

การศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน



นายสาริต รัตตานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

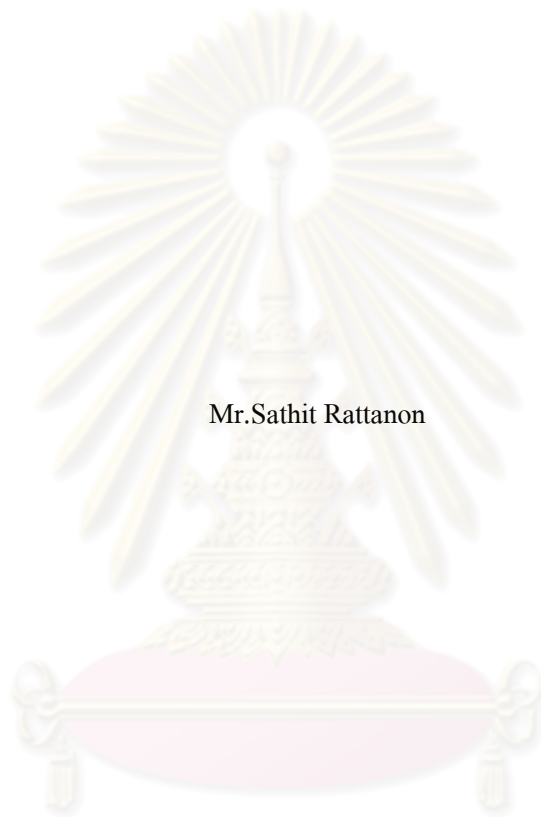
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARATIVE STUDY OF IMPULSE CURRENT POLARITY IMPACT ON
EFFECTIVE LENGTH OF GROUNDING ELECTRODE



Mr.Sathit Rattanon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าค่าที่มี
ต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

โดย

นายสาริต รัตตานนท์


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

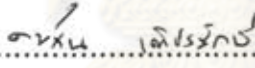
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

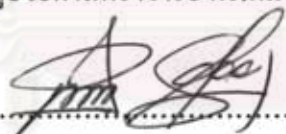
อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมตัน เพ็ชรรักษ์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)


.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.นัตยา คีตยเวียง)

สาริต รัตตานนท์: การศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสฟ้าผ่าที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน. (COMPARATIVE STUDY OF IMPULSE CURRENT POLRITY IMPACT ON EFFECTIVE LENGTH OF GROUNDING ELECTRODE)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 112 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสฟ้าผ่าที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน ซึ่งใช้การทดลองย่อส่วนศึกษาเปรียบเทียบ และหาค่าความยาวประสิทธิผลโดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของสายดินเทียบกับความยาว หรือขนาดอนุพันธ์ที่ไม่เกินค่า Tangent ของมุม $\alpha = 5^\circ$ ทำการทดลองโดยใช้รากสายดินแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน ที่ค่าความต้านทานจำเพาะ 1136 $\Omega \cdot \text{cm}$, 757 $\Omega \cdot \text{cm}$, และ 367 $\Omega \cdot \text{cm}$. ตามลำดับ และที่ทุกความต้านทานใช้รูปคลื่น 77.5/290 μs , 22.5/220 μs , 10/420 μs , และ 7.5/140 μs . ตามลำดับ ทั้งภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

จากการทดลอง พบว่า ขั้วของกระแสอิมพัลส์ ความต้านทานจำเพาะและเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์มีผลกระทบต่อความยาวประสิทธิผล โดยความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งยาวกว่ารากสายดินแนวนอน และความยาวประสิทธิผลของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบยาวกว่าขั้วบวกทั้งรากสายดินแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.32 – 5.07 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติศ. สุชาติ รัตตานนท์.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553.....

##5170493721: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: IMPULSE CURRENT POLARITY/ EFFECTIVE LENGTH

SATHIT RATTANON: COMPARATIVE STUDY OF IMPULSE CURRENT POLARITY IMPACT ON EFFECTIVE LENGTH OF GROUNDING ELECTRODE.
 THESIS ADVISOR: WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, PH.D., 112 pp.

This thesis presents the comparative study of impulse current polarity impact on effective length of grounding electrode. In the research, we used scaling experiment principle for investigate. And calculate the effective length of grounding by specify the changing of impulse impedance compare with the length of grounding electrode not exceed tangent of angle $\alpha = 5^\circ$. Do the experiment by used vertical and horizontal grounding electrode at the specific resistance 1136 Ω .cm. 757 Ω .cm. and 367 Ω .cm. respectively. Each the specific resistance used waveform 77.5/290 μ s. 22.5/220 μ s. 10/420 μ s. and 7.5/140 μ s. respectively all under positive and negative impulse.

From the experimental results show that impulse current polarity, specific resistance of saline and impulse current wave front impact on effective length of grounding electrode by the effective length of vertical grounding electrode is longer than the effective length of horizontal grounding electrode and the effective length under negative impulse polarity is longer than the effective length under positive impulse polarity with percent difference 0.32 – 5.07%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : ..Electrical Engineering.....

Student's Signature Sathit Rattanon

Field of Study : ..Electrical Engineering.....

Advisor's Signature W. P.

Academic Year : ..2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์รวมทั้งได้ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และ อาจารย์ ดร.นาตยา คล้ายเรือง ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกทั้งอุปกรณ์และสถานที่เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อจรรยา และคุณแม่น้อย รัตตานนท์ ที่คอยสนับสนุน และส่งเสริมในด้านการศึกษาต่อมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูทเวทีแด่บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีความรู้และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning Strike)	3
2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่า	4
2.3 กรณีฟ้าผ่าลงบนสายดินของเสาส่งไฟฟ้า	5
2.4 แรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส	6
2.5 การสร้างกระแสอิมพัลส์	7
2.6 ความรู้เกี่ยวกับระบบบรากลสายดิน	10
2.6.1 ความต้านทานดิน	10
2.6.2 ความลึกในการฝังรากลสายดิน	12
2.6.3 ความชื้นภายในดิน	13
2.6.4 อุณหภูมิ	14
2.6.5 ชนิดของรากลสายดิน	14
2.7 ความยาวประสิทธิผลของรากลสายดิน	17
2.8 หลักการทดลองย่อส่วน	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	24
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	24
3.2.1 ขั้นตอนการทดลองรากสายดินแนวตั้ง	26
3.2.2 ขั้นตอนการทดลองรากสายดินแนวนอน	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	28
4.1 การศึกษาผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อรากสายดินแนวตั้ง	28
4.1.1 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω.cm.)	28
4.1.2 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω.cm.)	30
4.1.3 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω.cm.)	31
4.1.4 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω.cm.)	33
4.1.5 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω.cm.)	34
4.1.6 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω.cm.)	36
4.2 การศึกษาผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อรากสายดินแนวนอน	38
4.2.1 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω.cm.)	39
4.2.2 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω.cm.)	40
4.2.3 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω.cm.)	42
4.2.4 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วลบ (ความต้านทาน จำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω.cm.)	43
4.2.5 กรณีกระแสिमพัลส์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω.cm.)	45

4.2.6 กรณีกระแสไฟฟ้าสลับ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω.cm.)	46
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผล	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
รายการอ้างอิง	53
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก อุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบ	56
ภาคผนวก ข รูปคลื่นการทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผล	58
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างความต้านทานดิน [8]	11
2.2 ชนิดของรากสายดิน	15
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในการทดลองและค่าจริงของรากสายดินแนวดิ่งและแนวนอน	25
3.2 ค่าความต้านทานน้ำเกลือ	26
4.1 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	28
4.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	29
4.3 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	30
4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	31
4.5 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	31
4.6 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	32
4.7 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	33
4.8 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	34
4.9 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	34
4.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	35
4.11 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	36
4.12 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	37
4.13 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	39
4.14 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวก	40
4.15 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ขั้วลบ	40

ตารางที่	หน้า
4.16 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วลบ	41
4.17 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสโพลล์ขั้วบวก	42
4.18 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วบวก	43
4.19 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสโพลล์ขั้วลบ	43
4.20 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วลบ	44
4.21 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสโพลล์ขั้วบวก	45
4.22 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วบวก	46
4.23 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสโพลล์ขั้วลบ	46
4.24 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วลบ	47
4.25 แสดงการเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผล	49
4.26 แสดงความแตกต่างของความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสโพลล์ขั้วบวกและขั้วลบ	50
ข.1 รูปคลื่นรากสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm	58
ข.2 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm	59
ข.3 รูปคลื่นรากสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm	60
ข.4 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm	61
ข.5 รูปคลื่นรากสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm	62
ข.6 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm	63
ค.1 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	64
ค.2 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	66
ค.3 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	68
ค.4 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	70

ตารางที่	หน้า
ค.5 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	72
ค.6 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	74
ค.7 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	76
ค.8 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm	78
ค.9 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	80
ค.10 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	82
ค.11 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	84
ค.12 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	86
ค.13 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	88
ค.14 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	90
ค.15 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	92
ค.16 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm	94
ค.17 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	96
ค.18 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	98
ค.19 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	100

ตารางที่	หน้า
ค.20 ผลการทดลองรากลสายดินแนวตั้ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	102
ค.21 ผลการทดลองรากลสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	104
ค.22 ผลการทดลองรากลสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	106
ค.23 ผลการทดลองรากลสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	108
ค.24 ผลการทดลองรากลสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm	110



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 (a) เกิดเส้นทางนำขึ้น (b) เกิด return stroke current	4
2.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า	4
2.3 ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีต่อสัตว์	5
2.4 ฟ้าผ่าลงบนสายดิน	6
2.5 แรงดันช่วงก๊าวและแรงดันล้มฟัส	6
2.6 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์	7
2.7 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และค่าพารามิเตอร์	8
2.8 วงจรจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์	9
2.9 ผลการจำลองที่ค่าความต้านทานคงที่และความเหนี่ยวนำลดลง	9
2.10 ผลการจำลองที่ความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น	9
2.11 อิทธิพลของรากสายดินที่มีต่อความต้านทานดิน	10
2.12 ตัวอย่างการปรับปรุงความต้านทานดินด้วยเกลือ	12
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความลึก	12
2.14 การติดตั้งรากสายดินทำมุม 30°	13
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความชื้นของดิน	13
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับอุณหภูมิของดิน	14
2.17 การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 40 m	16
2.18 การกระจายของแรงดันบนรากสายดิน	17
2.19 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับฟังก์ชันของความต้านทานดิน	17
2.20 ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาว	18
2.21 การทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน (a) แนวตั้ง (b) แนวนอน	19
2.22 (a) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริง (b) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลอง	22
2.23 แสดงความสัมพันธ์ของอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับกระแสตามการทดลองของ Idris, Mohamad Nor และ Ahmad	22
2.24 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน	23
3.1 วงจรทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผล	24
3.2 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ	25

ภาพที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนกับเวลาหน้าคลื่น ภายใต้กระแสลมพัดสี่ข้าง 48	48
5.1 (a) ความต้านทานดินบริเวณภูเขา (b) ความต้านทานดินบริเวณที่มีความแห้งแล้ง 52	52
ก.1 ออสซิลโลสโคป RIGOL DS1022C 56	56
ก.2 ชั้นทวดกระแสลมพัดสี่ 56	56
ก.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 56	56
ก.4 วงจรวัดความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ..... 57	57



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ในกรณีที่ระบบมีชนิดป้องกันสิ่งรบกวนจากภายนอกได้อย่างสมบูรณ์แล้ว ระบบรากสายดินก็จะไม่จำเป็น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการแยกสิ่งรบกวนออกจากระบบเป็นไปได้ยาก เนื่องจากระบบต้องมีการเชื่อมต่อกับภายนอกได้แก่แหล่งจ่ายไฟ หรือระบบสื่อสาร ดังนั้นเมื่อมีเหตุการณ์ฟ้าผ่าเกิดขึ้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนั้นเทียบกับดินเพิ่มขึ้น จนอาจทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไปยังระบบอื่นๆที่เชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบเหล่านั้นได้รับความเสียหาย การลดผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการออกแบบรากสายดินให้มีประสิทธิภาพในด้านการป้องกันฟ้าผ่าและความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้รากสายดินมีความสำคัญอย่างมากในการป้องกันอันตรายให้กับบุคคลที่ไปสัมผัสส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วหรือเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และยังช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากแรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัสในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งความสามารถในการป้องกันจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน รากสายดินที่ออกแบบไม่ดี จะทำให้การกระจายกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินทำได้ไม่เต็มที่

การที่จะทำให้อุปกรณ์กระจายลงสู่ดินได้ค่านั้น รากสายดินควรจะมี ความยาวมาก ๆ แต่เมื่อรากสายดินมีความยาวมากขึ้นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งเมื่อความยาวของรากสายดินถึงความยาวจุดหนึ่งแล้วก็จะเกิดการอิ่มตัว ทำให้ค่ายอดแรงดันฟ้าผ่าไม่ลดลงต่อไปอีก และจากสถิติฟ้าผ่าชั่วลบมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นมากกว่าฟ้าผ่าชั่วบวก ดังนั้น การหาค่าความยาวประสิทธิผลควรมีเปรียบเทียบกันระหว่างฟ้าผ่าชั่วบวกและชั่วลบ ก็จะทำได้ค่าความยาวประสิทธิผลที่คุ้มค่ามากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าชั่วบวกและชั่วลบที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน โดยค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินที่ได้จากการทดลอง และสามารถนำข้อมูลความแตกต่างที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจเพื่อออกแบบรากสายดินให้เหมาะสมกับข้อมูลการเกิดฟ้าผ่าชั่วบวกและชั่วลบของแต่ละพื้นที่ได้

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่งและแนวนอนภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบสำหรับรูปคลื่น 10/420 μ s.
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผลโดยใช้ผลการทดลองจากชุดทดลองย่อยส่วน
- 3) ศึกษาวิธีการปรับปรุงวงจรทดสอบเพื่อให้ได้เวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าที่สั้นลง
- 4) ศึกษาผลของเวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาคำรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสมกับข้อมูลการเกิดฟ้าผ่าของแต่ละพื้นที่ได้
- 2) พัฒนาคำรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการหาความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน
- 3) ทราบความแตกต่างของความยาวประสิทธิผลของรากสายดินภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ
- 4) ทราบผลของเวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

1.5 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาถึงขั้ว รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า และความรู้เกี่ยวกับรากสายดิน
- 2) ศึกษาหลักการทดลองย่อยส่วน ส่วนประกอบ และการใช้งานชุดทดลองย่อยส่วน
- 3) ศึกษาวิธีการหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน
- 4) ปรับปรุงองค์ประกอบของชุดวงจรทดสอบให้มีเวลาหน้าคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่สั้นลง
- 5) ทดลองหาผลของเวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน
- 6) สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์และเขียนวิทยานิพนธ์

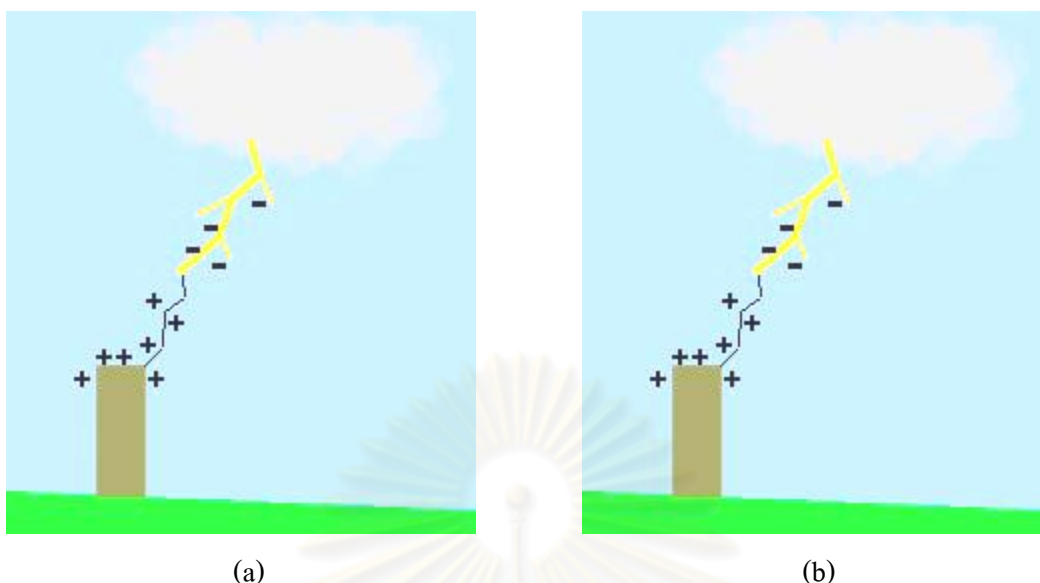
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning Strike)

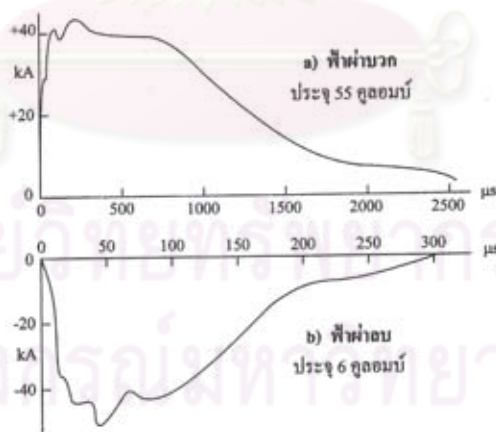
หากหากมองด้วยตาเปล่าเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นมา สิ่งที่สามารถสังเกตเห็น นั่นก็คือ ลมแสงกระแสะฟ้าผ่าพุ่งลงสู่วัตถุที่มีความสูง (มากที่สุด) หรือลงสู่พื้นดินที่ราบโล่ง ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแฟลคเตอร์บังคับเป็นอย่างไร ผลกระทบจากฟ้าผ่ามิได้จำกัดอยู่แค่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สินอย่างตรงๆ เพียงเท่านั้น แต่ผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่ายังแพร่กว้างไปมากกว่าที่เราสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า อันตรายของฟ้าผ่าสามารถจำแนกออกมาได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ผลกระทบทางตรง (Direct Lightning) กับผลกระทบทางอ้อม (Indirect Lightning) อันตรายจากฟ้าผ่าในรูปแบบผลกระทบทางตรง นั่นก็คือ ความเสียหาย ความสูญเสียชีวิตที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าได้ผ่าลงมาอย่าง ตรงๆ ส่วนผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่า ได้แก่ ไฟกระชอก (Surge) ทรานเซียนต์ และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ในทางปฏิบัติแล้ว ความเสียหาย ความเสื่อมสภาพ หรือผลการทำงานที่ผิดปกติของส่วนงานอิเล็กทรอนิกส์ความไวสูง ซึ่งทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีความไวในการตอบสนองที่เร็วมาก รองรับพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำ ตัวอย่างเช่น IC มีความสามารถในการรองรับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ใน ช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-7} จูล ล้วนแล้วแต่ได้รับอิทธิพลมาจากผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่าเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีใช้ผลกระทบทางตรง

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าก็คือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นผิวโลก (หรือเป็นไปในทิศทางที่ตรงกันข้าม ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยกว่า 1 %) สำหรับลักษณะการสะสมประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆโดยส่วนบนของก้อนเมฆจะมีการสะสมประจุไฟฟ้าบวก และฐานล่างของก้อนเมฆจะสะสมประจุไฟฟ้าลบ การเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าส่งผลให้สนามไฟฟ้า (Electric Field) ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นผิวโลกมีความเข้มข้นที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะไปสอดคล้องกับทฤษฎีในเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) นั่นก็คือ จะก่อให้เกิดการสร้างประจุไฟฟ้าตามพื้นผิวดิน หรือผิวของโครงสร้างวัตถุต่างๆ ที่อยู่ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นผิวโลกเมื่อระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอยู่ในราว 10kV – 30 kV/ เมตร จะก่อให้เกิดการไอโอไนเซชันในอากาศประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆจะถูกถ่ายเทลงตามเส้นทางนำลงหรือ Leader (พิจารณารูปที่ 2.1(a)) ประจุไฟฟ้าที่ถูกถ่ายเทลงตามเส้นทางนำลง จะเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวโลกให้เคลื่อนที่ขึ้นไปหา โดยจะเรียกว่าเส้นทางนำขึ้น หรือ Streamer เมื่อเส้นทางนำขึ้นกับเส้นทางนำลงมารกระทบกัน จะก่อให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจำนวนมหาศาลจากก้อนเมฆลงสู่พื้นผิวโลกหรือโครงสร้างวัตถุใด ๆ เรียกเส้นทางการถ่ายเทประจุไฟฟ้างี้ว่า Return Stroke Current ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 (a) เกิดเส้นทางนำขึ้น (b) เกิด return stroke current

จากข้อมูลบันทึกได้ในต่างประเทศพบว่า ประมาณ 80-85% เป็นฟ้าผ่าลบ ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าอาจกำหนดด้วยช่วงเวลาหน้าคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น เวลาช่วงหน้าคลื่น หมายถึง เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่นและช่วงเวลาหางคลื่นหมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าดังรูปที่ 2.2 [1]



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่า

ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่ามีทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อวงจรไฟฟ้า ทั้ง conducted และ radiated disturbances ที่ทุกระดับแรงดัน ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นมีดังนี้ [2]

- ความร้อน (การหลอมละลายของอุปกรณ์ต่าง ๆ, ไฟไหม้, ระเบิด)

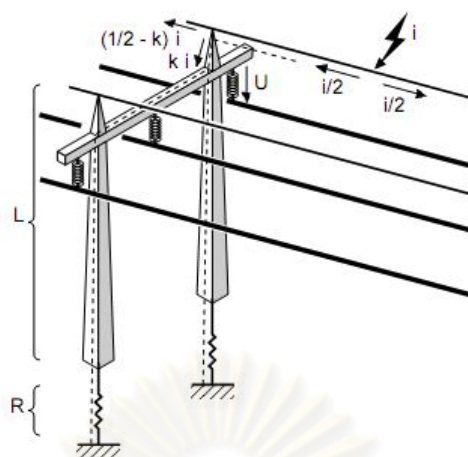
- อุปกรณ์ไฟฟ้าถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กความถี่สูง ซึ่งรวมทั้งการรบกวนโดยการนำกระแส, การเหนี่ยวนำของวงจร
- อุปกรณ์เกิดความเสียหาย ตัวอย่างเช่น เกิดการเบรคควาน์เนื่องจากแรงดันเกิน หรืออายุการใช้งานจนวนเสื่อมลง
- เกิดการหยุดชะงักของระบบไฟฟ้า
- เกิดอันตรายต่อมนุษย์หรือสัตว์



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีต่อสัตว์

2.3 กรณีฟ้าผ่าลงบนสายดินของเสาส่งไฟฟ้า

สำหรับเสาส่งไฟฟ้าที่มีสายดินแขวนอยู่ด้านบน (overhead ground wire) เพื่อล่อฟ้าดังรูปที่ 2.4 ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าระบบสายดินมีการก่อสร้างไม่เหมาะสมกับพฤติกรรมทรานเซียนต์ เช่น การทำให้ความต้านทานกระแสตรงต่ำ โดยการตอกรากสายดินแนวตั้งยาวมากเกินไป ส่งผลให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำมีค่าสูง ดังนั้นขณะที่กระแสฟ้าผ่าวิ่งไปบนสายดินและแบ่งไหลลงสู่เสาส่งด้วยอัตราส่วน k เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าสูง U ตกคร่อมระหว่างสายดินกับสายไฟฟ้าที่แขวนอยู่อีกปลายข้างหนึ่งของฉนวนตามสมการที่ (2.1) เมื่อแรงดันดังกล่าวมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตอิมพัลส์ (impulse flashover voltage) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดการกระโดดข้ามของแรงดันระหว่างสายทั้งสอง (back flashover) เกิดเป็นรูปคลื่นแรงดันหน้าคลื่นชัน (steep-front wave voltage surge) วิ่งไปบนสายเฟส ทำให้ระบบป้องกันเห็นว่าการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า [3]



รูปที่ 2.4 ฟาผ่าลงบนสายดิน

$$U = k(I.Rg + L \cdot \frac{dI}{dt}) + V_{peak} \quad (2.1)$$

เมื่อ

Rg = ความต้านทานการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

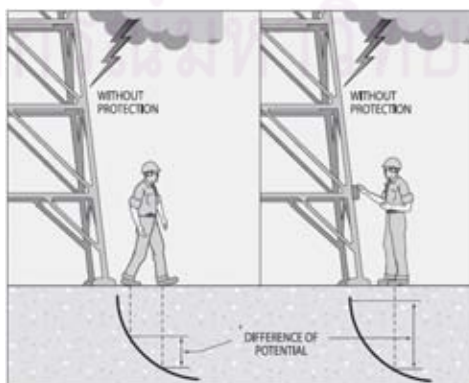
L = ความเหนี่ยวนำเสาส่งไฟฟ้า

 $\frac{dI}{dt}$ = อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสฟ้าผ่าV_{peak} = ค่ายอดแรงดันของระบบไฟฟ้า

2.4 แรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส

แรงดันช่วงก้ำว คือ แรงดันที่แตกต่างระหว่างเท้าทั้งสองข้าง สาเหตุเนื่องมาจากการกระแสฟ้าผ่าที่กระจายลงสู่ดิน

