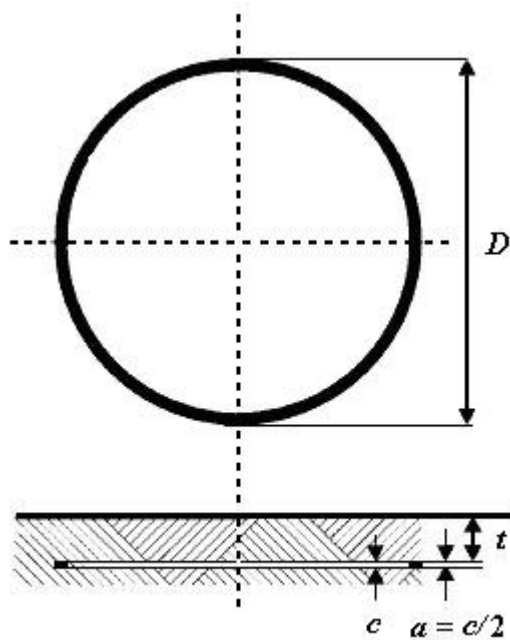
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d_0} \quad (37)$$

3. รากสายดินวงแหวน

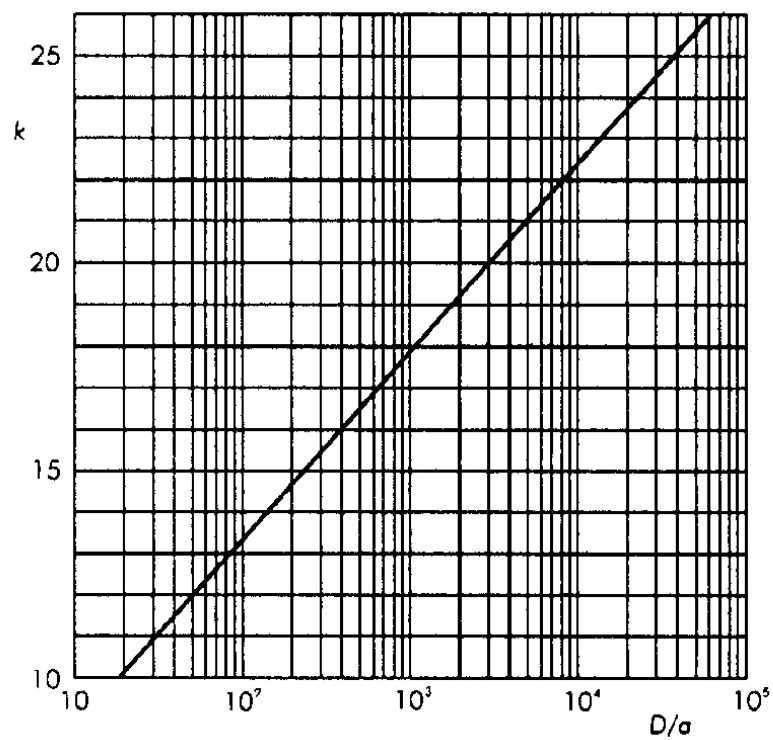
ความต้านทานดินของรากสายดินรูปวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D ทำจากแถบโลหะที่มีความหนา c วางที่ความลึกใต้ผิวดินโดยทั่วไป $t = 1$ เมตร สามารถคำนวณโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} k \quad (38)$$

เมื่อ k คือ แฟกเตอร์แสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 49 ไคอะแกรมของรากลายคินวงแหวนอย่างง่าย



ภาพที่ 50 ไคอะแกรมของแฟกเตอร์ $k = f(D/a)$

DEHN (n.d.) รากสายดินวงแหวนที่มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 30 เมตร) ความต้านทานดินสามารถคำนวณโดยประมาณด้วยสูตรสำหรับรากสายดินแบบแถบแบน โดยแทนความยาวของรากสายดินด้วยเส้นรอบวง πD

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{2\pi D}{d} \quad (39)$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่รากสายดินฝังอยู่ (เมตร)
 d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากสายดิน (เมตร)

สำหรับรากสายดินวงแหวนที่ไม่เป็นวงกลม ความต้านทานดินคำนวณโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง D ของวงกลมที่มีพื้นที่เดียวกัน

$$R = \frac{2\rho}{3D} \quad (40)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (41)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ที่ล้อมรอบโดยรากสายดิน

4. รากสายดินแบบเมช

รากสายดินแบบเมช (Mesh Electrode) ใช้ในระบบการต่อลงดินของพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น สถานีไฟฟ้าย่อย ตะแกรง (Grid) ของรากสายดินปกติสร้างให้ตรงกับขนาดของการติดตั้งและเพื่อให้แน่ใจว่าการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินมีความสม่ำเสมอ ความต้านทานดินของรากสายดินแบบเมชคำนวณโดยใช้สมการง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

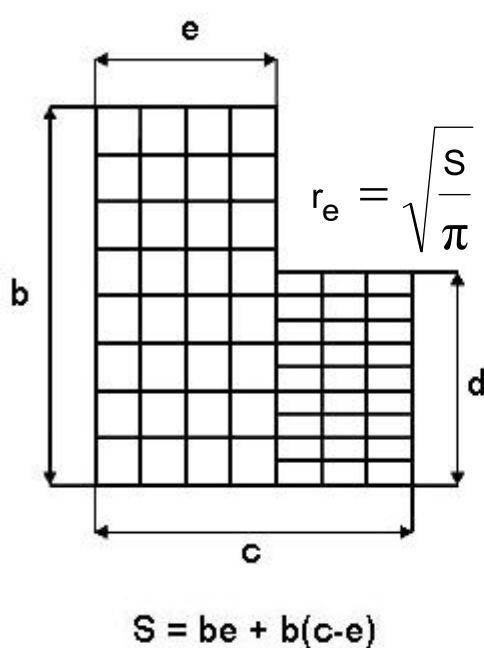
$$R = \frac{\rho}{4r_e} + \frac{\rho}{L_t} \quad (42)$$

โดยที่ r_e คือ รัศมีสมมูล (เมตร)

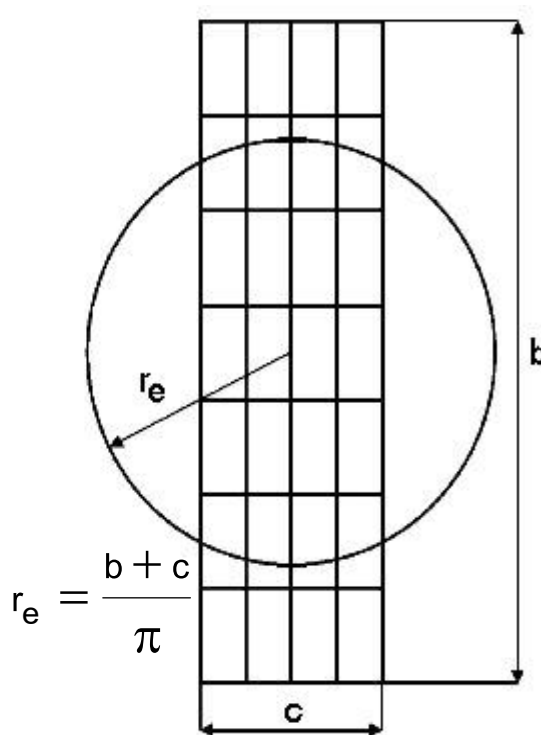
L_t คือ ผลรวมความยาวของตัวนำที่เป็นรากสายดิน (เมตร)

สำหรับสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือประมาณสี่เหลี่ยม พื้นที่รัศมีสมมูล คือ พื้นที่วงกลมที่ให้พื้นที่เท่ากับพื้นที่จริง

สำหรับพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้ารูปแบบรากสายดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวมาก รัศมีสมมูลเท่ากับผลรวมของด้านภายนอกหารด้วย π และ $L_t =$ ผลรวมของความยาวของด้านข้างของเมฆทั้งหมดภายในกริด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 51 ตัวอย่างของรากสายดินแบบเมฆ อธิบายวิธีคำนวณรัศมีสมมูล r_e

สำหรับรูปแบบรากสายดิน 2 รูปแบบ

(ก) รูปแบบคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(ข) รูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

DEHN (n.d.) รากสายดินแบบเมฆ กำหนดโดยสูตร

$$R = \frac{\rho}{2D} \quad (43)$$

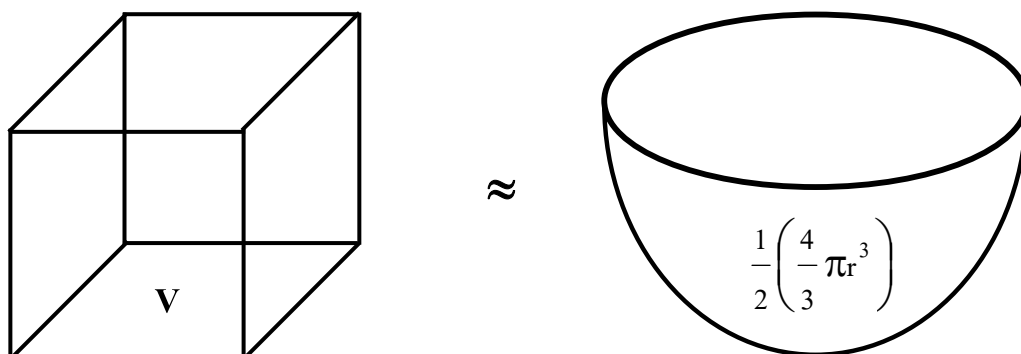
โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ สำหรับพื้นที่รากสายดินที่เป็นรูปหลายเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หาได้โดยใช้สมการที่ (44) สำหรับรากสายดินที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีด้านยาว b ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หาได้โดยใช้สมการที่ (45)

$$D = \frac{4A}{\pi} \quad (44)$$

$$D = 1.1b \quad (45)$$

5. รากสายฐานราก

ความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก สามารถคำนวณโดยใช้สูตรความต้านทานดินของรากสายดินครึ่งทรงกลม โดยการเปลี่ยนปริมาตรของคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นปริมาตรลูกบาศก์ให้เป็นครึ่งทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากัน



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนปริมาตรลูกบาศก์เป็นปริมาตรครึ่งทรงกลม

$$\text{ปริมาตรของคอนกรีต} = V \quad (46)$$

$$\text{ปริมาตรของครึ่งทรงกลม} = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \quad (47)$$

$$\text{ปริมาตรของครึ่งทรงกลม} = \text{ปริมาตรของคอนกรีต} \quad (48)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = V \quad (49)$$

$$r^3 = \frac{3}{2\pi} V \quad (50)$$

$$\left(\frac{d}{2} \right)^3 = \frac{3}{2\pi} V \quad (51)$$

$$d = 1.56 \sqrt[3]{V} \quad (52)$$

ความต้านทานดินของรากสายดินครึ่งทรงกลม คือ

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{\pi d} \quad (53)$$

$$R = 0.2 \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} \quad (54)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทานของรากสายดินฐานราก (โอห์ม)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

V คือ ปริมาตรของคอนกรีต (ลูกบาศก์เมตร)

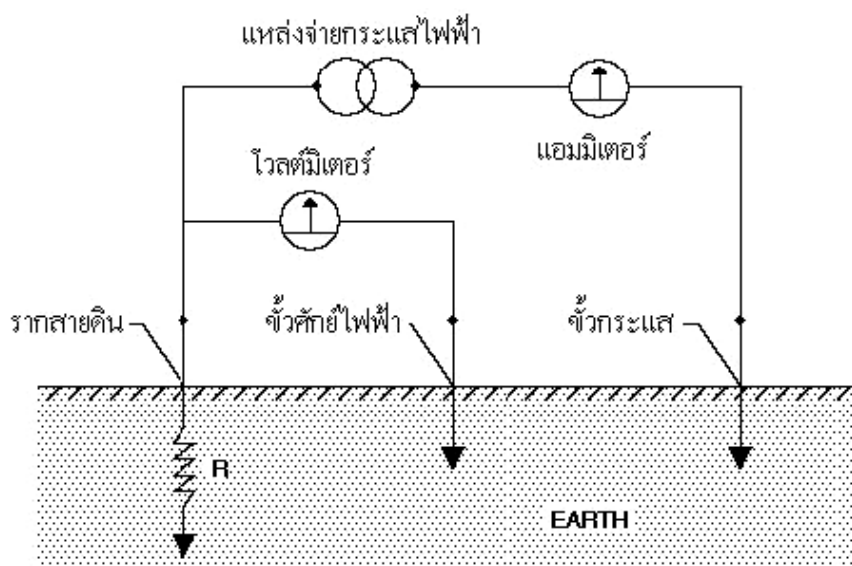
การวัดความต้านทานดิน

ความต้านทานดินที่ได้จากการคำนวณ ส่วนใหญ่อยู่บนพื้นฐานของการประมาณซึ่งอาจจะไม่เป็นไปตามการติดตั้ง เนื่องจากเงื่อนไขที่คาดไม่ถึงและเงื่อนไขที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง การคำนวณความต้านทานดินเพื่อกำหนดรูปแบบของรากสายดินที่ดีที่สุดสามารถทำได้เมื่อดินเป็นเนื้อเดียวกัน แต่โดยทั่วไปดินมักจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดที่จะหาความต้านทานดิน คือ การวัดความต้านทานดินในบริเวณที่จะก่อสร้างอาคารทั้งหมด และหาค่าที่ต้องการเพื่อใช้ในการตัดสินใจ และเมื่อมีการติดตั้งระบบต่อลงดินแล้วจะต้องวัดความต้านทานดินที่ติดตั้งเพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ

เครื่องวัดความต้านทานดินเป็นเครื่องมือวัดชนิดเดียวกันกับเครื่องวัดความต้านทานจำเพาะของดิน การวัดความต้านทานดินมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีความถูกต้องแตกต่างกันไป ความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของกระแสทดสอบและลักษณะการวางขั้วกระแส (Current Probe) และขั้วศักย์ไฟฟ้า (Potential Probe) เมื่อทำให้การไหลของกระแสทดสอบเป็นไปด้วยดีแล้วสามารถอ่านค่าความต้านทานดินได้จากเครื่องวัดโดยตรง วิธีการวัดความต้านทานดินที่ใช้กันทั่วไปคือ วิธีวัดแบบ 3 จุด (3 – Point Measurement) หรือ Fall-of-Potential Method

1. การวัดความต้านทานดินโดยวิธี Fall – of – Potential

การวัดค่าความต้านทานดินที่นิยมใช้กันมาก คือวิธี Fall-of-Potential เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องมากที่สุด การวัดด้วยวิธี Fall-of-Potential ใช้หลักการปล่อยกระแสที่ทราบค่าลงไปยังรากสายดินที่ต้องการทดสอบ กระแสจะไหลผ่านดินที่อยู่ระหว่างรากสายดินและกลับเข้าสู่เครื่องวัดทางขั้วกระแส ขณะที่กระแสผ่านในดินจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นในดิน ศักย์ไฟฟ้านี้จะถูกวัดความต่างศักย์ผ่านทางขั้วศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างรากสายดินกับขั้วกระแส อัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์กับกระแสจะเป็นค่าความต้านทานดินที่สามารถอ่านได้จากเครื่องวัดโดยตรง การวัดความต้านทานดินหลายๆ ค่า ทำได้โดยการย้ายขั้วศักย์ไฟฟ้าเป็นเส้นตรงไปตามระยะจากตำแหน่งรากสายดินไปยังขั้วกระแส ข้อมูลที่ได้นำไปวาดเป็นกราฟความต้านทานดินกับระยะจากรากสายดิน



ภาพที่ 53 การวัดความต้านทานดินโดยวิธี Fall-of-Potential

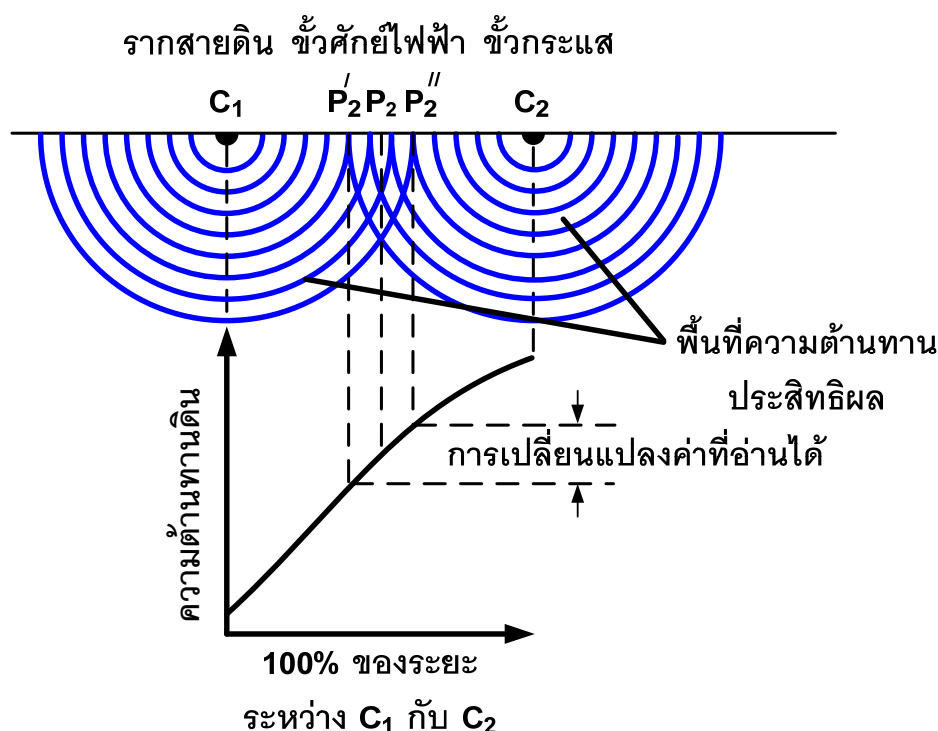
ความต่างศักย์ระหว่างรอกสายดินกับขั้วศักย์ไฟฟ้าจะถูกวัดโดยโวลต์มิเตอร์ และกระแสที่ไหลระหว่างรอกสายดินและขั้วกระแสจะถูกวัดโดยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) โดยกฎของโอห์ม (Ohm's Law) $V = RI$ หรือ $R = V/I$ จะได้รับความต้านทานดินของระบบต่อลงดิน เช่น ถ้าความต่างศักย์ระหว่างรอกสายดินกับขั้วศักย์ไฟฟ้า $V = 20$ โวลต์และกระแส $I = 1$ แอมแปร์ ดังนั้นความต้านทานดินที่อ่านได้จากเครื่องวัด คือ

$$R = \frac{V}{I} = \frac{20}{1} = 20 \text{ โอห์ม}$$

1.1 ตำแหน่งของขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าของแท่งหลักดินเดี่ยว

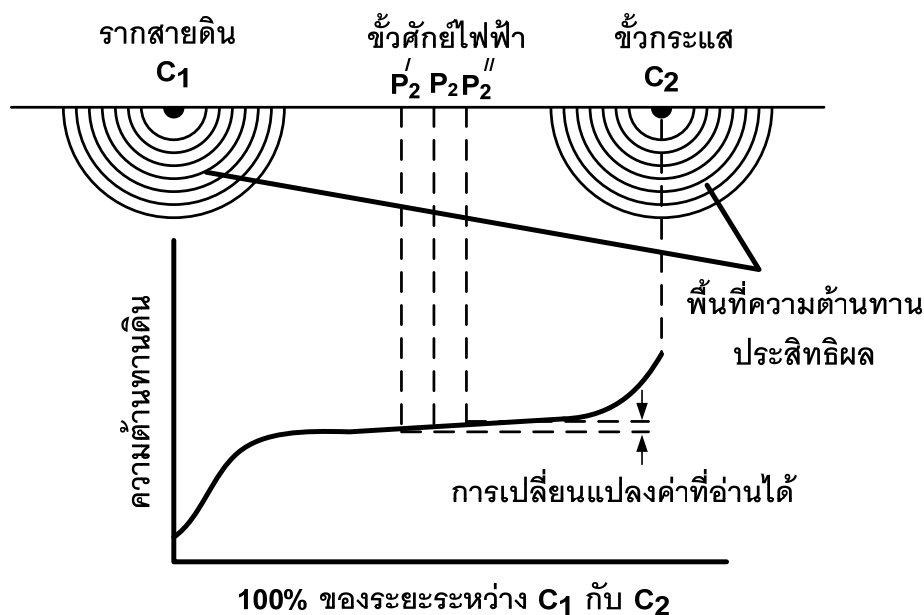
กระแสที่ไหลเข้าไปในดิน ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ รอกสายดินซึ่งแสดงเส้นที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน (Equipotential Line) ด้วยชั้นของดินรอบ ๆ รอกสายดิน ชุดของชั้นดินที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันรอบรอกสายดินที่ทดสอบ C_1 และขั้วกระแส C_2 มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่เป็นปฏิภาคกับขนาดของแต่ละรอกสายดิน ขั้วศักย์ไฟฟ้า P_2 เป็นตัววัดแรงดันทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ผิวดิน โดยเป็นผลรวมชุดของชั้นดินที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันทั้งสอง ถ้ารอกสายดินและขั้วกระแสอยู่ใกล้เกินไป การซ้อนทับของศักย์ที่เท่ากันของชั้นดิน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันผิวดินขณะวัดโดยขั้วศักย์ไฟฟ้า P_2 เปลี่ยนแปลงไปตามภาพที่ 54