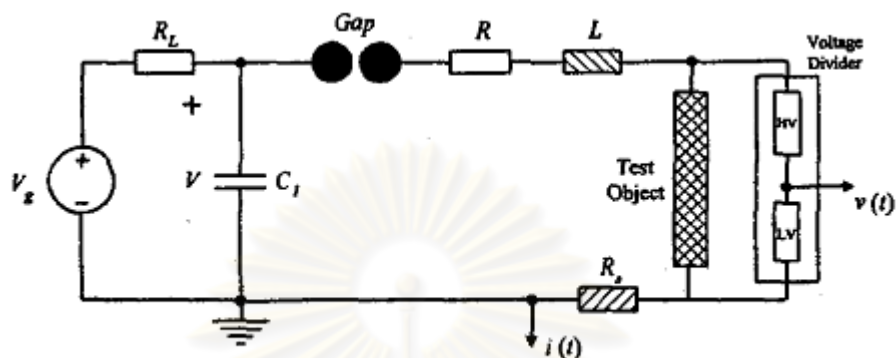
แรงดันสัมผัส คล้ายคลึงกับแรงดันช่วงก้ำว แตกต่างกันที่กระแสฟ้าผ่าจะไหลผ่านแขน และลำตัวของผู้สัมผัสลงสู่ดิน



รูปที่ 2.5 แรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส

2.5 การสร้างกระแสอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์โดยทั่วไปจะใช้หลักการวงจร Transient R-L-C ดังรูปที่ 2.6 [4]



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

เมื่อ

V_g คือ แรงดันอัดประจุ (DC generator)

R_L คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแส

R_s คือ ความต้านทานชั้นที่ สำหรับวัดกระแสทดสอบ

L คือ ตัวเหนี่ยวนำ

C คือ ตัวเก็บประจุ

เมื่อตัวเก็บประจุถูกอัดประจุด้วยแรงดัน V_g และเกิดการคายประจุเมื่อแกปเกิดการสปาร์ก ได้กระแส i_m ตามสมการที่ (2.3) [5]

$$V = Ri_m + L \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_m dt \quad (2.2)$$

$$i_m = \frac{V}{\omega L} [\exp(-\alpha t)] \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{R}{2L} \text{ และ } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.4)$$

เวลาที่กระแส i_m เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง ค่าสูงสุดครั้งแรก คือ

$$t_1 = t_f = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{\omega}{\sqrt{LC}} \right) = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\alpha} \right) \quad (2.5)$$

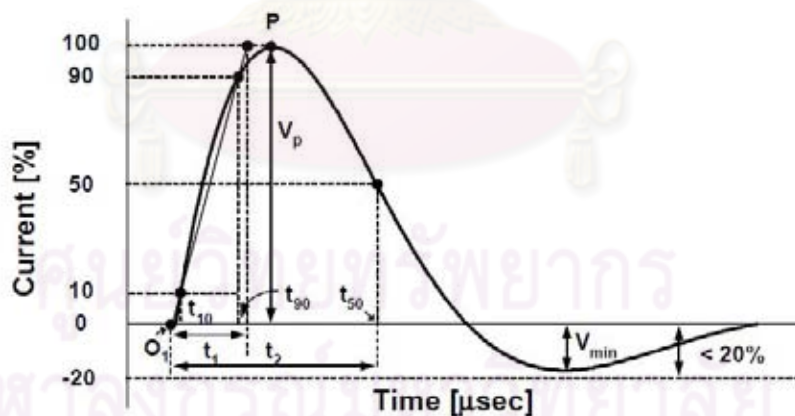
เวลาที่กระแส i_m ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง คือ

$$t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (2.6)$$

พารามิเตอร์ของเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหลังคลื่น T_2 ของกระแสมัลติพัลส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) จากค่าเวลาที่ 3 ค่า t_{10} , t_{90} และ t_{50} ที่ค่ากระแส 10%, 90% และ 50% ของค่าสูงสุดดังรูปที่ 2.7 [6]

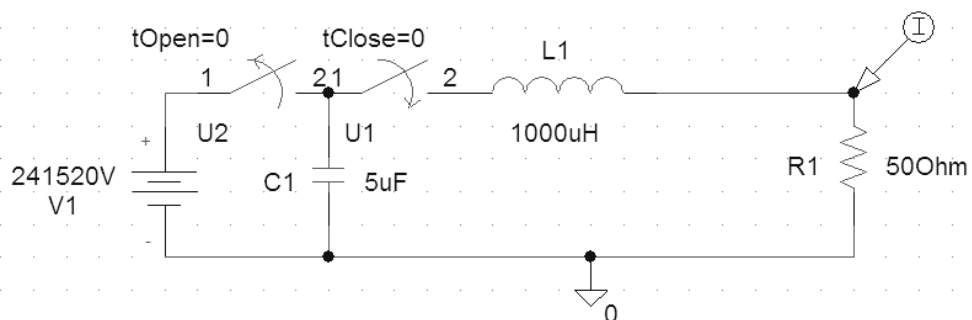
$$T_1 = \frac{t_{90} - t_{10}}{0.8} \quad (2.7)$$

$$T_2 = t_{50} - \frac{9t_{10} - t_{90}}{8} \quad (2.8)$$



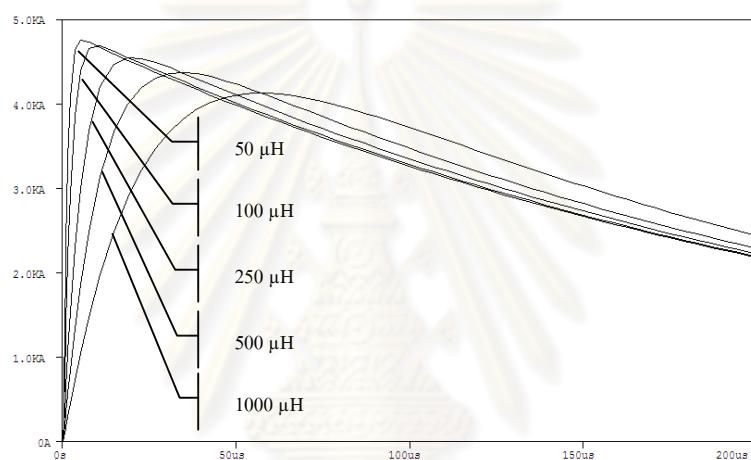
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสมัลติพัลส์และค่าพารามิเตอร์

การปรับลดเวลาหน้าคลื่นกระแสมัลติพัลส์ ต้องทำการปรับเพิ่มหรือลดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร ในการหาค่าของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของหน้าคลื่น จะใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลอง สำหรับวงจรที่ใช้ในการจำลองดังรูปที่ 2.8



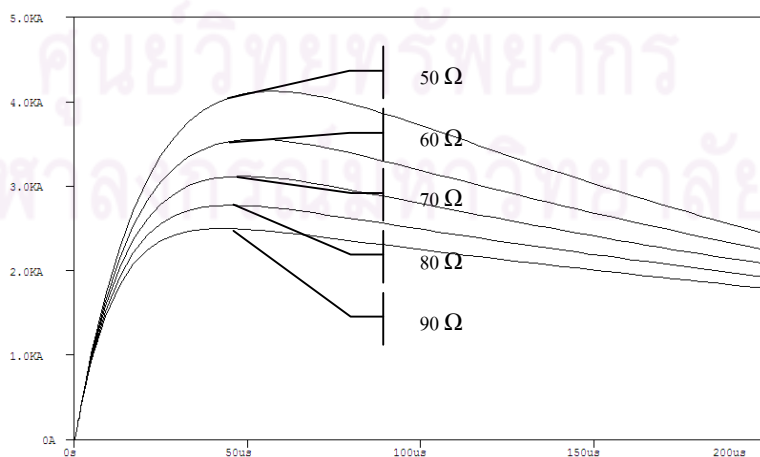
รูปที่ 2.8 วงจรจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของหน้าคลื่นกระแสพัลส์

กรณีที่ 1 ค่าความต้านทานคงที่และค่าความเหนี่ยวนำลดลง



รูปที่ 2.9 ผลการจำลองที่ค่าความต้านทานคงที่และความเหนี่ยวนำลดลง

กรณีที่ 2 ค่าความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 ผลการจำลองที่ความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อค่าความต้านทานคงที่และค่าความเหนี่ยวนำลดลงจะทำให้เวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าลดลง และเมื่อค่าความเหนี่ยวนำคงที่และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาหน้าคลื่นกระแสไฟฟ้าลดลงเช่นกัน

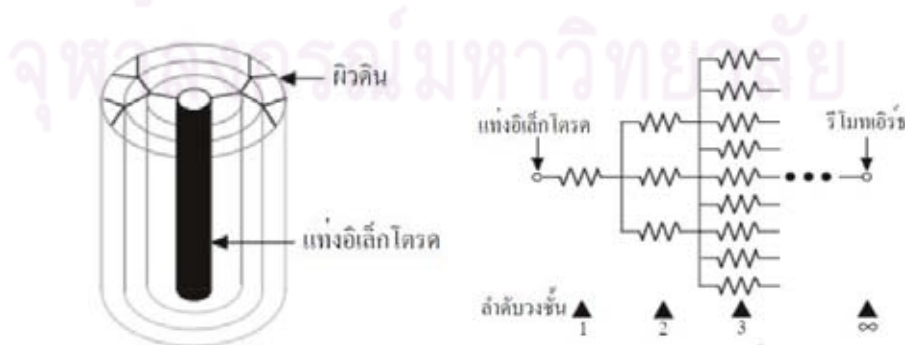
2.6 ความรู้เกี่ยวกับระบบรากสายดิน

การเชื่อมต่อเข้ากับระบบของอุปกรณ์ คือ การเตรียมเส้นทางเดินให้กับกระแสรั่วหรือกระแสไฟฟ้าขนาดสูงไหลลงสู่ดินโดยไม่ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้ารั่วควรมีค่าความต้านทานไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ และเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าควรมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่สูงเกินไป ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการกระจายกระแสของรากสายดินได้แก่

1. ความต้านทานดิน
2. ความลึกในการฝังรากสายดิน
3. ความชื้นภายในดิน
4. อุณหภูมิ
5. ชนิดของรากสายดิน
6. พฤติกรรมทรานเซียนต์ภายใต้กระแสไฟฟ้า

2.6.1 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานของดิน เป็นตัวแปรหรือแฟกเตอร์ที่สำคัญต่อค่าความต้านทานของรากสายดิน ซึ่งการวัดค่าความต้านทานของรากสายดิน จะหมายถึง การวัดค่าความต้านทานดินโดยเทียบจากแท่งอิเล็กโทรด หรือจุดที่ทำการวัดไปยังรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) โดยจะเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ซึ่งมีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร หรือ โอห์ม-เซนติเมตร หรือ โอห์ม-นิ้ว เป็นต้น [7]



(a) รูปแบบจำลองของรากสายดิน

(b) วงจรสมมูลของวงชั้นดิน

รูปที่ 2.11 อิทธิพลของรากสายดินที่มีต่อความต้านทานดิน

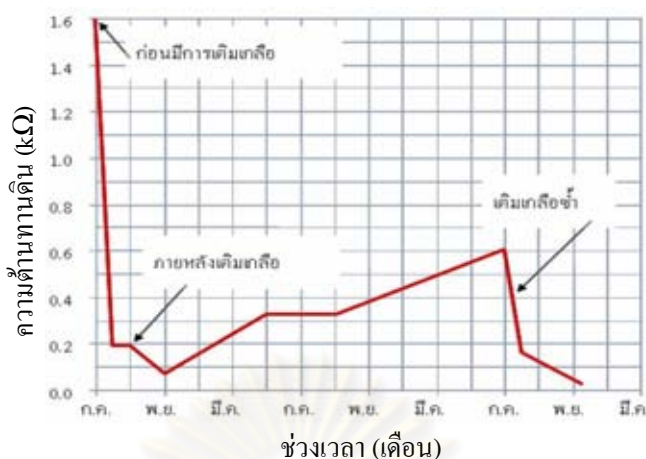
จากรูปที่ 2.11 (b) จะเห็นว่าความสามารถในการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้ายังมีค่าต่ำลงเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากรูปแบบของการต่อขนานกันของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และเมื่อถึงวงชั้นอนันต์ (∞) ซึ่งไม่รู้ว่าจะอยู่ที่ไหน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และจุดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับศูนย์ ก็คือรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานโดยเทียบจากแท่งอิเล็กโทรดหรือจุดกราวนด์ที่ต้องการวัดเทียบไปยังรีโมทเอิร์ธ (Remote Earth) ก็คือ การวัดค่าความต้านทานรวมตามรูปแบบจำลองดังรูปที่ 2.11 (b)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความต้านทานดิน [8]

จำนวนจุดทดสอบ	ชนิดของดิน	ความต้านทานของดิน		
		ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
24	Fills and ground containing varying amounts of refuse such as cinders, ashes and brine waste	14	3.5	41
205	Clay, shale, adobe, gumbo, loam, and slightly sandy proportions of sand, gravel, and stones	21	2.0	98
137	Clay, adobe, gumbo, and loam mixed with varying proportions of sand, gravel, and stones	93	6.0	800
72	Sand, stones, or gravel with little or no clay or stones	554	35	2,700

ความต้านทานดินอาจจะลดลงได้ 15% ถึง 90% โดยการเติมสารเคมี (ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของดิน) สำหรับสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับใช้ลดความต้านทานดิน ได้แก่ โซเดียม คลอไรด์, แมกนีเซียม ซัลเฟต, คอปเปอร์ ซัลเฟต และแคลเซียม คลอไรด์ สำหรับสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างมากคือ เกลือ และแมกนีเซียม ซัลเฟต โดยทั่วไปการใช้สารเคมี จะใส่ที่รอบ ๆ รากสายดิน โดยป้องกันไม่ให้สัมผัสกับรากสายดินโดยตรง [9]

การเติมสารเคมีเป็นการแก้ปัญหาค่าความต้านทานดินสูง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพควรมีแผนการบำรุงรักษาเพื่อให้แน่ใจว่าดินมีความต้านทานต่ำดังรูปที่ 2.12



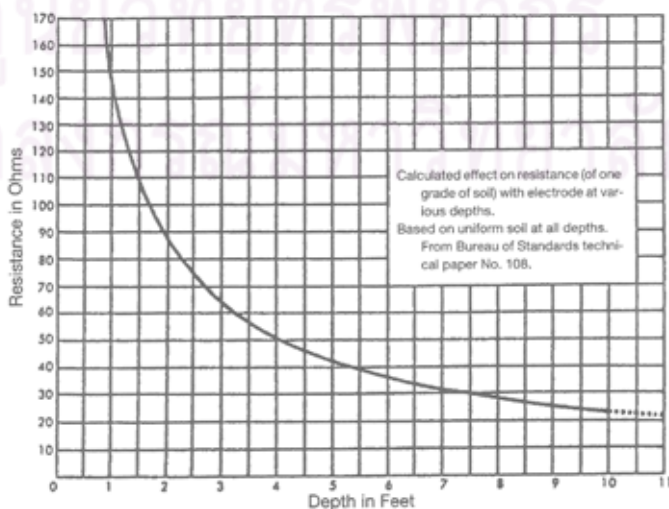
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการปรับปรุงความต้านทานดินด้วยเกลือ

2.6.2 ความลึกในการฝังรอกสายดิน

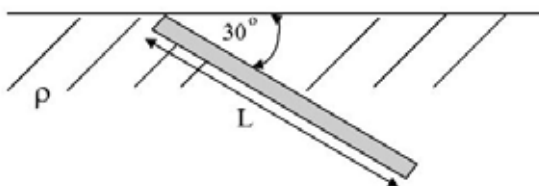
การฝังรอกสายดินให้มีประสิทธิภาพ จำต้องทำให้ค่าความต้านทานของรอกสายดินลดลงตามความลึก ซึ่งระดับความลึกที่เหมาะสมจะมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของดิน ตัวอย่างของความต้านทานดินตามระดับความลึกดังรูปที่ 2.13 จากกราฟพบว่า ความลึกที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-9 m ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อความลึกในการฝังรอกสายดินคือ

1. ความต้านทานเฉลี่ยของชั้นดินที่ลึกลงไป
2. การเพิ่มขึ้นของกำลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการฝังรอกสายดิน

ในกรณีที่ไม่สามารถตอกรอกสายดินให้ลึกได้มาตรฐาน [10] แนะนำให้ติดตั้งรอกสายดินเอียงทำมุม 30° กับแนวระดับ ดังรูปที่ 2.14 เพื่อให้ได้ความยาวของรอกสายดินที่ฝังลึกลงไปในดินเพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างรอกสายดินกับดิน



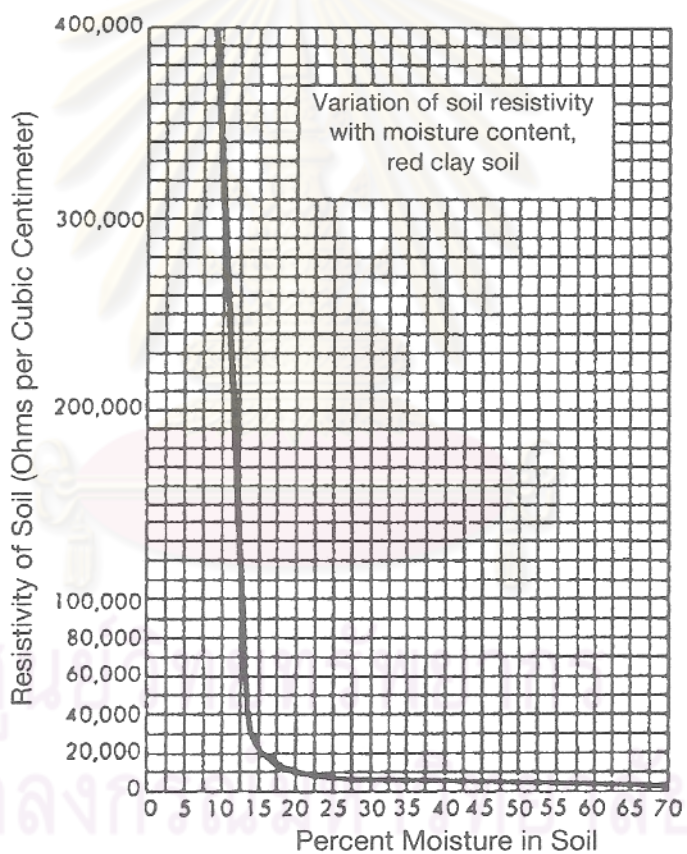
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความลึก



รูปที่ 2.14 การติดตั้งรอกสายดินทำมุม 30°

2.6.3 ความชื้นภายในดิน

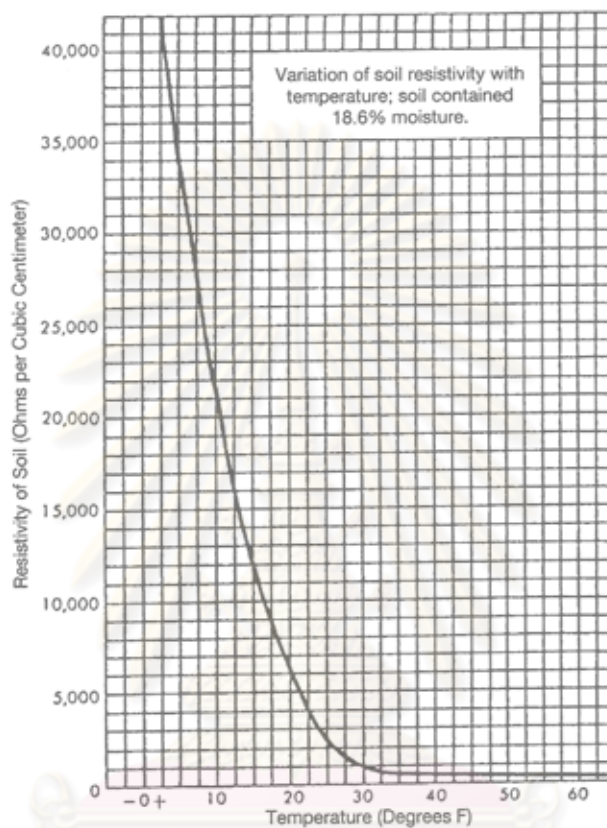
เปลี่ยนแปลงตามความชื้นของดิน เมื่อดินมีค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานของดินต่ำลง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความชื้นของดิน

2.6.4 อุณหภูมิ

เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของดินเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำลงดังรูปที่ 2.16



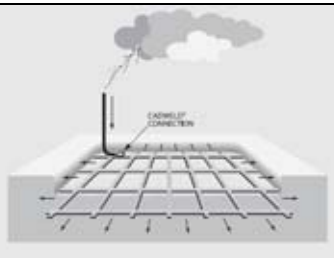
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับอุณหภูมิของดิน

2.6.5 ชนิดของรากสายดิน

พื้นฐานการติดตั้งรากสายดิน ควรทำให้ผิวของรากสายดินสัมผัสกับดินให้มากที่สุด การทำเช่นนี้ไม่เพียงแต่เป็นการลดความต้านทานของระบบรากสายดินให้ต่ำลง แต่ยังเป็นการปรับปรุงเสิร์จอิมพีแดนซ์ของรากสายดินให้ดีขึ้น รูปร่าง จำนวน ความยาว และความลึก ของรากสายดิน จะขึ้นอยู่กับการใช้งาน ชนิดของดิน และขนาดของพื้นที่ สำหรับรูปแบบของการติดตั้งที่ใช้โดยทั่วไป มีดังตารางที่ 2.2

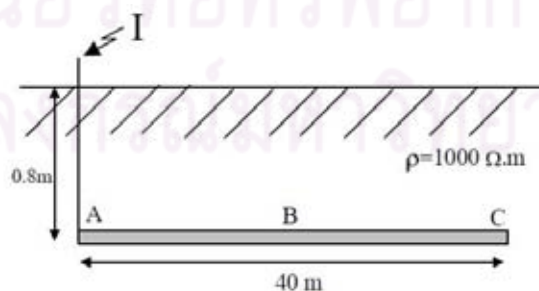
ตารางที่ 2.2 ชนิดของรากสายดิน

<p>1. รากสายดินเดี่ยวแนวตั้ง รากสายดินชนิดนี้อาจจะเพียงพอสำหรับการติดตั้งระบบไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับกระแสฟ้าผ่ารากสายดินชนิดนี้อาจจะมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่ต่ำเพียงพอ</p>	
<p>2. รากสายดินเดี่ยวแนวอนที่ต่อจุดปล่อยกระแสตรงส่วนปลาย การติดตั้งรากสายดินแบบนี้เป็นทางเลือก สำหรับพื้นที่แข็งหรือเป็นหิน การเจาะลงไปแนวตั้งทำได้ยาก แต่วิธีนี้ก็ไม่น่าแนะนำ เพราะแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสจะสูงมาก</p>	
<p>3. รากสายดินเดี่ยวแนวอนที่ต่อจุดปล่อยกระแสตรงกลาง การติดตั้งวิธีนี้กระแสจะแยกไหลเป็น 2 ทิศทาง และทำให้อิมพีแดนซ์ต่ำลง แต่วิธีนี้ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า</p>	
<p>4. รากสายดินแบบแนวรัศมีเดี่ยว การติดตั้งแบบนี้เหมาะสมสำหรับการป้องกันฟ้าผ่า ในพื้นที่ที่มีความต้านทานปานกลาง รัศมีสามารถขยายออกไปได้เป็นระยะทาง 100 ฟุต</p>	
<p>5. รากสายดินแบบแนวรัศมีทวิคูณ เหมาะสำหรับการป้องกันฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าจะแบ่งไหลแยกไปตามตัวนำ ทำให้มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ลดอันตรายจากแรงดันอย่างก้าว</p>	
<p>6. รากสายดินแบบฐานราก ได้แก่ตัวนำทองแดง หรือเหล็กชุบสังกะสีฝังในคอนกรีต ซึ่งรากสายดินแบบนี้ต้องดำเนินการติดตั้ง ตั้งแต่ตอนที่เริ่มก่อสร้างอาคาร โดยทั่วไปรากสายดินแบบนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้</p>	

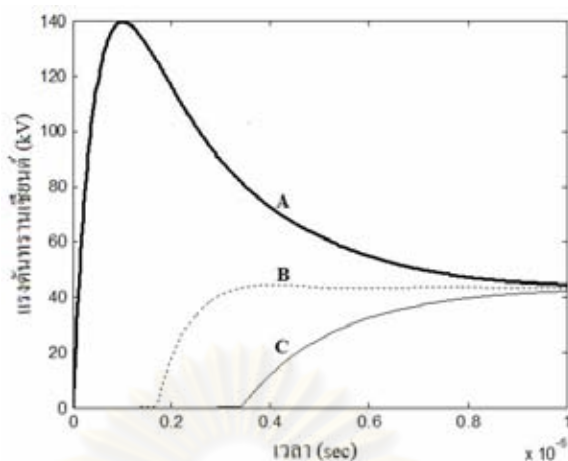
<p>7. รากสายดินแบบกริด การติดตั้งแบบนี้นิยมใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปจะออกแบบให้มีความต้านทาน 1 โอห์ม</p>	
<p>8. รากสายดินแบบกริดผสมรากสายดินเดี่ยวแนวตั้ง เพื่อช่วยให้ความต้านทานดินต่ำลง</p>	
<p>9. รากสายดินแบบวงแหวนเป็นรากสายดินที่มีตัวนำวนรอบเป็นวงแหวน หรือ วนตัวนำรอบอาคาร ทำหน้าที่ให้ความต้านทานดินต่ำ นอกจากนี้จะทำให้แรงดันย่างก้าวต่ำลง (step voltage) สำหรับคนที่ก้าวออกจากตัวอาคารในขณะที่เกิดฟ้าผ่าหรือเกิดลัดวงจรระบบไฟฟ้าลงดิน</p>	

2.6.6 พฤติกรรมทรานเซียนต์ภายใต้กระแสพัลส์ฟ้าผ่า

ในการออกแบบรากสายดินนอกจากการลดค่าความต้านทานดินแล้ว ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงการลดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายใต้กระแสพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งการเพิ่มความยาวรากสายดินแม้ว่าจะช่วยลดค่าความต้านทานของระบบรากสายดิน ค่าความเหนี่ยวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความยาว ทำให้การกระจายของแรงดันบนตัวนำไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง โดยค่ายอดแรงดันจะมีขนาดลดลงตลอดความยาวของตัวนำและมีแนวโน้มอิมพีแดนซ์เมื่อตัวนำมีความยาวถึงค่า ๆ หนึ่ง



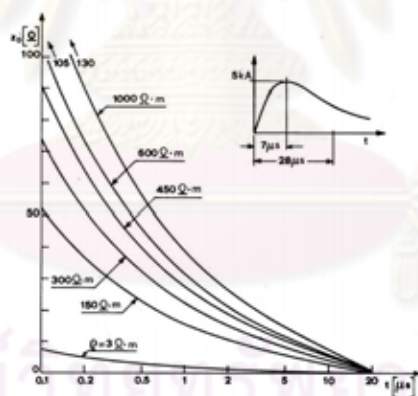
รูปที่ 2.17 การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 40 m



รูปที่ 2.18 การกระจายของแรงดันบนรากสายดิน

2.7 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

Mazzetti และ Vaca [11] ได้ให้ความหมายของความยาวประสิทธิผลว่าเป็นความยาวที่เพียงพอต่อการกระจายกระแสไฟฟ้าลงสู่ดิน โดยความยาวประสิทธิผลมีแนวโน้มลดลงตามค่าความต้านทานดินดังรูปที่ 2.19 แต่ยังไม่ได้ระบุถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณหาความยาวประสิทธิผล



รูปที่ 2.19 อิมพีแดนซ์กับฟังก์ชันของความต้านทานดิน

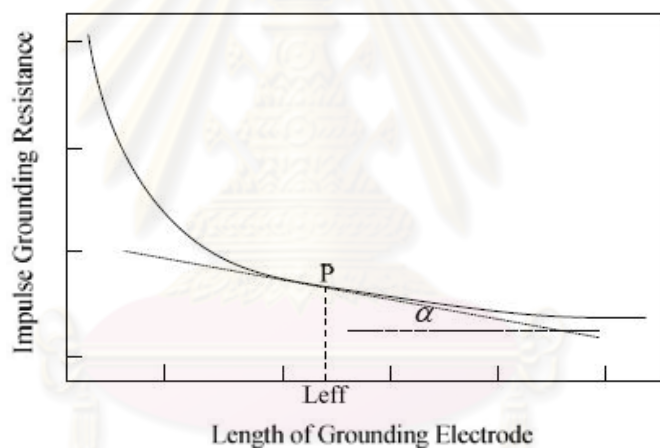
Gupta และ Thapar [12] ได้ทำการศึกษาความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน โดยพบว่า จากความยาวของรากสายดินทั้งหมดนั้น จะมีเพียงความยาวส่วนหนึ่งนับจากจุดที่ปล่อยกระแสที่สามารถกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเรียกความยาวนี้ว่าความยาวประสิทธิผล ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$l_e = A(\rho \cdot \tau)^{0.5} \quad (2.9)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานดิน τ คือ เวลาหน้าคลื่น ซึ่งความยาวประสิทธิผลจะเกิดขึ้นเมื่อ อัตราส่วน RT/L_s มีค่าเท่ากับ 0.57 เมื่อ R คือ ความต้านทานดินของกระแสความถี่ต่ำ T คือ เวลาหน้าคลื่น (μs) และ L_s คือ ความเหนี่ยวนำรวมของรากสายดินทั้งหมด สัมประสิทธิ์ A มีค่า 1.4 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงปลายตัวนำ มีค่า 1.55 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงกึ่งกลางตัวนำ และมีค่า 1.85 สำหรับรากสายดิน 4 แฉก ที่ปล่อยกระแสตรงจุดกึ่งกลางที่เชื่อมตัวนำเข้าด้วยกัน

J. L. He [13] ได้เสนอว่า ความยาวประสิทธิผลคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ของรากสายดินเทียบกับความยาวมีค่าไม่เกิน Tangent ของมุม $\alpha = 5^\circ$ ดังสมการที่ (2.10) และรูปที่ 2.20

$$-\frac{dz_l}{dl} \leq tg\alpha \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.20 ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาว

L. Grcev [14] เรียกความยาวประสิทธิผลว่า ความยาวลักษณะ (characteristic length) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ลักษณะ (characteristic frequency in F_c MHz) และความต้านทานดิน ρ จากผลการศึกษาในดินที่มีความต้านทานดินต่ำ ความยาวลักษณะจะมีค่าสั้น และจะเพิ่มขึ้นตามความต้านทานดินดังสมการที่ (2.11)

$$l_c = 0.6 (\rho / F_c)^{0.43} \quad (2.11)$$

พงศ์พันธุ์ ปรีวงค์ [3] ได้เสนอแนวคิดจุดคุ้มค่า (optimum point) ทางคณิตศาสตร์ คือ วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด (minimize per unit length impedance method) สำหรับหาค่าความยาวประสิทธิภาพของรากสายดินแท่งแนวตั้ง และรากสายดินแนวนอน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ power function

$$Z = aL^b + c \tag{2.12}$$

เมื่อ a, b และ c หาได้จากการทำ curve fitting

2. หาค่า impulse impedance ต่อหน่วย โดยการหารฟังก์ชัน Z ในสมการที่ (2.12) ด้วย L ดังสมการที่ (2.13)

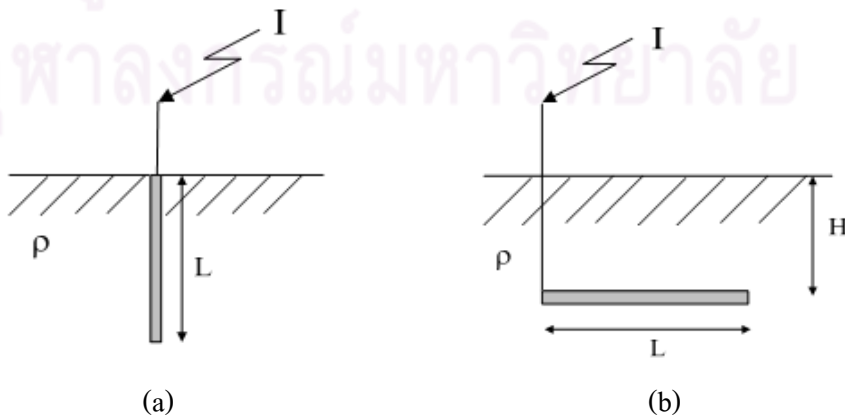
$$\frac{Z}{L} = \frac{aL^b + c}{L} = aL^{b-1} + cL^{-1} \tag{2.13}$$

3. หาค่าอนุพันธ์ Z/L แล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าความยาวตรงจุดต่ำสุดดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{d(Z/L)}{dL} = 0 \tag{2.14}$$

แก้สมการหาค่าความยาวประสิทธิภาพ l_e ดังสมการที่ (2.15)

$$l_e = \left| \frac{c}{a(b-1)} \right|^{1/b} \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.21 การทดลองหาค่าความยาวประสิทธิภาพของรากสายดิน (a) แนวตั้ง (b) แนวนอน

เมื่อได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน จากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันต่อค่ายอดกระแสตามสมการที่ (2.16)

$$Z = \frac{V_{peak}}{I_{peak}} \quad (2.16)$$

หลังจากได้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มาทำ curve fitting กับความยาวรากสายดินด้วย power function ตามสมการที่ (2.12) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a, b และ c

เนื่องจากการหาความยาวประสิทธิผลมีวิธีการหาหลายแบบตามงานวิจัยต่าง ๆ เช่น การหาความยาวประสิทธิผลของ Gupta และ Thapar ตามสมการที่ (2.9) แต่การหาความยาวตามวิธีการนี้ไม่ได้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการหาความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่ง

งานวิจัยของ L. Grcev ได้กล่าวว่า ความยาวประสิทธิผลมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ลักษณะของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ตามสมการที่ (2.11) แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดความถี่ลักษณะที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ทำได้ยาก

การหาความยาวประสิทธิผลของ พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด เป็นวิธีการหาความยาวจากจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวตรงจุดที่กราฟมีความชันเป็นศูนย์ จะได้ความยาวประสิทธิผลที่มีความยาวมาก ซึ่งจากการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดิน ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มีแนวโน้มคงที่ ที่ความยาวของรากสายดินในช่วงที่ไม่ยาวมากนัก ซึ่งจากการหาความยาวด้วยวิธีของ J. L. He มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พิจารณาได้จากกราฟมากกว่า อีกทั้งวิธีการนี้ยังสามารถใช้หาความยาวประสิทธิผลได้ทั้งรากสายดินแนวดิ่งและรากสายดินแนวนอน

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะใช้การหาค่าความยาวประสิทธิผลตามวิธีการของ J. L. He

2.8 หลักการทดลองย่อส่วน

เนื่องจากการทดลองด้วยขนาดที่เท่ากับของจริงยังมีข้อจำกัดดังนั้น จะเลือกใช้ทฤษฎีการทดลองย่อส่วน ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลองภาคสนามกับผลการทดลองที่ได้จากการย่อส่วน [15] ยืนยันว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน อีกทั้งยังง่ายต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความถี่ของรากสายดิน ความต้านทานดิน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะไหลลงสู่ดิน เกิดสนามไฟฟ้า (E) รอบรากสายดินดังสมการที่ (2.17)

$$E = J\rho_i \quad (2.17)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นของกระแส และ ρ_i คือ ความต้านทานดิน ขณะกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดิน เมื่อสนามไฟฟ้าในดินรอบรากสายดินเกินค่าสนามไฟฟ้าเบรคควาน์วิกฤติของดิน ดินรอบรากสายดินจะแตกตัว ความต้านทานของดินที่เกิดการแตกตัวจะต่ำลงมาก

ในการจำลองปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ทดลองภายในห้องปฏิบัติการ จะต้องเหมือนกับสภาพจริง ดังนั้น ค่าความต้านทานดินและค่าสนามไฟฟ้าเบรคควาน์วิกฤติของดินของทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (2.18)$$

$$E_{01} = E_{02} \quad (2.19)$$

เมื่อ ρ คือ ความต้านทานของดิน E_0 คือ ค่าสนามไฟฟ้าเบรคควาน์วิกฤติของดิน การทดลองภายในห้องปฏิบัติการแทนด้วย 2 สภาพจริงแทนด้วย 1 ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางดินของทั้งสองระบบดังสมการที่ (2.20)

$$v_1 = v_2 \quad (2.20)$$

และปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในรูปอัตราส่วน n เท่าของค่าในสภาพจริงได้แก่ ความยาวรากสายดิน แรงดันอิมพัลส์ กระแสอิมพัลส์ และอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.21)- (2.24)

$$l_1 = nl_2 \quad (2.21)$$

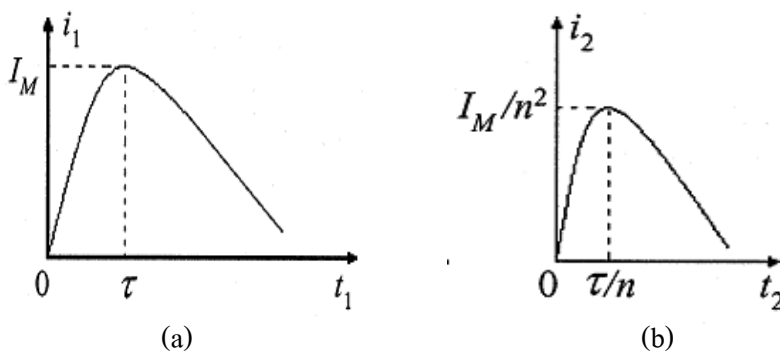
$$u_1 = nu_2 \quad (2.22)$$

$$i_1 = n^2 i_2 \quad (2.23)$$

$$Z_{11} = \frac{1}{n} Z_{12} \quad (2.24)$$

ในการทดลองย่อส่วน เวลาค้นคืนจริงของกระแสอิมพัลส์จะถูกทำอัตราส่วน n เท่า ดังสมการที่ (2.25) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริงและรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลองที่ใช้ในการทดลองย่อส่วนแสดงดังรูปที่ 2.22

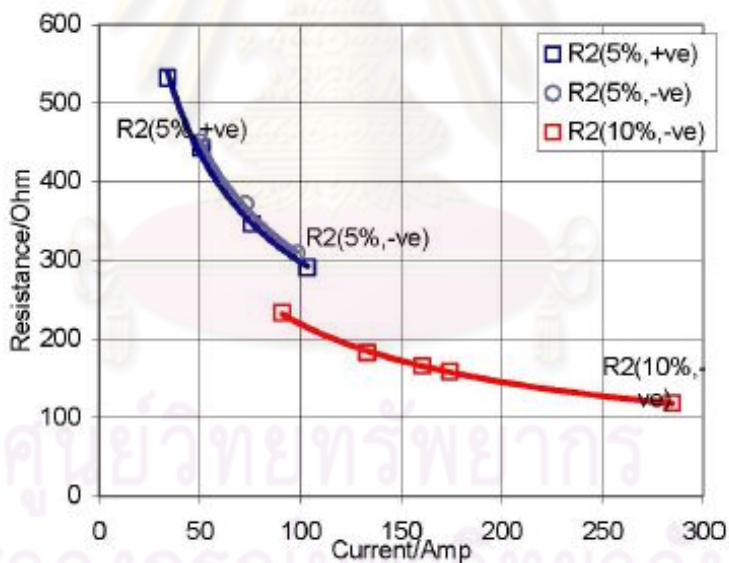
$$\tau_1 = n\tau_2 \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.22 (a) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริง (b) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลอง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

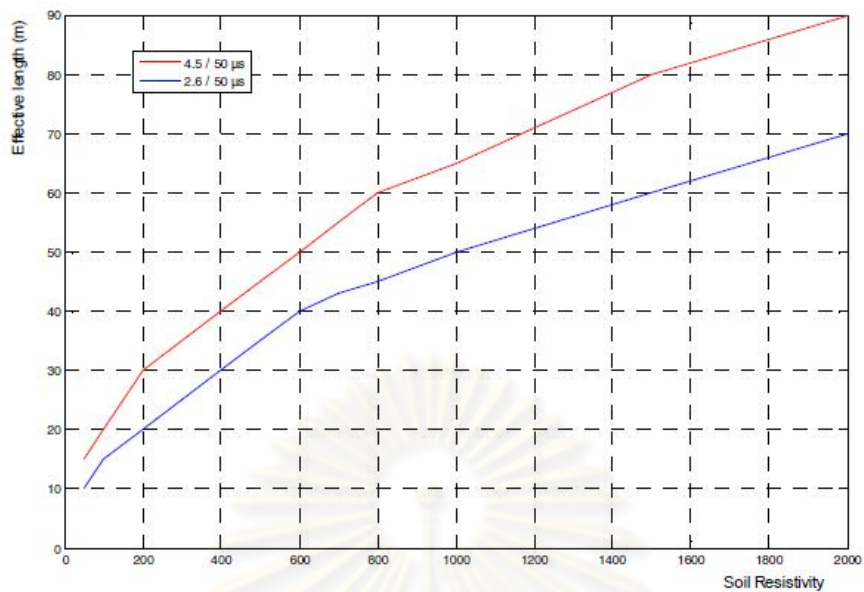
Idris, Mohamad Nor และ Ahmad [16] ได้ศึกษาผลกระทบของขั้วของอิมพัลส์ที่มีต่อรากสายดิน พบว่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อเปรียบเทียบค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของขั้วบวกและขั้วลบ ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของขั้วบวกจะต่ำกว่าขั้วลบดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับกระแส

ตามการทดลองของ Idris, Mohamad Nor และ Ahmad

Ivica, Rino และ Dragan [17] ศึกษาถึงความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.6/50 μ s. และ 4.5/50 μ s. ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นที่แตกต่างกัน และได้อธิบายว่า ที่เวลาหน้าคลื่นชันมาก ๆ จะมีความถี่สูง ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินสั้นลงตามเวลาหน้าคลื่นที่ลดลงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

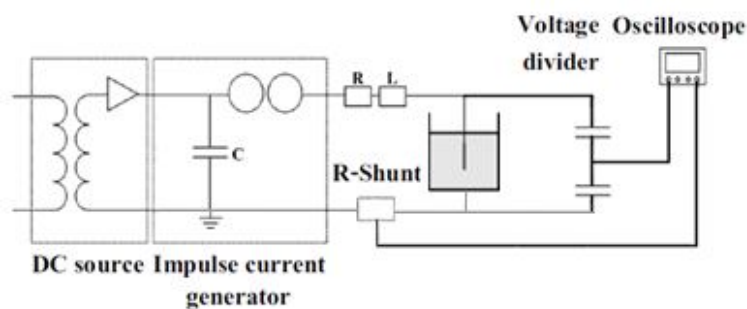
ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ และวิธีการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน โดยศึกษาทั้งรากสายดินแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ไฟฟ้า
2. ออสซิลโลสโคป RIGOL DS1022C, 25 MHz, 400 Msa/s
3. ชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์ 6.929 mΩ.
4. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุอัตราส่วน 151.1: 1 V
5. ถังอลูมิเนียมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 cm. สูง 80 cm.
6. รากสายดินสำหรับทดสอบแนวตั้งและแนวนอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 mm.
7. วงจรวัดความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ
8. สารละลายน้ำเกลือ

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

ในการทดลองจะใช้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่มีวงจรทดสอบดังรูปที่ 3.1 และชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 3.2 ป้อนกระแสอิมพัลส์ให้กับรากสายดินทดสอบที่ติดตั้งภายในถังอลูมิเนียมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 cm. สูง 80 cm. และบรรจุสารละลายน้ำเกลือที่ใช้แทนดิน การวัดกระแสอิมพัลส์จะใช้ชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์ 6.929 mΩ. ต่อในตำแหน่งก่อนลงดิน ส่วนการวัดแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแสจะใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุอัตราส่วน 151.1: 1 V ค่าที่วัดได้ทั้งหมดจะถูกบันทึกด้วยออสซิลโลสโคป RIGOL DS1022C, 25MHz.400 Msa/s



รูปที่ 3.1 วงจรทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผล

ความหมายในวงจร

C = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

R = ตัวต้านทานปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

L = ความเหนี่ยวนำปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองย่อส่วนและค่าจริงจะเลือกใช้อัตราส่วน $n = 10$ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในการทดลองและค่าจริงของรากสายดินแนวดิ่งและแนวนอน

พารามิเตอร์	ค่าในการทดลอง	ค่าจริง
เวลาน้ำคลื่น	7.75, 2.25, 1, 0.75 μs .	77.5, 22.5, 10, 7.5 μs .
เวลาหลังคลื่น	29, 22, 42, 14 μs .	290, 220, 420, 140 μs .
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางรากสายดิน	1.5 mm.	15 mm.
ความยาวรากสายดิน	3 cm. – 24 cm.	0.3 m. – 2.4 m.
ความลึกรากสายดินแนวนอน	8 cm.	0.8 m.

ตารางที่ 3.2 ค่าความต้านทานน้ำเกลือ

รากสายดิน	ค่าความต้านทานน้ำเกลือ
แนวดิ่ง	1136 Ω .cm.
	757 Ω .cm.
	367 Ω .cm.
แนวนอน	1136 Ω .cm.
	757 Ω .cm.
	367 Ω .cm.

3.2.1 ขั้นตอนการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง

1. ปรับค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ ให้มีค่าความต้านทาน 1136 Ω .cm.
2. ติดตั้งรากสายดินแนวดิ่งในถังออลูมิเนียม และปรับรากสายดินให้มีความยาวเริ่มต้น 3 cm.
3. ป้อนกระแสสลับพัลส์รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ให้กับรากสายดิน โดยทำการป้อนและบันทึกค่า V_{peak} และ I_{peak} ทั้งหมด 5 ครั้ง
4. ปรับรากสายดินเพิ่มขึ้น 3 cm. ทำการทดลองตามข้อ 3. ทำเช่นนั้นจนรากสายดินมีความยาว 24 cm.
5. ปรับรากสายดินให้มีความยาวเริ่มต้น 3 cm. และเปลี่ยนรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์เป็น 2.25/22 μ s. ทำการทดลองเช่นเดิมตามข้อ 3. และ 4.
6. ทำการทดลองที่รูปคลื่น 1/42 μ s. และ 0.75/14 μ s. ตามลำดับ
7. เมื่อครบทุกรูปคลื่นแล้วทำการทดลองที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm. และ 367 Ω .cm.

3.2.2 ขั้นตอนการทดลองรากสายดินแนวนอน

1. ปรับค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ ให้มีค่าความต้านทาน 1136 Ω .cm.
2. ติดตั้งรากสายดินแนวนอนความยาว 3 cm. ลึก 8 cm. ในถังออลูมิเนียม
3. ป้อนกระแสสลับพัลส์รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ให้กับรากสายดิน โดยทำการป้อนและบันทึกค่า V_{peak} และ I_{peak} ทั้งหมด 5 ครั้ง
4. เปลี่ยนรากสายดินให้มีความยาวเพิ่มขึ้น 3 cm. ทำการทดลองตามข้อ 3. ทำเช่นนั้นจนรากสายดินมีความยาว 24 cm.
5. เปลี่ยนรากสายดินให้มีความยาวเริ่มต้น 3 cm. และเปลี่ยนรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์เป็น 2.25/22 μ s. ทำการทดลองเช่นเดิมตามข้อ 3. และ 4.

6. ทำการทดลองที่รูปคลื่น $1/42 \mu\text{s}$. และ $0.75/14 \mu\text{s}$. ตามลำดับ

7. เมื่อครบทุกรูปคลื่นแล้วทำการทดลองที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ $757 \Omega\cdot\text{cm}$. และ $367 \Omega\cdot\text{cm}$.