การวัดความต้านทานดินเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานดินที่ถูกต้อง คือ ต้องวางขั้วกระแส C_2 ให้อยู่ที่ตำแหน่งห่างจากรากสายดินที่ต้องการทดสอบ C_1 อย่างเพียงพอ เพื่อให้ขั้วศักย์ไฟฟ้า P_2 อยู่ภายนอกบริเวณความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance Area) ของรากสายดิน C_1 และขั้วกระแส C_2 ถ้าขั้วศักย์ไฟฟ้าอยู่ภายในพื้นที่ความต้านทานประสิทธิผล เมื่อย้ายขั้วศักย์ไฟฟ้าระหว่างรากสายดินและขั้วกระแส ค่าความต้านทานดินที่อ่านได้ในแต่ละตำแหน่ง P_2' และ P_2'' จะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ภายใต้สภาวะนี้จะไม่มีความต้านทานดินที่ถูกต้อง



ภาพที่ 54 การวัดความต้านทานดินเมื่อขั้วกระแสอยู่ใกล้กับรากสายดินมากเกินไป

เมื่อตำแหน่งของขั้วกระแส C_2 อยู่ห่างจากรากสายดินที่ทดสอบอย่างเพียงพอ เพื่อให้แน่ใจว่าชุดของชั้นดินที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันไม่คาบเกี่ยวกัน และเมื่อขั้วศักย์ไฟฟ้า P_2 อยู่ภายนอกพื้นที่ความต้านทานประสิทธิผล ขณะที่ย้ายขั้วศักย์ไฟฟ้าเข้าหาและออกจากรากสายดิน ค่าความต้านทานดินที่อ่านได้จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่าความต้านทานดินที่อ่านได้ควรจะใกล้เคียงกัน และเป็นค่าความต้านทานดินที่ดีที่สุดของระบบต่อลงดิน ค่าที่อ่านได้ควรจะนำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อให้แน่ใจว่าความต้านทานที่อ่านได้อยู่ในบริเวณที่ราบ (Plateau) ของกราฟเหมือนกับภาพที่ 55 บริเวณที่ราบนี้ได้รับการอ้างอิงเป็นบริเวณ “62%”



ภาพที่ 55 การวัดความต้านทานดินเมื่อขั้วกระแสอยู่ห่างจากสายดินเพียงพอ

เมื่อกำหนดให้ D_c เป็นระยะ 100% ของระยะระหว่างสายดินที่ทดสอบ C_1 กับขั้วกระแส C_2 และ D_c มีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดของระบบสายดิน สามารถประมาณได้ว่า มีระยะเป็นครึ่งทรงกลมและผลจากศักย์ไฟฟ้าร่วมระหว่างสายดินกับขั้วกระแสสามารถละทิ้งได้ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด x ห่างจากสายดินที่ทดสอบ คือ

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x} - \frac{\rho I}{2\pi(D_c - x)} \quad (55)$$

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{D_c - x} \right] \quad (56)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (โอห์ม-เมตร)

I คือ กระแสทดสอบที่ไหลเข้าไปใน C_1 และไหลออกจาก C_2 (แอมแปร์)

สมมติสายดินที่ทดสอบเป็นสายดินครึ่งทรงกลมที่มีรัศมี r ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวทรงกลมหาได้โดยกำหนดให้ $x = r$

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{D_c - r} \right] \quad (57)$$

ความต่างศักย์ระหว่างรากสายดิน C_1 และขั้วศักย์ไฟฟ้า P_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่กำลังวัดอยู่ คือ

$$V_0 = V_r - V_x \quad (58)$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{D_c - r} \right] - \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{D_c - x} \right] \quad (59)$$

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{D_c - r} - \frac{1}{x} + \frac{1}{D_c - x} \right] \quad (60)$$

เมื่อ $x = r$ จะได้ $V_0 = 0$

ค่าที่แท้จริงของความต้านทานดินของรากสายดินครึ่งทรงกลม คือ

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (61)$$

$$R = \frac{V_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (62)$$

เพื่อที่จะวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างรากสายดินและขั้วศักย์ไฟฟ้า V_0 ให้ผลของความต้านทานดินที่ถูกต้อง จะเห็นได้ว่าเทอมของความผิดพลาดจะต้องเป็นศูนย์

$$\frac{1}{D_c - x} - \frac{1}{x} - \frac{1}{D_c - r} = 0 \quad (63)$$

$$x(D_c - r) - (D_c - x)(D_c - r) - x(D_c - x) = 0 \quad (64)$$

$$D_c x \left(1 - \frac{r}{D_c}\right) - (D_c - x)D_c \left(1 - \frac{r}{D_c}\right) - x(D_c - x) = 0 \quad (65)$$

ถ้า $D_c \gg r$ จะได้

$$D_c x - D_c(D_c - x) - D_c x + x^2 = 0 \quad (66)$$

$$x^2 + D_c x - D_c^2 = 0 \quad (67)$$

สามารถแก้สมการหาค่า x ได้ดังนี้

$$x = \frac{-D_c \pm \sqrt{D_c^2 + 4D_c^2}}{2} \quad (68)$$

$$x = \frac{-D_c}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{5D_c^2} \quad (69)$$

$$x = \frac{-D_c}{2} \pm \frac{D_c}{2} \sqrt{5} \quad (70)$$

$$x = \frac{D_c}{2} (-1 \pm \sqrt{5}) \quad (71)$$

$$x = \frac{D_c}{2} (\sqrt{5} - 1) \quad (72)$$

$$x = \frac{D_c}{2} (2.236 - 1) \quad (73)$$

$$x = 0.618 D_c \quad (74)$$

ค่าที่แท้จริงของความต้านทานดินคืออัตราส่วนของความต่างศักย์ต่อกระแสที่วัดได้ โดยขั้วศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่ง x ซึ่งเป็นระยะ 62 เปอร์เซ็นต์ของระยะ D_c จารากสายดินที่วัด C_1 กับขั้วกระแส C_2 ระยะ D_c วัดจากจุดศูนย์กลางของรากสายดินถึงจุดศูนย์กลางของขั้วกระแสและ D_c มีความสัมพันธ์ที่ใหญ่กว่ารัศมีของหลักดินที่ทดสอบมาก

ความต้านทานรากสายดินที่ทดสอบเทียบกับ Remote earth

$$R = \frac{V_0}{I} \quad (75)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D_c - r} \right) \quad (76)$$

ดังนั้นค่าใด ๆ ของ D_c ที่น้อยกว่าค่าอนันต์จะทำให้ความต้านทานดินที่วัดได้มีความผิดพลาด โดยความผิดพลาดนี้สามารถประมาณโดยพิจารณาจากความต้านทานดิน เมื่อ D_c อยู่ที่ตำแหน่งอนันต์ คือ

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (77)$$

ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคือ พจน์ของ $\left(1 - \frac{r}{D_c - r} \right)$ เมื่อ $D_c = 5r$ จะมี

ความผิดพลาด 25 เปอร์เซ็นต์ ถ้า $D_c = 11r$ จะมีความผิดพลาด 10 เปอร์เซ็นต์ และถ้า $D_c = 25r$ จะมีความผิดพลาด 4 เปอร์เซ็นต์

โดยการประมาณระยะขั้วกระแสที่ให้ค่าความต้านทานที่ถูกต้องเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นทแยงมุมของอะเรย์ D_d ความถูกต้อง 90% ตำแหน่งสำหรับ C_2 ควรอยู่ที่

$$11 \times (0.5 D_d) = 5.5 D_d \quad (78)$$

สมการที่ (78) เป็นพื้นฐานสำหรับหลักการวัดทั่วไปว่าระยะชั่วคราวจะต้องอยู่ห่างจากรากสายดินที่วัดไม่น้อยกว่า 5 เท่าของเส้นทแยงมุมที่ยาวที่สุดของพื้นที่ระบบรากสายดินล้อมรอบอยู่ ตารางที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้รับเมื่อระยะชั่วคราวจะมากกว่า 50 เท่าของเส้นทแยงมุมที่ยาวที่สุด

ตารางที่ 9 ความถูกต้องของความต้านทานดินกับระยะของชั่วคราว

ความถูกต้อง (เปอร์เซ็นต์)	ระยะชั่วคราว
90	5 x เส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน
95	10 x เส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน
98	25 x เส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน
99	50 x เส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน

ที่มา: วิวัฒน์ (2548)

ตารางที่ 10 ระยะห่างชั่วคราวและขั้วสัณยไฟฟ้าสำหรับระบบต่อลงดินขนาดเล็ก

ระยะโดยประมาณของขั้วสัณยไฟฟ้าและชั่วคราว โดยใช้วิธี 62%		
ความลึกที่ปัก ฟุต (เมตร)	ระยะขั้วสัณยไฟฟ้า ฟุต (เมตร)	ระยะชั่วคราว ฟุต (เมตร)
6 (1.80)	45 (13.50)	72 (21.60)
8 (2.40)	50 (15.00)	80 (24.00)
10 (3.00)	55 (16.50)	88 (26.40)
12 (3.60)	60 (18.00)	96 (28.80)
18 (5.40)	71 (21.30)	115 (34.50)
20 (6.00)	74 (22.20)	120 (36.00)
30 (9.00)	86 (25.80)	140 (42.00)

1.2 ตำแหน่งของขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าของแท่งหลักดินหลายแท่ง

การต่อลงดินโดยใช้แท่งหลักดินเดี่ยวเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด แต่บางครั้งแท่งหลักดินเดี่ยวไม่ได้ให้ความต้านทานดินต่ำเพียงพอ แท่งหลักดินหลายแท่งจะถูกปักและเชื่อมต่อกันกันโดยสายไฟฟ้า (Cable) บ่อยครั้งที่ใช้แท่งหลักดิน 3 หรือ 4 แท่ง ปักเป็นเส้นตรง เมื่อใช้แท่งหลักดิน 4 แท่งหรือมากกว่าจะจัดวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีระยะห่างเท่ากันและเชื่อมต่อกัน

ระบบการต่อลงดินโดยใช้แท่งหลักดินหลายแท่ง การวัดความต้านทานดินด้วยวิธี Fall-of-Potential ระยะห่างระหว่างรอกสายดินกับขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ 62% อาจจะใช้ไม่ได้โดยตรง ระยะห่างระหว่างรอกสายดินกับขั้วกระแสจะอยู่บนพื้นฐานของระยะห่างของกริดสูงสุด (สี่เหลี่ยมจัตุรัส, เส้นทแยงมุม, ความยาวรวม) เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้าง 6 เมตร จะมีเส้นทแยงมุมประมาณ 8.48 เมตร

ตารางที่ 11 ระยะห่างขั้วกระแสและขั้วศักย์ไฟฟ้าสำหรับแท่งหลักดินหลายแท่ง

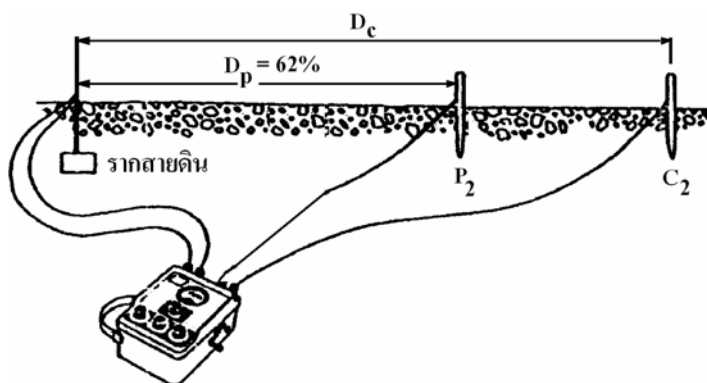
ระยะกริดสูงสุด ฟุต (เมตร)	ระยะขั้วศักย์ไฟฟ้า ฟุต (เมตร)	ระยะขั้วกระแส ฟุต (เมตร)
6 (1.80)	78 (23.40)	125 (37.50)
8 (2.40)	87 (26.21)	140 (42.00)
10 (3.00)	100 (30.00)	160 (48.00)
12 (3.60)	105 (31.50)	170 (51.00)
14 (4.20)	118 (35.40)	190 (57.00)
16 (4.80)	124 (37.20)	200 (60.00)
18 (5.40)	130 (39.00)	210 (63.00)
20 (6.00)	136 (40.80)	220 (66.00)
30 (9.00)	161 (48.30)	260 (78.00)
40 (12.00)	186 (55.80)	300 (90.00)
50 (15.00)	211 (63.30)	340 (102.00)
60 (18.00)	230 (69.00)	370 (111.00)
80 (24.00)	273 (81.90)	440 (132.00)

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ระยะกริดสูงสุด ฟุต (เมตร)	ระยะขั้วศักย์ไฟฟ้า ฟุต (เมตร)	ระยะขั้วกระแส ฟุต (เมตร)
80 (24.00)	273 (81.90)	440 (132.00)
100 (30.00)	310 (93.00)	500 (150.00)
120 (36.00)	341 (102.30)	550 (165.00)
140 (42.00)	372 (111.60)	600 (180.00)
160 (48.00)	390 (117.00)	630 (189.00)
180 (54.00)	343 (102.90)	700 (210.00)
200 (60.00)	453 (135.90)	730 (219.00)

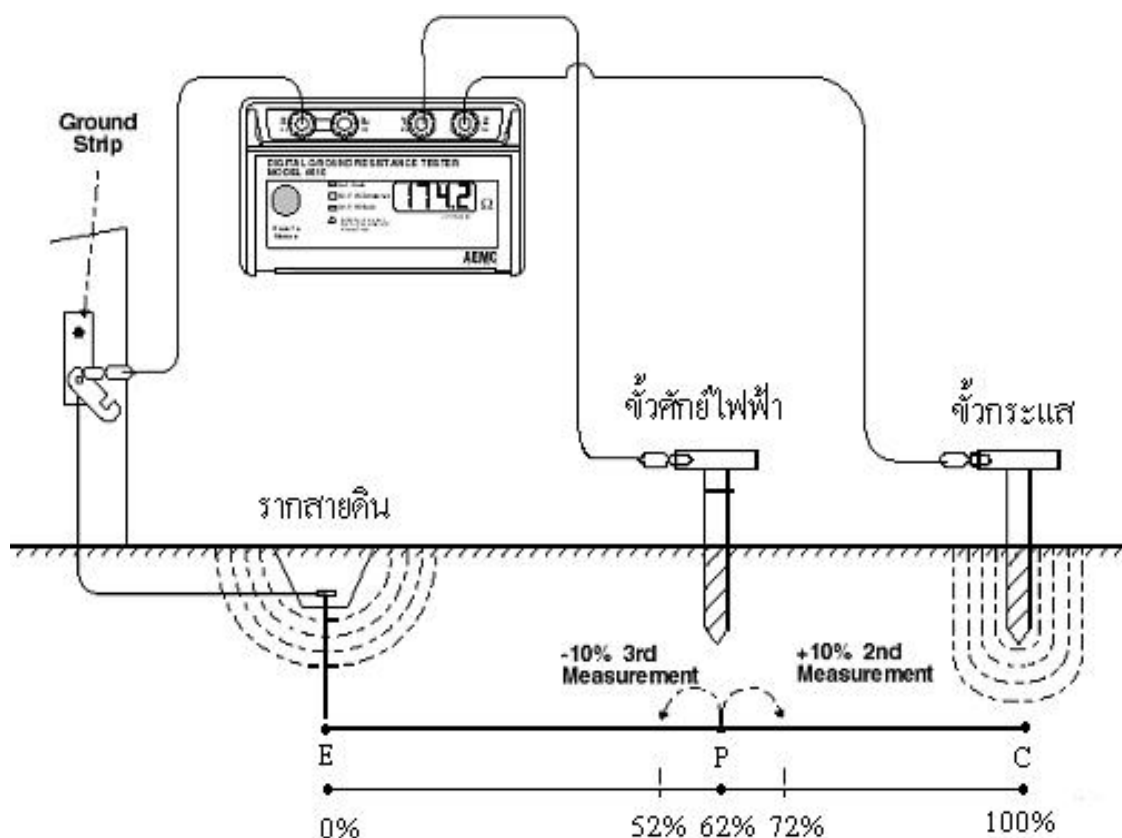
2. การวัดความต้านทานดินด้วยวิธี 62%

เมื่อพิจารณารูปภาพความต้านทานดินที่ได้จากการทดสอบความต้านทานดินจริง จึงได้นำวิธี 62% มาใช้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ถูกต้องที่สุดแต่ถูกจำกัดโดยข้อเท็จจริงที่ว่า ระบบต่อลงดินที่ทดสอบเป็นระบบต่อลงดินขนาดเล็ก เช่น แท่งหลักดินเดี่ยวหรือแท่งหลักดิน 2 – 3 แท่งเชื่อมต่อกัน รากสายดินในแนวตรง ท่อ หรือแผ่นเท่านั้น เนื่องจากระยะห่างของระบบรากสายดินกับขั้วกระแส (D_c) ที่ 100% นั้นไม่มาก การพิจารณาระยะ 100% จะพิจารณาจากด้านที่ยาวที่สุดของระบบรากสายดินเมื่อนำความยาวนั้นไปคูณ 5 เท่า (ความถูกต้อง 90%) หรือคูณ 10 เท่า (ความถูกต้อง 95%) จะได้ความยาว 100%



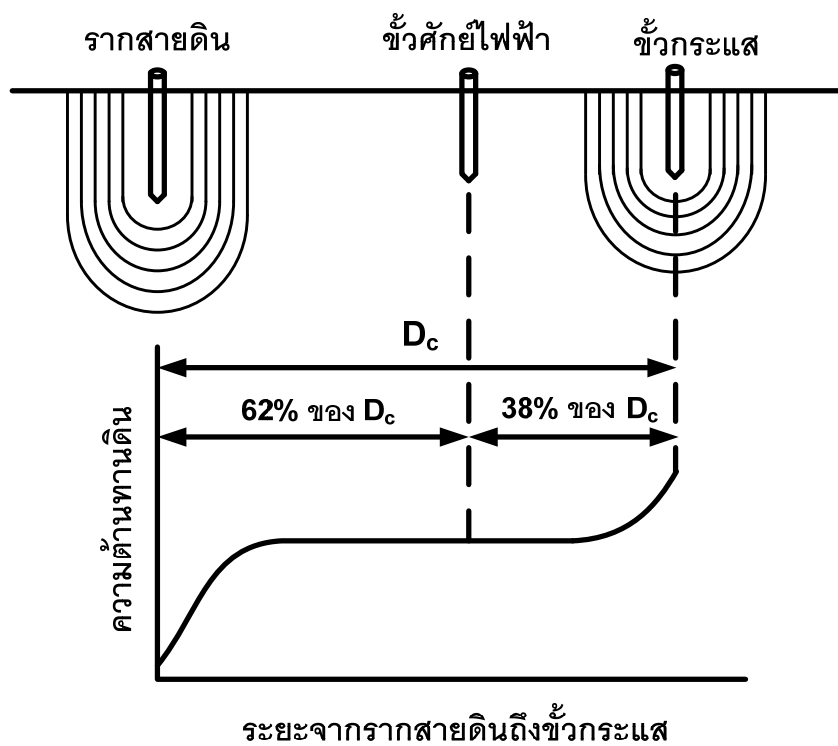
ภาพที่ 56 การวัดความต้านทานดินวิธี 62%

ระยะขั้วสัณยไฟฟ้า P ที่กำหนดไว้ประมาณ 62% ของระยะ D_c นั้น สามารถทดสอบได้ โดยให้เลื่อนขั้วสัณยไฟฟ้า P ไปมาระหว่างระยะ D_c จนกระทั่งความต้านทานดินที่อ่านได้จาก เครื่องวัดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินและระยะขั้วสัณยไฟฟ้าจาก แท่งหลักดินดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 การวัดความต้านทานดินโดยวิธี 62%

พิจารณาภาพที่ 57 ซึ่งรากสายดินกับขั้วกระแสมีระยะห่างอย่างเพียงพอ เพื่อให้พื้นที่ของ ความต้านทานประสิทธิภาพไม่ซ้อนกัน เมื่อเขียนกราฟความต้านทานดินที่วัดได้พบว่าจะได้ตำแหน่ง คงที่ของกราฟ เมื่อขั้วสัณยไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่ง 62% ของระยะทางจากรากสายดินกับขั้วกระแสและ ค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 ด้านของขั้วสัณยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 62% จะใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยปกติค่าเบี่ยงเบน จากค่าเฉลี่ยสูงสุดของความต้านทานดินทั้งสามจุดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อคูณด้วย 1.2 แล้วน้อยกว่า ความผิดพลาดที่ต้องการ ค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะเป็นความต้านทานดินที่วัดได้ ความผิดพลาดที่ต้องการ กำหนดโดยผู้ใช้ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่านครั้งแรก เช่น $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ อื่นๆ