นำค่า V_{peak} และ I_{peak} ที่ได้จากการทดลองมาหาอัตราส่วน $V_{\text{peak}}/I_{\text{peak}}$ ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ (Z) ของรากสายดินตามสมการที่ (2.16) แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z ($V_{\text{peak}}/I_{\text{peak}}$) กับ ความยาวของรากสายดิน แล้วทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง ได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1)

$$Z = aL^b \quad (3.1)$$

จากสมการความสัมพันธ์นำมาหาค่าอนุพันธ์เทียบกับความยาวของรากสายดินและกำหนดให้มีค่าไม่เกิน Tangent ของมุม $\alpha = 5^\circ$ ดังสมการที่ (3.3)

$$\frac{dZ}{dL} = (a)(b)L^{b-1} \quad (3.2)$$

$$-\frac{dZ}{dL} \leq \tan 5^\circ \quad (3.3)$$

$$-(a)(b)L^{b-1} \leq 0.0875 \quad (3.4)$$

$$L^{b-1} \leq \frac{0.0875}{-(a)(b)} \quad (3.5)$$

จะได้สมการสำหรับหาค่าความยาวประสิทธิผลดังสมการที่ (3.6)

$$L \leq \left[\frac{0.0875}{-(a)(b)} \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (3.6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีความต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน ทั้งรากสายดินแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน โดยทดลองภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ และรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

4.1 การศึกษาผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อรากสายดินแนวตั้ง

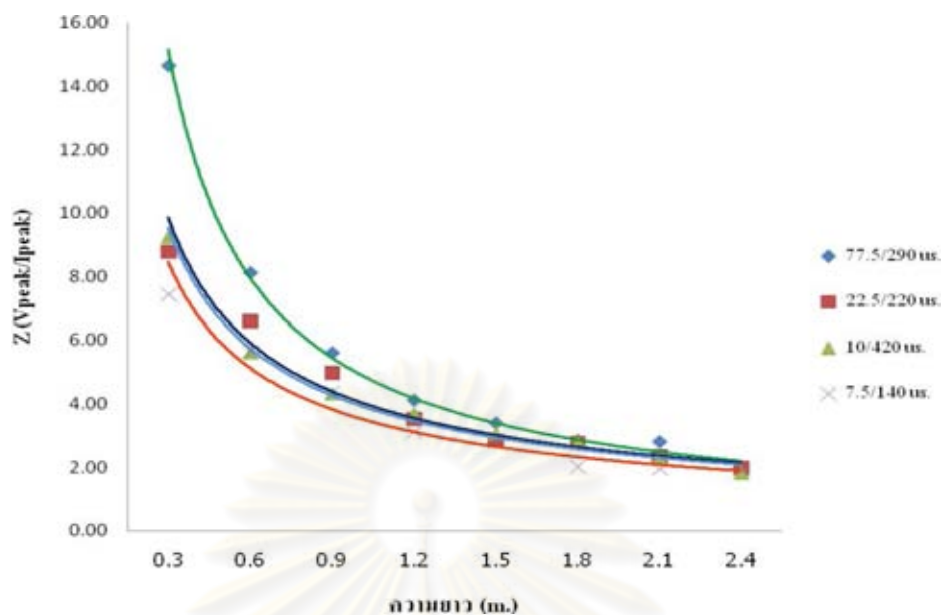
ในการทดลองจะปรับความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือให้มีความต้านทาน 1136 Ω .cm, 757 Ω .cm, และ 367 Ω .cm. ทำการทดลองที่ทุกค่าความต้านทานด้วยรูปคลื่น 77.5/290 μ s, 22.5/220 μ s, 10/420 μ s, และ 7.5/140 μ s. ตามลำดับ ทั้งกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ

4.1.1 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.1 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	14.65 \pm 3.82	8.77 \pm 0.73	9.26 \pm 0.87	7.45 \pm 1.02
0.6	8.12 \pm 0.16	6.59 \pm 0.39	5.62 \pm 0.77	5.66 \pm 0.42
0.9	5.61 \pm 0.29	4.96 \pm 0.42	4.33 \pm 1.54	4.39 \pm 0.45
1.2	4.12 \pm 0.17	3.51 \pm 0.64	3.69 \pm 0.19	3.13 \pm 0.31
1.5	3.40 \pm 0.09	2.83 \pm 0.67	3.07 \pm 0.21	2.82 \pm 0.33
1.8	2.85 \pm 0.08	2.77 \pm 0.34	2.79 \pm 0.30	2.03 \pm 0.18
2.1	1.81 \pm 0.05	2.34 \pm 0.26	2.30 \pm 0.36	1.96 \pm 0.26
2.4	1.90 \pm 0.01	1.97 \pm 0.22	1.82 \pm 0.02	1.91 \pm 0.18



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวดิ่งโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสอิมพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

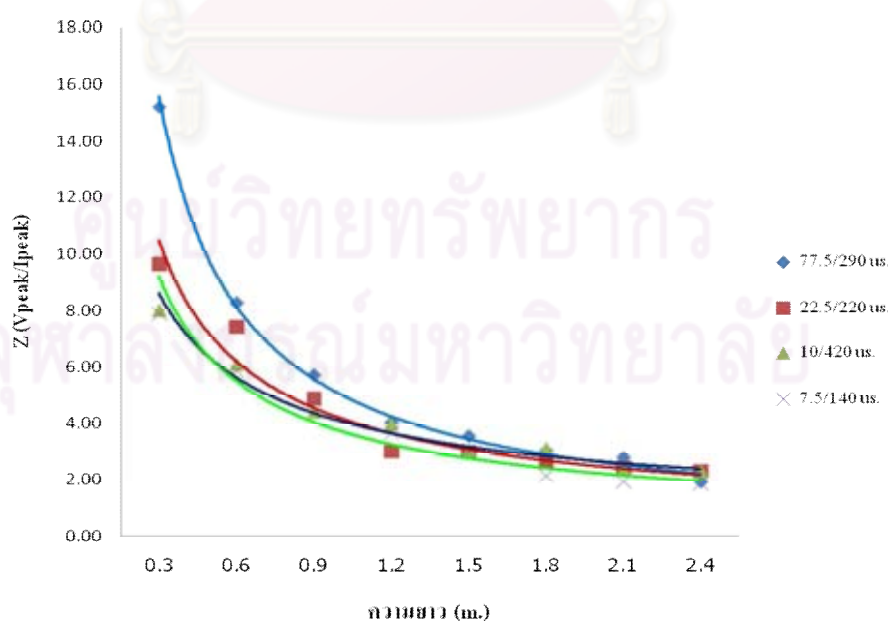
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 15.155L^{-0.932}$	13.89
22.5/220	$Z = 9.862L^{-0.737}$	12.74
10/420	$Z = 9.5397L^{-0.73}$	12.55
7.5/140	$Z = 8.4491L^{-0.721}$	11.77

4.1.2 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 $\Omega\cdot\text{cm}$)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.3 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 1136 $\Omega\cdot\text{cm}$. กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μs)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	15.22 \pm 1.52	9.67 \pm 1.25	8.02 \pm 2.57	7.92 \pm 0.51
0.6	8.29 \pm 0.32	7.43 \pm 0.89	6.09 \pm 0.67	5.87 \pm 0.75
0.9	5.71 \pm 0.20	4.88 \pm 0.32	4.43 \pm 1.36	4.80 \pm 0.50
1.2	4.04 \pm 0.11	3.02 \pm 0.16	3.99 \pm 0.25	3.71 \pm 0.13
1.5	3.56 \pm 0.17	3.02 \pm 0.16	3.06 \pm 0.20	2.99 \pm 0.31
1.8	3.05 \pm 0.05	2.60 \pm 0.27	3.14 \pm 0.16	2.15 \pm 0.01
2.1	2.80 \pm 0.05	2.45 \pm 0.25	2.38 \pm 0.11	1.95 \pm 0.21
2.4	1.91 \pm 0.07	2.30 \pm 0.21	2.32 \pm 0.12	1.88 \pm 0.17



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวตั้งโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 1136 $\Omega\cdot\text{cm}$. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสโพลล์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลล์ขั้วลบ

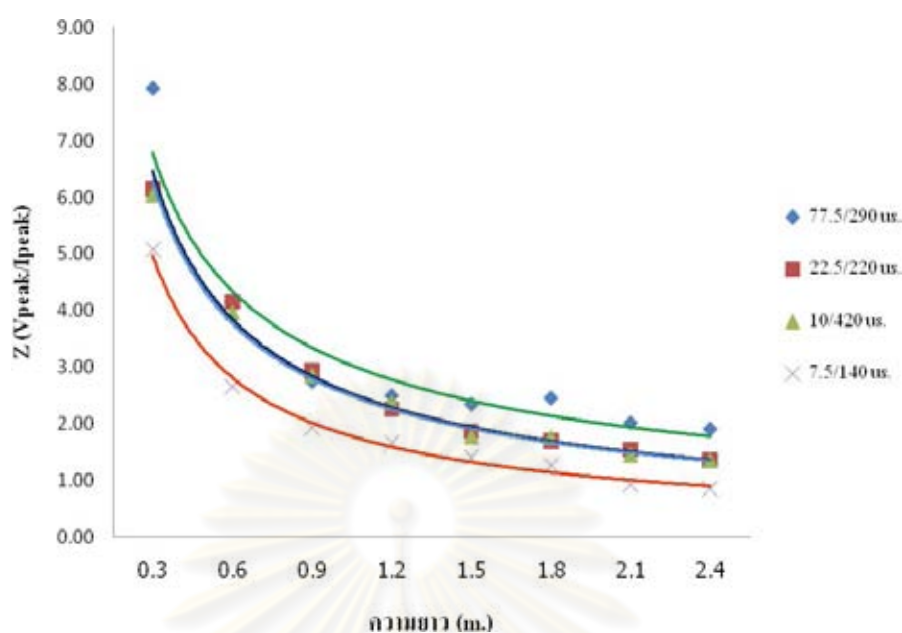
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 15.626L^{-0.939}$	14.04
22.5/220	$Z = 10.477L^{-0.758}$	12.99
10/420	$Z = 8.6508L^{-0.616}$	12.72
7.5/140	$Z = 9.2307L^{-0.745}$	12.19

4.1.3 กรณีกระแสโพลล์ขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.5 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสโพลล์ขั้วบวก

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	7.93 ± 0.75	6.15 ± 0.62	6.04 ± 0.24	5.08 ± 0.40
0.6	4.09 ± 0.33	4.15 ± 0.31	3.96 ± 0.27	2.66 ± 0.20
0.9	2.75 ± 0.13	2.93 ± 0.11	2.86 ± 0.33	1.94 ± 0.03
1.2	2.50 ± 0.10	2.26 ± 0.05	2.37 ± 0.09	1.67 ± 0.30
1.5	2.35 ± 0.05	1.86 ± 0.09	1.77 ± 0.07	1.42 ± 0.08
1.8	2.46 ± 0.00	1.69 ± 0.17	1.76 ± 0.13	1.27 ± 0.12
2.1	2.02 ± 0.02	1.54 ± 0.03	1.45 ± 0.05	0.93 ± 0.04
2.4	1.91 ± 0.02	1.35 ± 0.10	1.35 ± 0.08	0.86 ± 0.04



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวดิ่งโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

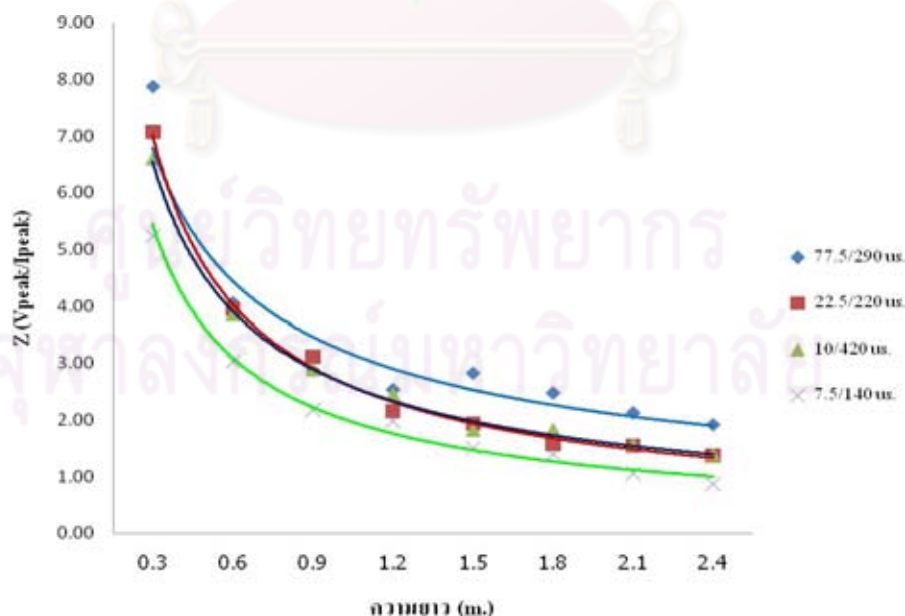
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 6.7871L^{-0.642}$	10.80
22.5/220	$Z = 6.4603L^{-0.747}$	9.93
10/420	$Z = 6.3073L^{-0.739}$	9.84
7.5/140	$Z = 4.9811L^{-0.821}$	8.26

4.1.4 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.7 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	7.88 \pm 0.41	7.08 \pm 0.64	6.60 \pm 0.64	5.24 \pm 0.60
0.6	4.06 \pm 0.19	3.95 \pm 0.14	3.85 \pm 0.40	3.03 \pm 0.30
0.9	2.88 \pm 0.05	3.12 \pm 0.21	2.89 \pm 0.30	2.18 \pm 0.22
1.2	2.54 \pm 0.06	2.16 \pm 0.10	2.45 \pm 0.13	1.99 \pm 0.15
1.5	2.83 \pm 0.03	1.94 \pm 0.08	1.82 \pm 0.19	1.51 \pm 0.15
1.8	2.48 \pm 0.04	1.57 \pm 0.12	1.83 \pm 0.12	1.40 \pm 0.14
2.1	2.13 \pm 0.04	1.55 \pm 0.03	1.56 \pm 0.16	1.06 \pm 0.09
2.4	1.92 \pm 0.01	1.37 \pm 0.13	1.38 \pm 0.14	0.87 \pm 0.03



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวตั้งโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสอิมพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วพล

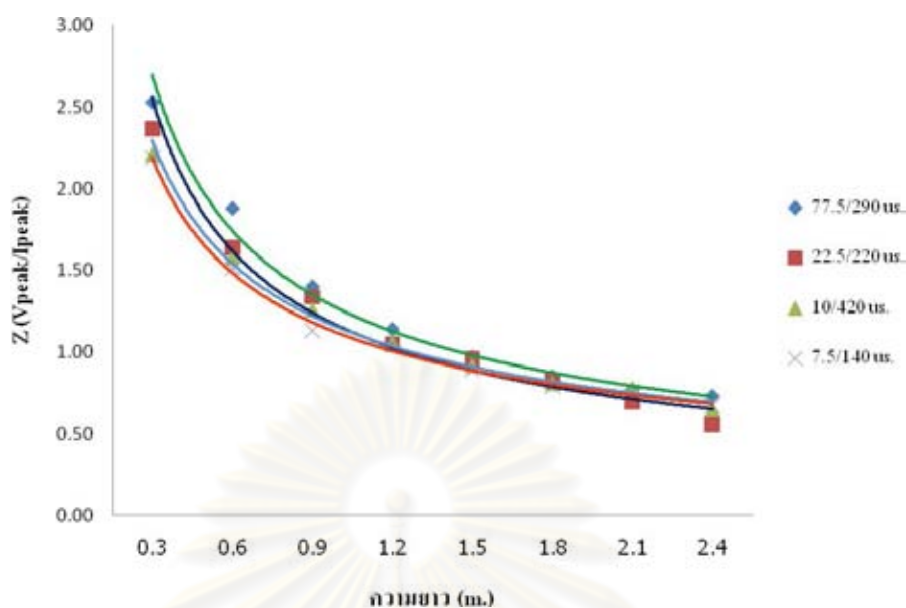
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 6.7908L^{-0.614}$	10.96
22.5/220	$Z = 7.0005L^{-0.797}$	10.10
10/420	$Z = 6.5476L^{-0.742}$	10.03
7.5/140	$Z = 5.4408L^{-0.816}$	8.69

4.1.5 กรณีกระแสอิมพัลส์ชั่วพล (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.9 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ชั่วพล

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	2.53 \pm 0.07	2.37 \pm 0.04	2.21 \pm 0.06	2.19 \pm 0.09
0.6	1.88 \pm 0.10	1.64 \pm 0.06	1.58 \pm 0.02	1.51 \pm 0.07
0.9	1.40 \pm 0.05	1.34 \pm 0.05	1.26 \pm 0.02	1.13 \pm 0.00
1.2	1.14 \pm 0.02	1.05 \pm 0.04	1.06 \pm 0.02	1.05 \pm 0.01
1.5	0.97 \pm 0.02	0.96 \pm 0.11	0.92 \pm 0.02	0.89 \pm 0.13
1.8	0.85 \pm 0.01	0.83 \pm 0.03	0.81 \pm 0.07	0.79 \pm 0.05
2.1	0.77 \pm 0.01	0.70 \pm 0.08	0.78 \pm 0.02	0.76 \pm 0.08
2.4	0.73 \pm 0.00	0.56 \pm 0.04	0.65 \pm 0.04	0.67 \pm 0.05



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวดิ่งโดย
สารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์
ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความ
ยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวดิ่ง ความต้านทานน้ำเกลือ
367 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

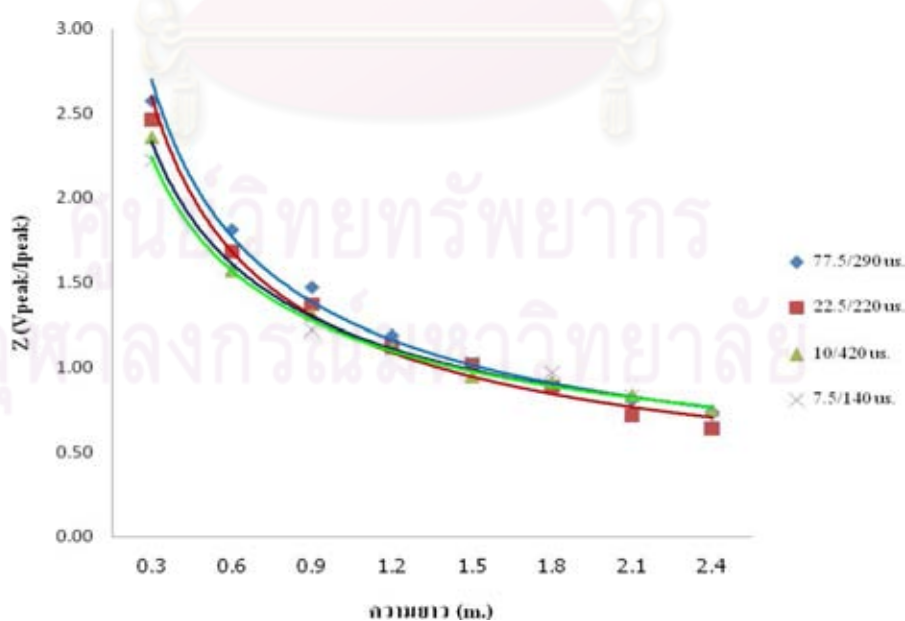
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 2.6943L^{-0.63}$	6.17
22.5/220	$Z = 2.5539L^{-0.657}$	5.94
10/420	$Z = 2.2897L^{-0.571}$	5.59
7.5/140	$Z = 2.1956L^{-0.561}$	5.44

4.1.6 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วลบ (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.11 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	2.57 \pm 0.07	2.46 \pm 0.25	2.36 \pm 0.07	2.22 \pm 0.09
0.6	1.81 \pm 0.05	1.68 \pm 0.07	1.57 \pm 0.02	1.58 \pm 0.10
0.9	1.47 \pm 0.03	1.37 \pm 0.06	1.31 \pm 0.04	1.22 \pm 0.07
1.2	1.19 \pm 0.00	1.13 \pm 0.06	1.12 \pm 0.02	1.11 \pm 0.02
1.5	1.02 \pm 0.00	1.02 \pm 0.07	0.95 \pm 0.03	1.03 \pm 0.09
1.8	0.90 \pm 0.01	0.89 \pm 0.07	0.92 \pm 0.06	0.97 \pm 0.05
2.1	0.81 \pm 0.01	0.72 \pm 0.06	0.84 \pm 0.06	0.83 \pm 0.06
2.4	0.74 \pm 0.00	0.64 \pm 0.05	0.75 \pm 0.05	0.69 \pm 0.06



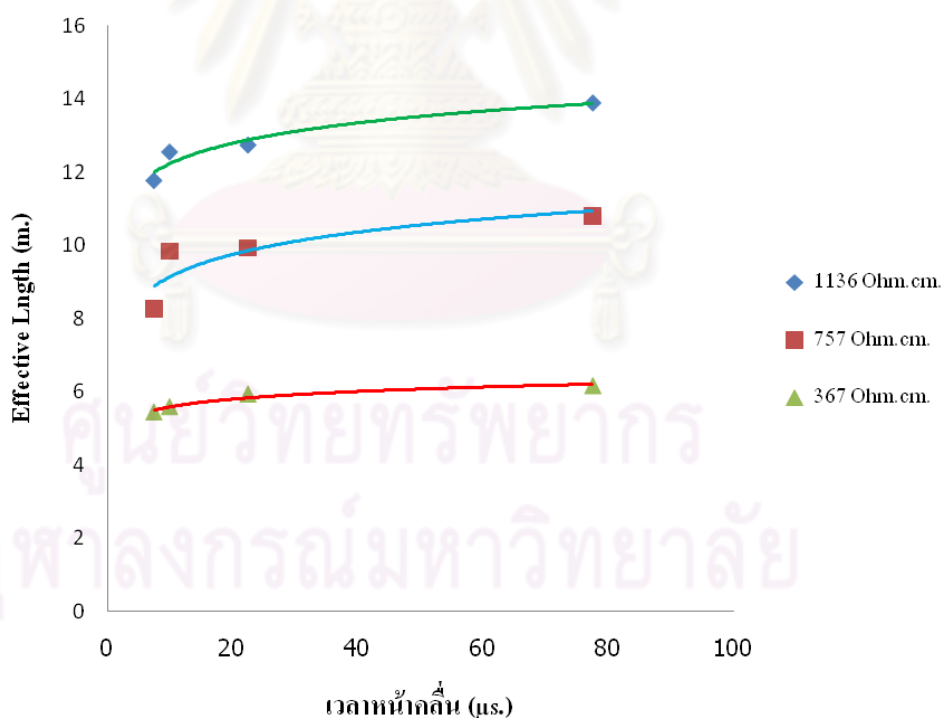
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวตั้งโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสโพลต์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวตั้ง ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลต์ชั่วคราว

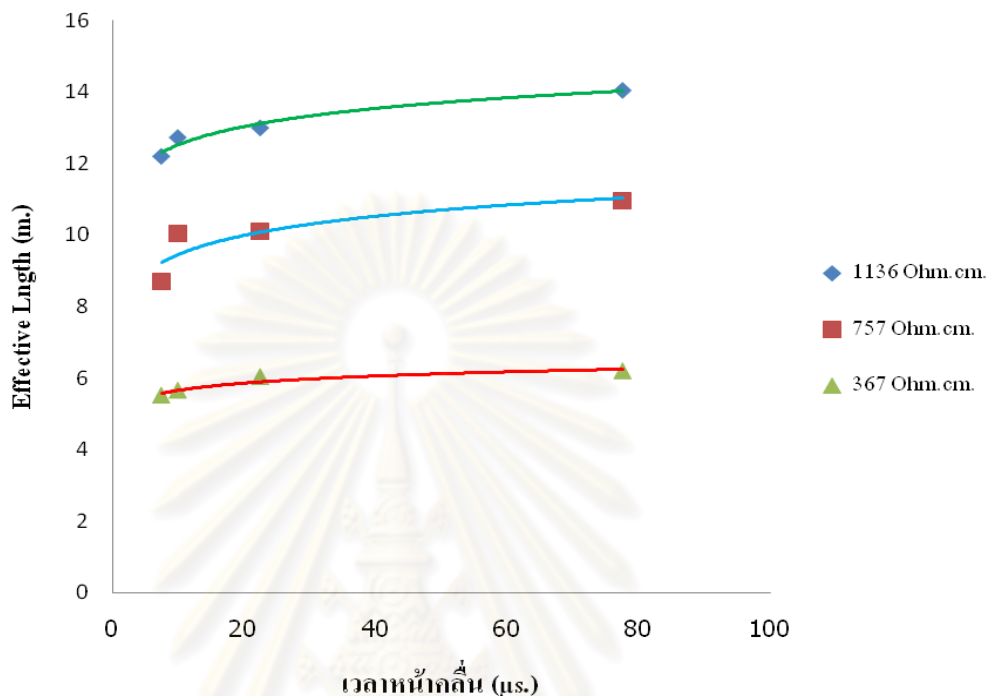
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 2.6989L^{-0.608}$	6.19
22.5/220	$Z = 2.5943L^{-0.626}$	6.03
10/420	$Z = 2.3326L^{-0.536}$	5.65
7.5/140	$Z = 2.2499L^{-0.518}$	5.51

นำข้อมูลรากสายดินแนวตั้งภายใต้กระแสโพลต์ชั่วคราวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหน้าคลื่นกับความยาวประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งกับเวลาหน้าคลื่นภายใต้กระแสโพลต์ชั่วคราว

นำข้อมูลรากสายดินแนวดิ่งภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วลบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหน้าคลื่นกับความยาวประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่งกับเวลาหน้าคลื่นภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วลบ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่งกับเวลาหน้าคลื่นภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งประมาณเชิงเส้น โดยฟังก์ชันลอการิทึม ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า เมื่อเวลาหน้าคลื่นลดลงทำให้ความยาวประสิทธิผลลดลง และเมื่อพิจารณาที่ความต้านทานสารละลายน้ำเกลือที่ลดต่ำลงก็จะพบว่า เป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินลดต่ำลงเช่นกัน

4.2 การศึกษาผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อรากสายดินแนวนอน

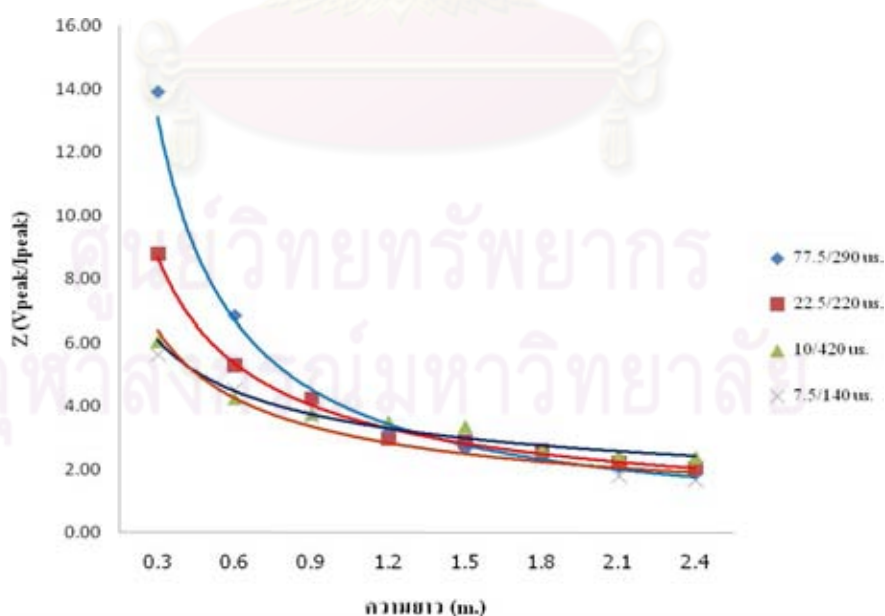
การทดลองในหัวข้อนี้ จะปรับความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือให้มีความต้านทาน 1136 Ω.cm, 757 Ω.cm, และ 367 Ω.cm. ทำการทดลองที่ทุกค่าความต้านทานด้วยรูปคลื่น 77.5/290 μs, 22.5/220 μs, 10/420 μs, และ 7.5/140 μs. ตามลำดับ ทั้งกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ

4.2.1 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.13 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอนความต้านทาน 1136 Ω .cm.กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	13.90 \pm 1.58	8.79 \pm 1.01	6.06 \pm 0.24	5.62 \pm 0.41
0.6	6.83 \pm 0.20	5.29 \pm 0.59	4.25 \pm 0.09	4.51 \pm 0.50
0.9	4.17 \pm 0.98	4.24 \pm 0.50	3.77 \pm 0.26	3.66 \pm 0.04
1.2	3.17 \pm 0.07	2.96 \pm 0.10	3.50 \pm 0.08	2.99 \pm 0.17
1.5	2.65 \pm 0.05	2.88 \pm 0.16	3.36 \pm 0.03	2.89 \pm 0.03
1.8	2.38 \pm 0.06	2.61 \pm 0.26	2.63 \pm 0.16	2.31 \pm 0.02
2.1	2.07 \pm 0.07	2.21 \pm 0.17	2.45 \pm 0.19	1.78 \pm 0.13
2.4	1.90 \pm 0.04	2.04 \pm 0.14	2.38 \pm 0.2	1.65 \pm 0.14



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวนอนโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสอิมพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

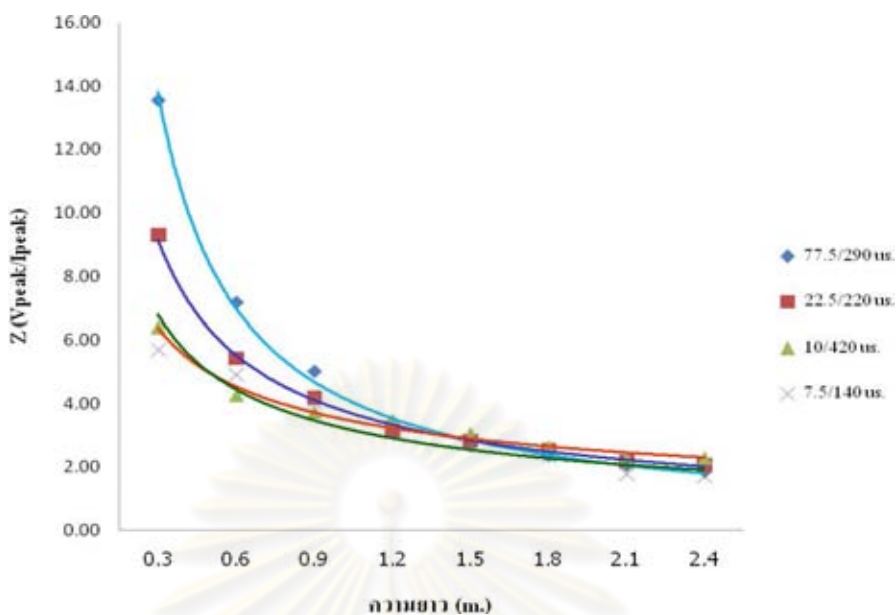
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 13.092L^{-0.965}$	12.56
22.5/220	$Z = 8.7017L^{-0.699}$	12.14
10/420	$Z = 6.0817L^{-0.44}$	10.75
7.5/140	$Z = 6.3977L^{-0.589}$	10.68

4.2.2 กรณีกระแสอิมพัลส์ชั่วคราว (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.15 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอนความต้านทาน 1136 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	13.54 \pm 1.48	9.30 \pm 1.25	6.41 \pm 0.01	5.70 \pm 1.23
0.6	7.16 \pm 0.12	5.43 \pm 0.20	4.27 \pm 0.08	4.91 \pm 0.42
0.9	5.01 \pm 0.02	4.18 \pm 0.38	3.74 \pm 0.16	4.05 \pm 0.16
1.2	3.42 \pm 0.08	3.16 \pm 0.09	3.47 \pm 0.07	3.08 \pm 0.17
1.5	2.66 \pm 0.02	2.83 \pm 0.13	3.04 \pm 0.17	2.86 \pm 0.02
1.8	2.35 \pm 0.05	2.55 \pm 0.44	2.63 \pm 0.24	2.33 \pm 0.03
2.1	2.04 \pm 0.02	2.17 \pm 0.23	2.28 \pm 0.08	1.76 \pm 0.14
2.4	1.85 \pm 0.08	2.06 \pm 0.24	2.28 \pm 0.08	1.69 \pm 0.12



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวนอนโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 1136 Ω.cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วพล

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 1136 Ω.cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วพล

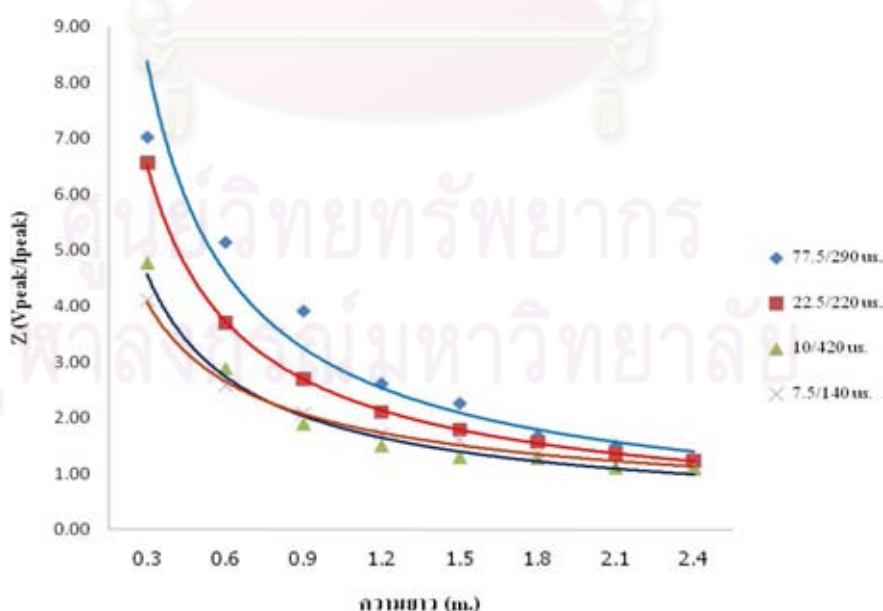
รูปคลื่น (μs.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 13.817L^{-0.983}$	12.73
22.5/220	$Z = 9.1411L^{-0.728}$	12.26
10/420	$Z = 6.3807L^{-0.492}$	11.02
7.5/140	$Z = 6.8088L^{-0.613}$	10.98

4.2.3 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.17 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	7.02 \pm 0.11	6.57 \pm 0.07	4.77 \pm 0.46	4.11 \pm 0.14
0.6	5.14 \pm 0.12	3.90 \pm 0.22	2.88 \pm 0.28	2.58 \pm 0.04
0.9	3.91 \pm 0.03	2.69 \pm 0.25	1.89 \pm 0.08	2.07 \pm 0.02
1.2	2.61 \pm 0.05	2.10 \pm 0.13	1.50 \pm 0.04	1.70 \pm 0.07
1.5	2.26 \pm 0.04	1.78 \pm 0.14	1.29 \pm 0.07	1.59 \pm 0.04
1.8	1.67 \pm 0.18	1.56 \pm 0.15	1.27 \pm 0.01	1.36 \pm 0.07
2.1	1.50 \pm 0.08	1.36 \pm 0.14	1.10 \pm 0.08	1.17 \pm 0.06
2.4	1.23 \pm 0.06	1.22 \pm 0.13	1.08 \pm 0.02	1.14 \pm 0.05



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวนอนโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสโพลาร์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสโพลาร์ชั่วคราว

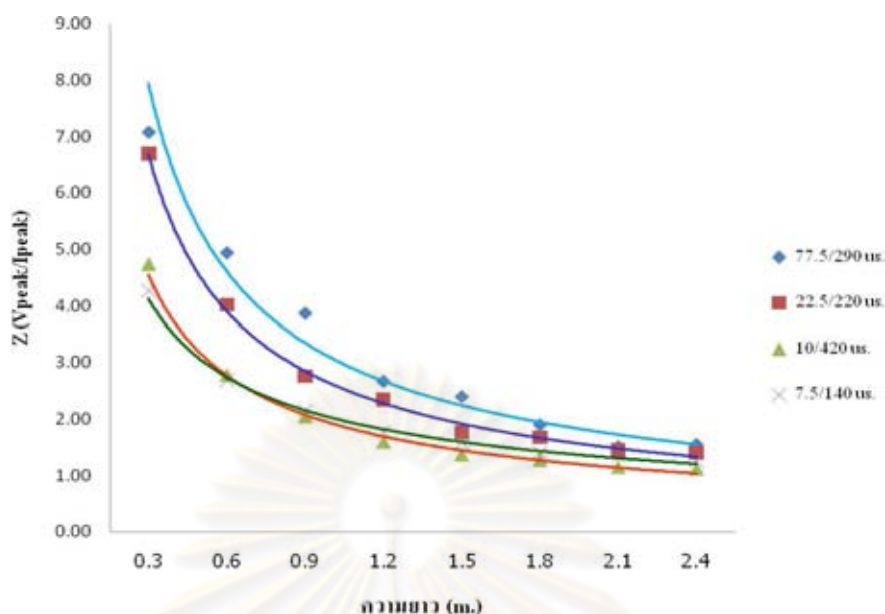
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 8.3795L^{-0.863}$	10.69
22.5/220	$Z = 6.6325L^{-0.814}$	9.70
10/420	$Z = 4.5728L^{-0.738}$	8.18
7.5/140	$Z = 4.0611L^{-0.616}$	7.96

4.2.4 กรณีกระแสโพลาร์ชั่วคราว (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.19 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 757 Ω .cm. กระแสโพลาร์ชั่วคราว

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	7.07 ± 0.09	6.70 ± 0.07	4.73 ± 0.39	4.26 ± 0.15
0.6	4.93 ± 0.08	4.02 ± 0.35	2.78 ± 0.37	2.68 ± 0.04
0.9	3.86 ± 0.04	2.76 ± 0.22	2.04 ± 0.14	2.14 ± 0.08
1.2	2.66 ± 0.03	2.35 ± 0.03	1.59 ± 0.13	1.76 ± 0.03
1.5	2.39 ± 0.04	1.76 ± 0.06	1.36 ± 0.06	1.58 ± 0.04
1.8	1.89 ± 0.04	1.68 ± 0.09	1.27 ± 0.11	1.40 ± 0.04
2.1	1.50 ± 0.02	1.45 ± 0.04	1.14 ± 0.06	1.35 ± 0.02
2.4	1.54 ± 0.02	1.40 ± 0.03	1.11 ± 0.05	1.25 ± 0.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวนอนโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วพลบ

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 757 Ω .cm. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วพลบ

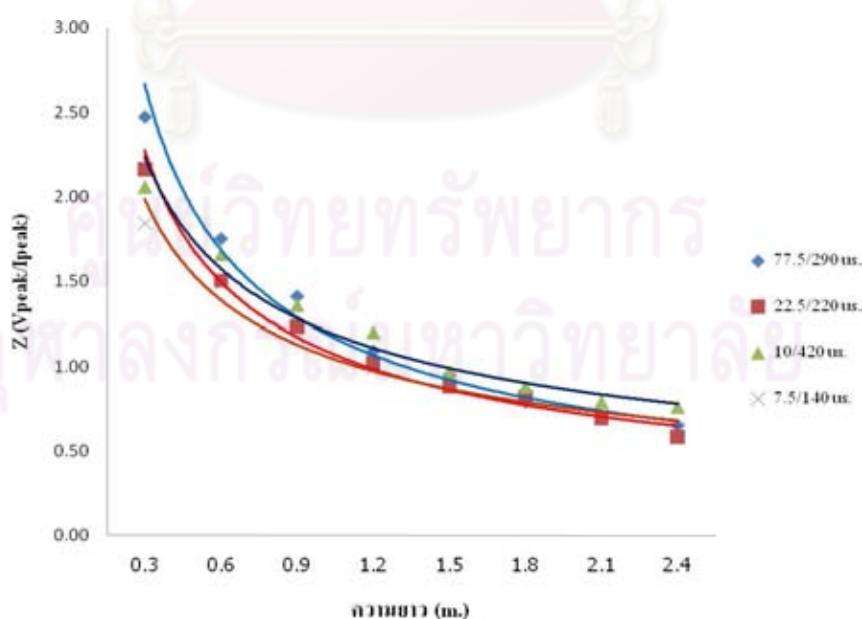
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 7.9355L^{-0.787}$	10.90
22.5/220	$Z = 6.6875L^{-0.778}$	9.95
10/420	$Z = 4.5638L^{-0.717}$	8.24
7.5/140	$Z = 4.1216L^{-0.589}$	8.10

4.2.5 กรณีกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.21 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินแนวนอนได้ดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	2.47 \pm 0.00	2.16 \pm 0.08	2.06 \pm 0.05	1.84 \pm 0.01
0.6	1.75 \pm 0.01	1.50 \pm 0.06	1.66 \pm 0.05	1.48 \pm 0.02
0.9	1.41 \pm 0.00	1.23 \pm 0.01	1.36 \pm 0.02	1.17 \pm 0.01
1.2	1.09 \pm 0.02	1.02 \pm 0.03	1.20 \pm 0.03	0.99 \pm 0.04
1.5	0.95 \pm 0.01	0.88 \pm 0.03	0.97 \pm 0.05	0.92 \pm 0.03
1.8	0.79 \pm 0.01	0.82 \pm 0.06	0.88 \pm 0.03	0.80 \pm 0.10
2.1	0.70 \pm 0.01	0.69 \pm 0.04	0.79 \pm 0.04	0.71 \pm 0.07
2.4	0.65 \pm 0.00	0.58 \pm 0.02	0.76 \pm 0.05	0.63 \pm 0.10



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (Vpeak/Ipeak) และความยาวของรากสายดินแนวนอนโดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสไฟฟ้าขั้วบวก

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสอิมพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ 367 Ω .cm. ภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

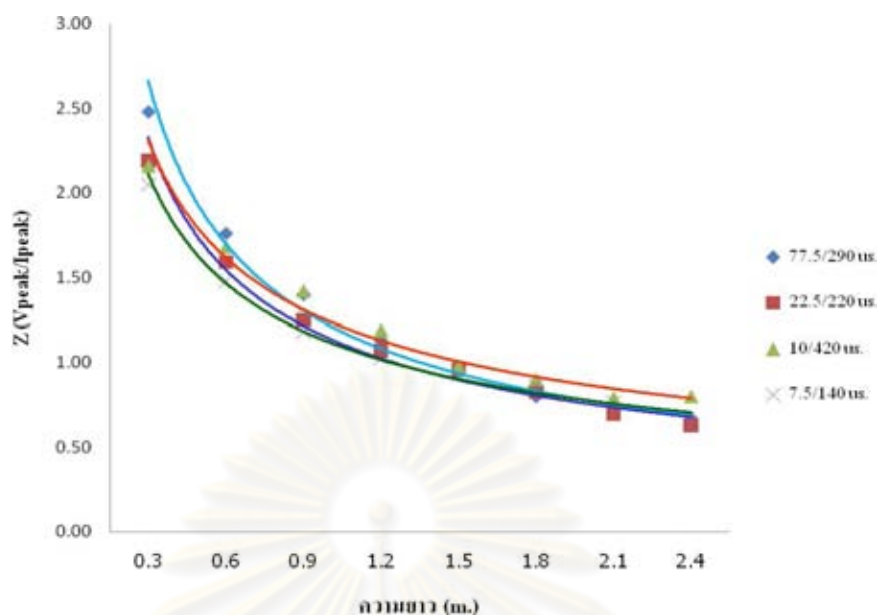
รูปคลื่น (μ s.)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 2.6637L^{-0.661}$	6.09
22.5/220	$Z = 2.2707L^{-0.603}$	5.56
10/420	$Z = 2.2323L^{-0.507}$	5.47
7.5/140	$Z = 1.9855L^{-0.513}$	5.06

4.2.6 กรณีกระแสอิมพัลส์ชั่วคราว (ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.)

หลังจากนำค่าผลการทดลองที่ได้มาเปลี่ยนเป็นค่าจริงดังตารางที่ 4.23 นำไปสร้างกราฟระหว่าง Z (Vpeak/Ipeak) กับความยาวของรากสายดินได้ดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ความต้านทาน 367 Ω .cm. กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

ความยาวรากสายดิน (m.)	รูปคลื่น (μ s.)			
	77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak	Vpeak/Ipeak
0.3	2.48 ± 0.08	2.19 ± 0.08	2.16 ± 0.09	2.05 ± 0.12
0.6	1.76 ± 0.01	1.59 ± 0.07	1.68 ± 0.04	1.48 ± 0.01
0.9	1.40 ± 0.02	1.25 ± 0.07	1.42 ± 0.06	1.18 ± 0.03
1.2	1.13 ± 0.01	1.07 ± 0.06	1.19 ± 0.04	1.03 ± 0.05
1.5	0.96 ± 0.02	0.96 ± 0.03	0.98 ± 0.08	0.93 ± 0.05
1.8	0.80 ± 0.00	0.83 ± 0.04	0.90 ± 0.04	0.87 ± 0.06
2.1	0.72 ± 0.00	0.70 ± 0.02	0.79 ± 0.03	0.77 ± 0.03
2.4	0.67 ± 0.01	0.63 ± 0.03	0.80 ± 0.07	0.63 ± 0.05



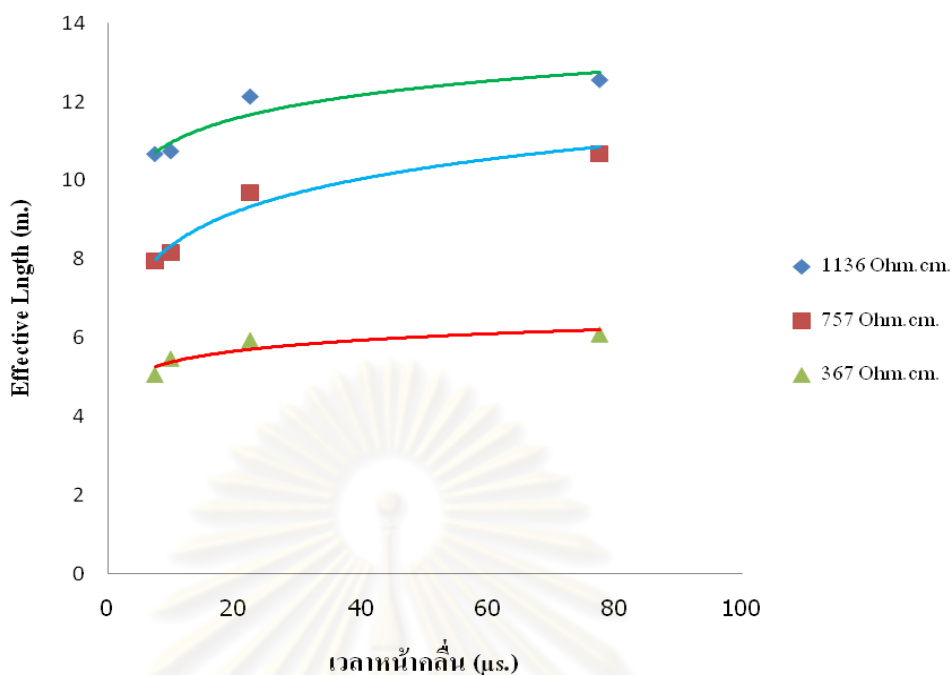
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z (V_{peak}/I_{peak}) และความยาวของรากสายดินแนวนอน โดยสารละลายน้ำเกลือมีความต้านทาน $367 \Omega \cdot \text{cm}$. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

ทำการประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันที่เกิดขึ้นต่อกระแสพัลส์ (Z) กับความยาวของรากสายดิน (L) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลตามสมการที่ (3.6) ได้ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 สมการแสดงความสัมพันธ์ Z และ L ของรากสายดินแนวนอน ความต้านทานน้ำเกลือ $367 \Omega \cdot \text{cm}$. ภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราว

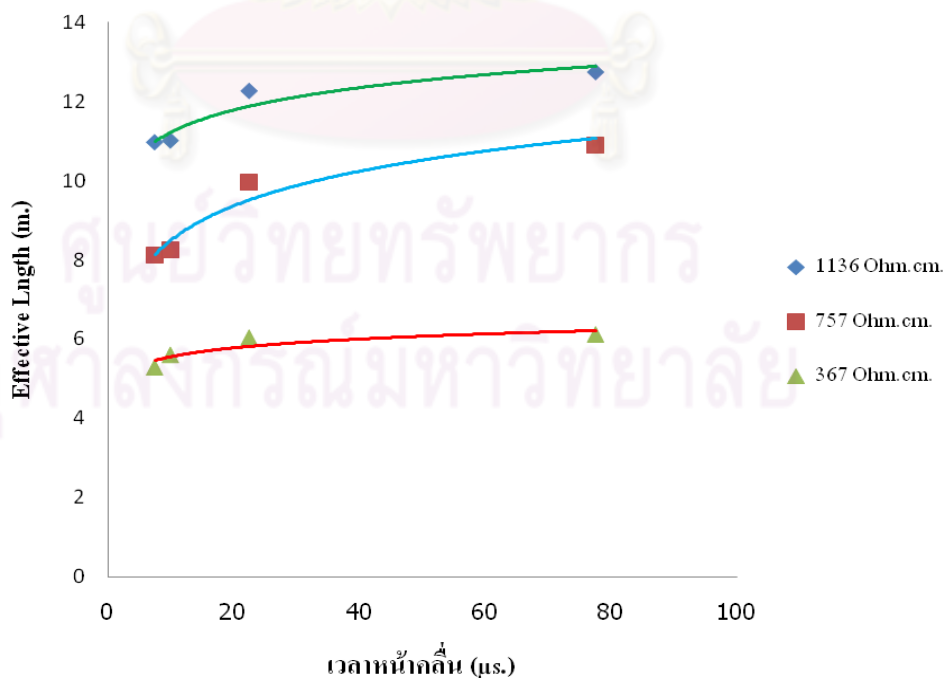
รูปคลื่น (μs)	สมการแสดงความสัมพันธ์	ความยาวประสิทธิผล (m.)
77.5/290	$Z = 2.6676L^{-0.651}$	6.11
22.5/220	$Z = 2.3286L^{-0.59}$	5.65
10/420	$Z = 2.3128L^{-0.516}$	5.60
7.5/140	$Z = 2.1096L^{-0.528}$	5.29

นำข้อมูลรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสพัลส์ชั่วคราวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาน้ำคลื่นกับความยาวประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน กับเวลาหน่วงคลื่นภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

นำข้อมูลรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหน่วงคลื่นกับความยาวประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน กับเวลาหน่วงคลื่นภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วคราว

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนกับเวลาหน้าคลื่นภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งประมาณเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันลอการิทึม ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า เมื่อเวลาหน้าคลื่นลดลงทำให้ความยาวประสิทธิผลลดลงด้วย และเมื่อพิจารณาที่ความต้านทานสารละลายน้ำเกลือที่ลดต่ำลงก็จะพบว่า เป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินลดต่ำลงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวประสิทธิผลกับเวลาหน้าคลื่นของรากสายดินแนวตั้งกับรากสายดินแนวนอน ที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือและเวลาหน้าคลื่นเดียวกัน ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนจะสั้นกว่ารากสายดินแนวตั้ง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือมีค่าสูง

ตารางที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผล

รายการ		รูปคลื่น (μ s.)		77.5/290	22.5/220	10/420	7.5/140
ความยาว ประสิทธิผล (m.)	รากสายดิน แนวตั้ง	1136 Ω .cm.	+	13.89	12.74	12.55	11.77
			-	14.04	12.99	12.72	12.19
		757 Ω .cm.	+	10.80	9.93	9.84	8.26
			-	10.96	10.10	10.03	8.69
		367 Ω .cm.	+	6.17	5.94	5.59	5.44
			-	6.19	6.03	5.65	5.51
	รากสายดิน แนวนอน	1136 Ω .cm.	+	12.56	12.14	10.75	10.68
			-	12.73	12.26	11.02	10.98
		757 Ω .cm.	+	10.69	9.70	8.18	7.96
			-	10.90	9.95	8.24	8.10
		367 Ω .cm.	+	6.09	5.56	5.47	5.06
			-	6.11	5.65	5.60	5.29

จากตารางที่ 4.25 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือเดียวกัน พบว่า ค่าความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบยาวกว่าขั้วบวก และเมื่อความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ หรือเวลาหน้าคลื่นลดลงจะเป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิผลลดต่ำลง

ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วบวกละและชั่วลบที่ค่าความต้านทานสารละลายน้ำเกลือเดียวกัน พบว่า ค่าความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วลบยาวกว่าชั่วบวกเช่นกัน และเมื่อความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ หรือเวลาหน้าคลื่นลดลงจะเป็นผลทำให้ความยาวประสิทธิผลลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผลรากสายดินแนวดิ่งกับรากสายดินแนวนอน พบว่า ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวดิ่งยาวกว่ารากสายดินแนวนอน ที่ทุกเวลาหน้าคลื่นทั้งภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วบวกละและชั่วลบ

นำความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วบวกละและชั่วลบของรากสายดินแนวดิ่งและรากสายดินแนวนอนมาเปรียบเทียบความแตกต่าง เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบรากสายดิน ได้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 แสดงความแตกต่างของความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ชั่วบวกละและชั่วลบ

รูปคลื่น (μ s.)	ความแตกต่าง (%)					
	รากสายดินแนวดิ่ง			รากสายดินแนวนอน		
	ความต้านทานจำเพาะ (Ω .cm.)			ความต้านทานจำเพาะ (Ω .cm.)		
	1136	757	367	1136	757	367
77.5/290	1.07	1.47	0.32	1.34	1.95	0.33
22.5/220	1.94	1.70	1.50	0.98	2.54	1.61
10/420	1.35	1.91	1.07	2.48	0.73	2.35
7.5/140	3.51	5.07	1.28	2.77	1.74	4.44

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขั้วกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน ทั้งรากสายดินแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน โดยใช้การทดลองย่อยส่วน และใช้วิธีการหาค่าความยาวประสิทธิผล โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายดินเทียบกับความยาว หรือขนาดอนุพันธ์ที่ไม่เกินค่า Tangent ของมุม $\alpha = 5^\circ$ ทดลองที่ค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำเกลือ 1136 $\Omega\cdot\text{cm}$, 757 $\Omega\cdot\text{cm}$. และ 367 $\Omega\cdot\text{cm}$. ตามลำดับ และทำการทดลองที่ทุกค่าความต้านทานด้วยรูปคลื่น 77.5/290 μs , 22.5/220 μs , 10/420 μs . และ 7.5/140 μs . ตามลำดับ ทั้งกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบนั้น พบว่า ค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งยาวกว่ารากสายดินแนวนอน ที่ทุกเวลาหน้าคลื่นทั้งภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ

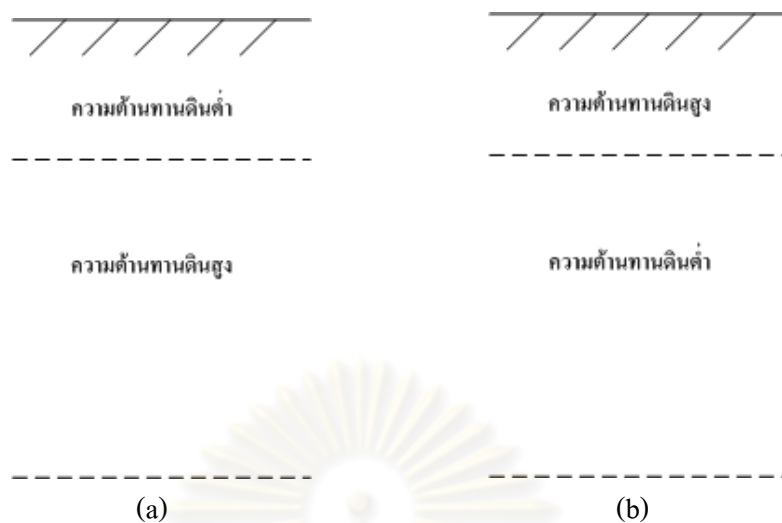
ความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำเกลือ และเวลาหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์ที่ลดลง ส่งผลให้ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งและแนวนอนลดต่ำลง เมื่อนำค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวตั้งและแนวนอนมาหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ พบว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.32 – 5.07 %

และจากการเปรียบเทียบค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบ ค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ขั้วลบยาวกว่าขั้วบวก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) รากสายดินที่ใช้ทดลองเป็นรากสายดินเดี่ยว ซึ่งในการใช้งานจริงอาจมีลักษณะที่ซับซ้อน จึงควรมีการศึกษาในรากสายดินอื่นเพิ่มเติม เช่น รากสายดินแบบแนวรัศมี กราวด์กริด เป็นต้น

2) ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษารากสายดินที่ฝังอยู่ในดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอ คือใช้สารละลายน้ำเกลือแทนดิน ซึ่งง่ายในการปรับความต้านทาน สะดวกในการทดลองซึ่งในทางปฏิบัติดินอาจมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอในชั้นดินที่ลึกลงไป ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งส่งผลกระทบต่อรากสายดินแนวตั้ง



รูปที่ 5.1 (a) ความต้านทานดินบริเวณภูเขา (b) ความต้านทานดินบริเวณที่มีความแห้งแล้ง

กรณีรากสายดินแนวตั้งบริเวณภูเขา ชั้นของดินที่ฝังรากสายดินที่ระดับความลึกไม่มาก ความต้านทานของดินจะต่ำเนื่องจากดินส่วนนี้มีความชื้น แต่เมื่อลึกลงไปความต้านทานของดินจะสูงขึ้นเนื่องจากเป็นชั้นของหินแข็ง กรณีรากสายดินแนวตั้งบริเวณที่มีความแห้งแล้ง ชั้นของผิวดินด้านบนมีความต้านทานดินที่สูงเนื่องจากดินแห้งไม่มีความชื้น แต่เมื่อลึกลงไปความต้านทานของดินต่ำลงเนื่องจากชั้นของดินส่วนนี้มีความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ตำราวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. 2549.
- [2] Benoit de Metz-Noblat. Cahier Technique Merlin Gerin n^o 168. Lightning and HV electrical installations (Jun. 1994): 10.
- [3] พงศ์พันธุ์ ปริยวงษ์. การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสลมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎีบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [4] Lorthongkam, C. and Thomrongtappitak, C. Design of Impulse High-Current Generator Using the IMC Simulation Program. Power sys. tec. conference proceedings 2 (Dec. 2000): 631-635.
- [5] Naidu, M.S. and Kamaraju, V. High voltage engineering. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2006.
- [6] Sato, S. and Harada, T. IEC 60060-1 Requirements in Impulse Current Waveform Parameters. Power eng. conference (Dec. 2005): 1-5.
- [7] วัฒนา สุนทรานุรักษ์. การกราวด์ในระบบไฟฟ้าและสื่อสาร. เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท ออโป จำกัด, 2548.
- [8] Marvin M. Frydenlund. Lightning protection for people and property. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993
- [9] IEEE std. IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. New York, 2007.
- [10] ANSI/IEEE Std. IEEE guide for safety in AC substation grounding. New York, 1986.
- [11] Mazzettie, C. and Veca, G.M. Impulse behavior of grounding electrodes. IEEE Trans. Power App. Syst 102, 9 (Sep. 1983): 3148-3154.
- [12] Gupta, B.P. and Thapar, B. Impulse characteristics of grounding electrodes. J. Inst. Eng. (India) 64, 4 (Feb. 1981): 178-182.
- [13] He, J.L. etal. Effective length of counterpoise wire under lightning current. IEEE Trans. Power Del 20, 2 (Apr. 2005): 1585-1591.
- [14] Grcev, L. and Arnautovski, V. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations. Power Tech Conference Proceedings 3 (Jun. 2003): 23-26.

- [15] He, J.L. et al. Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices. IEEE Trans. Power Del 18, 3 (Jul. 2003): 994-1001.
- [16] Idris, N.A., Mohamad Nor, N. and Ahmad, H. Effects of moisture contents in soil and impulse polarity of earth electrode under high impulse conditions. Properties and applications dielectric materials (Jun. 2006): 822-827.
- [17] Ivica, J.G., Rino, L. and Dragan, L. Effective Length of Horizontal Grounding Electrode. International conference on software, telecommunications and computer networks 16 (Sept. 2008): 47-50.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก อุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบ



- แบนด์วิดท์ 25 MHz
- จำนวนช่องสัญญาณขาเข้า 2 ช่อง
- อัตราการ Sampling 400 Msa/s

รูปที่ ก.1 ออสซิลโลสโคป RIGOL DS1022C



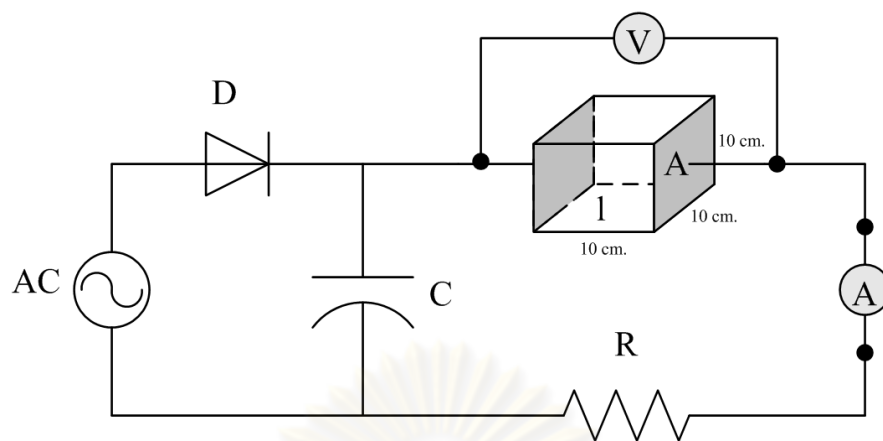
- ความต้านทาน 6.929 mΩ

รูปที่ ก.2 ชั้นที่วัดกระแสอิมพัลส์



- Voltage Ratio 151.1: 1 V

รูปที่ ก.3 โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ



รูปที่ ก.4 วงจรวัดความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$$\rho = \frac{V \times 10\text{cm.} \times 10\text{cm.}}{I \times 10\text{cm.}}$$

$$\rho = \frac{V}{I} \times 10\text{cm.} \text{ (หน่วย } \Omega\text{.cm.)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข รูปคลื่นการทดลองหาค่าความยาวประสิทธิผล

รอกสายดินแนวดิ่ง

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 $\Omega \cdot \text{cm}$.
- เส้นผ่าศูนย์กลางหลอดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ข.1 รูปคลื่นรอกสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 $\Omega \cdot \text{cm}$.

	กระแสимพัลส์ขั้วลบ	กระแสимพัลส์ขั้วบวก
รูปคลื่น 7.75/29 μs .		
รูปคลื่น 2.25/22 μs .		
รูปคลื่น 1/42 μs .		
รูปคลื่น 0.75/14 μs .		

รากสายดินแนวนอน

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ข.2 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.

	กระแสимพัลส์ขั้วลบ	กระแสимพัลส์ขั้วบวก
รูปคลื่น 7.75/29 μ s.		
รูปคลื่น 2.25/22 μ s.		
รูปคลื่น 1/42 μ s.		
รูปคลื่น 0.75/14 μ s.		

รากสายดินแนวดิ่ง

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

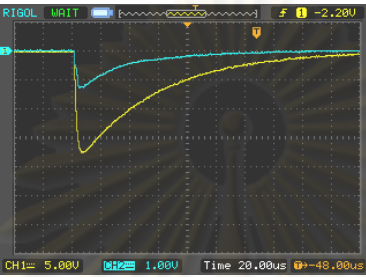
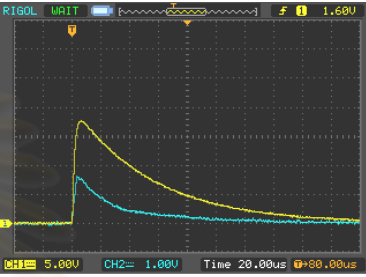
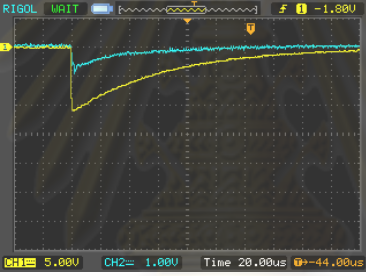
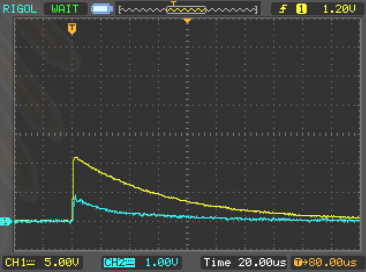
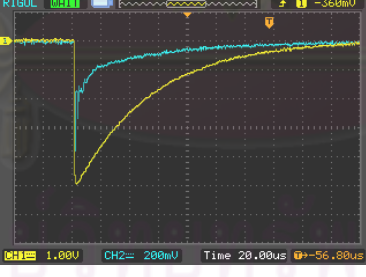
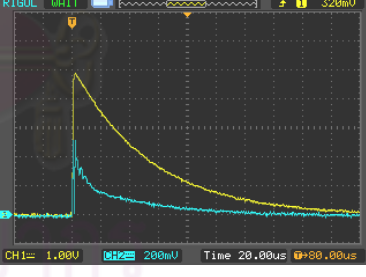
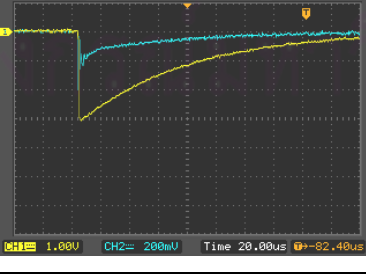
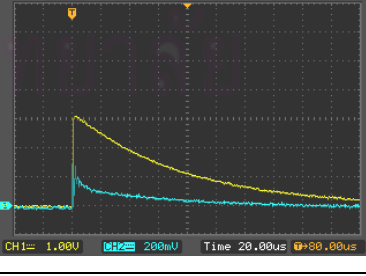
ตารางที่ ข.3 รูปคลื่นรากสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.

	กระแสिमพัลส์ชั่วพล	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก
รูปคลื่น 7.75/29 μ s.		
รูปคลื่น 2.25/22 μ s.		
รูปคลื่น 1/42 μ s.		
รูปคลื่น 0.75/14 μ s.		

รากสายดินแนวนอน

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

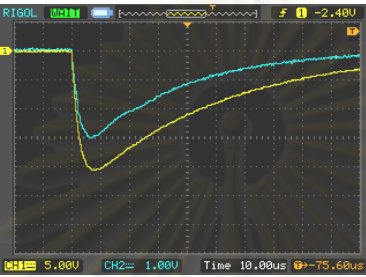
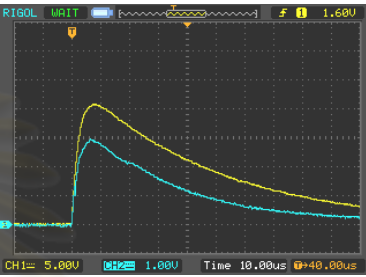
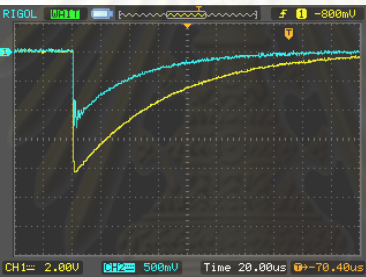
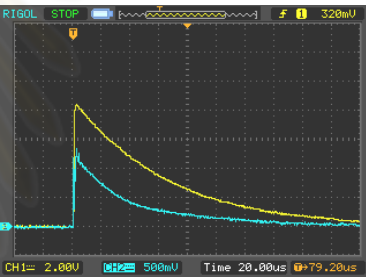
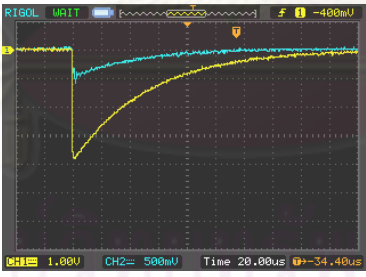
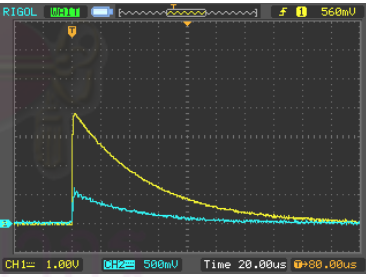
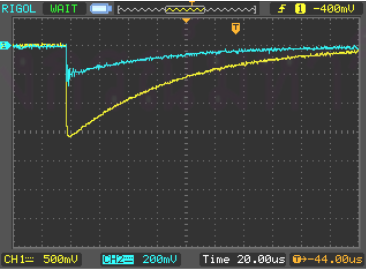
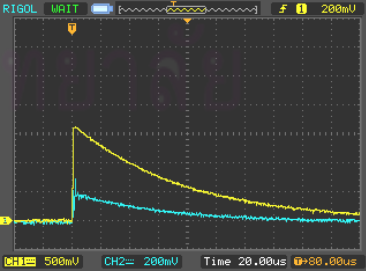
ตารางที่ ข.4 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.

	กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก
รูปคลื่น 7.75/29 μ s.		
รูปคลื่น 2.25/22 μ s.		
รูปคลื่น 1/42 μ s.		
รูปคลื่น 0.75/14 μ s.		

รากสายดินแนวดิ่ง

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

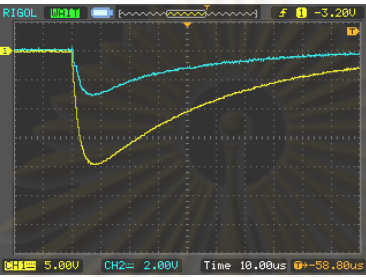
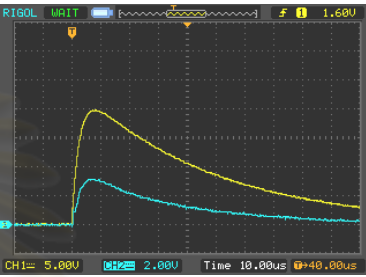
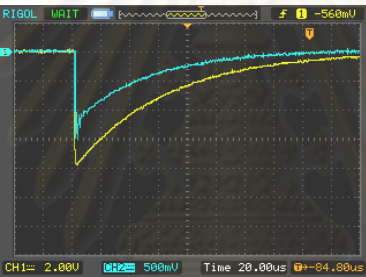
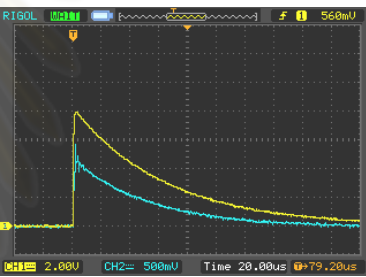
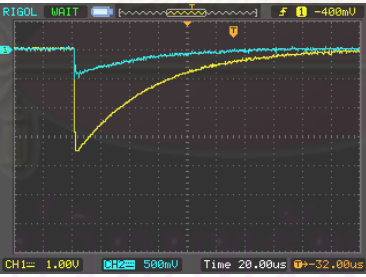
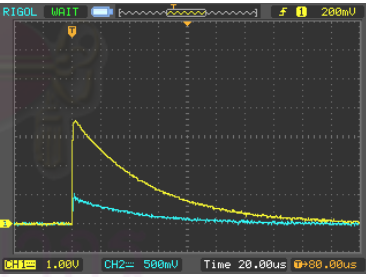
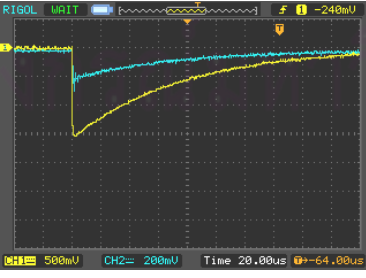
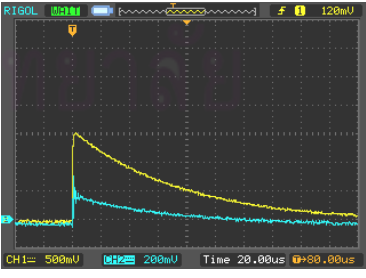
ตารางที่ ข.5 รูปคลื่นรากสายดินแนวดิ่ง ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.

	กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก
รูปคลื่น 7.75/29 μ s.		
รูปคลื่น 2.25/22 μ s.		
รูปคลื่น 1/42 μ s.		
รูปคลื่น 0.75/14 μ s.		

รากสายดินแนวนอน

- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ข.6 รูปคลื่นรากสายดินแนวนอน ที่ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.

	กระแสимพัลส์ชั่วพล	กระแสимพัลส์ชั่วบวก
รูปคลื่น 7.75/29 μ s.		
รูปคลื่น 2.25/22 μ s.		
รูปคลื่น 1/42 μ s.		
รูปคลื่น 0.75/14 μ s.		

ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 7.75/29 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3777.50	23.67	-3686.84	-22.51
	2	3777.50	53.11	-3717.06	-28.29
	3	3777.50	22.51	-3717.06	-21.36
	4	3747.28	21.36	-3717.06	-24.82
	5	3747.28	23.67	-3686.84	-25.98
6 cm.	1	3596.18	45.03	-3656.62	-47.34
	2	3626.40	44.45	-3626.40	-42.14
	3	3626.40	43.87	-3626.40	-43.87
	4	3596.18	45.61	-3626.40	-43.87
	5	3596.18	43.30	-3626.40	-42.14
9 cm.	1	3445.08	58.88	-3445.08	-58.88
	2	3445.08	66.96	-3445.08	-61.19
	3	3445.08	57.73	-3475.30	-57.73
	4	3445.08	61.19	-3445.08	-61.19
	5	3475.30	63.50	-3445.08	-63.50

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
12 cm.	1	3293.98	77.36	-3293.98	-83.13
	2	3293.98	84.28	-3293.98	-77.36
	3	3293.98	77.36	-3293.98	-83.13
	4	3293.98	84.28	-3293.98	-81.97
	5	3293.98	77.36	-3293.98	-81.97
15 cm.	1	3203.32	98.14	-3142.88	-81.97
	2	3173.10	94.67	-3173.10	-86.59
	3	3173.10	90.06	-3173.10	-91.21
	4	3173.10	93.52	-3173.10	-93.52
	5	3173.10	91.21	-3112.66	-91.21
18 cm.	1	3052.22	109.68	-3052.22	-101.02
	2	3052.22	109.68	-3052.22	-101.02
	3	3052.22	106.80	-3052.22	-101.02
	4	3022.00	101.02	-3082.44	-98.14
	5	3022.00	106.80	-3052.22	-101.02
21 cm.	1	2931.34	101.02	-2931.34	-103.91
	2	2901.12	103.91	-2931.34	-103.91
	3	2961.56	106.80	-2901.12	-106.80
	4	2931.34	103.91	-2961.56	-103.91
	5	2931.34	106.80	-2961.56	-106.80
24 cm.	1	2810.46	147.21	-2840.68	-144.32
	2	2780.24	147.21	-2840.68	-144.32
	3	2780.24	147.21	-2810.46	-147.21
	4	2810.46	147.21	-2840.68	-147.21
	5	2780.24	144.32	-2840.68	-158.75

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3445.08	40.41	-3384.64	-41.56
	2	3445.08	40.41	-3414.86	-41.56
	3	3384.64	41.56	-3414.86	-33.48
	4	3414.86	40.41	-3505.52	-32.33
	5	3414.86	33.48	-3414.86	-31.17
6 cm.	1	3052.22	49.65	-3082.44	-50.80
	2	3052.22	43.87	-3052.22	-39.26
	3	3052.22	43.87	-3052.22	-45.03
	4	3052.22	45.03	-3052.22	-38.10
	5	3022.00	49.65	-3052.22	-35.79
9 cm.	1	2719.80	51.96	-2780.24	-64.66
	2	2750.02	54.26	-2750.02	-53.11
	3	2780.24	66.96	-2780.24	-55.42
	4	2750.02	51.96	-2750.02	-57.73
	5	2750.02	54.26	-2780.24	-54.26
12 cm.	1	2478.04	60.61	-2326.94	-80.82
	2	2538.48	57.73	-2326.94	-83.71
	3	2538.48	83.71	-2326.94	-75.05
	4	2538.48	95.25	-2326.94	-72.16
	5	2538.48	75.05	-2326.94	-75.05

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	2326.94	83.71	-2326.94	-80.82
	2	2326.94	112.57	-2326.94	-83.71
	3	2326.94	109.68	-2326.94	-75.05
	4	2326.94	63.50	-2326.94	-72.16
	5	2326.94	66.39	-2326.94	-75.05
18 cm.	1	2206.06	98.14	-2206.06	-92.37
	2	2175.84	72.16	-2206.06	-89.48
	3	2206.06	69.27	-2145.62	-69.27
	4	2206.06	86.59	-2206.06	-92.37
	5	2145.62	75.05	-2206.06	-83.71
21 cm.	1	2054.96	92.37	-2054.96	-75.05
	2	2054.96	72.16	-2024.74	-95.25
	3	2054.96	92.37	-2054.96	-77.93
	4	2054.96	98.14	-1994.52	-77.93
	5	2054.96	89.48	-2024.74	-92.37
24 cm.	1	1934.08	95.25	-1934.08	-86.59
	2	1934.08	124.12	-1934.08	-98.14
	3	1934.08	101.02	-1903.86	-75.05
	4	1934.08	89.48	-1903.86	-75.05
	5	1934.08	89.48	-1934.08	-86.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1662.10	21.36	-1662.10	-15.59
	2	1662.10	16.74	-1662.10	-14.43
	3	1662.10	16.74	-1662.10	-24.25
	4	1662.10	16.74	-1662.10	-30.60
	5	1662.10	19.05	-1662.10	-29.44
6 cm.	1	1245.06	28.29	-1208.80	-17.90
	2	1208.80	19.05	-1208.80	-19.05
	3	1208.80	23.67	-1293.42	-24.82
	4	1257.15	19.63	-1208.80	-22.51
	5	1208.80	20.78	-1208.80	-17.90
9 cm.	1	1027.48	41.56	-1051.66	-19.05
	2	1027.48	18.47	-1039.57	-30.02
	3	1027.48	42.72	-1039.57	-41.56
	4	1003.30	18.47	-1051.66	-16.74
	5	1063.74	18.47	-1039.57	-23.67
12 cm.	1	870.33	22.51	-870.34	-21.94
	2	894.51	24.82	-894.51	-21.36
	3	870.33	24.82	-870.34	-20.20
	4	870.33	24.82	-870.34	-24.25
	5	894.51	22.51	-894.51	-23.09

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	785.72	24.25	-773.63	-27.71
	2	773.63	27.71	-773.63	-24.25
	3	785.72	27.71	-773.63	-25.40
	4	773.63	24.25	-773.63	-23.09
	5	797.81	24.25	-773.63	-26.56
18 cm.	1	664.84	21.94	-713.19	-24.25
	2	701.10	31.17	-701.10	-20.78
	3	701.10	23.09	-701.10	-21.94
	4	713.19	24.25	-725.28	-24.25
	5	713.19	26.56	-701.10	-21.94
21 cm.	1	640.66	26.56	-640.66	-26.56
	2	604.40	26.56	-616.49	-25.40
	3	604.40	35.79	-628.58	-28.86
	4	616.49	21.94	-628.58	-26.56
	5	616.49	26.56	-640.66	-25.40
24 cm.	1	586.27	31.75	-562.09	-23.09
	2	586.27	32.33	-580.22	-27.71
	3	592.31	32.33	-574.18	-24.82
	4	580.22	32.33	-568.14	-23.67
	5	580.22	31.75	-574.18	-24.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1375.01	17.90	-1375.01	-17.90
	2	1375.01	20.78	-1375.01	-16.16
	3	1375.01	16.16	-1375.01	-17.90
	4	1375.01	16.16	-1375.01	-19.05
	5	1375.01	23.09	-1375.01	-16.16
6 cm.	1	1281.33	20.20	-1281.33	-17.90
	2	1281.33	24.25	-1305.50	-22.51
	3	1281.33	22.51	-1305.50	-21.36
	4	1281.33	24.82	-1305.50	-24.82
	5	1281.33	21.94	-1305.50	-25.98
9 cm.	1	1027.48	27.71	-1051.66	-20.20
	2	1027.48	24.25	-1051.66	-20.20
	3	1027.48	22.51	-1039.57	-21.36
	4	1027.48	23.67	-1039.57	-27.13
	5	1027.48	20.20	-1039.57	-21.36
12 cm.	1	858.25	27.13	-858.25	-23.67
	2	858.25	32.33	-855.23	-23.09
	3	858.25	28.29	-858.25	-23.67
	4	858.25	23.67	-858.25	-21.65
	5	858.25	27.13	-858.25	-23.67

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	749.46	24.82	-749.46	-23.67
	2	749.46	32.91	-749.46	-24.82
	3	749.46	28.86	-749.46	-22.51
	4	749.46	23.67	-749.46	-31.03
	5	749.46	24.82	-749.46	-24.82
18 cm.	1	664.84	39.26	-664.84	-30.74
	2	664.84	30.02	-664.84	-30.74
	3	664.84	31.17	-664.84	-30.74
	4	664.84	31.17	-664.84	-30.88
	5	664.84	33.48	-664.84	-31.17
21 cm.	1	568.14	24.25	-568.14	-28.14
	2	568.14	27.71	-568.14	-28.86
	3	568.14	36.95	-568.14	-36.95
	4	568.14	28.86	-568.14	-26.84
	5	568.14	30.02	-568.14	-26.84
24 cm.	1	531.87	28.86	-531.87	-33.19
	2	531.87	25.40	-531.87	-26.56
	3	531.87	26.56	-531.87	-28.86
	4	531.87	33.48	-531.87	-25.40
	5	531.87	26.56	-531.87	-28.86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 7.75/29 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขาบวก		กระแสिमพัลส์ขาลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3445.08	21.36	-3445.08	-27.13
	2	3445.08	22.51	-3475.30	-23.67
	3	3445.08	25.40	-3445.08	-22.51
	4	3445.08	28.29	-3414.86	-30.60
	5	3414.86	27.71	-3445.08	-24.82
6 cm.	1	3293.98	50.22	-3324.20	-46.76
	2	3293.98	46.76	-3324.20	-47.91
	3	3293.98	49.65	-3324.20	-45.61
	4	3293.98	47.91	-3293.98	-45.61
	5	3293.98	46.76	-3293.98	-45.61
9 cm.	1	3203.32	83.13	-3173.10	-63.50
	2	3203.32	90.20	-3203.32	-63.50
	3	3173.10	90.20	-3173.10	-63.50
	4	3173.10	83.13	-3173.10	-63.50
	5	3173.10	51.96	-3173.10	-63.50
12 cm.	1	3082.44	96.98	-3082.44	-88.90
	2	3082.44	95.83	-3052.22	-88.90
	3	3112.66	95.83	-3082.44	-88.90
	4	3112.66	98.14	-3052.22	-93.52
	5	3082.44	101.60	-3082.44	-88.90

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	2991.78	115.46	-2991.78	-112.57
	2	2991.78	112.57	-2961.56	-112.57
	3	2991.78	115.46	-2991.78	-112.57
	4	2991.78	112.57	-2961.56	-109.68
	5	2991.78	109.68	-2991.78	-112.57
18 cm.	1	2931.34	121.23	-2901.12	-121.23
	2	2931.34	121.23	-2870.90	-121.23
	3	2931.34	121.23	-2931.34	-129.89
	4	2901.12	121.23	-2870.90	-121.23
	5	2931.34	129.89	-2870.90	-121.23
21 cm.	1	2810.46	132.78	-2780.24	-138.55
	2	2810.46	129.89	-2780.24	-135.66
	3	2810.46	141.43	-2810.46	-135.66
	4	2810.46	141.43	-2780.24	-135.66
	5	2810.46	132.78	-2810.46	-138.55
24 cm.	1	2719.80	144.32	-2689.58	-138.55
	2	2719.80	147.21	-2689.58	-141.43
	3	2719.80	144.32	-2689.58	-144.32
	4	2719.80	141.43	-2689.58	-144.32
	5	2719.80	138.55	-2689.58	-158.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3203.32	39.26	-3233.54	-41.56
	2	3263.76	42.72	-3173.10	-28.86
	3	3233.54	32.33	-3203.32	-32.33
	4	3203.32	39.26	-3203.32	-40.41
	5	3233.54	32.33	-3203.32	-32.33
6 cm.	1	2870.90	65.81	-2810.46	-53.11
	2	2870.90	55.42	-2870.90	-54.26
	3	2870.90	49.65	-2840.68	-49.65
	4	2870.90	56.57	-2780.24	-49.65
	5	2870.90	47.34	-2840.68	-54.26
9 cm.	1	2629.14	54.84	-2629.14	-60.61
	2	2629.14	54.84	-2629.14	-72.16
	3	2629.14	66.39	-2598.92	-66.39
	4	2629.14	63.50	-2598.92	-60.61
	5	2629.14	75.05	-2598.92	-54.84
12 cm.	1	2387.38	83.71	-2357.16	-75.05
	2	2387.38	83.71	-2357.16	-75.05
	3	2417.60	77.93	-2387.38	-72.16
	4	2387.38	77.93	-2357.16	-77.93
	5	2387.38	80.82	-2387.38	-75.05

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	2236.28	80.82	-2206.06	-72.16
	2	2206.06	69.27	-2206.06	-80.82
	3	2236.28	77.93	-2175.84	-80.82
	4	2206.06	77.93	-2206.06	-77.93
	5	2236.28	80.82	-2206.06	-77.93
18 cm.	1	2054.96	69.27	-2054.96	-63.50
	2	2085.18	75.05	-2054.96	-83.71
	3	2085.18	86.59	-2085.18	-92.37
	4	2054.96	92.37	-2054.96	-103.91
	5	2085.18	77.93	-2024.74	-72.16
21 cm.	1	1964.30	80.82	-1934.08	-80.82
	2	1934.08	101.02	-1934.08	-80.82
	3	1934.08	86.59	-1934.08	-109.68
	4	1934.08	83.71	-1934.08	-89.48
	5	1934.08	89.48	-1934.08	-89.48
24 cm.	1	1813.20	83.71	-1813.20	-72.16
	2	1813.20	89.48	-1813.20	-89.48
	3	1843.42	101.02	-1813.20	-101.02
	4	1813.20	92.37	-1813.20	-89.48
	5	1843.42	83.71	-1813.20	-92.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	2478.04	42.72	-2447.82	-38.10
	2	2478.04	39.54	-2447.82	-38.10
	3	2478.04	39.83	-2447.82	-38.25
	4	2478.04	39.54	-2447.82	-38.25
	5	2447.82	42.72	-2447.82	-38.10
6 cm.	1	1949.19	47.05	-1964.30	-47.05
	2	1964.30	45.03	-1964.30	-47.05
	3	1949.19	45.03	-1964.30	-45.03
	4	1934.08	45.03	-1964.30	-45.03
	5	1949.19	47.05	-1934.08	-45.03
9 cm.	1	1843.42	50.22	-1798.09	-50.22
	2	1828.31	53.69	-1813.2	-47.05
	3	1843.42	45.03	-1813.2	-50.22
	4	1828.31	45.03	-1813.2	-49.36
	5	1828.31	50.22	-1798.09	-45.03
12 cm.	1	1541.22	43.30	-44.74	-1556.33
	2	1571.44	44.74	-45.61	-1556.33
	3	1556.33	44.74	-45.61	-1556.33
	4	1556.33	43.30	-43.30	-1556.33
	5	1556.33	46.18	-45.61	-1571.44

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	1378.03	40.41	-1390.12	-43.30
	2	1378.03	41.13	-1365.94	-47.91
	3	1390.12	41.28	-1365.94	-42.72
	4	1378.03	41.28	-1365.94	-48.49
	5	1378.03	41.28	-1365.94	-43.87
18 cm.	1	1220.89	42.72	-1232.98	-39.83
	2	1208.8	44.45	-1232.98	-50.22
	3	1220.89	45.61	-1232.98	-50.22
	4	1220.89	50.22	-1220.89	-46.76
	5	1220.89	49.07	-1220.89	-47.91
21 cm.	1	1124.18	42.72	-1003.30	-45.03
	2	1112.10	41.56	-1003.30	-41.56
	3	1112.10	49.65	-1003.30	-46.18
	4	1112.10	49.65	-1003.30	-43.87
	5	1100.01	45.03	-1015.39	-43.87
24 cm.	1	1015.39	45.03	-1003.30	-45.03
	2	1003.30	43.87	-1003.30	-41.56
	3	1003.30	42.72	-1003.30	-46.18
	4	1015.39	39.26	-1003.30	-43.87
	5	1003.30	41.56	-1015.39	-43.87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 1136 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 1136 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1193.69	23.67	-1193.69	-28.29
	2	1193.69	21.94	-1193.69	-16.74
	3	1193.69	19.63	-1193.69	-28.29
	4	1193.69	19.63	-1193.69	-18.47
	5	1193.69	21.94	-1193.69	-18.47
6 cm.	1	1136.27	27.71	-1136.27	-21.94
	2	1136.27	27.71	-1136.27	-23.09
	3	1136.27	21.94	-1136.27	-27.71
	4	1136.27	27.71	-1136.27	-21.94
	5	1136.27	22.51	-1136.27	-21.94
9 cm.	1	1004.82	27.13	-1004.82	-24.25
	2	1004.82	27.13	-1004.82	-25.98
	3	1004.82	27.71	-1004.82	-25.98
	4	1004.82	27.71	-1004.82	-24.25
	5	1004.82	27.71	-1004.82	-23.67
12 cm.	1	882.42	30.60	-882.42	-30.02
	2	882.42	26.56	-882.42	-26.56
	3	882.42	30.02	-882.42	-27.13
	4	882.42	30.60	-882.42	-30.02
	5	882.42	30.02	-882.42	-30.02

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	761.54	25.98	-761.54	-26.56
	2	761.54	26.56	-761.54	-26.56
	3	761.54	26.56	-761.54	-26.84
	4	761.54	26.56	-761.54	-26.56
	5	761.54	25.98	-761.54	-26.84
18 cm.	1	610.44	25.98	-610.44	-25.98
	2	610.44	26.56	-610.44	-26.56
	3	610.44	26.56	-610.44	-26.56
	4	610.44	26.56	-610.44	-25.98
	5	610.44	26.56	-610.44	-25.98
21 cm.	1	586.27	32.91	-586.27	-32.91
	2	586.27	32.33	-586.27	-31.75
	3	586.27	38.10	-586.27	-35.21
	4	586.27	32.33	-586.27	-30.02
	5	586.27	30.02	-586.27	-37.52
24 cm.	1	531.87	31.17	-531.87	-34.64
	2	531.87	30.60	-531.87	-29.44
	3	531.87	30.60	-531.87	-29.44
	4	531.87	31.17	-531.87	-30.60
	5	531.87	38.68	-531.87	-34.06

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 7.75/29 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	4079.70	43.30	-4079.70	-49.65
	2	4109.92	54.84	-4079.70	-49.65
	3	4079.70	54.84	-4079.70	-49.65
	4	4049.48	53.11	-4049.48	-54.84
	5	4079.70	53.11	-4079.70	-55.42
6 cm.	1	3777.50	90.06	-3747.28	-95.83
	2	3777.50	87.75	-3807.72	-90.06
	3	3777.50	90.06	-3837.94	-90.06
	4	3777.50	87.75	-3807.72	-87.75
	5	3777.50	109.68	-3807.72	-106.80
9 cm.	1	3535.74	124.12	-3565.96	-121.23
	2	3565.96	121.23	-3565.96	-121.23
	3	3596.18	138.55	-3505.52	-121.23
	4	3565.96	129.89	-3505.52	-124.12
	5	3535.74	135.66	-3505.52	-124.12
12 cm.	1	3354.42	135.66	-3354.42	-129.89
	2	3384.64	129.89	-3354.42	-129.89
	3	3384.64	129.89	-3384.64	-129.89
	4	3354.42	138.55	-3354.42	-135.66
	5	3354.42	141.43	-3324.20	-135.66

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	3203.32	138.55	-3173.10	-109.68
	2	3203.32	138.55	-3173.10	-112.57
	3	3203.32	138.55	-3173.10	-112.57
	4	3203.32	132.78	-3173.10	-112.57
	5	3203.32	132.78	-3173.10	-112.57
18 cm.	1	3052.22	124.12	-3022.00	-121.23
	2	3052.22	124.12	-3022.00	-124.12
	3	3052.22	124.12	-3022.00	-121.23
	4	3052.22	124.12	-2991.78	-118.34
	5	3052.22	124.12	-3022.00	-124.12
21 cm.	1	2931.34	144.32	-2931.34	-135.66
	2	2931.34	144.32	-2901.12	-141.43
	3	2931.34	144.32	-2931.34	-138.55
	4	2931.34	147.21	-2931.34	-135.66
	5	2931.34	147.21	-2810.46	-129.89
24 cm.	1	2810.46	150.09	-2810.46	-147.21
	2	2810.46	147.21	-2810.46	-147.21
	3	2810.46	147.21	-2780.24	-144.32
	4	2810.46	147.21	-2780.24	-144.32
	5	2810.46	144.32	-2810.46	-144.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3898.38	62.35	-3868.16	-49.65
	2	3868.16	57.73	-3868.16	-53.11
	3	3868.16	63.50	-3898.38	-53.11
	4	3868.16	77.36	-3868.16	-54.26
	5	3868.16	57.73	-3868.16	-65.81
6 cm.	1	3293.98	72.74	-3293.98	-86.59
	2	3293.98	73.89	-3293.98	-86.59
	3	3293.98	79.67	-3293.98	-79.67
	4	3293.98	88.90	-3293.98	-80.82
	5	3293.98	84.28	-3293.98	-84.28
9 cm.	1	2870.90	92.37	-2901.12	-98.14
	2	2870.90	103.91	-2870.90	-95.25
	3	2870.90	98.14	-2870.90	-92.37
	4	2870.90	98.14	-2840.68	-80.82
	5	2870.90	98.14	-2840.68	-95.25
12 cm.	1	2538.48	109.68	-2538.48	-118.34
	2	2538.48	112.57	-2538.48	-124.12
	3	2538.48	109.68	-2538.48	-109.68
	4	2538.48	115.46	-2508.26	-112.57
	5	2538.48	115.46	-2538.48	-124.12

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	2296.72	135.66	-2296.72	-115.46
	2	2296.72	124.12	-2296.72	-112.57
	3	2296.72	118.34	-2296.72	-118.34
	4	2296.72	118.34	-2296.72	-118.34
	5	2296.72	124.12	-2296.72	-127.00
18 cm.	1	2115.40	112.57	-2115.4	-132.78
	2	2145.62	112.57	-2115.4	-135.66
	3	2115.40	135.66	-2115.4	-152.98
	4	2115.40	135.66	-2115.4	-121.23
	5	2085.18	135.66	-2115.4	-132.78
21 cm.	1	1964.30	129.89	-1964.3	-124.12
	2	1964.30	129.89	-1964.3	-124.12
	3	1964.30	124.12	-1964.3	-129.89
	4	1964.30	124.12	-1964.3	-129.89
	5	1964.30	129.89	-1964.3	-124.12
24 cm.	1	1813.20	121.23	-1813.2	-121.23
	2	1813.20	127.00	-1813.2	-144.32
	3	1813.20	138.55	-1782.98	-150.09
	4	1813.20	150.09	-1813.2	-127.00
	5	1813.20	138.55	-1813.2	-121.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	2538.48	40.41	-2538.48	-40.41
	2	2538.48	44.74	-2538.48	-40.41
	3	2538.48	41.56	-2538.48	-39.26
	4	2538.48	40.41	-2538.48	-32.33
	5	2538.48	43.30	-2538.48	-41.56
6 cm.	1	1903.86	43.87	-1903.86	-43.87
	2	1903.86	54.26	-1903.86	-54.26
	3	1903.86	46.18	-1903.86	-54.26
	4	1903.86	48.49	-1903.86	-43.87
	5	1903.86	48.49	-1903.86	-53.40
9 cm.	1	1541.22	51.96	-1526.11	-63.50
	2	1511.00	56.57	-1526.11	-46.18
	3	1511.00	43.87	-1526.11	-53.11
	4	1511.00	55.42	-1526.11	-49.65
	5	1511.00	61.19	-1526.11	-54.26
12 cm.	1	1305.50	53.11	-1269.24	-56.57
	2	1293.42	53.11	-1281.33	-49.65
	3	1293.42	53.11	-1281.33	-49.65
	4	1293.42	57.73	-1281.33	-53.11
	5	1293.42	56.57	-1281.33	-53.11

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	1112.10	61.19	-1100.01	-68.12
	2	1112.10	60.90	-1112.10	-68.12
	3	1112.10	61.19	-1112.10	-54.26
	4	1112.10	68.12	-1112.10	-54.26
	5	1112.10	63.79	-1112.10	-63.50
18 cm.	1	979.13	53.11	-979.13	-57.73
	2	979.13	53.11	-979.13	-48.49
	3	979.13	51.96	-979.13	-53.11
	4	979.13	63.50	-979.13	-57.73
	5	979.13	57.73	-979.13	-51.96
21 cm.	1	870.34	61.19	-870.34	-58.88
	2	870.34	61.19	-870.34	-51.96
	3	870.34	63.50	-870.34	-64.66
	4	870.34	57.73	-870.34	-48.49
	5	870.34	57.73	-870.34	-57.73
24 cm.	1	797.81	61.19	-785.72	-64.66
	2	797.81	56.57	-785.72	-64.66
	3	797.81	56.57	-785.72	-53.11
	4	797.81	65.81	-785.72	-53.11
	5	797.81	56.57	-785.72	-51.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1994.52	42.72	-1994.52	-42.72
	2	1994.52	41.56	-1994.52	-42.72
	3	1994.52	41.56	-1994.52	-40.41
	4	1994.52	35.79	-1994.52	-33.48
	5	1994.52	35.79	-1994.52	-33.48
6 cm.	1	1317.59	45.03	-1317.59	-39.26
	2	1317.59	54.26	-1317.59	-48.49
	3	1317.59	54.26	-1317.59	-49.65
	4	1317.59	48.49	-1317.59	-42.72
	5	1317.59	47.34	-1317.59	-39.26
9 cm.	1	1027.48	53.69	-1027.48	-49.65
	2	1027.48	51.96	-1027.48	-39.26
	3	1027.48	51.96	-1027.48	-48.49
	4	1027.48	53.69	-1027.48	-51.96
	5	1027.48	53.69	-1027.48	-48.49
12 cm.	1	834.07	36.95	-834.07	-38.10
	2	834.07	51.96	-834.07	-40.41
	3	834.07	57.73	-834.07	-46.18
	4	834.07	57.73	-834.07	-46.18
	5	834.07	51.96	-834.07	-40.41

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	701.10	46.18	-701.10	-40.41
	2	701.10	51.96	-701.10	-51.96
	3	701.10	46.18	-701.10	-45.03
	4	701.10	51.96	-701.10	-51.96
	5	701.10	51.96	-701.10	-45.03
18 cm.	1	634.62	54.26	-634.62	-46.18
	2	634.62	54.26	-634.62	-39.26
	3	634.62	45.03	-634.62	-54.26
	4	634.62	45.03	-634.62	-45.03
	5	634.62	54.26	-634.62	-45.03
21 cm.	1	568.14	63.50	-568.14	-57.73
	2	568.14	63.50	-568.14	-48.49
	3	568.14	57.73	-568.14	-48.49
	4	568.14	63.50	-568.14	-57.73
	5	568.14	57.73	-568.14	-57.73
24 cm.	1	513.74	57.73	-513.74	-57.73
	2	513.74	63.50	-513.74	-63.50
	3	513.74	57.73	-513.74	-57.73
	4	513.74	57.73	-513.74	-57.73
	5	513.74	63.50	-513.74	-57.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 7.75/29 μs .
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 $\Omega\cdot\text{cm}$.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.13 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μs . ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 $\Omega\cdot\text{cm}$.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3777.50	53.11	-3777.50	-53.11
	2	3777.50	54.84	-3777.50	-53.11
	3	3777.50	54.84	-3777.50	-54.84
	4	3777.50	53.11	-3777.50	-53.11
	5	3777.50	53.11	-3777.50	-53.11
6 cm.	1	3535.74	69.27	-3565.96	-70.43
	2	3535.74	69.27	-3565.96	-71.58
	3	3535.74	70.43	-3535.74	-72.74
	4	3535.74	69.27	-3535.74	-72.74
	5	3535.74	65.81	-3535.74	-72.74
9 cm.	1	3384.64	86.59	-3354.42	-86.59
	2	3384.64	87.75	-3354.42	-86.59
	3	3384.64	86.59	-3354.42	-85.44
	4	3384.64	85.44	-3354.42	-87.75
	5	3384.64	86.59	-3354.42	-87.75
12 cm.	1	3173.10	118.34	-3173.10	-118.34
	2	3173.10	124.12	-3173.10	-118.34
	3	3173.10	124.12	-3173.10	-121.23
	4	3173.10	121.23	-3173.10	-118.34
	5	3173.10	121.23	-3173.10	-121.23

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	3052.22	138.55	-3052.22	-129.89
	2	3052.22	135.66	-3052.22	-127.00
	3	3052.22	132.78	-3052.22	-127.00
	4	3052.22	135.66	-3052.22	-129.89
	5	3052.22	132.78	-3052.22	-124.12
18 cm.	1	2901.12	150.09	-2901.12	-155.87
	2	2901.12	158.75	-2901.12	-150.09
	3	2901.12	187.62	-2901.12	-150.09
	4	2901.12	190.50	-2901.12	-158.75
	5	2901.12	193.39	-2901.12	-152.98
21 cm.	1	2780.24	167.41	-2810.46	-184.73
	2	2780.24	184.73	-2810.46	-184.73
	3	2780.24	190.50	-2810.46	-184.73
	4	2780.24	190.50	-2810.46	-190.50
	5	2780.24	196.28	-2810.46	-190.50
24 cm.	1	2659.36	196.28	-2659.36	-170.30
	2	2659.36	228.03	-2659.36	-173.19
	3	2659.36	219.37	-2659.36	-176.07
	4	2659.36	216.48	-2659.36	-170.30
	5	2659.36	219.37	-2659.36	-173.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.14 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3535.74	54.26	-3565.96	-53.11
	2	3535.74	54.26	-3596.18	-53.11
	3	3535.74	53.11	-3565.96	-53.11
	4	3535.74	53.11	-3565.96	-53.11
	5	3535.74	54.26	-3565.96	-54.26
6 cm.	1	3022.00	84.28	-3022.00	-84.28
	2	3022.00	73.89	-3022.00	-68.12
	3	3022.00	73.89	-3022.00	-83.13
	4	3022.00	81.97	-3022.00	-70.43
	5	3022.00	75.05	-3022.00	-72.74
9 cm.	1	2659.36	109.68	-2659.36	-89.48
	2	2659.36	109.68	-2629.14	-89.48
	3	2659.36	89.48	-2629.14	-109.68
	4	2659.36	101.02	-2659.36	-101.02
	5	2659.36	89.48	-2629.14	-92.37
12 cm.	1	2326.94	112.57	-2357.16	-101.02
	2	2387.38	127.00	-2387.38	-101.02
	3	2387.38	106.80	-2357.16	-101.02
	4	2357.16	106.80	-2357.16	-101.02
	5	2357.16	112.57	-2357.16	-98.14