ภาพที่ 58 กราฟความต้านทานดินวัดด้วยวิธี 62%

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดความต้านทานดิน ตราอักษร MEGGER รุ่น DET 2/2 พร้อมอุปกรณ์ประกอบ ได้แก่ ขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าและขั้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ยาว 40 เซนติเมตร จำนวน 4 แท่ง สายวัดไฟฟ้า
2. ค้อนเหล็ก
3. ประแจเลื่อน
4. แปรงทองเหลือง
5. ตลับเมตร
6. เครื่องคอมพิวเตอร์ Note Book Pentium M processor ความจุของ Hard Disk ขนาด 80 GB พร้อมหน่วยประมวล RAM 1 GB และระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP Professional 2006
7. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Statistical Package for Social Science (SPSS) for Windows Version 13.0
8. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล



ภาพที่ 59 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

วิธีการ

1. การกำหนดรูปแบบรากสายดินฐานราก

เนื่องจากคอนกรีตมีคุณลักษณะที่สามารถรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ การออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึงจำนวนมากจึงไม่สามารถทำได้ ขณะที่เหล็กเสริม (Reinforcement Steel) มีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูง และมีประสิทธิภาพการยึดหดตัวเท่าๆ กับคอนกรีต ดังนั้นการใช้เหล็กร่วมกับคอนกรีตโดยให้คอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึงจึงได้ผลดี โดยใช้เหล็กเสริมใส่ในบริเวณส่วนโครงสร้างที่เกิดแรงดึง แรงเฉือน หรือแรงบิด เพื่อช่วยคอนกรีตในการรับแรงที่เกิดขึ้น ดังนั้นโครงสร้างส่วนมากจะสร้างโดยมีเหล็กเสริมเป็นส่วนประกอบ

นิพนธ์ (2544) เหล็กโครงสร้างที่ใช้โดยทั่วไปเป็นประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) โดยมีส่วนผสมของคาร์บอน 1.7 % แมงกานีส 1.65% ซิลิกอน 0.6% และทองแดง 0.6% คาร์บอนและแมงกานีสเป็นส่วนผสมสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก

เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถจัดประเภทตามปริมาณส่วนผสมของคาร์บอนได้ 4 ประเภท

ก. ประเภทคาร์บอนต่ำ (Low Carbon) มีส่วนผสมของคาร์บอนน้อยกว่า 0.15%

ข. ประเภทคาร์บอนค่อนข้างปานกลาง (Mild Carbon) มีส่วนผสมคาร์บอน ระหว่าง 0.15 - 0.29%

ค. ประเภทคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon) มีส่วนผสมคาร์บอน ระหว่าง 0.30 - 0.59%

ง. ประเภทคาร์บอนสูง (High Carbon) มีส่วนผสมคาร์บอนระหว่าง 0.60 - 1.70%

เหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในงาน โครงสร้าง (Structural Carbon Steel) จัดอยู่ในประเภท ข. ซึ่งมีส่วนผสมคาร์บอนระหว่าง 0.25 - 0.29%

เหล็กเสริม (Steel Reinforcement) ที่ใช้โดยทั่วไป แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. เหล็กกลมเรียบ (Round Bars) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 , 9 , 12 , 15 , 19 , 22 , 25 และ 28 มิลลิเมตร

2. เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bars) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 , 12 , 16 , 19 , 20 , 25 และ 28 มิลลิเมตร

ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. กำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นสำหรับเสาของอาคาร ต้องมีพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่หน้าตัดของเสา และขนาดต้องไม่เล็กกว่า 12 มิลลิเมตร จำนวนของเหล็กยื่นในเสากลมต้องไม่น้อยกว่า 6 เส้น และสำหรับเสาเหลี่ยมไม่น้อยกว่า 4 เส้น (นิพนธ์, 2544)

ตารางที่ 12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็ก		เส้นผ่านศูนย์กลาง	พื้นที่หน้าตัด
เหล็กกลมเรียบ	เหล็กข้ออ้อย	(มิลลิเมตร)	(ตารางมิลลิเมตร)
RB 6	-	6	28.27
RB 9	-	9	63.62
-	DB 10	10	78.54
RB 12	DB 12	12	113.10
RB 15	-	15	176.71
-	DB 16	16	201.06
RB 19	DB 19	19	283.53
RB 22	-	22	380.13
RB 25	DB 25	25	1,963.50
RB 28	DB 28	28	2,463.01

ตารางที่ 13 ความยาวการทาบเหล็กสำหรับการต่อเหล็กข้ออ้อยสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดตั้งแต่ 200 กก./ซม.²

กำลังคลากของเหล็ก	ความยาวที่ทาบเหล็ก	หมายเหตุ
(กก./ซม. ²)		
3500	20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง	} ต้องไม่น้อยกว่า 30 ซม.
4200	24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง	
5200	30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง	

การต่อเหล็กโดยวิธีทาบ ความยาวที่ทาบอย่างน้อยที่สุดจะต้องมีค่าตามตารางที่ 13 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า 200 กก./ซม.² ให้เพิ่มระยะทาบเหล็กหนึ่งในสามของค่าในตารางที่ 13 และสำหรับการต่อเหล็กกลมเรียบระยะทาบอย่างน้อยจะต้องเป็นสองเท่าของค่าที่กำหนดไว้สำหรับเหล็กข้ออ้อย

ตารางที่ 14 ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

องค์อาคารคอนกรีตหล่อในที่ (Concrete Structure)	ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (ชม.) (Minimum Cover - cm.)		
	มาตรฐาน ว.ศ.ท.	ข้อบัญญัติ กรุงเทพมหานคร	มาตรฐาน AASHTO
ฐานรากและองค์อาคารสำคัญที่สัมผัสดินโดยตรง	7.5	6.0	7.5
องค์อาคารที่สัมผัสดินหรือถูกแดดฝน			
- เหล็กเสริมหลักขนาด 16 มม. ขึ้นไป	5.0	4.0	5.1
- เหล็กเสริมรองขนาดเล็กกว่า 16 มม.	3.8	3.0	3.8
องค์อาคารที่ไม่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน			
- เหล็กเสริมหลัก	2.0	ไม่ระบุ	3.8
- เหล็กเสริมรอง	**	ไม่ระบุ	2.5
- แผ่นพื้นและผนัง	2.0	1.5	ไม่ระบุ
- คาน	3.0	3.0	ไม่ระบุ
เสาที่มีเหล็กปลอกเกลียวหรือปลอกเดี่ยว	3.5**	3.0	ไม่ระบุ
แผ่นพื้นสะพานคอนกรีต			
- เหล็กเสริมบน (Top reinforcement)	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	5.0
- เหล็กเสริมล่าง (Bottom reinforcement)	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	2.5

** ไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดมวลรวมหยาบใหญ่ที่สุด

ที่มา: นิพนธ์ (2544)

ข้อกำหนดในมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง ได้กำหนดขนาดอย่างต่ำของวัสดุในระบบป้องกัน ตามตารางที่ 15 นอกจากนี้การใช้สิ่งปลูกสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันฟ้าผ่า กำหนดความต่อเนื่องทางไฟฟ้าของเหล็ก ดังนี้ (ว.ส.ท. ,2546)

1. ประมาณ 50% ของการต่อรวมของแท่งตัวนำแนวดิ่งและแนวนราบถูกเชื่อมหรือผูกมัดแน่นด้วยกัน
2. แท่งตัวนำแนวดิ่งถูกเชื่อมหรือผูกมัดให้เหลื่อมกันอย่างน้อย 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำ
3. ต้องให้มีความต่อเนื่องของเหล็กเสริมระหว่างคอนกรีตหล่อสำเร็จแต่ละชุดและคอนกรีตหล่อสำเร็จข้างเคียง

ตารางที่ 15 ขนาดต่ำที่สุดของวัสดุในระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระดับป้องกัน	วัสดุ	ตัวนำล่อฟ้า (ตารางมิลลิเมตร)	สายนำลงดิน (ตารางมิลลิเมตร)	รากสายดิน (ตารางมิลลิเมตร)
1 ถึง 4	ทองแดง	50	50	50
	อะลูมิเนียม	70	70	-
	เหล็ก	120	120	120

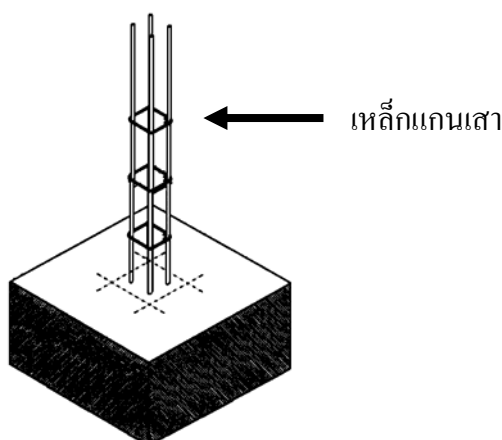
เมื่อพิจารณามาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง กำหนดขนาดอย่างต่ำของวัสดุในระบบป้องกันฟ้าผ่า เมื่อใช้เหล็กเป็นรากสายดินจะต้องมีขนาดไม่ต่ำกว่า 120 ตารางมิลลิเมตร เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมที่ใช้ในการก่อสร้างเหล็กข้ออ้อย DB16 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 201 ตารางมิลลิเมตร เป็นขนาดที่สามารถใช้เป็นรากสายดินได้ กรณีที่เหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 16 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่า 120 ตารางมิลลิเมตรตามที่มาตรฐานต้องการต้องใช้เหล็กเสริมขนาด 10 มิลลิเมตรอย่างน้อย 2 เส้น เชื่อมต่อกันเป็นวงแหวนรอบ ๆ สิ่งปลูกสร้าง

การต่อเหล็กโดยวิธีทาบ ความยาวที่ทาบอย่างน้อยที่สุด 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่ง
เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้างทั่วไป

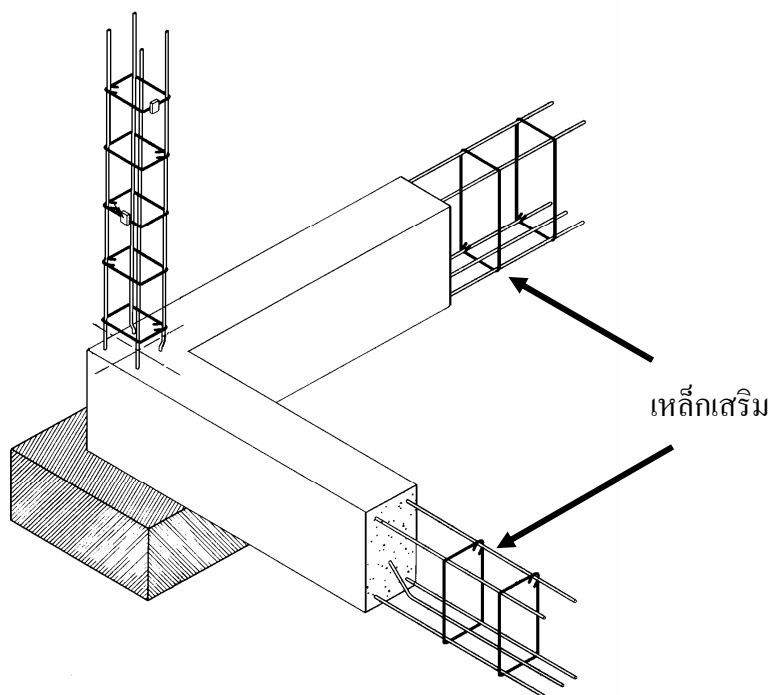
ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมฐานรากและองค์อาคารสำคัญที่สัมผัสดินโดยตรงมี
ความหนามากกว่า 5 เซนติเมตร เป็นไปตามความต้องการของรากสายดินฐานราก

พิจารณารูปแบบการก่อสร้างทั่วไป พบว่าครอบคลุมความต้องการตามมาตรฐานป้องกัน
ฟ้าผ่า เมื่อพิจารณาส่วนของโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างที่สัมผัสกับดินจะพบว่าฐานราก (Footing)
ของอาคารเป็นส่วนที่สัมผัสกับดินโดยตรง ส่วนคานคอดินและพื้นชั้นล่างสุดของอาคารมีพื้นที่
ส่วนใหญ่สัมผัสดิน จึงสามารถพิจารณาเป็นรากสายดินฐานรากได้ ดังนั้นรูปแบบของรากสายดิน
ฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมภายในโครงสร้าง สามารถพิจารณาได้ 3 รูปแบบ คือ

1. รากสายดินฐานรากที่ใช้ Footing ของสิ่งปลูกสร้าง เป็นรากสายดินที่มีลักษณะคล้าย
กับแท่งหลักดิน (Ground rod)
2. รากสายดินฐานรากที่ใช้คานคอดินของสิ่งปลูกสร้าง เป็นรากสายดินที่มีลักษณะคล้าย
กับรากสายดินแบบวงแหวน (Ring Electrode)
3. รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมพื้นชั้นล่างสุดของสิ่งปลูกสร้าง เป็นรากสายดินที่มี
ลักษณะคล้ายกับรากสายดินแบบกริด (Ground Grid)



ภาพที่ 60 รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กแกนเสาเป็นรากสายดิน



ภาพที่ 61 รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมในคานคอดินเป็นรากสายดิน



ภาพที่ 62 รากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมพื้นชั้นล่างสุดของสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดิน

2. การวัดความต้านทานดินของระบบต่อลงดินขนาดใหญ่

การทดสอบระบบต่อลงดินเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะหาว่าความต้านทานดินมีค่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ การทดสอบความต้านทานดินระบบป้องกันฟ้าโดยทั่วไปใช้วิธี Fall-of-Potential เนื่องจากระบบต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นระบบต่อลงดินขนาดเล็ก ประกอบด้วยแท่งหลักดิน 1 แท่ง หรือ 3 แท่งขนานกันวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

IEEE 81.2 (1991) ความถูกต้องของค่าความต้านทานดินขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขั้วกระแส ถ้าต้องการความถูกต้อง 100% ตำแหน่งของขั้วกระแสต้องอยู่ที่ Remote earth ระยะน้อยที่สุดของขั้วกระแสที่ให้ความถูกต้อง 95% อยู่ที่ 6.5 เท่าของระยะยาวที่สุดของระบบรากสายดิน (เส้นทแยงมุมของระบบรากสายดิน)

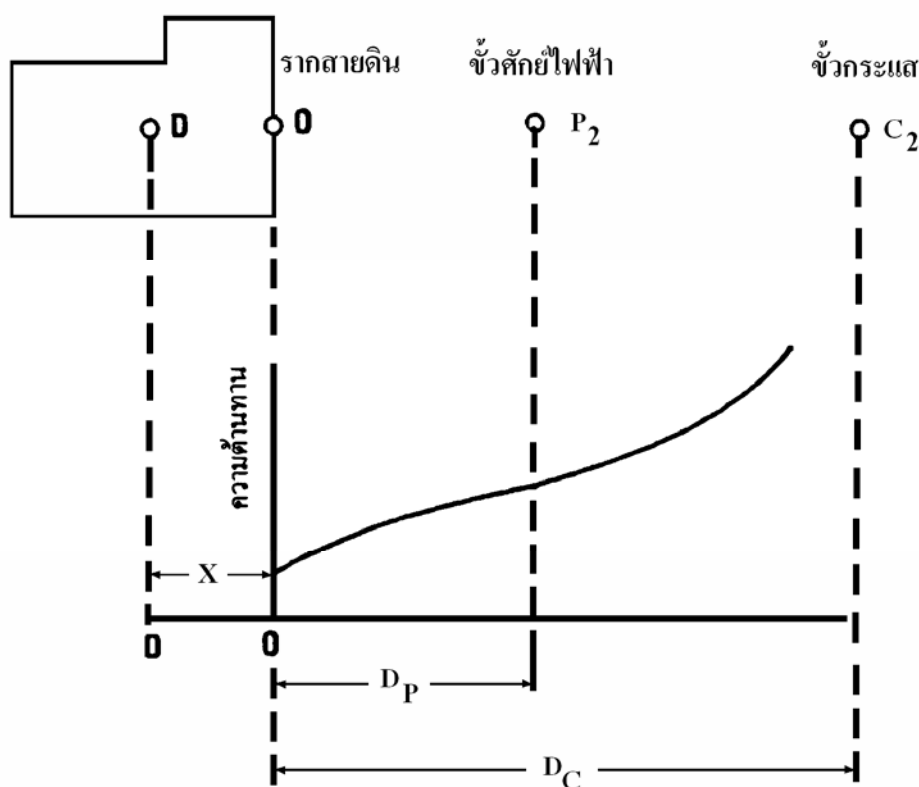
ในระบบต่อลงดินขนาดใหญ่ปัญหายากที่พบในการทดสอบความต้านทานดินของระบบรากสายดินที่ประกอบด้วยแท่งหลักดินจำนวนมาก หรือรากสายดินอื่นๆ ที่เชื่อมต่อขนานกันทั้งหมด และกระจายอยู่บนพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ต้องการทดสอบ วิธีการทดสอบปกติเป็นวิธีที่ดีแต่มีข้อเสียคือ โดยทั่วไปจะต้องวางขั้วกระแสห่างจากระบบรากสายดินที่ต้องการวัดที่ระยะห่างมาก ดังนั้นวิธีการทดสอบความต้านทานดินของระบบรากสายดินฐานรากจะใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกับวิธีทดสอบความต้านทานดินในสถานีไฟฟ้า ได้แก่ วิธี Intersecting Curve , วิธี Slope , วิธี Star-Delta และวิธี Four Potential

2.1 วิธี Intersecting Curves

ความยากในการวัดความต้านทานดินของระบบรากสายดินขนาดใหญ่ เกี่ยวข้องกับการใช้สายตัวนำสำหรับต่อขั้วศักย์ไฟฟ้าและขั้วกระแสที่ยาวมาก จึงได้คิดวิธีที่ไม่จำเป็นต้องใช้สายตัวนำที่ยาวขึ้นมา หลักการพื้นฐาน คือ การสร้างกราฟความต้านทานดิน (Earth Resistance Curve) ขึ้นหลาย ๆ กราฟที่ระยะห่างของขั้วกระแสกับรากสายดินที่ระยะต่าง ๆ กัน และเมื่อสมมติตำแหน่งศูนย์กลางระบบรากสายดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน จะสามารถสร้างกราฟความต้านทานดินกับระยะศูนย์กลางระบบรากสายดิน เรียกว่า Intersection Curve ตำแหน่งที่ตัดกันของกราฟจะให้ความต้านทานดินและตำแหน่งศูนย์กลางของระบบรากสายดิน

การทดสอบระบบรากสายดินขนาดใหญ่โดยวิธี Intersecting Curve มีขั้นตอนดังนี้

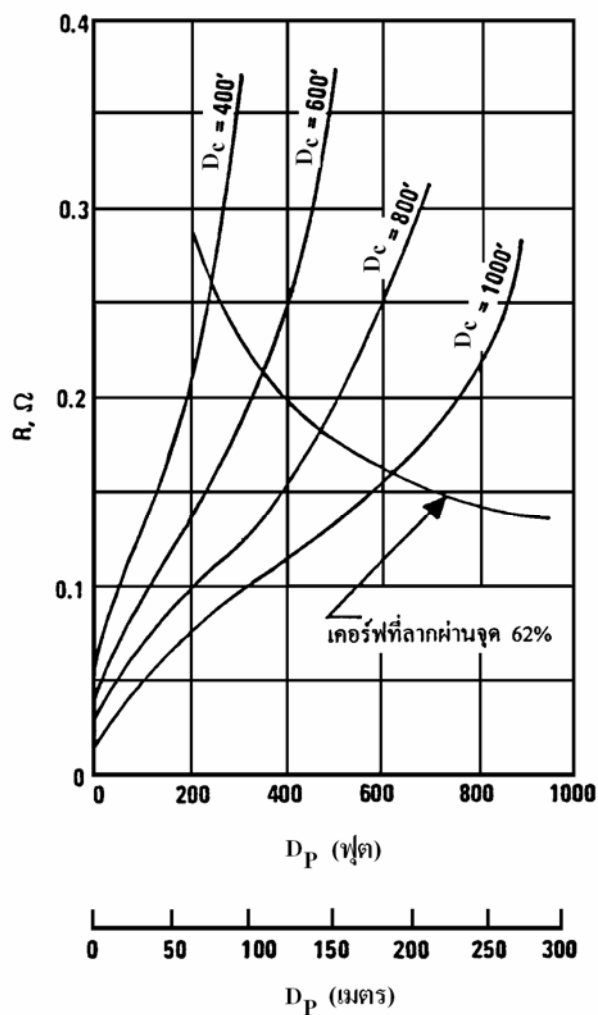
1. เริ่มต้นโดยการเลือกตำแหน่งรากสายดินที่ต้องการทดสอบมาจุดหนึ่ง ประดิเลือกจุดที่เข้าถึงสะดวก กำหนดให้เป็นจุด O
2. ปักขั้วกระแสที่ระยะห่างจากจุดที่ต้องการทดสอบเป็นระยะ D_C ปักขั้วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างจากจุดที่ต้องการทดสอบที่ระยะ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9 ของระยะ D_C วัดค่าความต้านทานดินในแต่ละตำแหน่งของขั้วศักย์ไฟฟ้า
3. นำค่าความต้านทานดินมาเขียนกราฟความต้านทานดินกับระยะของขั้วศักย์ไฟฟ้า จะได้กราฟความต้านทานดิน 1 เส้น



ภาพที่ 63 การจัดรูปแบบการวัดความต้านทานดินโดยวิธี Intersecting Curve

ที่มา: ปรับปรุงจากวิวัฒน์ (2548)

4. ดำเนินการตามข้อ 1 ถึงข้อ 3 เพื่อสร้างกราฟความต้านทานดินเส้นใหม่ โดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการทดสอบกับขั้วกระแส D_c ใหม่ 2-3 ระยะ จะได้กราฟความต้านทานดินหลายเส้นดังภาพที่ 64



ภาพที่ 64 กราฟความต้านทานดินของระบบบรากสายดินขนาดใหญ่

5. สมมติศูนย์กลางของระบบบรากสายดินอยู่ที่ตำแหน่ง D ห่างจากจุดที่ต้องการวัด O เป็นระยะ X ระยะจริงจากศูนย์กลางระบบบรากสายดินถึงขั้วกระแส คือ $D_c + X$ ความต้านทานดินของการวัดที่ถูกต้องได้รับเมื่อขั้วศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ระยะ $0.618 (D_c + X)$ จากศูนย์กลางระบบบรากสายดิน หมายความว่าระยะของขั้วศักย์ไฟฟ้า D_p ที่วัดจากจุด O เป็นไปตามสมการที่ 79 ดังนั้นเมื่อทราบระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการวัดกับจุดศูนย์กลางระบบบรากสายดิน X สามารถคำนวณค่าของระยะ D_p ได้ และสามารถอ่านความต้านทานดินได้จากกราฟตามข้อ 4

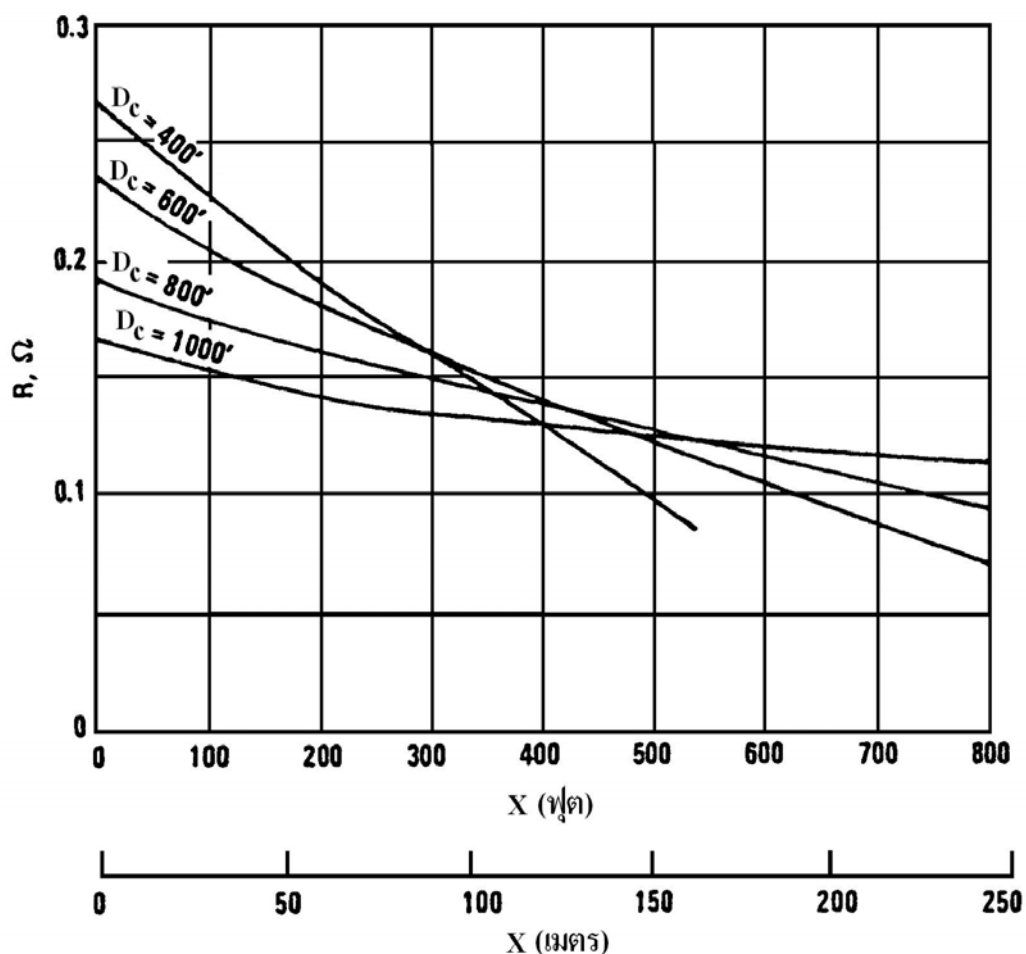
$$D_p = 0.618 (D_c + X) - X \quad (79)$$

6. เมื่อสมมติระยะจุดศูนย์กลางระบบรากสายดิน X ต่าง ๆ กัน เพื่อหาค่า D_p ตามสมการที่ 79 และจากค่า D_p สามารถอ่านค่าความต้านทานดินจากกราฟในข้อ 4 ค่าความต้านทานดินที่ได้จาก D_p แต่ละค่านำไปสร้างกราฟความต้านทานดินกับระยะศูนย์กลางระบบรากสายดิน X 1 เส้น

7. ดำเนินการตามข้อ 6 สำหรับระยะ D_c ต่าง ๆ กัน จะได้รับกราฟความต้านทานดินกับระยะศูนย์กลางระบบรากสายดินหลาย ๆ เส้นดังภาพที่ 65

8. พิจารณากราฟที่ได้ตามข้อ 7 กราฟควรตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่งและจุดที่กราฟตัดกันคือ ความต้านทานดินของระบบรากสายดินที่ดำเนินการวัด และทำให้ทราบจุดศูนย์กลางระบบรากสายดินด้วย ในกรณีที่กราฟไม่ตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่งโดยตรง ให้พิจารณาจุดที่กราฟตัดกันเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยจุดกึ่งกลางของสามเหลี่ยมจะให้ค่าความต้านทานดินของระบบรากสายดินที่วัด

จุดประสงค์ของการวัดความต้านทานดินด้วยวิธี Intersecting Curve คือ เพื่อลดระยะขั้วกระแส และปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ที่ดี จากการปฏิบัติระยะที่แน่นอนของขั้วกระแส คือ ถ้าระบบต่อลงดินเป็นรูปของสี่เหลี่ยมจัตุรัส ระยะที่น้อยที่สุดของขั้วกระแสไม่ควรน้อยกว่าด้านของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และระยะสูงที่สุดไม่ควรมากเกินไป 2 เท่าของด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากถ้าระยะขั้วกระแสมากเกินไปจะทำให้กราฟที่ได้แบนมาก และจุดตัดกันของกราฟจะไม่แน่ชัด สำหรับระบบรากสายดินรูปร่างอื่นๆ จะต้องตัดสินใจเลือกกระยะขั้วกระแสที่น้อยที่สุดและสูงที่สุดที่เหมาะสม



ภาพที่ 65 กราฟที่สร้างขึ้นโดยวิธี Intersection Curve

2.2 วิธี Slope Method

การวัดความต้านทานดินด้วยวิธี Fall-of-Potential แสดงให้เห็นว่าความต้านทานดินที่แท้จริงของระบบบรากสายดินจะได้รับเมื่อขั้วศักย์ไฟฟ้าอยู่ห่างจากศูนย์กลางระบบบรากสายดินเท่ากับ 61.8 % ของระยะจากศูนย์กลางระบบบรากสายดินไปยังขั้วกระแส ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดระบบบรากสายดินขนาดใหญ่ ขณะที่การทดสอบความต้านทานดินโดยวิธีการตัดกันของกราฟ (Intersecting Curve) เป็นวิธีที่ซับซ้อนและเป็นการคำนวณแบบ “ลองผิดลองถูก” (Trial and Error) ซึ่งไม่สะดวกในการปฏิบัติ จึงได้มีการคิดเทคนิคซึ่งปฏิบัติได้ง่ายกว่าและให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ รวมทั้งการวัดความต้านทานดินในดินที่มีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอด้วย วิธีนี้เรียกว่า Slope method

ขั้นตอนการวัดความต้านทานด้วยวิธี Slope มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกตำแหน่งรากสายดินที่ต้องการทดสอบ E ที่เหมาะสมซึ่งสามารถต่อกับเครื่องวัดความต้านทานดิน (Earth Tester) ได้สะดวก
2. ปิดขั้วกระแสที่ระยะห่างจากรากสายดิน E เป็นระยะ D_c ประกติประมาณ 2 - 3 เท่าของมิติสูงที่สุดของระบบรากสายดิน
3. ปิดขั้วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ 20% ของ D_c วัดค่าความต้านทานดิน กำหนดให้ค่าความต้านทานเป็น R_1
4. ปิดขั้วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ 40% ของ D_c วัดค่าความต้านทานดิน กำหนดให้ค่าความต้านทานเป็น R_2
5. ปิดขั้วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ 60% ของ D_c วัดค่าความต้านทานดิน กำหนดให้ค่าความต้านทานเป็น R_3
6. คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของความชันของกราฟความต้านทานดินกับระยะทางตามสมการที่ 80

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (80)$$

เมื่อ μ คือ การเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความต้านทานดิน

7. นำค่าการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความต้านทานดิน μ ที่ได้ไปหาค่าอัตราส่วนระหว่างระยะขั้วศักย์ไฟฟ้ากับระยะขั้วกระแส D_p / D_c จากตาราง Tagg Slope (ภาคผนวก ก)

8. เนื่องจากระยะชั่วกระแส D_c ที่ปักขณะวัดความต้านทานดินนั้นทราบค่าแล้ว สามารถคำนวณหาระยะชั่วศักย์ไฟฟ้า D_p จากสมการที่ 81

$$D_p = \frac{D_p}{D_c} \times D_c \quad (81)$$

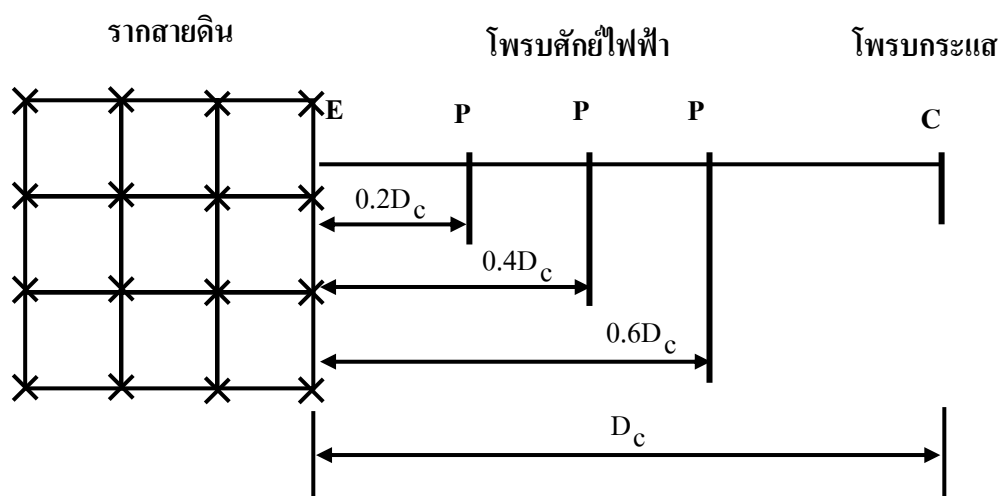
เมื่อ D_p คือ ระยะระหว่างรากสายดินกับชั่วศักย์ไฟฟ้า

$\frac{D_p}{D_c}$ คือ อัตราส่วนของ D_p / D_c จาก ตาราง Tagg Slope

D_c คือ ระยะระหว่างรากสายดินกับชั่วกระแส

9. ปักชั่วศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างจากระบบรากสายดิน E ที่ระยะใหม่ D_p ที่คำนวณได้ วัดความต้านทานดินที่ระยะ D_p ใหม่ ค่าความต้านทานดินที่ได้จะเป็นความต้านทานดินจริงที่ได้รับที่ระยะชั่วกระแส D_c นี้

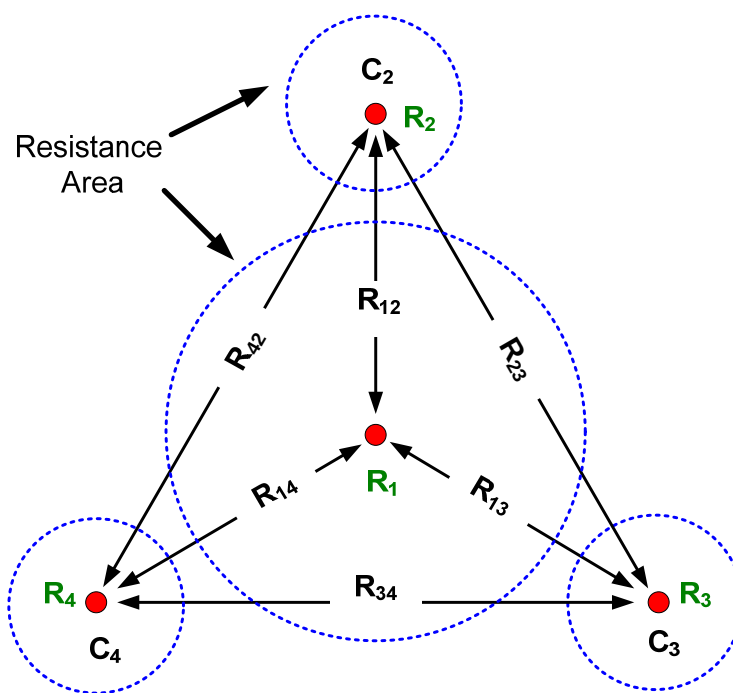
10. ดำเนินการตามข้อ 1 ถึง 9 ซ้ำสำหรับค่าของ D_c ที่มากขึ้น ถ้าความต้านทานจริง ลดลงอย่างเห็นได้ชัด จำเป็นต้องเพิ่มระยะของ D_c เพิ่มเติม หลังทำการทดสอบหลายๆ ครั้งและเขียนกราฟความต้านทานจริง กราฟจะเริ่มแสดงการลดลงน้อยและจะแสดงคงที่มากขึ้น ที่จุดนี้เป็นความต้านทานดินของระบบต่อลงดินที่แท้จริง



ภาพที่ 66 ตำแหน่งชั่วศักย์ไฟฟ้าสำหรับการวัดความต้านทานดินโดยวิธี Slope

2.3 วิธี Star Delta

การวัดความต้านทานดินด้วยวิธี Slope และวิธี Intersection Curve ถ้าขั้วกระแสอยู่ใกล้กับรากสายดินอาจจะอยู่ภายในสนามของการทดสอบรากสายดิน การพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีทั้งสองจะพิสูจน์ได้ไม่ชัดเจน และไม่สามารถแสดงต่อผู้ปฏิบัติงานว่าพบตำแหน่งการทดสอบที่ดีแล้ว เมื่อสภาวะนี้มีอิทธิพลต่อการวัดและพื้นที่ที่ต้องการทดสอบมีจำกัดทำให้ระยะห่างของขั้วกระแสกับรากสายดินไม่เพียงพอ อาจจำเป็นต้องใช้วิธี Star-Delta เป็นวิธีการวัดสำหรับโครงสร้างของขั้วทดสอบและเส้นทางของการวัด มีลักษณะคล้ายกับการเขียนสัญลักษณ์เหมือนระบบขดลวด Delta และ Star วิธีนี้จะใช้ระยะในการวัดน้อย โดยใช้โครงสร้างของขั้วศักย์ไฟฟ้าทั้งสามอยู่รอบ ๆ ระบบรากสายดินที่ทดสอบ



ภาพที่ 67 โครงร่างการทดสอบความต้านทานดินวิธี Star-Delta

ภาพที่ 67 รากสายดินที่จะทดสอบกำหนดเป็น " E " ขั้วกระแสทั้งสามกำหนดเป็น C_2 , C_3 และ C_4 ปักขั้วกระแสห่างจากรากสายดินเท่า ๆ กัน โดยมุมระหว่างขั้วกระแสเท่ากับ 120 องศา การแยกวงจรกระแสและวงจรแรงดันไม่ต้องสนใจ การวัดความต้านทานดินสองจุดวัดระหว่างขั้วของขั้วกระแสทั้งหมด และระหว่างขั้วกระแสกับรากสายดินที่ต้องการทดสอบ

ความต้านทานดินของระบบรากสายดินที่ทดสอบ E มีความต้านทานเป็น R_1 และ ความต้านทานดินของขั้วกระแส C_2 , C_3 และ C_4 มีความต้านทาน R_2 , R_3 และ R_4 ตามลำดับ ความสัมพันธ์อื่น ๆ คือความต้านทานระหว่างขั้วกระแสกับขั้วกระแสหรือระหว่างขั้วกระแสกับรากสายดินเป็นผลรวมของความต้านทานแต่ละคู่ (เหมือนกับ ความต้านทาน 2 ตัวต่ออนุกรมกัน) เช่น ถ้าวัดความต้านทานระหว่าง "E" และ " C_2 " ความต้านทานทั้งหมดจะเป็น $R_1 + R_2$ ดังนั้น เมื่อพิจารณาระบบทั้งหมด รูปแบบความต้านทาน Star-Delta แสดงโดยลูกศรระหว่าง "E" และขั้วกระแสตามภาพที่ 67 ผลการทดสอบในการวัด 6 ครั้ง ($R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{23}, R_{34}$ และ R_{42}) เมื่อนำไปคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ 4 สมการ จะสามารถคำนวณความต้านทานดินของรากสายดินที่ต้องการทดสอบได้

เมื่อระยะระหว่างรากสายดิน E และขั้วกระแสเพียงพอ (พื้นที่ความต้านทานไม่ซ้อนทับกัน) ความต้านทานแต่ละค่าของรากสายดินสามารถหาได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{3} \left[(R_{12} + R_{13} + R_{14}) - \left(\frac{R_{23} + R_{34} + R_{42}}{2} \right) \right] \quad (82)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} [R_{12} + R_{13} - R_{23}] \quad (83)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} [R_{12} + R_{14} - R_{42}] \quad (84)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} [R_{13} + R_{14} - R_{34}] \quad (85)$$

ถ้าผลลัพธ์จากสมการที่ (82) เท่ากับผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (83) สมการที่ (84) และสมการที่ (85) เงื่อนไขนี้จำเป็นพอใจสำหรับการวัด อย่างไรก็ตามถ้ามีขั้วกระแสปักอยู่ในพื้นที่ความต้านทานที่ซ้อนทับกับรากสายดินหรือขั้วกระแสอื่น ๆ ค่าความต้านทานที่ได้รับจะผิดพลาดอย่างชัดเจน (บางครั้งค่าความต้านทานจะมีค่าเป็นลบ) ค่าความต้านทานที่ได้จะเตือนให้ผู้วัดทำการทดสอบซ้ำ

การคำนวณความต้านทาน R_2 , R_3 และ R_4 เพื่อแสดงข้อผิดพลาดที่คิดพลาด สมการ
สำหรับหาค่า R_2 , R_3 และ R_4 คือ

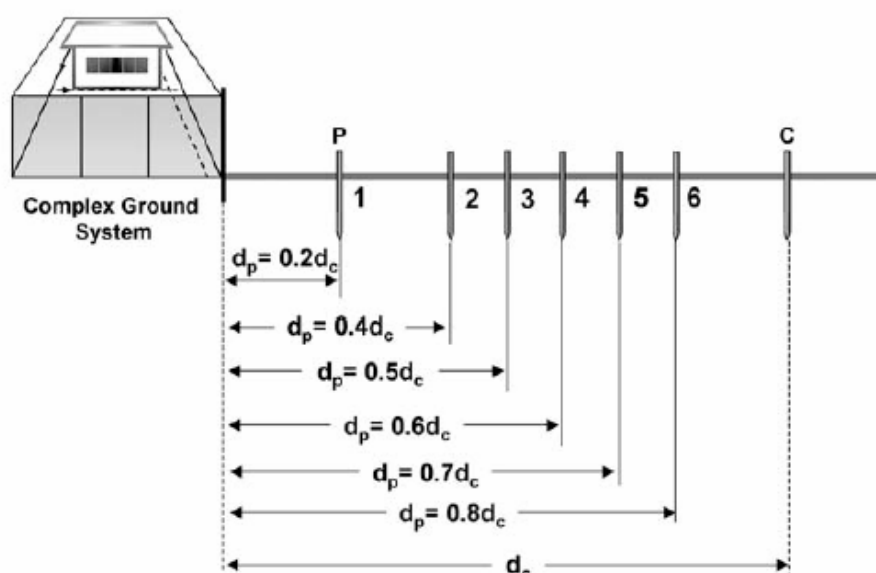
$$\left. \begin{aligned} R_2 &= \frac{1}{2} [R_{12} + R_{23} - R_{13}] \\ R_2 &= \frac{1}{2} [R_{12} + R_{42} - R_{14}] \\ R_2 &= \frac{1}{2} [R_{23} + R_{42} - R_{34}] \end{aligned} \right\} \quad (86)$$

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= \frac{1}{2} [R_{13} + R_{23} - R_{12}] \\ R_3 &= \frac{1}{2} [R_{13} + R_{34} - R_{14}] \\ R_3 &= \frac{1}{2} [R_{23} + R_{34} - R_{42}] \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

$$\left. \begin{aligned} R_4 &= \frac{1}{2} [R_{13} + R_{23} - R_{12}] \\ R_4 &= \frac{1}{2} [R_{13} + R_{34} - R_{14}] \\ R_4 &= \frac{1}{2} [R_{23} + R_{34} - R_{42}] \end{aligned} \right\} \quad (88)$$

2.4 วิธี 4 ขั้ว (Four Potential Method)

วิธี Four Potential ได้รับการแนะนำโดยดอกเตอร์ G.F.Tagg ในปี 1964 อยู่บนพื้นฐานวิธี Fall-of-Potential โดยมีจุดประสงค์ที่ต้องการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบบรากสายดินที่ซับซ้อนซึ่งหาตำแหน่งศูนย์กลางไฟฟ้าของระบบต่อลงดินได้ยาก วิธีการนี้จะครอบคลุมการทดสอบและสามารถหาสูตรความต้านทานของการต่อลงดิน ค่าความต้านทานดินได้รับโดยเครื่องวัดที่ตำแหน่งขั้วศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 6 จุด เมื่อนำไปแทนในสมการ 4 สมการ จะสามารถหาความต้านทานการต่อลงดินที่ถูกต้องได้



ภาพที่ 68 โครงร่างการทดสอบความต้านทานดินวิธี Four Potential

ข้อทดสอบจัดตามภาพที่ 68 การวัดระบบต่อลงดินที่ซับซ้อน ขั้วกระแสวางที่ระยะเหมาะสมจากขอบของระบบต่อลงดิน ขั้วศักย์ไฟฟ้าวางที่ระยะ 20% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของระยะขั้วกระแสและทำการทดสอบในแต่ละตำแหน่งของขั้วกระแส ค่าความต้านทานที่ได้รับ (R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 และ R_6) นำไปคำนวณสมการ 4 สมการดังนี้

$$R_{\infty} = -0.1187R_1 - 0.4667R_2 + 1.9816R_4 - 0.3961R_6 \quad (89)$$

$$R_{\infty} = -2.6108R_2 + 4.0508R_3 - 0.1626R_4 - 0.2774R_6 \quad (90)$$

$$R_{\infty} = -1.8871R_2 + 1.1148R_3 + 3.6837R_4 - 1.9114R_5 \quad (91)$$

$$R_{\infty} = -6.5225R_3 + 13.6816R_4 - 6.8803R_5 + 0.7210R_6 \quad (92)$$

ผลลัพธ์สำหรับ R_{∞} 4 ค่า ควรจะใกล้เคียงกันมาก และสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ได้ เนื่องจากวิธีนี้เป็นสมมุติฐานในทางทฤษฎี ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ที่ผลลัพธ์จากสมการที่ (89) จะถูกต้องน้อยกว่าสมการอื่น ๆ ถ้าผลลัพธ์จากสมการที่ (89) มีความแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (90) สมการที่ (91) และสมการที่ (92) อาจจะไม่ต้องคำนึงถึงและคำนวณค่าเฉลี่ยจากผลลัพธ์ 3 ค่าที่เหลือ

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องการระยะสำหรับช่วงกระแสน้ำ (D_c) มาก ระยะช่วงกระแสน้ำจะอยู่ในช่วงถึง 2,000 ฟุต (600 เมตร) หรือมากกว่าสำหรับระบบบรากสายดินที่ปกคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ หรือระบบบรากสายดินที่มีความต้านทานดินต่ำมาก

3. กำหนดกลุ่มตัวอย่างที่จะศึกษา

กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างที่ปกคลุมด้วยชั้นดินตะกอนดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำเจ้าพระยา (Chao Phaya deltaic clays) ครอบคลุมเขตพื้นที่ทั้งหมดและบางส่วนของ 14 จังหวัด รวมถึงกรุงเทพมหานครและปริมณฑล คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร ชั้นดินเหนียวอ่อนได้รับขนานนามว่า “ดินเหนียวกรุงเทพ” (Soft Bangkok Clay) มีความหนาของชั้นดินโดยเฉลี่ยประมาณ 18 เมตร และมีปริมาณน้ำในดินในช่วง 20 – 120% โดยน้ำหนัก มีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจสูงและมีโครงการก่อสร้างต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก สิ่งปลูกสร้างวางตัวอยู่เกือบเต็มพื้นที่ อย่างไรก็ตามอาคารและสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่มักจะกระจุกตัวกันอยู่ในบริเวณส่วนกลางของพื้นที่ ซึ่งเรียกว่าเขตพื้นที่กรุงเทพ ฯ ชั้นใน (ว.ส.ท., ม.ป.ป.)

การตรวจสอบความต้านทานดินของบรากสายดินฐานรากจะต้องใช้พื้นที่ในการทดสอบมาก พื้นที่กรุงเทพ ฯ ชั้นในจึงไม่เหมาะสม ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงเลือกกลุ่มตัวอย่างพื้นที่กรุงเทพ ฯ ชั้นนอกและปริมณฑลที่มีสิ่งปลูกสร้างกำลังดำเนินการก่อสร้างอยู่

4. การทดสอบความต้านทานดินในภาคสนามและการเก็บข้อมูล

การทดสอบความต้านทานดินในภาคสนามเริ่มจากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยใช้การวัดแบบ Four-point method แบบระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากันหรือวิธีของ Wenner ซึ่งให้ผลการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ถูกต้องที่สุด โดยกำหนดช่วงระยะห่างของขั้วความต่างศักย์ที่สัมพันธ์กับการย้ายขั้วกระแส โดยระยะห่างของขั้วกระแสและขั้วความต่างศักย์ที่ใช้ คือ ระยะ 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 เมตร จากนั้นพิจารณาขนาดของระบบรากสายดินฐานรากเพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วกระแสกับระบบรากสายดินและดำเนินการวัดความต้านทานดินตามวิธีสโบล การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง มี 3 ลักษณะ คือ

- (1) การสำรวจเก็บข้อมูลความต้านทานดินที่ใช้เหล็กแกนเสาภายใน Footing เป็นรากสายดินฐานราก
- (2) การสำรวจเก็บข้อมูลความต้านทานดินที่ใช้เหล็กเสริมภายในคานคอดินเป็นรากสายดินฐานราก
- (3) การสำรวจเก็บข้อมูลความต้านทานดินที่ใช้เหล็กเสริมภายในพื้นคอนกรีตเป็นรากสายดินฐาน

5. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตาม (Dependent Variable) 1 ตัว กับตัวแปรอิสระ (Independent Variable) 1 ตัวหรือมากกว่า 1 ตัวว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตามขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรอิสระอย่างไร โดยเริ่มพิจารณาว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด จากนั้นจะสร้างรูปแบบการถดถอยเพื่อแทนลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ได้แก่ การสร้างสมการถดถอย (Regression Equation) จากรูปแบบที่กำหนดนั้นโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) สมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่นั้นจะพิจารณาได้ทั้งจากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐาน ค่าสถิติที่ใช้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแล้ว (Adjusted Coefficient of Determination) ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean of Square) ส่วนการทดสอบสมมติฐานเป็นการพิจารณา

ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยบางค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ นั่นคือตัวแปรอิสระบางตัวแปรมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามหรือไม่ โดยการทดสอบแบบ t และแบบ t บางส่วน หรือการทดสอบแบบ F หรือแบบ F บางส่วน (ทรงศิริ,2542)

5.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation Analysis)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์อย่างง่าย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวแปร เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การถดถอย ข้อแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์การถดถอย คือ การวิเคราะห์การถดถอยค่าที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยไม่ได้แสดงระดับของความสัมพันธ์ ขณะที่การวิเคราะห์สหสัมพันธ์จะให้ค่าที่แสดงระดับความสัมพันธ์ได้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : R) หลักการวิเคราะห์ คือ การพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม Y สามารถอธิบายด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรอิสระ X ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าอธิบายได้มากแสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าอธิบายได้น้อยแสดงว่ามีความสัมพันธ์กันน้อย การคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทำได้โดยใช้สมการที่ (93)

$$R = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)(\sum Y^2 - n\bar{Y}^2)}} \quad (93)$$

การแปลความหมายของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

1. ค่า R มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1
2. เครื่องหมายของ R แสดงทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ถ้าเป็นบวกแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ถ้ามีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม
3. ถ้า R เท่ากับ 1 หรือ -1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์สมบูรณ์แบบ ถ้าพิจารณาจากแผนภาพการกระจายจะพบว่า จุดทุกจุดจะอยู่ในแนวเส้นตรง

4. ถ้า R มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน
5. ถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อย แต่ถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเข้าใกล้ -1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมาก

5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination , R^2)

สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ คือ ค่าที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตาม (Y) ที่เกิดจากค่าตัวแปรอิสระ (X) กล่าวคือเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของตัวแปร Y นั้นอธิบายได้ด้วยตัวแปร X ร้อยละเท่าไร และจากสาเหตุอื่นอีกร้อยละเท่าไร ถ้าค่า R^2 มีค่าสูงมาก แสดงว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการการถดถอย นั้นได้ดี และตัวแปรทั้งสองนั้นมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สมการการถดถอยที่ใช้ประมาณย่อมมีค่าความน่าเชื่อถือได้สูง แต่ถ้าค่า R^2 ต่ำแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการการถดถอย และตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความผันแปรที่อธิบายได้ด้วยตัวแปร X (Explained variation) กับความผันแปรรวม (Total variation) ตามสมการที่ (94)

$$R^2 = \frac{\text{Explained Variation}}{\text{Total Variation}} = \frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (94)$$

เมื่อ Y คือ ค่าข้อมูลจริงของตัวแปรตาม

$\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูลจริงของตัวแปรตาม

$\hat{Y}$ คือ ค่าจากการวิเคราะห์ของตัวแปรตาม

เกณฑ์การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ Y จะพิจารณาจากค่า Coefficient of Determination (R^2) ของเส้นกราฟการถดถอย ดังนี้

การแปลความหมายค่าของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

1. R^2 เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า การผันแปรของ Y สามารถอธิบายได้จากตัวแปร X ร้อยละเท่าไร และจากสาเหตุอื่นอีกร้อยละเท่าไร
2. ถ้า $R^2 = 0$ แสดงว่าการผันแปรของ Y ไม่สามารถอธิบายได้จากตัวแปร X เลย หรือ X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
3. ถ้า $R^2 = 1$ แสดงว่าการผันแปรของ Y อธิบายได้จากตัวแปร X ร้อยละ 100 หรือ X และ Y มีความสัมพันธ์สมบูรณ์แบบ
4. ถ้า $R^2 = 0.67$ แสดงว่าการผันแปรของ Y อธิบายได้จากตัวแปร X ร้อยละ 67 อีก ร้อยละ 33 เป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุอื่น

5.3 การคัดเลือกสมการการถดถอยที่ดีที่สุด (Selection the Best Regression Equation)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยการสร้างสมการถดถอยจุดประสงค์เพื่อพยากรณ์ค่าตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระ ดังนั้น สมการถดถอยที่ดีที่สุด คือ สมการถดถอยที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้ใกล้เคียงที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ว่ามีค่ามากหรือน้อย ถ้า R^2 มีค่ามากแสดงว่าตัวแปรอิสระที่ใช้อยู่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม โดยปกติสมการถดถอยที่ดีจะพยายามหาตัวแปรอิสระให้มากที่สุดเพื่อมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ซึ่งถ้ามีตัวแปรอิสระมากขึ้นย่อมจะทำให้ค่า R^2 สูงขึ้นตามไปด้วย ในกรณีนี้ต้องระมัดระวังการสรุปผลจากค่า R^2 เพราะเมื่อค่า R^2 สูงขึ้นทำให้ดูเหมือนว่าตัวแปรอิสระเหล่านั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก แต่บางครั้งตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในสมการเดียวกันนั้นมีความสัมพันธ์กันสูง จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามให้มีค่า R^2 สูงไปด้วย ปัญหาความซ้ำซ้อนของความสัมพันธ์นี้เรียกว่า การเกิด Multicollinearity ดังนั้นก่อนนำตัวแปรอิสระใดมาสร้างสมการการถดถอยควรแก้ปัญหา Multicollinearity โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งหมดก่อนโดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ถ้าตัวแปรอิสระคู่ใดมีความสัมพันธ์กันสูง แสดงว่าตัวแปรทั้งสองนั้นสามารถแทนกันได้จึงควรตัดออกไป โดยนำมาใช้เพียงตัวแปรเดียวซึ่งในการเลือกตัวแปรใดนั้น ให้พิจารณาจากตัวแปรอิสระตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่สูงกว่า (ศิริชัย, 2540)

รูปแบบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากกับ
รัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)
โดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) for Windows Version 13.0
รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

$$\hat{Y} = a + b \ln(X) \quad (95)$$

$$\hat{Y} = a + \frac{b}{X} \quad (96)$$

$$\hat{Y} = a(b)^X \quad (97)$$

$$\hat{Y} = a(X)^b \quad (98)$$

$$\hat{Y} = e^{\left(a + \frac{b}{X}\right)} \quad (99)$$

$$\hat{Y} = e^{(a + bX)} \quad (100)$$

$$\hat{Y} = ae^{bX} \quad (101)$$

$$\hat{Y} = \frac{1}{\frac{1}{u} + a(b)^X} \quad (102)$$

โดยที่ $\hat{Y}$ คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

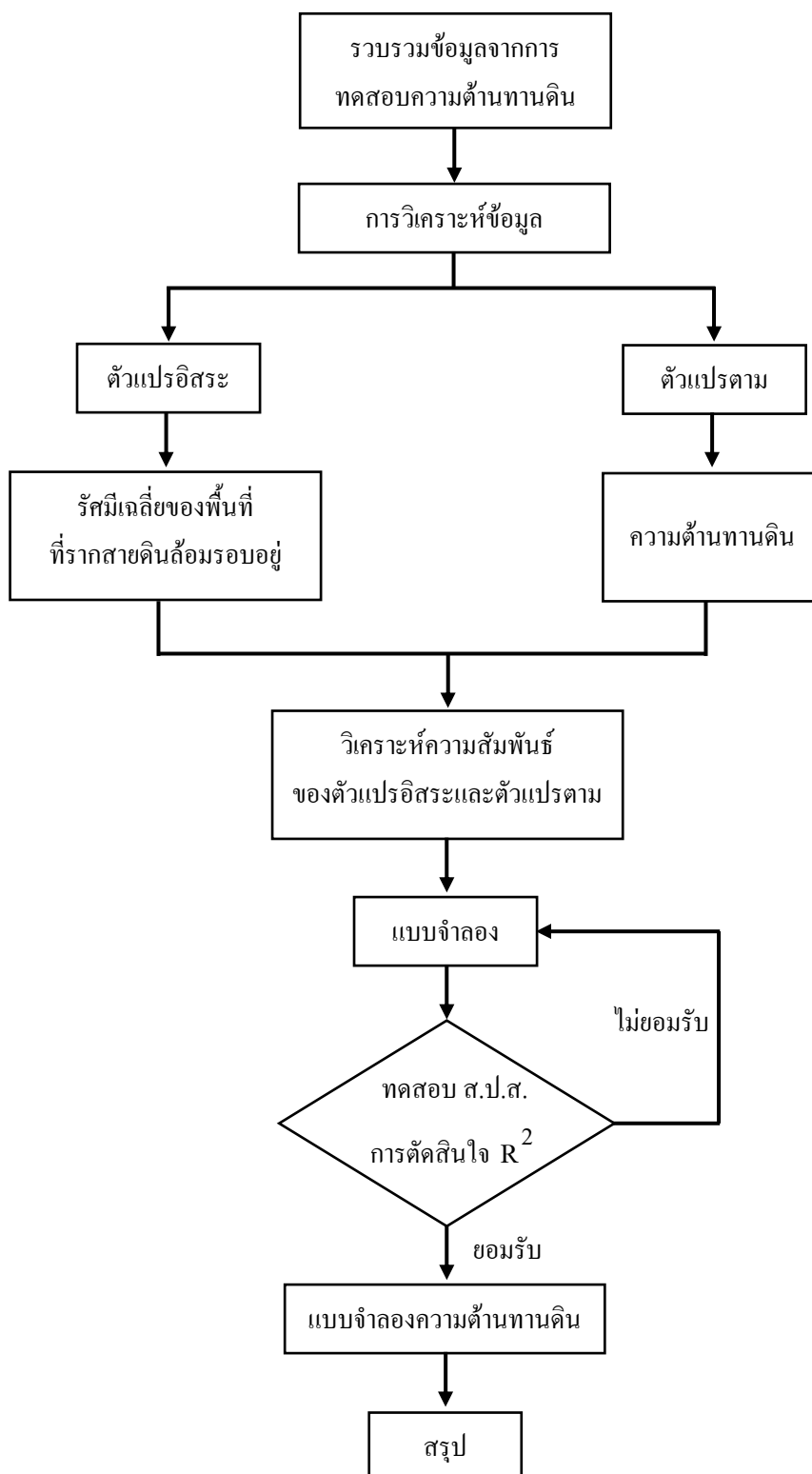
X คือ รัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ (เมตร)

a คือ ค่าคงที่

b คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย

u คือ ค่าขอบเขตบนของรูปแบบโลจิสติก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก
แสดงตามภาพที่ 69



ภาพที่ 69 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก

ผลและวิจารณ์

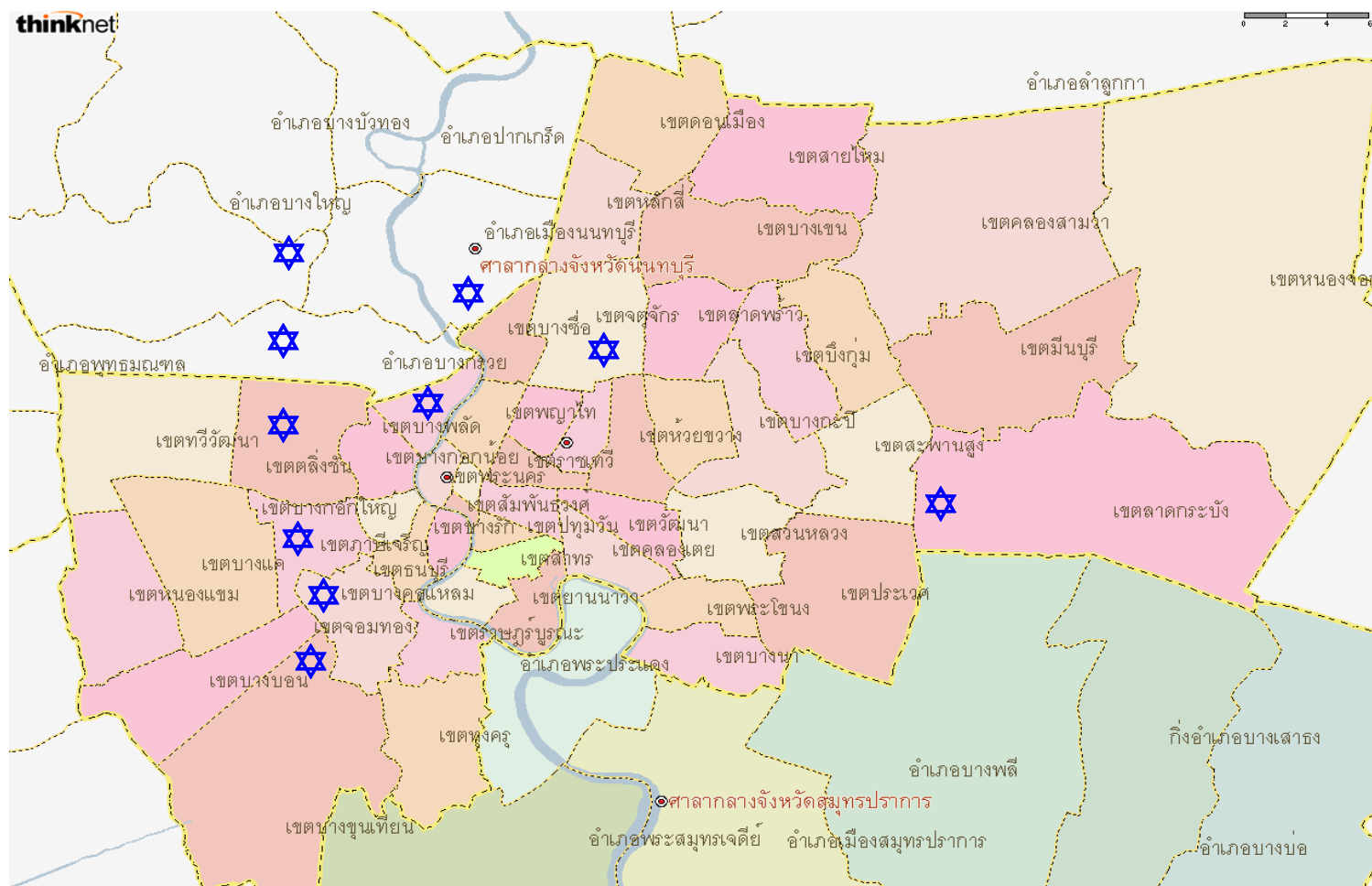
ผล

จากการดำเนินการทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก โดยใช้เหล็กเสริมภายในสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล ได้ดำเนินการทดสอบจากโครงการก่อสร้างจำนวน 23 โครงการ ดังนี้

1. โครงการก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ถนนสีรินธร แขวงบางพลัด เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร
2. โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี
3. โครงการก่อสร้างอาคารโหลว์มรยงค์โดโยต์บางนาคอมเพล็กซ์ เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
4. โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชันษา จุฬารักษ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร
5. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรุ๊ป ถนนนครอินทร์ อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี
6. โครงการก่อสร้างโรงพยาบาลสวทยานามัยกรมตดแต่ง (โรงพยาบาลราชาวดี) ถนนนครอินทร์ ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
7. โครงการก่อสร้างอาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2 ถนนพระราม 2 เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร
8. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง ถนนราชพฤกษ์ อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี

9. โครงการก่อสร้างอาคารโหว์รุ่มรถยนต์มือสอง ถนนราชพฤกษ์ อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี
10. โครงการก่อสร้าง อาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร
11. โครงการก่อสร้างหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมัมพร 2 ถนนราชพฤกษ์ เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร
12. โครงการก่อสร้างโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก ถนนสีรินธร แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร
13. โครงการก่อสร้างบ้านพักข้าราชการกรมทางหลวง ถนนสีรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร
14. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น ถนนราชพฤกษ์ อำเภอบางกรวย จังหวัด นนทบุรี
15. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานบริษัททัวร์ ถนนราชพฤกษ์ เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร
16. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์สำหรับจำหน่ายแอร์ สำนักงานและที่อยู่อาศัย ถนนกัลป์พฤกษ์ เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร
17. โครงการก่อสร้างอาคารโหว์รุ่มและศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า ถนนกัลป์พฤกษ์ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร
18. โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียม เมโทรพาร์ค สาทร ถนนกัลป์พฤกษ์ เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร

19. โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำนักงานข้าราชการพลเรือน (กพ.) ถนนติวานนท์
อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
 20. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ริมถนนราชพฤกษ์ ถนนราชพฤกษ์ เขตตลิ่งชัน
กรุงเทพมหานคร
 21. โครงการก่อสร้างอาคารที่พักคอนโดมิเนียม คชาบุรี(ชัยพร วิลล์ 1) ถนนราชพฤกษ์
เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร
 22. โครงการก่อสร้างอาคารเรียน สถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า ถนนพระบรม
ราชชนนี แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร
 23. โครงการก่อสร้างภาควิชาวิศวกรรม เครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
บางเขน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร
- สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้างที่เป็นกลุ่มตัวอย่างทดสอบความต้านทานดินของรากสายดิน
ฐานรากแสดงตามภาพที่ 70 และผลการทดสอบความต้านทานดินแสดงตามตารางที่ 16 - 18



ภาพที่ 70 สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้างที่เป็นกลุ่มตัวอย่างทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก

ตารางที่ 16 ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กแกนเสาภายใน Footing

โครงการ	จำนวนตัวอย่าง	ขนาดฐานราก (เมตรxเมตรxเมตร)	ความต้านทานดิน (โอห์ม)	หมายเหตุ
อาคารหอพักนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต	5	พื้นที่หน้าตัด 660 ซม. ² ยาว 25 เมตร	0.600-3.400	ทดสอบจากเสาเข็ม
อาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2	1.00 x 1.00 x 2.00 3.00 x 3.00 x 2.00	1.726 – 1.760 0.874 – 0.962	
อาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2	30	0.50 x 0.50 x 0.60 0.50 x 0.70 x 0.60	0.344-7.170	
อาคารพาณิชย์ 4 ชั้น	7	0.60 x 0.60 x 0.60	0.062 – 3.570	
อาคารโหลว์รูมและศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า	5	0.50 x 0.50 x 0.60	3.37 – 7.13	
อาคารสำนักงานบริษัททัวร์	1	พื้นที่หน้าตัด 660 ซม. ² ยาว 25 เมตร	0.598	ทดสอบจากเสาเข็ม

ตารางที่ 17 ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กเสริมภายในคานคอดิน

โครงการ	ความต้านทาน จำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)	รัศมีเฉลี่ย ของอาคาร (เมตร)	ความต้านทานดิน (โอห์ม)	ความต่อเนื่อง (โอห์ม)
อาคารหอพักนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต	ทดสอบไม่ได้	6.38	0.700	ทดสอบไม่ได้
อาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	131.32	26.30	0.280	0.260 – 2.890
อาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรู๊ป	38.79	10.70	0.014	0.018 – 2.550
อาคารโรงพยาบาลสงขลางามสัณยกรรมตกแต่ง	21.03	26.76	0.030	0.204 – 4.250
อาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2	11.88	39.09	0.010	0.168 – 1.200
อาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง	5.57	6.77	0.700	0.236 – 2.430
อาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	4.69	21.25	0.042	0.170 – 0.240
อาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2	3.50	3.71	0.727	0.972 – 5.990
อาคารที่พักข้าราชการกรมทางหลวง	9.70	11.94	0.037	4.205 – 6.150

ตารางที่ 17 (ต่อ)

โครงการ	ความต้านทาน จำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)	รัศมีเฉลี่ย ของอาคาร (เมตร)	ความต้านทานดิน (โอห์ม)	ความต่อเนื่อง (โอห์ม)
อาคารพาณิชย์ 4 ชั้น	5.15	9.57	0.042	0.208 – 0.472
อาคารสำนักงานบริษัททัวร์	76.11	10.48	0.120	0.170 – 0.380
อาคารพาณิชย์จำหน่ายแอร์ สำนักงานและที่พักอาศัย	5.33	8.69	0.168	0.135 – 1.450
อาคารโชว์รูมและศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า	6.32	37.85	0.010	0.327 – 2.050
อาคารคอนโดมิเนียมเมโทรปาร์คสาทร	4.78	15.96	0.030	0.358 – 2.070
อาคารที่ทำการสำนักงาน กพ. จังหวัดนนทบุรี	4.30	24.51	0.023	0.690 – 3.410
อาคารพาณิชย์ริมถนนราชพฤกษ์	5.62	11.73	0.037	0.198 – 0.266
อาคารคอนโดมิเนียม คชาบุรี (ชัยพฤกษ์ 1)	5.65	10.84	0.038	0.186 – 4.390
อาคารเรียนสถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า	55.24	21.11	1.600 – 2.420	1.260 – 2.450
อาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	85.07	23.94	0.074	0.386 – 2.173

ตารางที่ 18 ค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากทดสอบจากเหล็กเสริมภายในพื้นคอนกรีต

โครงการ	ความต้านทาน จำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)	รัศมีเฉลี่ย ของอาคาร (เมตร)	ความต้านทานดิน (โอห์ม)	ความต่อเนื่อง (โอห์ม)
อาคารโชว์รูมรถยนต์โตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์	15.02	7.36	0.046	1.650 – 5.180
อาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชนมายุพารณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	5.73	22.25	0.026	0.808 – 2.720
อาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก	12.70	29.48	0.073	0.355 – 3.410
อาคารโชว์รูมรถยนต์มือสอง	5.60	19.08	0.114	0.176 – 3.550

จากการดำเนินการทดสอบความต้านทานดินของรากสายดินฐานราก โดยใช้เหล็กเสริมภายในสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล จากโครงการก่อสร้างจำนวน 23 โครงการ ผลการทดสอบความต้านทานดินแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ทดสอบจากเหล็กแกนเสาที่อยู่ภายใน Footing ที่มีลักษณะเหมือนกับแท่งหลักดิน (Ground Rod) ดำเนินการทดสอบจาก 6 โครงการ รวม 50 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.344 – 7.170 โอห์ม

กลุ่มที่ 2 ทดสอบจากเหล็กเสริมภายในคานคอดินที่มีลักษณะเหมือนกับรากสายดินวงแหวน (Ring Electrode) ดำเนินการทดสอบจาก 19 โครงการ พบว่ามีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.010 – 0.727 โอห์ม

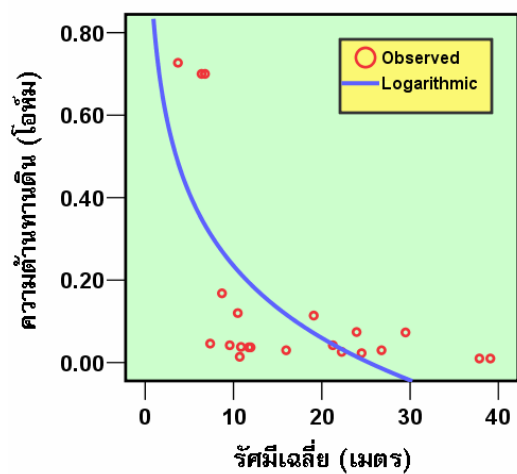
กลุ่มที่ 3 ทดสอบจากเหล็กเสริมภายในพื้นคอนกรีตที่มีลักษณะเหมือนกับรากสายแบบตะแกรง (Ground Grid) ดำเนินการทดสอบจาก 4 โครงการ พบว่ามีค่าความต้านทานดินระหว่าง 0.026 – 0.114 โอห์ม

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากกับรัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Statistical Package for Social Science (SPSS) for Windows คำนวณหาสมการการถดถอย (Regression Equation) ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์หลากหลายรูปแบบ หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) เพื่อใช้เลือกรูปแบบสมการการถดถอยที่ดีที่สุด

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินกับรัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ ได้ผลดังตารางที่ 19

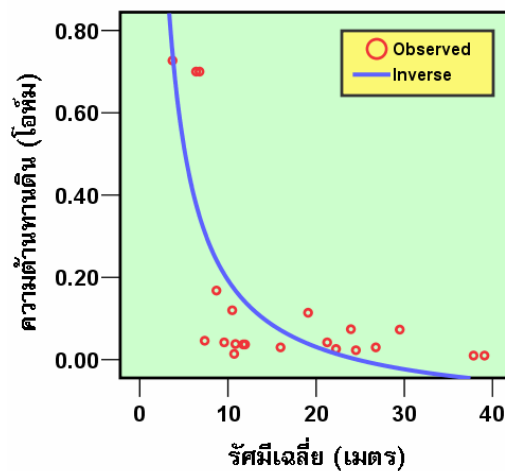
ตารางที่ 19 สมการถดถอยและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

รูปแบบสมการถดถอย	สมการถดถอย	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2
Logarithmic	$\hat{Y} = 0.817 - 0.253 \ln(X)$	0.453
Inverse	$\hat{Y} = -0.132 + \frac{3.251}{X}$	0.625
Compound	$\hat{Y} = 0.224 \bullet 0.924^X$	0.402
Power	$\hat{Y} = 2.573 \bullet X^{-1.423}$	0.505
S	$\hat{Y} = e^{\left(-4.229 + \frac{16.335}{X}\right)}$	0.555
Growth	$\hat{Y} = e^{(-1.494 - 0.079X)}$	0.402
Exponential	$\hat{Y} = 0.224e^{-0.079X}$	0.402
Logistic	$\hat{Y} = \frac{1}{4.455 \bullet 1.082^X}$	0.402



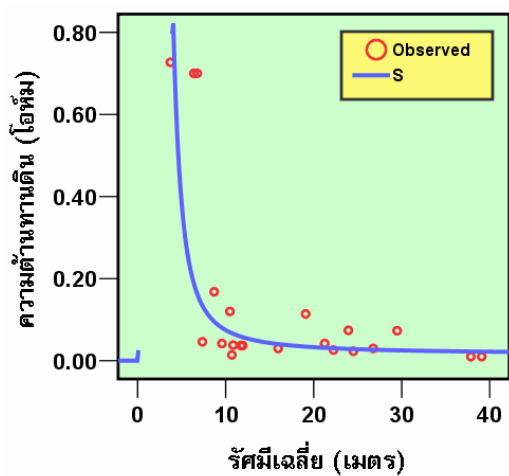
(ก) กราฟแบบ Logarithmic

$$\hat{Y} = 0.817 - 0.253 \ln(X)$$



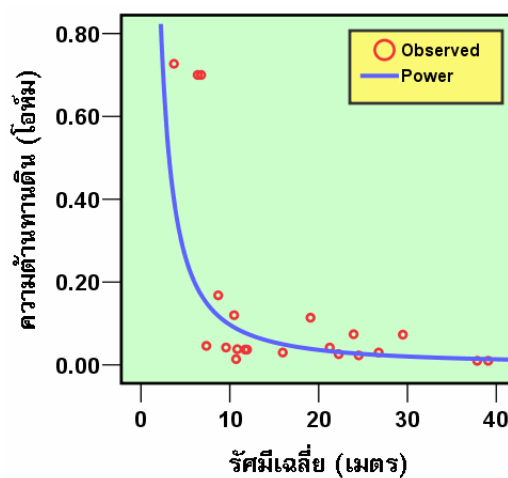
(ข) กราฟแบบ Inverse

$$\hat{Y} = -0.132 + \frac{3.251}{X}$$



(ค) กราฟแบบ S

$$\hat{Y} = e^{\left(-4.229 + \frac{16.335}{X}\right)}$$



(ง) กราฟแบบ Power

$$\hat{Y} = 2.573 \bullet X^{-1.423}$$

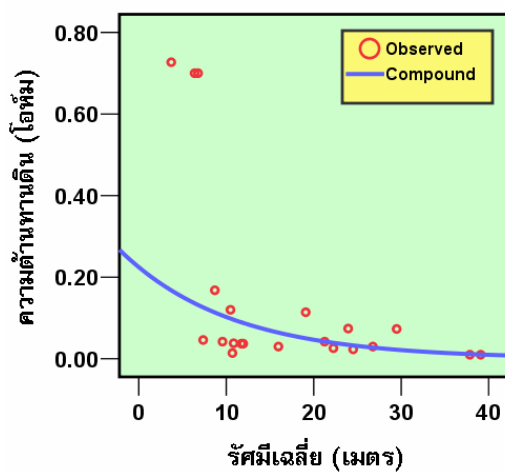
ภาพที่ 71 กราฟสมการถดถอย

(ก) แบบ Logarithmic

(ข) แบบ Inverse

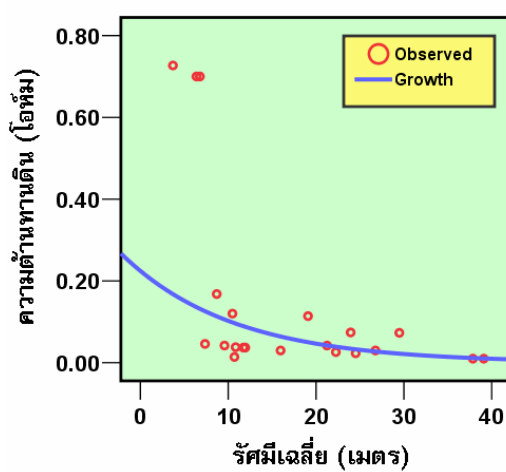
(ค) แบบ S

(ง) แบบ Power



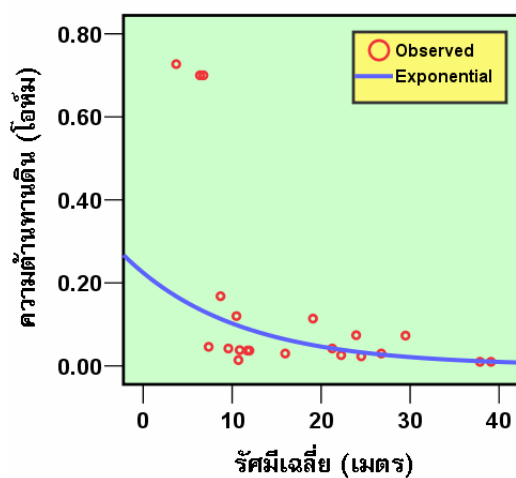
(ก) กราฟแบบ Compound

$$\hat{Y} = 0.224 \bullet 0.924^X$$



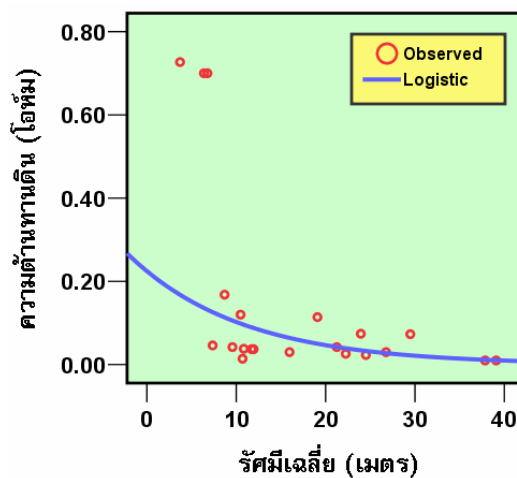
(ข) กราฟแบบ Growth

$$\hat{Y} = e^{(-1.494 - 0.079X)}$$



(ค) กราฟแบบ Exponential

$$\hat{Y} = 0.224e^{-0.079X}$$



(ง) กราฟแบบ Logistic

$$\hat{Y} = \frac{1}{4.455 \bullet 1.082^X}$$

ภาพที่ 72 กราฟสมการถดถอย

(ก) แบบ Compound

(ข) แบบ Growth

(ค) แบบ Exponential

(ง) แบบ Logistic

วิจารณ์

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองแต่ละแบบพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.402 ถึง 0.625 และเมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากสมการถดถอยพบว่ารูปแบบบางสมการไม่เหมาะสม เช่น กราฟที่ได้จากสมการถดถอยแบบ Logarithmic และ Inverse กราฟตัดแกน X ซึ่งขัดแย้งกับแนวความคิดพื้นฐานเนื่องจากค่าความต้านทานดินมีค่าเป็นลบไม่ได้ ขณะที่กราฟที่ได้จากสมการถดถอยแบบ Compound, Growth, Exponential และ Logistic นั้น มีลักษณะเหมือนกัน โดยที่กราฟจะตัดแกน Y ซึ่งขัดแย้งกับแนวความคิดพื้นฐานเนื่องจากเมื่อขนาดของพื้นที่ที่รากลอยดินล้อมรอบมีค่าเป็นศูนย์ (ไม่ได้ติดตั้งรากลอยดิน) ค่าความต้านทานดินควรมีค่าสูง ดังนั้นสมการที่เหมาะสมคือ สมการถดถอยแบบ Power และแบบ S เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพบว่าสมการถดถอยแบบ S มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่าสมการถดถอยแบบ Power แต่ไม่แตกต่างกันมากนักจึงสามารถใช้ได้ทั้งสองรูปแบบ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินของรากลอยดินฐานรากกับรัศมีเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กันตามสมการถดถอยแบบ S ตามสมการที่ (103) และสมการถดถอยแบบ Power ตามสมการที่ (104)

$$\hat{Y} = e^{\left(-4.229 + \frac{16.335}{X}\right)} \quad (103)$$

$$\hat{Y} = 2.573 \bullet X^{-1.423} \quad (104)$$

โดยที่ $\hat{Y}$ คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

X คือ รัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากลอยดินล้อมรอบอยู่ (เมตร)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก โดยใช้วิธีสำรวจวัดค่าความต้านทานดิน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้เหล็กแกนเสาของ Footing เป็นรากสายดินฐานราก ในดินที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า 100 โอห์ม-เมตร จะให้ความต้านทานดินต่ำกว่า 10 โอห์ม การใช้เหล็กเสริมภายในคานคอดินและเหล็กเสริมภายในพื้นคอนกรีตชั้นที่ติดกับดินของสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดินฐานรากจะให้ความต้านทานดินต่ำกว่า 1 โอห์ม
2. รากสายดินฐานรากมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีความต้านทานดินต่ำ สามารถใช้เป็นรากสายดินในระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ โดยใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่ต่ำกว่า 120 ตารางมิลลิเมตร แต่ต้องระวังจุดเชื่อมต่อให้ดี เนื่องจากการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างทั่วไปความต่อเนื่องทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในอาคารมีค่าสูง
3. ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากกับรัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่ารัศมีเฉลี่ยของพื้นที่ที่รากสายดินล้อมรอบอยู่มีอิทธิพลต่อความต้านทานดินประมาณ 55.50% ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานดิน ได้แก่ ความต้านทานจำเพาะของดิน ความต่อเนื่องของระบบรากสายดิน
4. จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากพบว่ารูปแบบสมการความต้านทานดินที่เหมาะสมเป็นแบบสมการ S และแบบสมการ Power
5. ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าความต้านทานดินของรากสายดินฐานรากที่ใช้เหล็กเสริมภายในสิ่งปลูกสร้างเป็นรากสายดิน

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากความต้านทานดินขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดินและดินในแต่ละพื้นที่จะมีความต้านทานจำเพาะแตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานรากในพื้นที่ที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูง เพื่อจะได้รับแบบจำลองความต้านทานดินที่ใช้รากสายดินฐานรากที่ถูกต้องมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชัยมงคล คำสุข. 2543. ระบบป้องกันและจำกัดฟ้าผ่าของ ทศท.. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2526. การป้องกันฟ้าผ่าสำหรับอาคารก่อสร้าง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชำนาญ ห่อเกียรติ, เทพัญญา ขัติแสง. 2549. การต่อลงดิน. ครั้งที่ 1 บริษัท จรัสสินทวงศ์การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ทรงศิริ แต่สมบัติ, รศ.ดร. 2542. การวิเคราะห์การถดถอย. ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ อังกรภินันท์. 2544. คู่มือออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. ครั้งที่ 4. บริษัท โอ.เอส. พรินต์ติ้ง เฮ้าส์ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- วัฒนา แก้วคุก. 2547. รีโมตเอิร์ทและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน. **Industrial Technology Review** 10 (130): 114-117.
- วิวัฒน์ กุลวงศ์วิทย์. 2548. การต่อลงดินระบบไฟฟ้า เล่มที่ 4 หลักดิน รากสายดิน และการวัด. ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรออกแบบและปรึกษาเครื่องกล และไฟฟ้าไทย, กรุงเทพฯ.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. ม.ป.ป.. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2546. มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง. ครั้งที่ 2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2540. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สำราญ สังข์สะอาด, ดร. 2528. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Anonymous. 1997. **Ground Rod Gold**. Available Source:
<http://www.hubbellpowersystems.com>, May 10, 2006

Dehn. n.d. . **Lightning Protection Guide**. Available Source: <http://www.dehn.de>, July 5, 2007

IEEE Std 80. 2000. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**

IEEE Std 81. 1983. **IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.**

IEEE Std 81.2. 1991. **IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems.**

IEEE Std 142. 1982. **IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.**

IEEE Std 142. 1991. **IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.**

Julius Preminger. 1975. Evaluation of concrete-encased electrodes. **IEEE. Trans. Ind. App.** 1A-11 (6): 664-68.

Kostic, M.B. 1993. Analysis of foundation grounding systems with external loops and rods. **IEE Proceeding-C** 140 (2): 73-76.

- Kostic, M.B., B.D. Popovic and M.S. Jovanovic. 1990. Numerical analysis of a class of foundation grounding systems. **IEE Proceedings, Pt. C**, 137: 123-128.
- Kostic, M.B. and G.H. Shirkoochi. 1993. Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil. **IEEE. Trans. PWED**. 8 (3): 1080-1087.
- Markiewicz, Henryk, prof., Antoni Klajn, Dr. 2004. **Earththing System - Basic Constructional Aspects**. Power Quality Application Guide. Available Source: <http://www.cda.org.uk>, March 20, 2007.
- Thapar, B., O. Ferrer and D.A. Blank. 1990. Ground resistance of concrete foundations in substation yards. **IEEE Trans. PWRD**. 5 (1): 130-135.
- Woertz. n.d.. **Grounding Material**. Available Source: <http://www.woertz-usa.com>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายชื่อผู้ประสานงานและให้ความช่วยเหลือการสำรวจความต้านทานดิน

รายนามผู้ประสานงานการสำรวจความต้านทานดิน

1. โครงการก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
คุณพรชัย บันลือศรีสกุล วิศวกรที่ปรึกษา
2. โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
คุณอำนาจ แก้วแดง ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
3. โครงการก่อสร้างอาคารโห้วร่มโตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์
คุณธนา ย่าป่าคาย วิศวกรออกแบบ
4. โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชันษา จุฬารักษ์ (สร.4)
คุณพรชัย จินดาพร ผู้จัดการโครงการ
คุณพงศ์ภูมิ เทียนวิบูลย์ วิศวกรโครงการ
5. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรู๊ป
คุณบรรพต ขุนรักพรหม ผู้จัดการโครงการ
คุณทัศนียา แน่นหนา Safety Office
6. โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาลสวงามสัลยกรรมตกแต่ง
คุณดำเพลิน มัคศรีพงษ์ วิศวกรที่ปรึกษา
7. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง
คุณรวมพล ทองสัมฤทธิ์ ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
8. โครงการก่อสร้างอาคารโห้วร่มรถยนต์
คุณสมชาย นุชคุ้ม ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
9. โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก
คุณเวนิตย์ โปรณะ วิศวกร

10. โครงการก่อสร้างอาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมัมพร 2
คุณสุรศักดิ์ เรืองปัญญาวุฒิ กรรมการผู้จัดการ
11. โครงการก่อสร้างอาคารบ้านพักข้าราชการกรมทางหลวง
คุณสมชาย มุสิกเกตุ ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
12. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานบริษัททัวร์
คุณวันชัย อินขจร ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
13. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ (จำหน่ายแอร์) สำนักงานและที่พักอาศัย
คุณชลัท พิวไผ่งาม วิศวกรควบคุมงานก่อสร้าง
14. โครงการก่อสร้างอาคารโชว์รูมและศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า
คุณอนุรัตน์ ปาลกะวงศ์ ผู้จัดการโครงการ
15. โครงการก่อสร้างอาคารเมโทรพาร์ค สาทร
คุณคมสันต์ หนองพงษ์ Senior M&E Engineer
16. โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำนักงานข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี
คุณสาโรจน์ เนินเพิ่มพิสุทธิ์ วิศวกรควบคุมโครงการ
17. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ร่วมรื่นราชพฤกษ์
คุณแดง พรหมสุวรรณ ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
18. โครงการก่อสร้างคอนโด คชาปรี (ชัยพร วิลล่า1)
คุณเพชร สุขชัยปการปภา กรรมการผู้จัดการ
คุณอำนาจ แก้วแดง ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง
20. โครงการก่อสร้างอาคารเรียนสถาบันกวดวิชาเดอะเบรน ปิ่นเกล้า
คุณวินัย วินุทธ์อรรถ วิศวกรที่ปรึกษา

รายนามผู้ให้ความช่วยเหลือการสำรวจความต้านทานดิน

1. นาวาตรี ประสิทธิ์ สิงหวรรณศ์
2. คุณธนา ยาป่าคาย
3. พันจ่าเอก กวี แก้วหาวงษ์

ภาคผนวก ข

การสำรวจความต้านทานดินของระบบรากสายดินฐานราก

การสำรวจความต้านทานดินของระบบรากสายดินฐานราก

1. โครงการก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

1.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ตั้งอยู่ที่ ถนนสีรินธร
แขวงบางพลัด เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 10 เมตร ยาว 15 เมตร

1.2 วันที่ทดสอบ

6 เมษายน 2550

1.3 ผลการทดสอบ

1.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ดำเนินการทดสอบไม่ได้

1.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมในเสาเข็ม	0.60 – 3.40	โอห์ม
ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน	0.70	โอห์ม

1.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ดำเนินการทดสอบไม่ได้

2. โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตศรีราชา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 39.50 เมตร ยาว 55 เมตร

2.2 วันที่ทดสอบ

10 เมษายน 2550

2.3 ผลการทดสอบ

2.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 1 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารปฏิบัติการ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	19.32	14.56	8.84	2.61	0.63
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	121.39	182.97	222.17	98.40	31.67
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	131.32				

2.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.280 โอห์ม

2.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 2.03 – 2.19 โอห์ม

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมพื้น 0.26 – 2.89 โอห์ม

3. โครงการก่อสร้างอาคารโซลาร์รูมโตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์

3.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 1 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 8.50 เมตร ยาว 20 เมตร

3.2 วันที่ทดสอบ

29 เมษายน 2550

3.3 ผลการทดสอบ

3.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 2 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารโซลาร์รูมโตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	5.960	2.320	0.158	0.070	0.038
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	37.45	29.15	3.97	2.64	1.91
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	15.02				

3.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดได้จากเหล็กเสริมพื้น 0.046 โอห์ม

3.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต้านทานเหล็กเสริมคานคอดิน 1.65 – 5.18 โอห์ม

4. โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชนา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 6 ชั้น ตั้งอยู่ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 25.50 เมตร ยาว 61 เมตร

4.2 วันที่ทดสอบ

1 พฤษภาคม 2550

4.3 ผลการทดสอบ

4.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 3 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิม
 พระเกียรติ 4 รอบ พระชนาจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	2.200	0.650	0.134	0.146	0.031
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	13.823	8.168	3.368	1.734	1.558
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	5.73				

4.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมพื้น 0.026 โอห์ม

4.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต้านทานระหว่างเหล็กเสริมพื้น 0.808 – 2.72 โอห์ม

5. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัท ประวิทย์กรู๊ป

5.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 6 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนนครินทร์
ตำบลบางขุนกอง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 12 เมตร ยาว 30 เมตร

5.2 วันที่ทดสอบ

15 พฤษภาคม 2550

5.3 ผลการทดสอบ

5.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 4 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคาร
สำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรู๊ป

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	9.350	4.320	2.100	0.64	0.08
ความต้านทานจำเพาะ (Ω .m)	58.748	54.287	52.779	24.127	4.021
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (Ω .m)	38.79				

5.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.014 โอห์ม

5.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.018 – 2.55 โอห์ม

6. โครงการก่อสร้างโรงพยาบาลสวงาม ศัลยกรรมตกแต่ง (โรงพยาบาลราชวดี)

6.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 และ 6 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนนครินทร์
ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 45 เมตร ยาว 50 เมตร

6.2 วันที่ทดสอบ

2 มิถุนายน 2550

6.3 ผลการทดสอบ

6.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 5 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคาร
โรงพยาบาลสวงาม ศัลยกรรมตกแต่ง

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	7.530	3.180	0.420	0.120	0.056
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	47.312	39.961	10.556	4.524	2.815
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	21.03				

6.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.030 โอห์ม

6.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมพื้น 0.204 – 4.25 โอห์ม

7. โครงการก่อสร้างอาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2

7.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนพระราม 2
แขวงแสมคำ เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 60 เมตร ยาว 80 เมตร

7.2 วันที่ทดสอบ

16 มิถุนายน 2550

7.3 ผลการทดสอบ

7.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 6 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารห้างคาร์ฟูร์
สาขาพระราม 2

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	4.350	1.550	0.210	0.090	0.078
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	27.332	19.478	5.278	3.393	3.921
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	11.88				

7.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.010 โอห์ม

7.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.168 – 1.200 โอห์ม

8. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง

8.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้นครึ่ง ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
ตำบลบางเลน อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 4 เมตร ยาว 36 เมตร

8.2 วันที่ทดสอบ

4 กรกฎาคม 2550

8.3 ผลการทดสอบ

8.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 7 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์
2 ชั้นครึ่ง

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.752	0.632	0.220	0.047	0.032
ความต้านทานจำเพาะ (Ω .m)	11.008	7.942	5.529	1.772	1.608
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (Ω .m)	5.57				

8.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.700 โอห์ม

8.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.236 – 2.43 โอห์ม

9. โครงการก่อสร้างอาคารโหว์รุ่มรถยนต์มือสอง

9.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 1 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
ตำบลบางเลน อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 22 เมตร ยาว 52 เมตร

9.2 วันที่ทดสอบ

23 กรกฎาคม 2550

9.3 ผลการทดสอบ

9.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 8 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโหว์รุ่มรถยนต์มือสอง

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.842	0.790	0.152	0.043	0.021
ความต้านทานจำเพาะ (Ω .m)	11.574	9.927	3.820	1.621	1.056
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (Ω .m)	5.60				

9.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมพื้น 0.114 โอห์ม

9.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมพื้น 0.176 – 3.550 โอห์ม

10. โครงการก่อสร้างอาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้น ตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 33 เมตร ยาว 43 เมตร

10.2 วันที่ทดสอบ

3 สิงหาคม 2550

10.3 ผลการทดสอบ

10.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 9 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารคณะสังคมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.730	0.472	0.152	0.044	0.023
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	10.870	5.931	3.820	1.659	1.156
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	4.69				

10.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสา 0.874 – 1.760 โอห์ม
ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมพื้น 0.042 โอห์ม

10.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมพื้น 0.170 – 0.240 โอห์ม

11. โครงการก่อสร้างอาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2

11.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
แขวงบางเขื่อนหนึ่ง เขตตลิ่งชัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 4.50 เมตร ยาว 9.60 เมตร

11.2 วันที่ทดสอบ

15 สิงหาคม 2550

11.3 ผลการทดสอบ

11.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 10 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารหมู่บ้าน
จัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	0.832	0.390	0.140	0.056	0.035
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	5.228	4.901	3.519	2.111	1.759
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	3.50				

11.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสาเดี่ยว 0.344 – 7.170 โอห์ม

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสารวม 0.727 โอห์ม

11.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กแกนเสา 0.972 – 5.990 โอห์ม

12. โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก

12.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 7 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนสีรินธร
แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง เมตร 26 ยาว 105 เมตร

12.2 วันที่ทดสอบ

6 กันยายน 2550

12.3 ผลการทดสอบ

12.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 11 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	4.860	1.518	0.334	0.104	0.031
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	30.536	19.076	8.394	3.921	1.558
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	12.70				

12.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมพื้น 0.073 โอห์ม

12.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.355 – 3.41 โอห์ม

13. โครงการก่อสร้างอาคารบ้านพักข้าราชการกรมทางหลวง

13.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนสีรินธร
แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 8 เมตร ยาว 56 เมตร

13.2 วันที่ทดสอบ

5 ตุลาคม 2550

13.3 ผลการทดสอบ

13.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 12 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน อาคารบ้านพักข้าราชการ
กรมทางหลวง

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	2.450	0.644	0.320	0.234	0.162
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	15.394	8.093	8.042	8.822	8.143
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	9.70				

13.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.037 โอห์ม

13.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 4.205 – 6.150 โอห์ม

14. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น

14.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
ตำบลบางขุนทอง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 12 เมตร ยาว 24 เมตร

14.2 วันที่ทดสอบ

10 พฤศจิกายน 2550

14.3 ผลการทดสอบ

14.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 13 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.780	0.592	0.124	0.056	0.038
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	11.184	7.439	3.116	2.111	1.910
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	5.15				

14.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสาเดียว 0.062 – 3.570 โอห์ม
ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.042 โอห์ม

14.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.208 – 0.472 โอห์ม

15. โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานบริษัททัวร์

15.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
แขวงฉิมพลี เขตตลิ่งชัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 15 เมตร ยาว 23 เมตร สูง 12 เมตร

15.2 วันที่ทดสอบ

21 พฤศจิกายน 2550

15.3 ผลการทดสอบ

15.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 14 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงาน
บริษัททัวร์

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	44.200	4.680	1.011	0.320	0.130
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	277.717	58.811	25.409	12.064	6.535
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	76.11				

15.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสาเข็ม	0.598	โอห์ม
ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน	0.120	โอห์ม

15.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน	0.170 – 0.380	โอห์ม
---	---------------	-------

16. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ (จำหน่ายแอร์) สำนักงานและที่พักอาศัย

16.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนกัลปพฤกษ์
แขวงสวนบางประทุน เขตจอมทอง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 9 เมตร ยาว 23 เมตรและกว้าง 5 เมตร ยาว 6 เมตร

16.2 วันที่ทดสอบ

22 พฤศจิกายน 2550

16.3 ผลการทดสอบ

16.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 15 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์
(จำหน่ายแอร์) สำนักงานและที่พักอาศัย

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.580	0.614	0.174	0.072	0.038
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	9.927	7.716	4.373	2.714	1.910
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	5.33				

16.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากโพลท์ยัดเสาเหล็ก 0.168 โอห์ม

16.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างโพลท์ยัดเสาเหล็ก 0.135 – 1.450 โอห์ม

17. โครงการก่อสร้างอาคารโห่รวมและศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า

17.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 2 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนกัลปพฤกษ์
แขวงบางขุนเทียน เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 50 เมตร ยาว 90 เมตร

17.2 วันที่ทดสอบ

24 พฤศจิกายน 2550

17.3 ผลการทดสอบ

17.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 16 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารโห่รวม
และศูนย์บริการรถยนต์ฮอนด้า

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.622	0.636	0.213	0.120	0.070
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	10.191	7.992	5.353	4.524	3.519
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	6.32				

17.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสาเดี่ยว	3.37 – 7.13	โอห์ม
ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน	0.010	โอห์ม

17.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน	0.327 – 2.05	โอห์ม
---	--------------	-------

18. โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียมเมโทรปาร์ค สาทร

18.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนกัลปพฤกษ์
แขวงบางหว้า เขตบางภาษีเจริญ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 20 เมตร ยาว 40 เมตร

18.2 วันที่ทดสอบ

30 พฤศจิกายน 2550

18.3 ผลการทดสอบ

18.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 17 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม
เมโทรปาร์คสาทร

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.440	0.462	0.174	0.068	0.042
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	9.048	5.806	4.373	2.564	2.111
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	4.78				

18.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.030 โอห์ม

18.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กคานคอดิน 0.358 – 2.07 โอห์ม

19. โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำนักงานข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี

19.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 10 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนติวานนท์
ตำบลตลาดขวัญ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 16 เมตร ยาว 118 เมตร สูง 45.50 เมตร

19.2 วันที่ทดสอบ

8 ธันวาคม 2550

19.3 ผลการทดสอบ

19.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 18 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการ
สำนักงานข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.206	0.346	0.152	0.072	0.060
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	7.578	4.348	3.820	2.714	3.016
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	4.30				

19.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.023 โอห์ม

19.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.690 – 3.41 โอห์ม

20. โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ร่มรื่นราชพฤกษ์

20.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
แขวงตลิ่งชัน เขตตลิ่งชัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 12 เมตร ยาว 36 เมตร

20.2 วันที่ทดสอบ

12 ธันวาคม 2550

20.3 ผลการทดสอบ

20.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 19 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์
ร่มรื่นราชพฤกษ์

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.026	0.420	0.234	0.142	0.102
ความต้านทานจำเพาะ (Ω .m)	6.447	5.278	5.881	5.353	5.127
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (Ω .m)	5.62				

20.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสา 0.037 โอห์ม

20.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กแกนเสา 0.198 – 0.266 โอห์ม

21. โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียมคชาบุรี (ชัยพร วิลล์ 1)

21.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนราชพฤกษ์
แขวงตลิ่งชัน เขตตลิ่งชัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 12.30 เมตร ยาว 30 เมตร

21.2 วันที่ทดสอบ

13 ธันวาคม 2550

21.3 ผลการทดสอบ

21.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 20 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม
คชาบุรี (ชัยพร วิลล์ 1)

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	1.178	0.540	0.210	0.140	0.070
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	7.402	6.790	5.280	5.280	3.520
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	5.65				

21.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กแกนเสา 0.038 โอห์ม

21.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กแกนเสา 0.186 – 4.39 โอห์ม

22. โครงการก่อสร้างอาคารเรียนสถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า

22.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 7 ชั้น ตั้งอยู่ที่ถนนพระบรมราชชนนี
แขวงบางบำหรุ เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 40 เมตร ยาว 35 เมตร สูง 22 เมตร

22.2 วันที่ทดสอบ

23 มกราคม 2551

22.3 ผลการทดสอบ

22.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 21 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคารเรียน
สถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า

รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	29.900	4.770	0.650	0.200	0.090
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	187.87	59.942	16.336	7.540	4.520
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	55.24				

22.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานชั้นที่ 2 1.600 – 2.420 โอห์ม

22.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานชั้นที่ 2 1.260 – 2.450 โอห์ม

23. โครงการก่อสร้างอาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

23.1 ลักษณะอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 6 ชั้น ตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร
พื้นที่อาคารขณะสำรวจ กว้าง 30 เมตร ยาว 60 เมตร

23.2 วันที่ทดสอบ

23 กุมภาพันธ์ 2551

23.3 ผลการทดสอบ

23.3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางผนวกที่ 22 ผลการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน โครงการก่อสร้างอาคาร
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

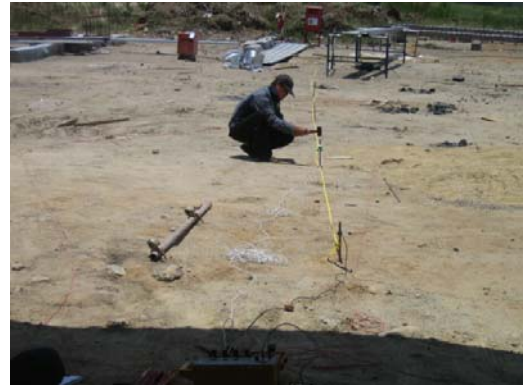
รายงานการตรวจวัดความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity)					
วิธีทดสอบ	Four Point Method				
ความลึกโพรบ (cm)	5	10	20	30	40
ระยะห่างโพรบ (m)	1	2	4	6	8
ค่าความต้านทาน(Ω)	40.26	10.32	1.48	0.076	0.053
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega.m$)	252.96	129.685	37.196	2.865	2.660
ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย ($\Omega.m$)	85.07				

23.3.2 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานวัดจากเหล็กเสริมคานคอดิน 0.074 โอห์ม

23.3.3 ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

ค่าความต่อเนื่องระหว่างเหล็กเสริมคานคอดิน 0.386 – 2.173 โอห์ม



ภาพผนวกที่ 1 โครงการก่อสร้างอาคารโหว์รรณยนต์โตโยต้าบางนาคอมเพล็กซ์



ภาพผนวกที่ 2 โครงการก่อสร้างอาคารเฉลิมพระเกียรติ 4 รอบพระชนษาจุฬารณณ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 3 โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานใหญ่ กลุ่มบริษัทประวิทย์กรุป



ภาพผนวกที่ 4 โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาลสวนงามศีลธรรมตกแต่ง



ภาพผนวกที่ 5 โครงการก่อสร้างอาคารห้างคาร์ฟูร์ สาขาพระราม 2



ภาพผนวกที่ 6 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 2 ชั้นครึ่ง



ภาพผนวกที่ 7 โครงการก่อสร้างโซว์รูมรถยนต์มือสอง



ภาพผนวกที่ 8 โครงการก่อสร้างอาคารคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ 9 โครงการก่อสร้างอาคารหมู่บ้านจัดสรร หมู่บ้านอิมอัมพร 2



ภาพผนวกที่ 10 โครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาล ตา หู คอ จมูก



ภาพผนวกที่ 11 โครงการก่อสร้างอาคารบ้านพักข้าราชการกรมทางหลวง



ภาพผนวกที่ 12 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ 4 ชั้น



ภาพผนวกที่ 13 โครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานบริษัททัวร์



ภาพผนวกที่ 14 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์จำหน่ายแอร์ สำนักงานและที่อยู่อาศัย



ภาพผนวกที่ 15 โครงการก่อสร้างอาคารโชว์รูมรถยนต์และศูนย์บริการฮอนด้า



ภาพผนวกที่ 16 โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียมเมโทรพาร์คสาทร



ภาพผนวกที่ 17 โครงการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำนักงานข้าราชการพลเรือน จังหวัดนนทบุรี



ภาพผนวกที่ 18 โครงการก่อสร้างอาคารพาณิชย์ร่วมรีนราชพฤกษ์



ภาพผนวกที่ 19 โครงการก่อสร้างอาคารคอนโดมิเนียมคชาบุรี (ชัยพร วิลล์ 1)



ภาพผนวกที่ 20 โครงการก่อสร้างอาคารเรียนสถาบันกวดวิชาเดอะเบรน สาขาปิ่นเกล้า



ภาพผนวกที่ 21 โครงการก่อสร้างอาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ค่าอัตราส่วนระยะชั่วศักราชไฟฟ้ากับระยะชั่วกระแสสำหรับวิธี Tagg Slope

ตารางผนวกที่ 23 ค่า D_p/D_c ของค่า μ ต่าง ๆ สำหรับวิธี Tagg Slope

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.40	0.6432	0.6431	0.6429	0.6428	0.6426	0.6425	0.6423	0.6422	0.6420	0.6419
0.41	0.6418	0.6416	0.6415	0.6413	0.6412	0.6410	0.6409	0.6408	0.6406	0.6405
0.42	0.6403	0.6402	0.6400	0.6399	0.6397	0.6396	0.6395	0.6393	0.6392	0.6390
0.43	0.6389	0.6487	0.6386	0.6384	0.6383	0.6382	0.6380	0.6379	0.6377	0.6376
0.44	0.6374	0.6373	0.6372	0.6370	0.6369	0.6367	0.6366	0.6364	0.6363	0.6361
0.45	0.6360	0.6359	0.6357	0.6356	0.6354	0.6353	0.6351	0.6350	0.6348	0.6347
0.46	0.6346	0.6344	0.6343	0.6341	0.6340	0.6338	0.6337	0.6336	0.6334	0.6333
0.47	0.6331	0.6330	0.6328	0.6327	0.6325	0.6324	0.6323	0.6321	0.6320	0.6318
0.48	0.6317	0.6315	0.6314	0.6312	0.6311	0.6310	0.6308	0.6307	0.6305	0.6304
0.49	0.6302	0.6301	0.6300	0.6298	0.6297	0.6295	0.6294	0.6292	0.6291	0.6289
0.50	0.6288	0.6286	0.6285	0.6283	0.6282	0.6280	0.6279	0.6277	0.6276	0.6274
0.51	0.6273	0.6271	0.6270	0.6268	0.6267	0.6265	0.6264	0.6262	0.6261	0.6259
0.52	0.6258	0.6256	0.6255	0.6253	0.6252	0.6250	0.6248	0.6247	0.6245	0.6244
0.53	0.6242	0.6241	0.6239	0.6238	0.6336	0.6235	0.6233	0.6232	0.6230	0.6229
0.54	0.6227	0.6226	0.6224	0.6223	0.6221	0.6220	0.6218	0.6217	0.6215	0.6214
0.55	0.6212	0.6210	0.6209	0.6207	0.6206	0.6204	0.6203	0.6201	0.6200	0.6198
0.56	0.6197	0.6295	0.6194	0.6192	0.6191	0.6189	0.6188	0.6186	0.6185	0.6183
0.57	0.6182	0.6180	0.6179	0.6177	0.6176	0.6174	0.6172	0.6171	0.6169	0.6168
0.58	0.6166	0.6165	0.6163	0.6162	0.6160	0.6159	0.6157	0.6156	0.6154	0.6153
0.59	0.6151	0.6150	0.6148	0.6147	0.6145	0.6144	0.6142	0.6141	0.6139	0.6138
0.60	0.6136	0.6134	0.6133	0.6131	0.6130	0.6128	0.6126	0.6125	0.6123	0.6121
0.61	0.6120	0.6118	0.6117	0.6115	0.1663	0.6112	0.6110	0.6108	0.6107	0.6105
0.62	0.6104	0.6102	0.6100	0.6099	0.6097	0.6096	0.6094	0.6092	0.6091	0.6089
0.63	0.6087	0.6086	0.6084	0.6083	0.6081	0.6079	0.6077	0.6076	0.6074	0.6073
0.64	0.6071	0.6070	0.6068	0.6066	0.6065	0.6063	0.6061	0.6060	0.6058	0.6057
0.65	0.6055	0.6053	0.6052	0.6050	0.6049	0.6047	0.6045	0.6044	0.6042	0.6040
0.66	0.6039	0.6037	0.6036	0.6034	0.6032	0.6031	0.6029	0.6027	0.6026	0.6024
0.67	0.6023	0.6021	0.6019	0.6018	0.6016	0.6015	0.6013	0.6011	0.6010	0.6008
0.68	0.6006	0.6005	0.6003	0.6002	0.6000	0.5998	0.5997	0.5995	0.5993	0.5992
0.69	0.5990	0.5989	0.5987	0.5985	0.5984	0.5982	0.5980	0.5979	0.5977	0.5975

ตารางผนวกที่ 23 (ต่อ)

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.70	0.5974	0.5973	0.5971	0.5969	0.5967	0.5965	0.5964	0.5962	0.5960	0.5959
0.71	0.5957	0.5955	0.5953	0.5952	0.5950	0.5948	0.5947	0.5945	0.5943	0.5942
0.72	0.5940	0.5938	0.5936	0.5935	0.5933	0.5931	0.5930	0.5928	0.5926	0.5924
0.73	0.5923	0.5921	0.5920	0.5918	0.5916	0.5914	0.5912	0.5911	0.5909	0.5907
0.74	0.5906	0.5904	0.5902	0.5900	0.5899	0.5897	0.5895	0.5894	0.5892	0.5890
0.75	0.5889	0.5887	0.5885	0.5883	0.5882	0.5880	0.5878	0.5877	0.5875	0.5873
0.76	0.5871	0.5870	0.5868	0.5866	0.5865	0.5863	0.5861	0.5859	0.5858	0.5856
0.77	0.5854	0.5853	0.5851	0.5849	0.5847	0.5846	0.5844	0.5842	0.5841	0.5839
0.78	0.5837	0.5835	0.5834	0.5832	0.5830	0.5829	0.5827	0.5825	0.5824	0.5822
0.79	0.5820	0.5818	0.5817	0.5815	0.5813	0.5812	0.5810	0.5808	0.5805	0.805
0.80	0.5803	0.5801	0.5799	0.5797	0.5796	0.5794	0.5792	0.5790	0.5788	0.5786
0.81	0.5785	0.5783	0.5781	0.5779	0.5777	0.5775	0.5773	0.5772	0.5770	0.5768
0.82	0.5766	0.5764	0.5762	0.5760	0.5759	0.5757	0.5755	0.5753	0.5751	0.5749
0.83	0.5748	0.5746	0.5744	0.5742	0.5740	0.5739	0.5736	0.5735	0.5733	0.5731
0.84	0.5729	0.5727	0.5725	0.5723	0.5722	0.5720	0.5718	0.5716	0.5714	0.5712
0.85	0.5711	0.5709	0.5707	0.5705	0.5703	0.5701	0.5699	0.5698	0.5696	0.5694
0.86	0.5692	0.5690	0.5688	0.5686	0.5685	0.5683	0.5681	0.5679	0.5677	0.5675
0.87	0.5674	0.5672	0.5670	0.5668	0.5666	0.5664	0.5662	0.5661	0.5659	0.5657
0.88	0.5655	0.5653	0.5651	0.5650	0.5648	0.5646	0.5644	0.5642	0.5640	0.5638
0.89	0.5637	0.5635	0.5633	0.5631	0.5629	0.5627	0.5625	0.5624	0.5622	0.5620
0.90	0.5618	0.5616	0.5614	0.5612	0.5610	0.5608	0.5606	0.5604	0.5602	0.5600
0.91	0.5598	0.5696	0.5594	0.5592	0.5590	0.5588	0.5586	0.5584	0.5582	0.5580
0.92	0.5578	0.5576	0.5574	0.5572	0.5570	0.5568	0.5565	0.5563	0.5561	0.5559
0.93	0.5557	0.5555	0.5553	0.5551	0.5549	0.5547	0.5545	0.5543	0.5541	0.5539
0.94	0.5537	0.5535	0.5533	0.5531	0.5529	0.5527	0.5525	0.5523	0.5521	0.5519
0.95	0.5517	0.5515	0.5513	0.5511	0.5509	0.5507	0.5505	0.5503	0.5501	0.5499
0.96	0.5497	0.5495	0.5493	0.5491	0.5489	0.5487	0.5485	0.5483	0.5481	0.5479
0.97	0.5477	0.5475	0.5473	0.5471	0.5469	0.5467	0.5464	0.5462	0.5460	0.5458
0.98	0.545	0.5454	0.5452	0.5450	0.5448	0.5446	0.5444	0.5442	0.5440	0.5438
0.99	0.5436	0.5434	0.5432	0.5430	0.5428	0.5426	0.5424	0.5422	0.5420	0.5418

ตารางผนวกที่ 23 (ต่อ)

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.00	0.5416	0.5414	0.5412	0.5409	0.5407	0.5406	0.5403	0.5400	0.5398	0.5396
1.01	0.5394	0.6391	0.5389	0.5387	0.5385	0.5383	0.5380	0.5378	0.5376	0.5374
1.02	0.5371	0.5369	0.5367	0.5365	0.5362	0.5360	0.5358	0.5356	0.5354	0.5351
1.03	0.5349	0.5347	0.5345	0.5342	0.5340	0.5338	0.5336	0.5333	0.5331	0.5329
1.04	0.5327	0.5325	0.5322	0.5320	0.5318	0.5316	0.5131	0.5311	0.5309	0.5307
1.05	0.5305	0.5302	0.5300	0.5298	0.5296	0.5293	0.5291	0.5299	0.5287	0.5284
1.06	0.5282	0.5280	0.5278	0.5276	0.5273	0.5271	0.5269	0.5267	0.6264	0.6262
1.07	0.5260	0.5258	0.5255	0.5253	0.5251	0.5249	0.5247	0.5244	0.5242	0.5240
1.08	0.5238	0.5235	0.5233	0.5231	0.5229	0.5226	0.5224	0.5222	0.5219	0.5217
1.09	0.5215	0.5213	0.5211	0.5209	0.52069	0.5204	0.5202	0.5200	0.5197	0.5195
1.10	0.5193	0.5190	0.5188	0.5185	0.5183	0.5180	0.5178	0.5175	0.5173	0.5170
1.11	0.5168	0.5165	0.5163	0.5160	0.5158	0.5155	0.5153	0.5150	0.5148	0.5145
1.12	0.5143	0.5140	0.5137	0.5135	0.5132	0.5130	0.5127	0.5125	0.5122	0.5120
1.13	0.5118	0.5115	0.5113	0.5110	0.5108	0.5105	0.5103	0.5100	0.5098	0.5095
1.14	0.5093	0.5090	0.5088	0.5085	0.5083	0.5080	0.5078	0.5075	0.5073	0.5070
1.15	0.5068	0.5065	0.5062	0.5060	0.5057	0.5055	0.5052	0.5050	0.5047	0.5045
1.16	0.5042	0.5040	0.5037	0.5035	0.5032	0.5030	0.5027	0.5025	0.5022	0.5020
1.17	0.5017	0.5015	0.5012	0.5010	0.5007	0.5005	0.5002	0.5000	0.4997	0.4995
1.18	0.4992	0.4990	0.4987	0.4985	0.4982	0.4980	0.4977	0.4975	0.4972	0.4970
1.19	0.4967	0.4965	0.4962	0.4960	0.4957	0.4955	0.4952	0.4950	0.4947	04945
1.20	0.4942	0.4939	0.4936	0.4933	0.4930	0.4928	0.4925	0.4922	0.4919	0.4915
1.21	0.4913	0.4910	0.4907	0.4904	0.4901	0.4899	0.4896	0.4893	0.4890	0.4887
1.22	0.4884	0.4881	0.4878	0.4875	0.4872	0.4870	0.4867	0.4854	0.4861	0.4858
1.23	0.4855	0.4852	0.4849	0.4846	0.4843	0.48471	0.4838	0.4835	0.4832	0.4829
1.24	0.4825	0.4823	0.4820	0.4817	0.4814	0.4812	0.4809	0.4806	0.4803	0.4800
1.25	0.4797	0.4794	0.4791	0.4788	0.4785	0.4783	0.4780	0.4777	0.4774	0.4771
1.26	0.4768	0.4765	0.4762	0.4759	0.4756	0.4754	0.4751	0.4748	0.4745	0.4742
1.27	0.4739	0.4736	0.4733	0.4730	0.4727	0.4725	0.4722	0.4719	0.4716	0.4713
1.28	0.4710	0.4707	0.4704	0.4701	0.4698	0.4696	0.4693	0.4690	0.4687	0.4684
1.29	0.4681	0.4678	0.4675	0.4672	0.4669	0.4667	0.4664	0.4661	0.4658	0.4655

ตารางผนวกที่ 23 (ต่อ)

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.30	0.4652	0.4649	0.4645	0.4642	0.4638	0.4635	0.4631	0.4628	0.4625	0.4621
1.31	0.4618	0.4614	0.4611	0.4607	0.4604	0.4601	0.4597	0.4594	0.4590	0.4586
1.32	0.4583	0.4580	0.4577	0.4573	0.4570	0.4568	0.4563	0.4559	0.4556	0.4553
1.33	0.4549	0.4546	0.4542	0.4539	0.4535	0.4532	0.4529	0.4525	0.4522	0.4518
1.34	0.4515	0.4511	0.4508	0.4505	0.4501	0.4498	0.4494	0.4491	0.4487	0.4484
1.35	0.4481	0.4477	0.4474	0.4470	0.4467	0.4463	0.4460	0.4457	0.4453	0.4450
1.36	0.4446	0.4443	0.4439	0.4436	0.4432	0.4429	0.4426	0.4422	0.4419	0.4415
1.37	0.4412	0.4408	0.4405	0.4402	0.4398	0.4395	0.4391	0.4388	0.4384	0.4381
1.38	0.4378	0.4374	0.4371	0.4367	0.4364	0.4360	0.4357	0.4354	0.4350	0.4347
1.39	0.4343	0.4340	0.4336	0.4333	0.4330	0.4326	0.4323	0.4319	0.4316	0.4312
1.40	0.4309	0.4305	0.4301	0.4298	0.4292	0.4288	0.4284	0.4280	0.4275	0.4271
1.41	0.4267	0.4263	0.4258	0.4254	0.4250	0.4246	0.4242	0.4237	0.4233	0.4229
1.42	0.4225	0.4221	0.4216	0.4212	0.4208	0.4204	0.4200	0.4195	0.4191	0.4187
1.43	0.4183	0.4178	0.4174	0.4170	0.4166	0.4162	0.4157	0.4153	0.4149	0.4145
1.44	0.4141	0.4136	0.4132	0.4128	0.4124	0.4210	0.4115	0.4111	0.4107	0.4103
1.45	0.4099	0.4094	0.4090	0.4086	0.4082	0.4077	0.4073	0.4069	0.4065	0.4061
1.46	0.4056	0.4052	0.4048	0.4044	0.4040	0.4035	0.4031	0.4027	0.4023	0.4018
1.47	0.4014	0.4010	0.4005	0.4001	0.3997	0.3993	0.3989	0.3985	0.3980	0.3976
1.48	0.3972	0.3968	0.3964	0.3659	0.3955	0.3951	0.3947	0.3943	0.3938	0.3934
1.49	0.3930	0.3926	0.3921	0.3917	0.3913	0.3909	0.3905	0.3900	0.3896	0.3892
1.50	0.3888	0.3883	0.3878	0.3874	0.3869	0.3864	0.3859	0.3854	0.3850	0.3845
1.51	0.3840	0.3835	0.3830	0.3825	0.3820	0.3816	0.3811	0.3806	0.3801	0.3796
1.52	0.3791	0.3786	0.3781	0.3776	0.3771	0.3768	0.3760	0.3755	0.3750	0.3745
1.53	0.3740	0.3735	0.3730	0.3724	0.3719	0.3714	0.3709	0.3704	0.3698	0.3693
1.54	0.3688	0.3683	0.3677	0.3672	0.3667	0.3662	0.3656	0.3651	0.3646	0.3640
1.55	0.3635	0.3630	0.3624	0.3619	0.3613	0.3608	0.3602	0.3597	0.3591	0.3586
1.56	0.3580	0.3574	0.3669	0.3563	0.3557	0.3552	0.3546	0.3540	0.3534	0.3528
1.57	0.3523	0.3517	0.3511	0.3506	0.3500	0.3494	0.3488	0.3482	0.3477	0.3471
1.58	0.3465	0.3459	0.2453	0.3447	0.3441	0.3435	0.3429	0.3423	0.3417	0.3411
1.59	0.3405	0.3399	0.33936	0.3386	0.3380	0.3374	0.3368	0.3362	0.3355	0.3349

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์หาสมการถดถอยโดยโปรแกรม SPSS 13.0 for Windows

การวิเคราะห์สมการหาสมการถดถอยโดยโปรแกรม SPSS 13.0 for Windows

ตารางผนวกที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอย

Equation	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
Logarithmic	.673	.453	.424	.181
Inverse	.790	.625	.605	.150
Compound	.634	.402	.371	1.01
Power	.711	.505	.497	.919
S	.745	.555	.532	.871
Growth	.636	.402	.371	1.01
Exponential	.634	.402	.371	1.01
Logistic	.634	.402	.371	1.01

ตารางผนวกที่ 25 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Equation		Sum of	df	Mean	F	Sig.
		Squares		Square		
Linear	Regression	.302	1	.302	6.819	.017
	Residual	.840	19	.044		
	Total	1.142	20			
Logarithmic	Regression	.517	1	.517	15.713	.001
	Residual	.625	19	.033		
	Total	1.142	20			
Inverse	Regression	.713	1	.713	31.608	.000
	Residual	.429	19	.023		
	Total	1.142	20			
Quadratic	Regression	.535	2	.268	7.940	.003
	Residual	.607	18	.034		
	Total	1.142	20			
Compound	Regression	13.049	3	13.049	12.786	.002
	Residual	19.390	17	1.021		
	Total	32.439	20			
Power	Regression	16.390	1	16.390	19.403	.000
	Residual	16.049	19	.845		
	Total	32.439	20			
S	Regression	18.014	1	18.014	23.726	.000
	Residual	14.425	19	.759		
	Total	32.439	20			
Growth	Regression	13.049	1	13.049	12.786	.002
	Residual	19.390	19	1.021		
	Total	32.439	20			
Exponential	Regression	13.049	1	13.049	12.786	.002
	Residual	19.390	19	1.021		
	Total	32.439	20			
Logistic	Regression	13.049	1	13.049	12.786	.002
	Residual	19.390	19	1.021		
	Total	32.439	20			

ตารางผนวกที่ 26 สัมประสิทธิ์การถดถอย

Equation		Unstandardized		Standardized	t	Sig.
		Coefficients		Coefficients		
		B	Std. Error	Beta		
Logarithmic	ln(Average_Radius)	-.253	.064	-.673	-3.964	.001
	(Constant)	.817	.174		4.698	.000
Inverse	1/Average_Radius	3.251	.578	.790	5.622	.000
	(Constant)	-.132	.059		-2.223	.039
Compound	Average_Radius	.924	.020	.530	45.513	.000
	(Constant)	.224	.098		2.299	.033
Power	ln(Average_Radius)	-1.423	.323	-.711	-4.405	.000
	(Constant)	2.573	2.268		1.135	.271
S	1/Average_Radius	16.335	3.354	.745	4.871	.000
	(Constant)	-4.229	.344		-	.000
Growth	Average_Radius	-.079	.022	-.634	-3.576	.002
	(Constant)	-1.494	.435		-3.435	.003
Exponential	Average_Radius	-.079	.022	-.634	-3.576	.002
	(Constant)	.224	.098		2.299	.033
Logistic	Average_Radius	1.082	.024	1.886	45.513	.000
	(Constant)	4.455	1.937		2.299	.033

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	เรือเอกอนวัช วรรณศรี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2511
สถานที่เกิด	พิจิตร
ประวัติการศึกษา	(1) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2) ศีษศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ประจำกรมกำลังพลทหารเรือ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองทัพเรือ
ผลงานทางวิชาการ	บทความเรื่องการศึกษาการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้รากสายดินฐานราก ในวิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 21 ฉบับที่ 65