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	2175.84	109.68	-2145.62	-118.34
	2	2175.84	135.66	-2145.62	-118.34
	3	2145.62	118.34	-2145.62	-118.34
	4	2175.84	118.34	-2145.62	-127.00
	5	2145.62	129.89	-2145.62	-127.00
18 cm.	1	1964.30	121.23	-1964.30	-112.57
	2	1964.30	124.12	-1964.30	-115.46
	3	1964.30	124.12	-1964.30	-112.57
	4	1964.30	152.98	-1964.30	-129.89
	5	1964.30	112.57	-1964.30	-115.46
21 cm.	1	1813.20	129.89	-1813.20	-121.23
	2	1813.20	141.43	-1813.20	-121.23
	3	1813.20	127.00	-1813.20	-127.00
	4	1813.20	158.75	-1813.20	-129.89
	5	1813.20	115.46	-1813.20	-127.00
24 cm.	1	1662.10	144.32	-1662.10	-121.23
	2	1662.10	121.23	-1662.10	-121.23
	3	1662.10	161.64	-1662.10	-115.46
	4	1662.10	121.23	-1662.10	-115.46
	5	1662.10	138.55	-1662.10	-121.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.15 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	2266.50	47.34	-2296.72	-57.73
	2	2266.50	57.73	-2296.72	-47.34
	3	2266.50	42.72	-2296.72	-47.34
	4	2266.50	47.34	-2296.72	-47.05
	5	2266.50	45.03	-2296.72	-45.03
6 cm.	1	1692.32	55.42	-1692.32	-66.96
	2	1692.32	66.96	-1692.32	-70.43
	3	1692.32	56.57	-1692.32	-49.65
	4	1692.32	65.81	-1692.32	-65.81
	5	1692.32	51.96	-1692.32	-56.57
9 cm.	1	1402.21	71.58	-1414.30	-65.81
	2	1402.21	71.58	-1414.30	-65.81
	3	1402.21	78.51	-1414.30	-71.58
	4	1402.21	71.58	-1414.30	-78.51
	5	1402.21	78.51	-1414.30	-65.81
12 cm.	1	1172.54	76.20	-1172.54	-65.81
	2	1172.54	80.82	-1172.54	-79.67
	3	1172.54	76.20	-1172.54	-79.67
	4	1172.54	76.20	-1172.54	-77.36
	5	1172.54	80.82	-1172.54	-68.12

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	1027.48	78.51	-1027.48	-78.51
	2	1027.48	72.74	-1027.48	-72.74
	3	1027.48	81.97	-1027.48	-72.74
	4	1027.48	80.82	-1027.48	-80.82
	5	1027.48	86.59	-1027.48	-72.74
18 cm.	1	918.69	71.58	-918.69	-68.12
	2	918.69	72.74	-918.69	-65.81
	3	918.69	72.74	-918.69	-71.58
	4	918.69	72.74	-918.69	-85.73
	5	918.69	71.58	-918.69	-72.74
21 cm.	1	834.07	73.89	-834.07	-66.96
	2	834.07	68.12	-834.07	-72.74
	3	834.07	84.28	-834.07	-77.36
	4	834.07	73.89	-834.07	-72.74
	5	834.07	79.67	-834.07	-77.36
24 cm.	1	737.37	66.96	-737.37	-61.19
	2	737.37	66.96	-737.37	-66.96
	3	737.37	69.27	-737.37	-69.27
	4	737.37	69.27	-737.37	-66.96
	5	737.37	69.27	-737.37	-69.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 757 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.16 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 757 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1707.43	42.72	-1707.43	-42.72
	2	1707.43	42.72	-1707.43	-39.83
	3	1707.43	42.72	-1707.43	-38.25
	4	1707.43	39.83	-1707.43	-39.83
	5	1707.43	39.83	-1707.43	-39.83
6 cm.	1	1196.71	47.05	-1196.71	-44.16
	2	1196.71	47.05	-1196.71	-45.61
	3	1196.71	45.61	-1196.71	-44.16
	4	1196.71	47.05	-1196.71	-44.16
	5	1196.71	45.61	-1196.71	-45.61
9 cm.	1	954.95	46.76	-954.95	-43.30
	2	954.95	46.76	-954.95	-46.76
	3	954.95	45.89	-954.95	-43.30
	4	954.95	45.89	-954.95	-43.30
	5	954.95	45.89	-954.95	-46.76
12 cm.	1	773.63	43.30	-773.63	-43.30
	2	773.63	46.90	-773.63	-43.30
	3	773.63	46.90	-773.63	-45.03
	4	773.63	46.90	-773.63	-45.03
	5	773.63	43.30	-773.63	-43.30

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	664.84	42.72	-664.84	-42.72
	2	664.84	40.84	-664.84	-40.84
	3	664.84	42.72	-664.84	-42.72
	4	664.84	42.72	-664.84	-42.72
	5	664.84	40.41	-664.84	-40.84
18 cm.	1	580.22	40.41	-580.22	-42.72
	2	580.22	40.41	-580.22	-42.72
	3	580.22	42.72	-580.22	-40.41
	4	580.22	45.03	-580.22	-40.41
	5	580.22	45.03	-580.22	-40.41
21 cm.	1	525.83	43.01	-525.83	-39.26
	2	525.83	43.01	-525.83	-39.26
	3	525.83	49.65	-525.83	-38.25
	4	525.83	45.03	-525.83	-38.25
	5	525.83	45.03	-525.83	-39.26
24 cm.	1	465.39	39.26	-465.39	-33.48
	2	465.39	38.10	-465.39	-40.41
	3	465.39	41.85	-465.39	-40.41
	4	465.39	41.85	-465.39	-40.41
	5	465.39	43.30	-465.39	-33.48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 7.75/29 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.17 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	5469.82	207.82	-5439.60	-210.71
	2	5469.82	219.37	-5439.60	-202.05
	3	5469.82	225.14	-5439.60	-216.48
	4	5469.82	213.60	-5439.60	-216.48
	5	5469.82	216.48	-5439.60	-213.60
6 cm.	1	4865.42	233.80	-4865.42	-277.10
	2	4865.42	259.78	-4865.42	-277.10
	3	4865.42	268.44	-4865.42	-265.55
	4	4865.42	268.44	-4865.42	-265.55
	5	4865.42	268.44	-4865.42	-259.78
9 cm.	1	4381.90	331.94	-4351.68	-300.19
	2	4351.68	317.51	-4351.68	-288.64
	3	4351.68	305.96	-4351.68	-300.19
	4	4351.68	300.19	-4351.68	-300.19
	5	4351.68	305.96	-4351.68	-288.64
12 cm.	1	3989.04	340.60	-3989.04	-340.60
	2	3989.04	346.37	-3989.04	-334.82
	3	3989.04	357.92	-3989.04	-334.82
	4	3989.04	357.92	-3989.04	-334.82
	5	3989.04	352.14	-3989.04	-334.82

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	3747.28	386.78	-3717.06	-363.69
	2	3747.28	392.55	-3717.06	-363.69
	3	3747.28	392.55	-3717.06	-363.69
	4	3747.28	386.78	-3717.06	-363.69
	5	3747.28	375.23	-3717.06	-363.69
18 cm.	1	3505.52	409.87	-3505.52	-398.33
	2	3505.52	415.64	-3505.52	-392.55
	3	3505.52	415.64	-3505.52	-386.78
	4	3505.52	409.87	-3505.52	-386.78
	5	3505.52	409.87	-3505.52	-386.78
21 cm.	1	3293.98	438.74	-3293.98	-409.87
	2	3293.98	432.96	-3293.98	-409.87
	3	3293.98	432.96	-3293.98	-404.10
	4	3293.98	421.42	-3293.98	-404.10
	5	3293.98	421.42	-3293.98	-398.33
24 cm.	1	3112.66	427.19	-3112.66	-421.42
	2	3112.66	427.19	-3112.66	-421.42
	3	3112.66	427.19	-3112.66	-421.42
	4	3112.66	427.19	-3112.66	-421.42
	5	3112.66	421.42	-3112.66	-421.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.18 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3686.84	138.55	-3686.84	-138.55
	2	3686.84	167.41	-3686.84	-138.55
	3	3686.84	170.30	-3686.84	-170.30
	4	3686.84	170.30	-3686.84	-138.55
	5	3686.84	138.55	-3686.84	-173.19
6 cm.	1	2931.34	170.30	-2931.34	-178.96
	2	2931.34	187.62	-2931.34	-178.96
	3	2931.34	187.62	-2931.34	-176.07
	4	2931.34	176.07	-2931.34	-176.07
	5	2931.34	176.07	-2931.34	-161.64
9 cm.	1	2326.94	161.64	-2326.94	-176.07
	2	2326.94	178.96	-2326.94	-161.64
	3	2326.94	178.96	-2326.94	-176.07
	4	2326.94	176.07	-2326.94	-176.07
	5	2326.94	176.07	-2326.94	-161.64
12 cm.	1	1994.52	193.39	-1994.52	-187.62
	2	1994.52	193.39	-1994.52	-187.62
	3	1994.52	196.28	-1994.52	-176.07
	4	1994.52	187.62	-1994.52	-176.07
	5	1994.52	177.51	-1994.52	-161.64

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	1722.54	225.14	-1752.76	-161.64
	2	1722.54	173.19	-1722.54	-178.96
	3	1722.54	173.19	-1752.76	-178.96
	4	1752.76	161.64	-1752.76	-155.87
	5	1722.54	178.96	-1752.76	-184.73
18 cm.	1	1556.33	181.84	-1541.22	-193.39
	2	1556.33	187.62	-1541.22	-158.75
	3	1556.33	199.16	-1541.22	-170.30
	4	1556.33	181.84	-1541.22	-161.64
	5	1556.33	184.73	-1541.22	-181.84
21 cm.	1	1402.21	222.25	-1378.03	-176.07
	2	1378.03	178.96	-1390.12	-210.71
	3	1378.03	176.07	-1378.03	-210.71
	4	1365.94	184.73	-1378.03	-176.07
	5	1365.94	230.91	-1378.03	-187.62
24 cm.	1	1257.15	245.35	-1257.15	-187.62
	2	1257.15	228.03	-1257.15	-187.62
	3	1257.15	199.16	-1257.15	-210.71
	4	1257.15	233.80	-1257.15	-222.25
	5	1257.15	228.03	-1257.15	-178.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.19 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	2296.72	99.58	-2296.72	-99.58
	2	2296.72	106.80	-2296.72	-99.58
	3	2296.72	106.80	-2296.72	-99.58
	4	2296.72	103.91	-2296.72	-93.81
	5	2296.72	103.91	-2296.72	-93.81
6 cm.	1	1601.66	101.02	-1601.66	-103.91
	2	1601.66	101.02	-1601.66	-103.91
	3	1601.66	103.91	-1601.66	-101.02
	4	1601.66	101.02	-1601.66	-101.02
	5	1601.66	101.02	-1601.66	-101.02
9 cm.	1	1184.62	95.25	-1184.62	-93.81
	2	1184.62	95.25	-1184.62	-93.81
	3	1184.62	95.25	-1184.62	-86.59
	4	1184.62	92.37	-1184.62	-89.48
	5	1184.62	92.37	-1184.62	-89.48
12 cm.	1	979.13	93.81	-979.13	-86.59
	2	979.13	93.81	-979.13	-86.59
	3	979.13	93.81	-979.13	-89.48
	4	979.13	90.92	-979.13	-86.59
	5	979.13	90.92	-979.13	-89.48

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	809.90	86.59	-809.90	-86.59
	2	809.90	86.59	-809.90	-86.59
	3	809.90	86.59	-809.90	-86.59
	4	809.90	90.92	-809.90	-86.59
	5	809.90	90.92	-809.90	-80.82
18 cm.	1	713.19	86.59	-713.19	-83.71
	2	713.19	77.93	-713.19	-72.16
	3	713.19	103.91	-713.19	-75.05
	4	713.19	86.59	-713.19	-75.05
	5	713.19	86.59	-713.19	-83.71
21 cm.	1	628.58	83.71	-628.58	-69.27
	2	628.58	80.82	-628.58	-77.93
	3	628.58	77.93	-628.58	-83.71
	4	628.58	77.93	-628.58	-72.16
	5	628.58	80.82	-628.58	-72.16
24 cm.	1	574.18	77.93	-574.18	-83.71
	2	574.18	89.48	-574.18	-69.27
	3	574.18	89.48	-574.18	-75.05
	4	574.18	89.48	-574.18	-77.93
	5	574.18	95.25	-574.18	-77.93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวดิ่ง

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm.

ตารางที่ ค.20 ผลการทดลองรากสายดินแนวดิ่ง ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1160.45	54.84	-1160.45	-50.51
	2	1160.45	54.84	-1160.45	-50.51
	3	1160.45	54.84	-1160.45	-50.51
	4	1160.45	50.51	-1160.45	-54.84
	5	1160.45	50.51	-1160.45	-54.84
6 cm.	1	737.37	50.51	-737.37	-49.07
	2	737.37	50.51	-737.37	-43.30
	3	737.37	50.51	-737.37	-43.30
	4	737.37	46.18	-737.37	-49.07
	5	737.37	46.18	-737.37	-49.07
9 cm.	1	556.05	49.36	-556.05	-49.07
	2	556.05	49.36	-556.05	-49.07
	3	556.05	49.36	-556.05	-43.30
	4	556.05	49.07	-556.05	-43.30
	5	556.05	49.07	-556.05	-43.30
12 cm.	1	441.21	42.14	-429.12	-39.26
	2	441.21	42.14	-429.12	-39.26
	3	441.21	42.14	-429.12	-39.26
	4	441.21	41.56	-429.12	-37.52
	5	441.21	41.56	-429.12	-38.68

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	362.64	40.41	-362.64	-39.26
	2	362.64	50.80	-362.64	-36.95
	3	362.64	42.14	-362.64	-36.95
	4	362.64	42.72	-362.64	-33.48
	5	362.64	32.33	-362.64	-31.17
18 cm.	1	314.29	35.79	-314.29	-33.48
	2	314.29	40.41	-314.29	-35.79
	3	314.29	41.56	-314.29	-31.17
	4	314.29	41.56	-314.29	-31.17
	5	314.29	40.41	-314.29	-31.17
21 cm.	1	278.02	43.87	-278.02	-31.17
	2	278.02	33.48	-271.98	-38.10
	3	275.00	34.64	-271.98	-32.33
	4	275.00	32.33	-271.98	-32.33
	5	275.00	39.26	-271.98	-32.33
24 cm.	1	244.78	33.48	-244.78	-35.79
	2	244.78	38.10	-244.78	-39.26
	3	244.78	38.10	-244.78	-38.10
	4	244.78	40.41	-244.78	-31.17
	5	244.78	34.64	-244.78	-33.48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 7.75/29 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.21 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 7.75/29 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	4986.30	202.05	-4986.30	-202.05
	2	4986.30	202.05	-4986.30	-193.39
	3	4986.30	202.05	-4986.30	-207.82
	4	4986.30	202.05	-4986.30	-207.82
	5	4986.30	202.05	-4986.30	-193.39
6 cm.	1	4563.22	259.78	-4563.22	-256.89
	2	4563.22	259.78	-4563.22	-262.66
	3	4563.22	262.66	-4563.22	-256.89
	4	4563.22	259.78	-4563.22	-259.78
	5	4563.22	262.66	-4563.22	-259.78
9 cm.	1	4230.80	297.30	-4170.36	-294.41
	2	4200.58	297.30	-4109.92	-291.53
	3	4200.58	297.30	-4109.92	-288.64
	4	4200.58	297.30	-4109.92	-297.30
	5	4200.58	297.30	-4109.92	-297.30
12 cm.	1	3717.06	340.60	-3868.16	-340.60
	2	3656.62	329.05	-3837.94	-340.60
	3	3686.84	334.82	-3837.94	-340.60
	4	3656.62	340.60	-3837.94	-340.60
	5	3656.62	346.37	-3837.94	-334.82

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	3565.96	369.46	-3596.18	-375.23
	2	3565.96	375.23	-3565.96	-357.92
	3	3565.96	375.23	-3565.96	-375.23
	4	3565.96	375.23	-3565.96	-375.23
	5	3565.96	375.23	-3565.96	-375.23
18 cm.	1	3354.42	432.96	-3354.42	-421.42
	2	3354.42	432.96	-3354.42	-421.42
	3	3354.42	421.42	-3354.42	-421.42
	4	3354.42	421.42	-3354.42	-421.42
	5	3354.42	421.42	-3354.42	-421.42
21 cm.	1	3052.22	444.51	-3173.10	-438.74
	2	3173.10	444.51	-3173.10	-438.74
	3	3173.10	450.28	-3173.10	-438.74
	4	3142.88	444.51	-3173.10	-444.51
	5	3112.66	450.28	-3173.10	-444.51
24 cm.	1	2961.56	450.28	-2961.56	-450.28
	2	2991.78	461.83	-2961.56	-438.74
	3	2931.34	450.28	-2961.56	-450.28
	4	2961.56	450.28	-2961.56	-427.19
	5	2961.56	450.28	-2961.56	-438.74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 2.25/22 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.22 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 2.25/22 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	3263.76	155.87	-3263.76	-144.32
	2	3263.76	155.87	-3263.76	-144.32
	3	3263.76	144.32	-3263.76	-144.32
	4	3263.76	144.32	-3263.76	-155.87
	5	3263.76	155.87	-3263.76	-155.87
6 cm.	1	2508.26	161.64	-2508.26	-161.64
	2	2508.26	161.64	-2508.26	-161.64
	3	2508.26	176.07	-2508.26	-161.64
	4	2508.26	176.07	-2508.26	-161.64
	5	2508.26	161.64	-2508.26	-144.32
9 cm.	1	2145.62	173.19	-2115.40	-167.41
	2	2145.62	176.07	-2115.40	-167.41
	3	2145.62	173.19	-2115.40	-155.87
	4	2145.62	176.07	-2115.40	-184.73
	5	2145.62	176.07	-2115.40	-173.19
12 cm.	1	1843.42	178.96	-1843.42	-178.96
	2	1843.42	178.96	-1843.42	-173.19
	3	1843.42	173.19	-1843.42	-178.96
	4	1843.42	178.96	-1843.42	-173.19
	5	1843.42	190.50	-1843.42	-155.87

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	1586.55	184.73	-1586.55	-158.75
	2	1586.55	184.73	-1586.55	-164.53
	3	1586.55	173.19	-1586.55	-176.07
	4	1586.55	187.62	-1586.55	-164.53
	5	1586.55	173.19	-1586.55	-164.53
18 cm.	1	1450.56	170.30	-1438.47	-164.53
	2	1450.56	170.30	-1426.38	-176.07
	3	1450.56	207.82	-1426.38	-167.41
	4	1450.56	176.07	-1426.38	-184.73
	5	1450.56	170.30	-1426.38	-167.41
21 cm.	1	1305.50	178.96	-1305.50	-193.39
	2	1305.50	190.50	-1305.50	-181.84
	3	1305.50	193.39	-1305.50	-187.62
	4	1305.50	204.94	-1305.50	-181.84
	5	1305.50	176.07	-1305.50	-181.84
24 cm.	1	1184.62	207.82	-1184.62	-196.28
	2	1184.62	207.82	-1184.62	-176.07
	3	1184.62	207.82	-1184.62	-176.07
	4	1184.62	196.28	-1184.62	-196.28
	5	1184.62	196.28	-1184.62	-196.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 1/42 μ s.
- ความต้านทานสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.23 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 1/42 μ s. ที่ความต้านทาน
จำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	1964.30	98.14	-1964.30	-93.81
	2	1964.30	98.14	-1964.30	-86.59
	3	1964.30	93.81	-1964.30	-86.59
	4	1964.30	93.81	-1964.30	-93.81
	5	1964.30	93.81	-1964.30	-93.81
6 cm.	1	1365.94	83.71	-1365.94	-80.82
	2	1365.94	83.71	-1365.94	-79.38
	3	1365.94	84.86	-1365.94	-79.38
	4	1365.94	79.38	-1365.94	-83.71
	5	1365.94	79.38	-1365.94	-83.71
9 cm.	1	1075.83	80.82	-1075.83	-72.16
	2	1075.83	79.38	-1075.83	-79.38
	3	1075.83	77.93	-1075.83	-77.93
	4	1075.83	77.93	-1075.83	-77.93
	5	1075.83	80.82	-1075.83	-72.16
12 cm.	1	882.42	72.16	-882.42	-72.16
	2	882.42	72.16	-882.42	-77.93
	3	882.42	76.49	-882.42	-77.93
	4	882.42	76.49	-882.42	-72.16
	5	882.42	72.16	-882.42	-72.16

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ชั่ววอก		กระแสिमพัลส์ชั่วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	749.46	72.16	-749.46	-66.39
	2	749.46	72.16	-749.46	-75.05
	3	749.46	80.82	-749.46	-80.82
	4	749.46	80.82	-749.46	-80.82
	5	749.46	80.82	-749.46	-80.82
18 cm.	1	664.84	77.93	-664.84	-69.27
	2	664.84	77.93	-664.84	-72.16
	3	664.84	77.93	-664.84	-77.93
	4	664.84	72.16	-664.84	-72.16
	5	664.84	72.16	-664.84	-77.93
21 cm.	1	586.27	75.05	-586.27	-72.16
	2	586.27	69.27	-586.27	-69.27
	3	586.27	72.16	-586.27	-75.05
	4	586.27	77.93	-586.27	-75.05
	5	586.27	77.93	-586.27	-77.93
24 cm.	1	537.92	80.82	-537.92	-72.16
	2	537.92	69.27	-537.92	-77.93
	3	537.92	69.27	-537.92	-63.50
	4	537.92	69.27	-537.92	-63.50
	5	537.92	66.39	-537.92	-63.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รากสายดินแนวนอน

- รูปคลื่น 0.75/14 μ s.
- ความต้านทานจำเพาะสารละลายน้ำเกลือ 367 Ω .cm.
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm. ลึก 8 cm.

ตารางที่ ค.24 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน ภายใต้รูปคลื่น 0.75/14 μ s. ที่ความต้านทานจำเพาะ 367 Ω .cm.

ความยาว	ครั้งที่	กระแสिमพัลส์ขั้วบวก		กระแสिमพัลส์ขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
3 cm.	1	930.78	50.51	-930.78	-49.07
	2	930.78	50.51	-930.78	-49.07
	3	930.78	51.38	-930.78	-43.30
	4	930.78	50.51	-930.78	-43.30
	5	930.78	50.51	-930.78	-43.30
6 cm.	1	628.58	43.01	-616.49	-41.85
	2	628.58	43.01	-616.49	-41.85
	3	628.58	43.01	-616.49	-41.85
	4	628.58	41.56	-616.49	-41.56
	5	628.58	41.56	-616.49	-41.56
9 cm.	1	477.48	40.99	-477.48	-41.13
	2	477.48	40.99	-477.48	-40.99
	3	477.48	40.99	-477.48	-40.99
	4	477.48	40.41	-477.48	-39.26
	5	477.48	40.41	-477.48	-39.26
12 cm.	1	389.84	40.41	-383.79	-39.83
	2	389.84	40.41	-383.79	-39.83
	3	389.84	37.52	-383.79	-35.79
	4	389.84	37.52	-383.79	-35.79
	5	389.84	40.41	-383.79	-35.79

ความยาว	ครั้งที่	กระแสไฟฟ้าขั้วบวก		กระแสไฟฟ้าขั้วลบ	
		Vpeak (V)	Ipeak (A)	Vpeak (V)	Ipeak (A)
15 cm.	1	326.38	36.37	-326.38	-36.37
	2	326.38	36.37	-326.38	-36.37
	3	326.38	34.06	-326.38	-35.79
	4	326.38	34.06	-326.38	-35.79
	5	326.38	36.37	-326.38	-31.75
18 cm.	1	281.05	30.02	-287.09	-37.52
	2	287.09	39.26	-284.07	-30.02
	3	284.07	40.99	-287.09	-31.75
	4	284.07	31.75	-287.09	-32.33
	5	281.05	38.68	-287.09	-34.06
21 cm.	1	253.85	38.10	-259.89	-35.21
	2	253.85	35.79	-256.87	-33.48
	3	253.85	31.17	-262.91	-34.64
	4	250.83	32.91	-259.89	-31.75
	5	253.85	42.14	-259.89	-33.48
24 cm.	1	229.67	33.48	-232.69	-40.41
	2	229.67	30.02	-247.80	-38.10
	3	229.67	34.64	-256.87	-45.03
	4	229.67	43.87	-232.69	-34.64
	5	229.67	43.87	-235.716	-34.64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสาธิต รัตตานนท์ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ.2528 จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ในปีการศึกษา 2550 งานวิจัยที่สนใจได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับรอกสายดินและไฟฟ้าแรงสูง



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย