

## บทที่ 1

### พื้นฐานการต่อลงดิน

#### 1.1 วัตถุประสงค์ของการต่อลงดิน

#### 1.2 ความเข้าใจพื้นฐานของการต่อลงดิน

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปมีความเข้าใจว่าเป็นการต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งอันที่จริงแล้ว การต่อลงดินมีวัตถุประสงค์หลายประการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเป็นการต่อลงดินของระบบแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตาม การต่อลงดินเพื่อความปลอดภัยก็ยังเป็นพื้นฐานที่สำคัญถึงแม้ไม่ใช่ทั้งหมด

#### 1.1 วัตถุประสงค์ของการต่อลงดิน

การต่อลงดิน หมายถึง การนำตัวนำในวงจรบางส่วนต่อลงดินที่พื้นโลก หรือต่อเข้ากับจุดต่อลงดินซึ่งทำเพื่อใช้อ้างอิงเป็นจุดต่อลงดินของระบบไฟฟ้า

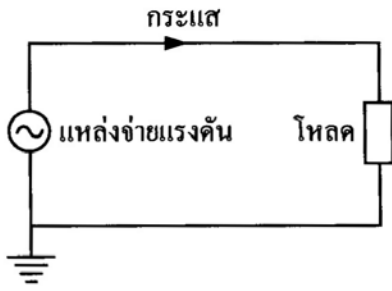
วัตถุประสงค์ของการต่อลงดินในระบบใดๆมักเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อต่อไปนี้ และไม่ว่าการต่อลงดินจะทำเพื่อวัตถุประสงค์ใดก็ตาม ก็จะต้องมีความปลอดภัยเป็นพื้นฐานสำคัญอยู่เสมอ

- ก. เพื่อความปลอดภัย
- ข. เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน
- ค. เพื่อมีคุณภาพไฟฟ้า
- ง. เพื่อให้เกิดความประหยัด

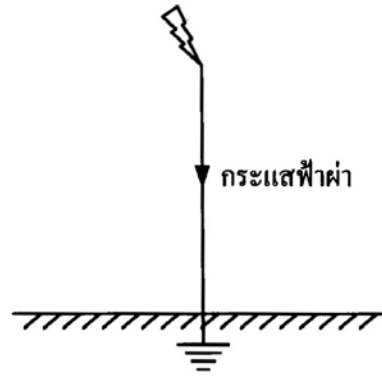
#### 1.2 ความเข้าใจพื้นฐานการต่อลงดิน

##### 1.2.1 กระแสไหลลงดินได้อย่างไร

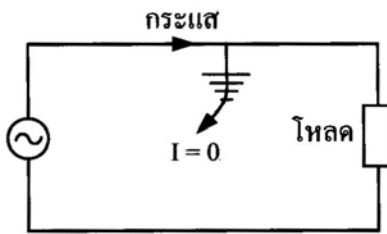
กระแสไหลลงดินเกิดได้ 2 กรณี คือ กระแสที่อยู่ในวงจรไฟฟ้าไหลลงดิน และกระแสฟ้าผ่าไหลลงดิน กระแสทั้งสองกรณีนี้มีความแตกต่างกันคือ ถ้าเป็นกระแสในวงจรไฟฟ้าโดยทั่วไปมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า และกระแสดังกล่าวจะไหลลงดินได้ก็ต่อเมื่อมีการไหลแบบครบวงจร ส่วนกระแสฟ้าผ่าจากฟ้าผ่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุและการเคลื่อนที่ของประจุทำให้เกิดกระแส กระแสในกรณีหลังนี้ไม่จำเป็นต้องครบวงจรเหมือนในวงจรไฟฟ้าตามกรณีแรก



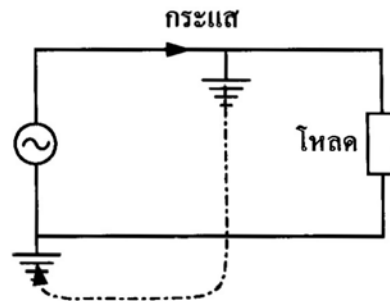
(ก) วงจรไฟฟ้าจ่ายโหลดตามปกติ



(ข) กระแสฟ้าผ่าไหลลงดิน



(ค) กระแสลัดวงจรลงดินแต่ไม่ครบวงจร กระแสจึงเป็นศูนย์



(ง) กระแสลัดวงจรลงดินและครบวงจร ทำให้กระแสลัดวงจรลงดินไม่เป็นศูนย์

รูปที่ 1.2.1.1 แสดงการไหลของกระแสลงดินจากวงจรไฟฟ้าและจากฟ้าผ่า รูปที่ 1.2.1.1 (ก) เป็นวงจรไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีกระแสมาจากแหล่งจ่ายแรงดัน ในรูปนี้ยังไม่ได้แสดงการเดินสายดินไปยังเปลือกนอกหรือตัวถังของโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

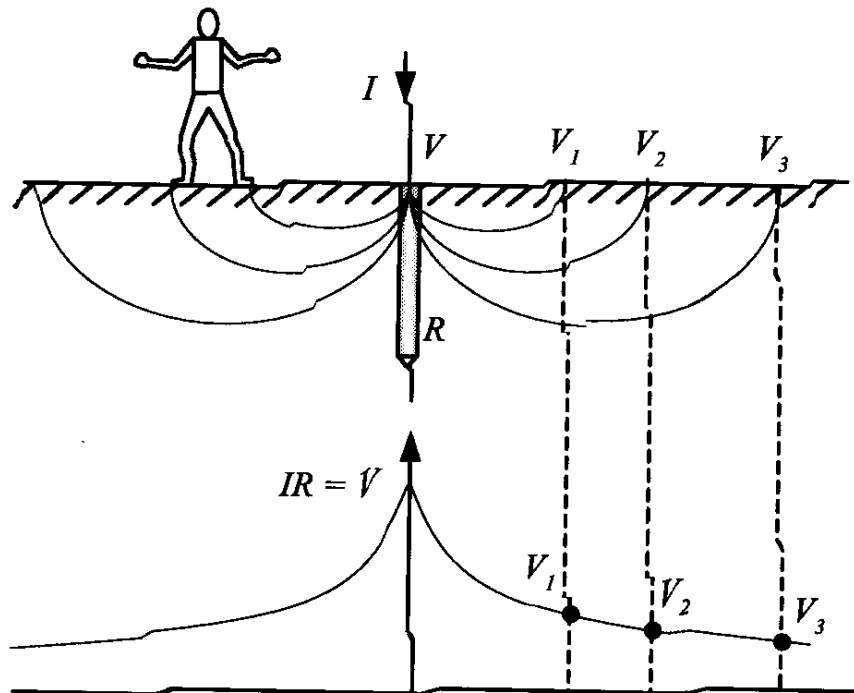
ในรูปที่ 1.2.1.1 (ข) แสดงการไหลของประจุจากก้อนเมฆลงดิน และการไหลของประจุคือการไหลของกระแสนั้นเอง การไหลในรูปนี้ไม่จำเป็นต้องครบวงจรเพราะพื้นฐานเดิมของการเกิดกระแสมาจากการไหลของประจุ

ในรูปที่ 1.2.1.1 (ค) แสดงวงจรไฟฟ้าที่แตกต่างจากรูปที่ 1.2.1.1 (ก) เพราะไม่มีการต่อลงดินที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและเมื่อมีการลัดวงจรลงดินดังในรูป กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไม่มีเส้นทางไหลเพื่อให้ครบวงจร ดังนั้นกรณีนี้กระแสจึงไม่สามารถไหลให้ครบวงจรได้ ทำให้ขนาดกระแสมีค่าเป็นศูนย์ หลักการที่กระแสลัดวงจรลงดินและมีค่ากระแสเป็นศูนย์ทำให้อุปกรณ์ป้องกันต้นทางไม่ทำงานและระบบไฟฟ้ายังสามารถจ่ายไฟฟ้าให้โหลดได้วิธีการนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการให้เกิดการหยุดจ่ายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้านั้นจะไม่มีการต่อลงดิน เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ต้องการหลีกเลี่ยงความเสียหายอย่างมากเมื่อเกิดลัดวงจรลงดินแล้วอุปกรณ์ป้องกันต้นทางตัดไฟทำให้แหล่งจ่ายไฟไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าไปให้โหลดได้

ในรูปที่ 1.2.1.1 (ง) แสดงวงจรไฟฟ้าที่แตกต่างจากรูปที่ 1.2.1.1 (ก) และมีกระแสลัดวงจรลงดินเกิดขึ้น ในกรณีนี้กระแสลัดวงจรทางไหลกลับไปที่แหล่งจ่ายได้ทำให้เกิดครบวงจร ดังนั้นกระแสลัดวงจรลงดินในกรณีนี้จึงมีค่าไม่เป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติถ้ากระแสไหลผ่านดินกลับไปที่แหล่งจ่ายต้นทาง กระแสอาจมีค่าน้อย เพราะดินมีความต้านทาน ในกรณีนี้อุปกรณ์ป้องกันต้นทางอาจไม่เปิดวงจรออก

### 1.2.2 กระแสไหลลงดินทำให้เกิดอันตรายอะไรได้บ้าง

ถ้ามีกระแสไหลลงดิน จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ภาคพื้นดินที่จุดต่างๆ มีค่าต่างกันดังรูปที่ 1.2.2.1 ถ้าเป็นกระแสไหลลงดินที่มาจากวงจรไฟฟ้า กระแสจะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้านทานดินของแท่งสายดินหรือความต้านทานดินที่เกิดจากการต่อลงดินแบบอื่นๆ แต่ถ้าเป็นกระแสไหลลงดินที่มาจากกระแสฟ้าจะถือว่ากระแสฟ้ามีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าที่ภาคพื้นดินมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้านทานดินของแท่งสายดินด้วยเหตุนี้เองเวลาพิจารณาการต่อลงดินของกระแสฟ้าจะต้องพยายามให้ความต้านทานดินมีค่าต่ำที่สุดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น

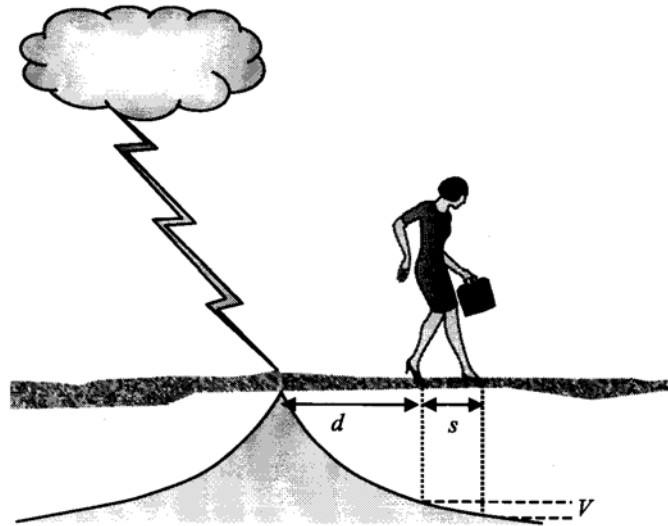


รูปที่ 1.2.2.1 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ภาคพื้นดินเมื่อมีกระแสไหลลงดินผ่านความต้านทานดิน  $R$  ทำให้จุดที่กระแสไหลลงดินมีแรงดันไฟฟ้า  $V=IR$  และแรงดันไฟฟ้าที่ห่างออกไปก็มีค่าน้อยลงเป็น  $V_1, V_2, V_3$  ตามลำดับ ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินหรือความต้านทานดินมีค่าต่ำมาก แรงดันสูงสุด  $V=IR$  ก็มีค่าน้อยลงทำให้แรงดันที่ภาคพื้นดินที่จุดที่เคยเป็นแรงดัน  $V_1, V_2, V_3$  ก็มีค่าน้อยลงด้วย

ในรูปที่ 1.2.2.1 เมื่อมีคนก้าวขาโดยขาข้างหนึ่งอยู่ที่พื้นที่มีแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  และขาอีกขาหนึ่งมีแรงดันไฟฟ้า  $V_2$  ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมระหว่างขามีค่าเท่ากับ  $V_1-V_2$  ถ้าก้าวขาให้กว้างมากขึ้นแรงดันไฟฟ้า

คร่อมระหว่างขาที่มากขึ้น แรงดันคร่อมขาดังกล่าว หรือเรียกว่า แรงดันย่างก้าว (Step Voltage) โดยทั่วไประยะย่างก้าวที่ใช้ในการคำนวณคือ 1 เมตร เพราะถือว่าเป็นระยะย่างก้าวที่ไกลที่สุดแล้วสำหรับมนุษย์ทั่วไป

แรงดันไฟฟ้าย่างก้าวหาได้จากสมการที่คิดจากอิเล็กโตรดที่เป็นครึ่งทรงกลมและมีสมการดังแสดงในสมการที่ (1.2.2.1) และแสดงในรูปที่ 1.2.2.2



รูปที่ 1.2.2.2 แรงดันย่างก้าว  $V$  ที่ระยะห่างจากจุดกระแสดัง  $d$  เมตร

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{s}{d(d+s)} \right]$$

เมื่อ	$V$	แรงดันย่างก้าว (กิโลโวลต์)
	$I$	กระแสลงดิน (กิโลแอมแปร์)
	$\rho$	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
	$d$	ระยะห่างจากจุดที่กระแสลงดิน (เมตร)
	$s$	ระยะย่างก้าว (เมตร) ในการคำนวณ โดยทั่วไปใช้ 1 เมตร

ตัวอย่าง สมมุติกระแสลงดินมีค่า  $20kA$ . ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่า  $100$  โอห์ม-เมตร และยืนห่างจากจุดที่กระแสลงดิน  $30$  เมตร แรงดันย่างก้าวสามารถคำนวณได้ค่าดังนี้

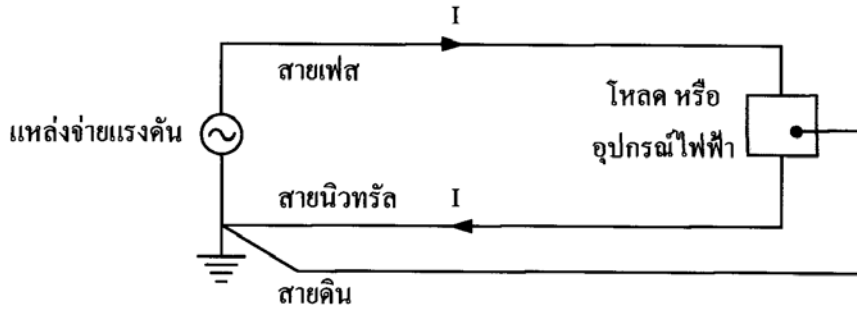
$$V = \frac{20 \times 100}{2\pi} \left[ \frac{1}{30(30+1)} \right]$$

$$= 0.342 \text{ kV.}$$

แรงดันดังกล่าวจะมีอันตรายหรือไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของแรงดันที่เกิดขึ้นด้วย เช่น ถ้าเป็นแรงดันฟ้าผ่าที่มีระยะเวลาของแรงดันสั้นมากเป็น  $\mu s$  หรือไมโครวินาที แรงดันขนาดดังกล่าวก็ไม่มีอันตรายแต่อย่างใด แต่ถ้าเป็นแรงดันในระบบ  $50$  เฮิร์ตซ์ ที่กระแสไหลต่อเนื่องก็ย่อมมีอันตราย สำหรับอันตรายที่เกิดจากขนาดกระแสและระยะเวลาจะมีรายละเอียดกล่าวไว้ในบทต่อไป

### 1.2.3 การต่อลงดินของอุปกรณ์

ที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นเกี่ยวกับการต่อลงดินมักเป็นการต่อลงดินของระบบ ส่วนการต่อลงดินของอุปกรณ์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยจะได้กล่าวไว้ในที่นี้ เพราะเป็นพื้นฐานการต่อลงดินที่ควรทำความเข้าใจ พิจารณารูปที่ 1.2.3.1 มีสายสามเส้นจากแหล่งจ่ายไฟมาที่โหลด คือ สายเฟส สายนิวทรัล และสายดิน



รูปที่ 1.2.3.1 การต่อลงดินของอุปกรณ์

การต่อลงดินของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1.2.3.1 ก็เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับคนที่สัมผัสเปลือกนอกของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะหรือเป็นตัวนำทางไฟฟ้า ถ้าเปลือกนอกของอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นฉนวนก็ไม่จำเป็นต้องเดินสายดินมาที่อุปกรณ์ เพียงแต่เดินสายเฟสและสายนิวทรัลก็พอ ตัวอย่างเช่น เครื่องเป่าผม ที่เราใช้ทุกวันไม่มีสายดิน บางท่านไปเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์ดังกล่าวทำมาไม่มีคุณภาพเพราะไม่มีสายดิน แต่อันที่จริงแล้วอุปกรณ์ที่เปลือกนอกไม่ใช่โลหะไม่จำเป็นต้องมีสายดินก็ได้ แต่ทั้งนี้ต้องให้ผ่านการทดสอบมาก่อนว่าเปลือกนอกของอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าวเป็นฉนวนและมีความเหมาะสมในการใช้โดยไม่ต้องมีสายดิน

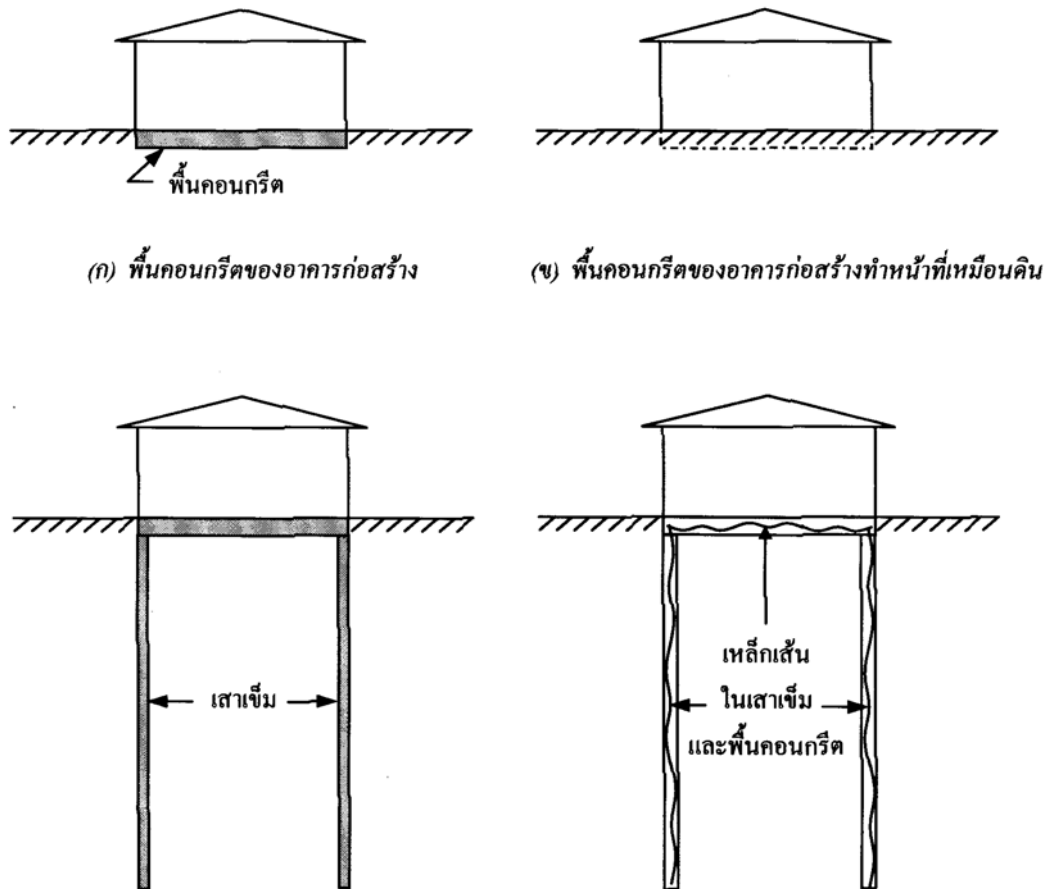
ในรูปที่ 1.2.3.1 สายดินและสายนิวทรัลมีจุดเริ่มต้นที่เดียวกันจากแหล่งจ่ายต้นทาง แต่ต่างกันที่ว่าสายนิวทรัลมีไว้เพื่อรองรับกระแสที่ไหลกลับจากอุปกรณ์ ส่วนสายดินต้องไม่มีกระแสไหลผ่านในกรณีที่ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นตามปกติ และเมื่อสายดินไม่มีกระแสไหลผ่านทำให้ที่เปลือกนอกของอุปกรณ์ไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์เท่ากับแท่งสายดินที่ต้นทางของแหล่งจ่ายไฟ วิธีการดังกล่าวมีไว้สำหรับการตรวจงานติดตั้งสายดิน ไม่ว่าจะป็นในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรม นั่นคือ ถ้าเรานำมิเตอร์วัดกระแสแบบคล็อง (*Clip-Amp Meter*) มาคล้องสายดินในระบบไฟฟ้าที่จุดใดๆ ก็ตามต้องไม่มีกระแสไหล เพราะสายดินถูกออกแบบมาไม่ให้มีกระแสไหลผ่าน เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าตามปกติ

อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีสายดินเสมอไป และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นต้องมีสายดินต้องมีเปลือกนอกเป็นฉนวนพร้อมทั้งผ่านการทดสอบและยอมรับว่าใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยไม่ต้องมีสายดิน อุปกรณ์ไฟฟ้าอีกประเภทที่ไม่ต้องมีสายดินคือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำไม่มากกว่า 50 โวลต์ แต่ถ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลือกนอกเป็นโลหะ จำเป็นต้องมีสายดินมาต่อที่เปลือกนอกของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับคนที่สัมผัสเมื่อมีกระแสไฟฟ้ารั่วจากอุปกรณ์ไฟฟ้าลงไปที่เปลือกนอกของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ

#### 1.2.4 คอนกรีตมีผลอย่างไรต่อระบบการต่อลงดิน

ปัจจุบันได้มีการฝังแท่งตัวนำในพื้นที่คอนกรีตแทนแท่งสายดิน คือฝังในแนวราบกับพื้นคอนกรีตของอาคารก่อสร้างแทนที่จะต้องปักแท่งสายดินในแนวตั้ง คำถามก็เกิดขึ้นเสมอว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติอย่างไรและกระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำที่ฝังในคอนกรีตจะไหลลงดินได้อย่างไร

ได้มีการค้นคว้าวิจัยเรื่องคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีตโดยหาทั้งความนำความต้านทานจำเพาะปรากฏว่าความต้านทานจำเพาะของคอนกรีตที่มีส่วนผสมแตกต่างกันและมีความชื้นต่างกันั้นก็มีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ระหว่าง 30 – 150 โอห์ม-เมตร และสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตทำหน้าที่เหมือนดินทุกประการ โดยมีความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของคอนกรีต 100 โอห์ม-เมตร



รูปที่ 1.2.4.1 พื้นคอนกรีตและเสาเข็มเพื่อใช้กับงานต่อลงดินในระบบไฟฟ้า

พิจารณารูปที่ 1.2.4.1 (ก) แสดงอาคารก่อสร้างที่มีพื้นคอนกรีตฝังในดิน ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินและคอนกรีตมีค่าเท่ากันก็สามารถแทนคอนกรีตส่วนนั้นด้วยดินดังแสดงในรูปที่ 1.2.4.4 (ข) ส่วนในรูปที่ 1.2.4.1 (ค) แสดงเสาเข็มของอาคารก่อสร้างที่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กเส้น ถ้าเราพิจารณาคอนกรีตเหมือนดินก็จะได้เหล็กเส้นทำหน้าที่เหมือนแท่งสายดิน ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าแท่งสายดิน 3 เมตรที่ใช้งานทั่วไป ด้วยเหตุนี้งานออกแบบสมัยใหม่จึงมักใช้เสาเข็มและประโยชน์ของเหล็กเส้นในคอนกรีตมาเป็นตัวนำในระบบไฟฟ้า ส่วนกระแสที่ไหลผ่านเหล็กเส้นจะมีขนาดมากพอที่จะทำให้คอนกรีตแตกหักภายในหรือไม่นั้น จากข้อมูลที่เคยมีการใช้และบันทึก ยังไม่เคยปรากฏว่ามีคอนกรีตแตกหักเนื่องจากกระแสไฟฟ้า ถึงแม้จะเป็นกระแสฟ้าผ่าก็ตาม ทั้งนี้

เป็นเพราะกระแสฟ้าผ่าไหลไปตามเหล็กเส้นจำนวนมากในอาคารก่อสร้าง ทำให้กระแสที่ไหลในเหล็กเส้นแต่ละเส้นมีค่าน้อยมาก แต่ทั้งนี้การออกแบบโดยใช้เหล็กเส้นของอาคารเป็นส่วนหนึ่งของตัวนำในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องได้รับคำยินยอมจากวิศวกร โครงสร้างก่อนเสมอทุกครั้ง

## บทที่ 2

### การวัดความต้านทานดินและความต้านทานจำเพาะของดิน

- 2.1 การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน
- 2.2 ความต้านทานของอิเล็กโทรด
- 2.3 ความต้านทานแท่งอิเล็กโทรดหลายชุดขนานกัน
- 2.4 การวัดความต้านทานดิน
- 2.5 อิมพีแดนซ์ของดินตามเวลาเมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์
- 2.6 อิมพีแดนซ์ของดินเนื่องจากสัญญาณอิมพัลส์เทียบกับความต้านทานของเครื่องวัด
- 2.7 ความต้านทานดินกับความลึกของการฝังแท่งหลักดิน

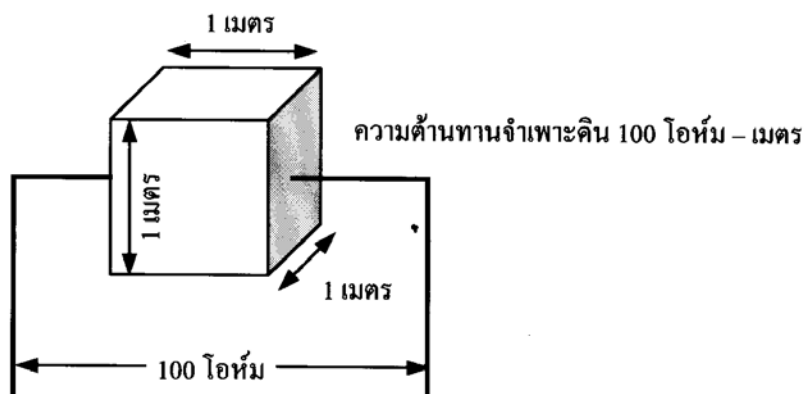
ความต้านทานดินมีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าในแง่ของคุณภาพไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีผลเกี่ยวข้องกับเรื่องความปลอดภัยในการทำงานเป็นอย่างมากถ้าต้องการให้มีการต่อลงดินที่ดี ต้องให้ความต้านทานดินต่ำ

ความต้านทานดินขึ้นกับลักษณะของสัญญาณกระแสที่ลงดินด้วย ถ้าเป็นความต้านทานดินหรือความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดจากเครื่องวัดเป็นค่าของสัญญาณต่อเนื่อง แต่ถ้ากระแสที่ไหลลงดินมีสัญญาณเป็นอิมพัลส์ ค่าความต้านทานดินก็มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทั้งค่าความต้านทานดินที่วัดจากเครื่องวัดและความต้านทานดินที่แปรเปลี่ยนไปตามสัญญาณกระแสอิมพัลส์เนื่องจากฟ้าผ่า

ปริมาณน้ำฝน ความร้อน ความชื้น และลมมีผลต่อดินเฉพาะในส่วนที่มีความลึกอยู่ระหว่าง 0 – 1.5 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีการแปรเปลี่ยนมากที่สุด ความชื้นของดินประมาณ 5 – 40 % (โดยน้ำหนัก) ความนำจะมีค่าสูงมาก เมื่อความชื้นมีค่าถึง 14 – 18% และส่วนประกอบของเกลือมีผลมากในดินที่ลึกลงไปมากกว่าที่ผิว

#### 2.1 การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานจำเพาะของดิน 100 โอห์ม – เมตร หมายถึง ความต้านทานของดินที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร โดยวัดระหว่างผิวหน้าตรงข้ามได้ 100 โอห์ม



รูปที่ 2.1.1 ความหมายของความต้านทานจำเพาะดิน 100 โอห์ม – เมตร



ความต้านทานจำเพาะของดินไม่สามารถบอกได้ด้วยชนิดของดินเพราะค่าความต้านทานจำเพาะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากองค์ประกอบหลายอย่าง ทำให้ต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะแต่ละพื้นที่ และแต่ละฤดูกาลด้วย

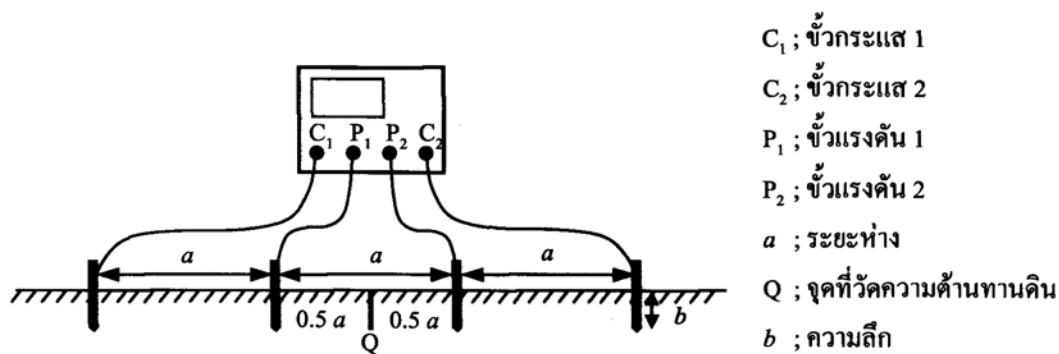
การวัดความต้านทานจำเพาะในปัจจุบันใช้วิธี *Wenner* ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1.2 ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยมีปลายแหลมสี่ชุดวางห่างเท่ากันด้วยระยะ  $a$  เมตร ลึก  $b$  เมตร เครื่องวัดโดยทั่วไปแนะนำให้ฝังลึก 0.3 – 0.5 เมตร เมื่ออ่านค่าความต้านทานจากเครื่องวัดแล้ว ให้คำนวณความต้านทานจำเพาะจากสมการดังนี้

$$\rho_a = \left[ \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \right] \text{ (โอห์ม-เมตร)}$$

- เมื่อ  $a$  ระยะห่างระหว่างปลายแหลม (เมตร)  
 $b$  ความลึกของแท่งปลายแหลมที่ฝังดิน (เมตร)  
 $R$  ความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (โอห์ม)

กรณีที่ระยะห่าง  $a$  มีค่ามากกว่าความลึก  $b$  มาก ( $a \gg b$ ) สมการที่ (2.1.1) สามารถเขียนได้ใหม่ตามสมการที่ (2.1.2)

$$\rho = 2\pi a R \quad \text{(โอห์ม - เมตร)} \quad (2.1.2)$$



รูปที่ 2.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่ขั้ว

การเพิ่มระยะ  $a$  ให้มากขึ้นทำให้กระแสที่ไหลลึกลงไปในดินมากขึ้น โดยทั่วไประยะระหว่างอิเล็กโทรดเป็นตัวกำหนดความลึกของดินที่ต้องการ วัดความต้านทานจำเพาะ เช่น ระยะ  $a = 3$  เมตร เป็นการวัดความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินด้านบนที่ลึก 3 เมตร

ตารางที่ 2.1.1 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดินหรือหินชนิดต่างๆ และตารางที่ 2.1.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นผิว

ตารางที่ 2.1.1 ความต้านทานจำเพาะของดินหรือหิน [1]

ชนิดของดินหรือหิน	ความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม – เมตร)	
	แห้ง	ชื้น
Crusher run granite with fines (N.C)	$140 \times 10^6$	1,300 น้ำในดิน : 45 Ω·m
1.5" crusher run granite (Ga.) with fines	4,000	1,200 น้ำฝน : 100 Ω·m
0.75"–1" granite (Calif.) with fines	–	6,513 10 นาทีหลังฝนตก : 45 Ω·m
#4(1"–2") washed granite (Ga.)	$1.5 - 4.5 \times 10^6$	5,000 น้ำฝน : 100 Ω·m
#3(2"–4") washed granite (Ga.)	$2.6 - 3 \times 10^6$	10,000 น้ำฝน : 100 Ω·m
Size unknown, washed limestone (Mich.)	$7 \times 10^6$	2,000 – 3,000 น้ำในดิน : 45 Ω·m
Washed granite, similar to 0.75" gravel	$2 \times 10^6$	10,000
Washed granite, similar to pea gravel	$40 \times 10^6$	5,000
#57 (0.75") washed granite	$190 \times 10^6$	8,000 น้ำในดิน : 45 Ω·m
Asphalt	$2 - 30 \times 10^6$	$10,000 - 6 \times 10^6$
Concrete	$1 \times 10^6 - 9 \times 10^9$	21 – 100

หมายเหตุ อ้างอิงจาก IEEE-80 Guide for Safety in AC Substation Grounding

ตารางที่ 2.1.2 ความต้านทานจำเพาะของพื้นผิว (1)

ชนิดดิน	ความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (โอห์ม – เมตร)
ดินอินทรีย์เปียก	10
ดินชื้น	100
ดินแห้ง	1,000
หิน	10,000

หมายเหตุ อ้างอิงจาก IEEE-80 Guide for Safety in AC Substation Grounding

**2.2 ความต้านทานของอิเล็กโทรด**

อิเล็กโทรดเป็นตัวนำที่นำกระแสแสดงดิน และความต้านทานของอิเล็กโทรดหาได้จากการพิจารณาครึ่งทรงกลมของดินที่อยู่รอบๆ อิเล็กโทรด

เริ่มต้นจากการพิจารณาความต้านทานของทรงกลม ซึ่งมีความต้านทานตามสมการดังนี้

$$R_s = \frac{\rho}{4\pi r}$$

- เมื่อ  $R_s$  ความต้านทานของทรงกลม (โอห์ม – เมตร)
- $\rho$  ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม)
- $r$  รัศมีของทรงกลม (เมตร)

ความต้านทานของครึ่งทรงกลมมีค่าเป็นสองเท่าของความต้านทานทรงกลมตามสมการดังนี้

$$R_{HS} = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{\pi D}$$

- เมื่อ  $R_{HS}$  ความต้านทานของครึ่งทรงกลม (โอห์ม – เมตร)
- $D$  เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม (เมตร)

สมการที่ (2.2.2) สามารถนำไปใช้ในการคำนวณความต้านทานโดยประมาณของโครงสร้างขนาดใหญ่ที่เป็นโครงโลหะฝังดิน เช่น คอนกรีตขนาดใหญ่ได้ดิน โดยค่า  $D$  คำนวณจากสมการดังนี้

$$D = 1.57 \times \sqrt[3]{V}$$

- เมื่อ  $V$  ปริมาตรของดินหรือโครงสร้างคอนกรีต (ลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 2.2.1 ความต้านทานดินสำหรับอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ในดินหรือหินชนิดต่างๆ

ชนิดของดินหรือหิน	ความต้านทานดิน (โอห์ม) สำหรับอิเล็กโทรดแบบต่างๆ							
	แบบแท่ง <sup>1</sup> หรือท่อ <sup>2</sup> ความยาว (ม.)			แบบบารี่ <sup>3</sup> หรือสาย <sup>4</sup> ความยาว (ม.)			แบบแผ่นโลหะ พื้นที่ (ตร.ม.)	
	1	2	5	10	50	100	0.5	1.0
ดินเหนียวร่วน	20	15	6	6	2	1	10	8
ดินเหนียว	70	40	20	20	5	3	35	25
ทรายชั้น	140	80	40	40	10	6	70	50
กรวดชั้น	350	200	100	100	25	15	180	139
ทรายกรวดแห้ง	700	400	200	200	50	30	250	250
หิน	2,100	1,200	600	600	150	90	1,000	750

หมายเหตุ

1. แท่งเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม. ชูปทองแดงหนา 2.5 มม. หรือ เหล็กแผ่นหนา 7 มม. ขนาด 65x 65 มม.ม้วน
2. ท่อทองแดงหน้า 3 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มม.
3. บาร์ทองแดง พื้นที่หน้าตัด 50 ตร.มม. หรือ บาร์เหล็ก พื้นที่หน้าตัด 100 ตร.มม.
4. สายทองแดง พื้นที่หน้าตัด 35 ตร.มม. หรือ สายเหล็ก พื้นที่หน้าตัด 95 ตร.มม.

### 2.3 ความต้านทานแท่งอิเล็กโทรดหลายชุดขนานกัน

อิเล็กโทรดที่ปักลงในดินหลายชุดขนานกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3.1 โดยทั่วไปจะปักให้มีระยะห่างของอิเล็กโทรดเท่ากับ 1 – 1.5 เท่าของความยาวแท่งอิเล็กโทรด เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเรื่องคัปปลิง (Coupling) ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดหลายชุดขนานกันเป็นไปตามตารางที่ 2.3.1 โดยอิเล็กโทรดที่ขนานกันเป็นจำนวนมากนั้นจะวางเรียงเป็นแนวยาวหรือล้อมรอบเป็นวงกลมก็ได้



รูปที่ 2.3.1 อิเล็กโทรดวางแบบชุดเดียวหรือหลายชุดขนานกัน

ตัวคูณความต้านทานอิเล็กโทรดตามตารางที่ 2.3.1 มีประโยชน์คือ ทำให้ทราบหรือคาดการณ์ล่วงหน้าได้ว่า กรณีมีอิเล็กโทรดหนึ่งแท่งซึ่งมีค่าความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งแล้ว ถ้าต้องการเพิ่มอิเล็กโทรดมากขึ้นค่าความต้านทานที่ได้จะเป็นอย่างไร ในทางปฏิบัติทั่วไปที่ทำอยู่ คือ เมื่อปักแท่งหลักดินไปหนึ่งแท่ง และวัดค่าความต้านทานไม่ได้ตามที่กำหนด ก็จะไปปักเพิ่มไปเรื่อยๆ โดยไม่ทราบล่วงหน้าว่าถ้าปักแท่งดินเพิ่มอีกจะได้ค่าความต้านทานเป็นอย่างไร ซึ่งการปฏิบัติในลักษณะดังกล่าวเป็นงานที่ไม่ได้นำการวิเคราะห์เข้ามาช่วยเลย

ปัจจุบันมีช่างหรือวิศวกรบางส่วนที่ทำการปักแท่งอิเล็กโทรดไว้ล่วงหน้า 3 ชุด ขนานกันและไม่ได้วัดความต้านทานดินด้วยว่ามีค่าเท่าไร คือ ปักเสร็จก็ถือว่าเสร็จงานแล้ว งานดังกล่าวยิ่งทำไปก็ยิ่งไม่มีคุณภาพ และก็มิใช่ช่างและวิศวกรจำนวนมากที่ไม่รู้จักหรือบางครั้งอาจไม่เคยเห็นเครื่องมือวัดความต้านทานดินเลย เพราะไม่ได้เสาะแสวงหาความรู้เพิ่มเติม

ตารางที่ 2.3.1 ค่าตัวคูณความต้านทานอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยว

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

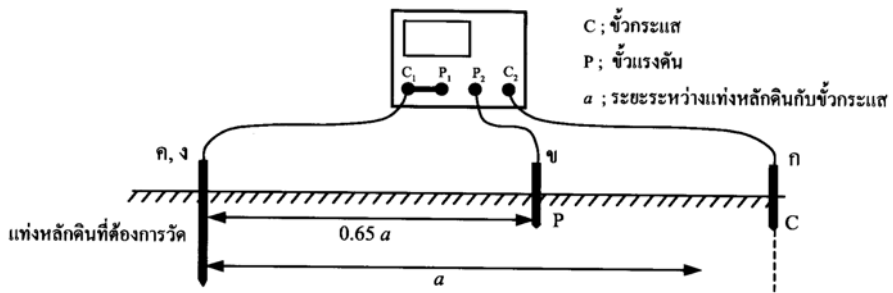
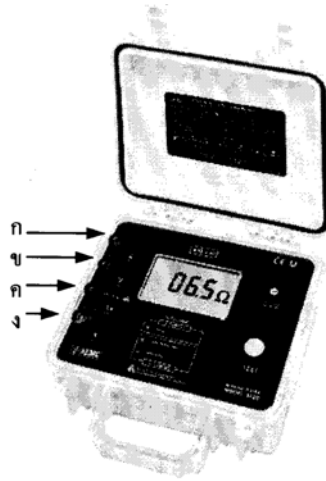
แบบฝึกหัดที่ 2.3.1 แท่งหลักดินหนึ่งแท่งยาว 3 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5/8 นิ้ว มีค่าความต้านทานดิน 50 โอห์ม ถ้าต้องการให้ความต้านทานดินที่ได้ มีค่าต่ำกว่า 20 โอห์ม ต้องปักแท่งหลักดินทั้งหมดประมาณกี่แท่ง ?

## 2.4 การวัดความต้านทานดิน

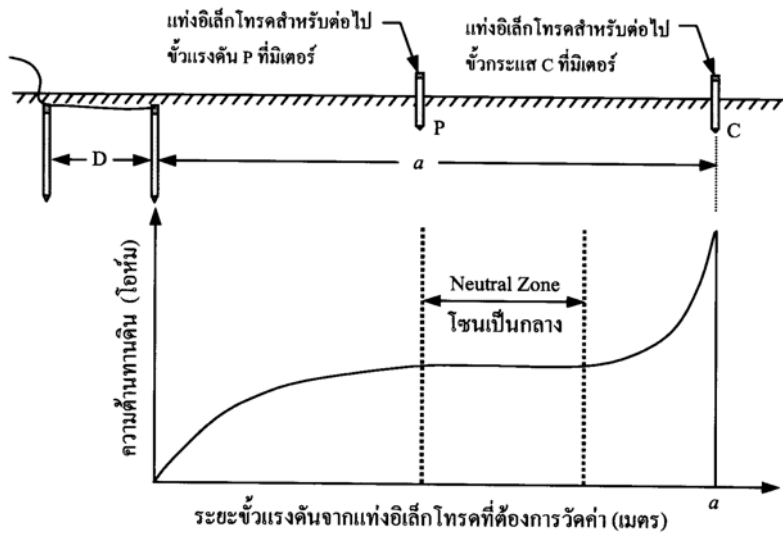
การวัดความต้านทานดินมีหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีความถูกต้องแตกต่างกันไป ความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับขนาดกระแส ถ้าต้องการวัดความต้านทานดินสูงมากกว่า 1,000 โอห์ม – เมตร ก็ต้องเพิ่มวิธีการเพื่อเพิ่มขนาดกระแสให้สูงขึ้น

รูปที่ 2.4.1 แสดงวิธีการวัดความต้านทานดินแบบสามขั้ว ซึ่งมีเตอร์ในรูปแบบเป็นมิเตอร์ที่ใช้วัดได้ทั้งการหาความต้านทานจำเพาะแบบสี่ขั้ว หรือการวัดหาความต้านทานดินของอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบสามขั้ว โดยขั้ว ก. และ ง. เป็นขั้วกระแส ส่วนขั้ว ข. และ ค. เป็นขั้วแรงดัน ถ้าต้องการวัดความต้านทานดินแบบสามขั้วก็ให้ต่อขั้ว ค. และ ง. เข้าด้วยกันเพื่อไปต่อกับแท่งหลักดินหรืออิเล็กทรอนิกส์โทรดที่ต้องการวัดค่า การวัดความต้านทานดินแบบสามขั้วได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4.1 โดยให้วางขั้วแรงดัน  $P$  ห่างจากแท่งหลักดินที่ต้องการวัดประมาณ 65% ของระยะระหว่างขั้วกระแสและแท่งหลักดิน  $a$  หรือ 0.65 เท่าของระยะทาง  $a$  ในกรณีที่ต้องการวัดความต้านทานของการต่อลงดินทั้งระบบ ระยะ  $a$  ต้องมีค่ามากกว่าสิบเท่าของระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์โทรดจึงจะได้ค่าการวัดที่ถูกต้องมากขึ้น

ระยะขั้วแรงดัน  $P$  ที่กำหนดไว้ให้เป็นประมาณ 65% ของระยะ  $a$  นั้น สามารถทดสอบได้โดยให้เลื่อนขั้วแรงดัน  $P$  ไปมาระหว่างระยะ  $a$  จนกระทั่งความต้านทานดินที่อ่านได้จากเครื่องมือเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินและระยะขั้วแรงดันจากแท่งหลักดินดังแสดงในรูปที่ 2.4.2



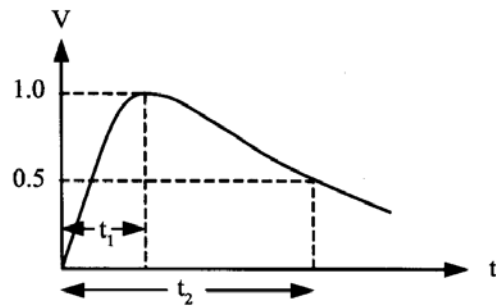
รูปที่ 2.4.1 การวัดความต้านทานดินแบบสามขั้ว



รูปที่ 2.4.2 กราฟแสดงความต้านทานดินของอิเล็กโทรดเมื่อมีการเลื่อนขั้วแรงดัน P

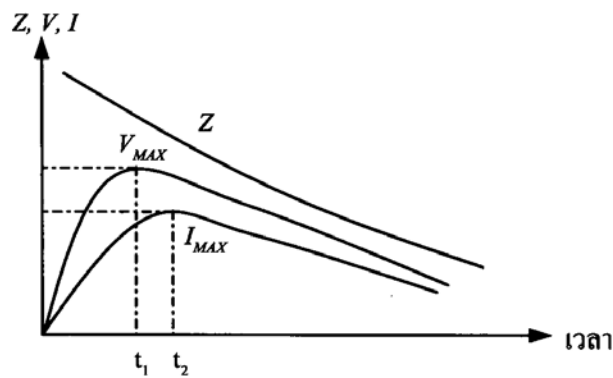
**2.5 อิมพีแดนซ์ของดินตามเวลาเมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์**

ลักษณะคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่านแสดงไว้ในรูปที่ 2.5.1 ลักษณะคลื่นแบบนี้เรียกว่าอิมพัลส์ (Impulse) คลื่นอิมพัลส์สามารถกำหนดขนาดโดยบอกเป็น  $t_1/t_2$  โดย  $t_1$  คือเวลาหน้าคลื่น และ  $t_2$  คือเวลาหลังคลื่น มีหน่วยเป็นไมโครวินาที  $t_2$  ซึ่งเป็นเวลาหลังคลื่นนับจากเวลาเริ่มต้นจนถึงจุดที่แรงดันไฟฟ้าลดลงมาที่  $0.5 p.u.$



รูปที่ 2.5.1 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอิมพัลส์  $t_1/t_2$   $\mu s$

อิมพีแดนซ์ของดินเมื่อสัญญาณกระแสเป็นอิมพัลส์มีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับช่วงขณะสัญญาณแรงดันและกระแสในช่วงนั้นว่ามีค่าเท่าใด จากงานวิจัยที่ได้มีการวัดอิมพีแดนซ์ของดินเมื่อป้อนด้วยสัญญาณอิมพัลส์จะได้รูปร่างคลื่นของแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเมื่อต้องการนำอิมพีแดนซ์ของดินมาคิดก็ให้คิดที่ค่าแรงดันและกระแสสูงสุดมาคำนวณอิมพีแดนซ์ แม้จะไม่ได้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.5.2



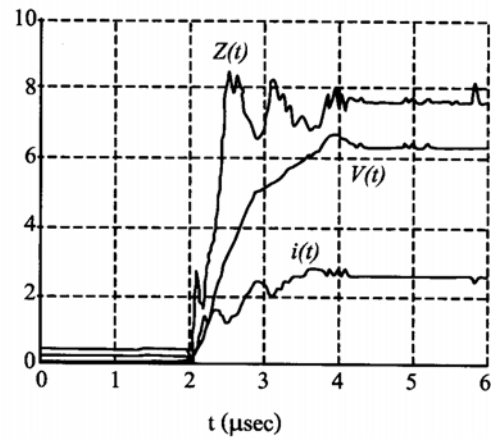
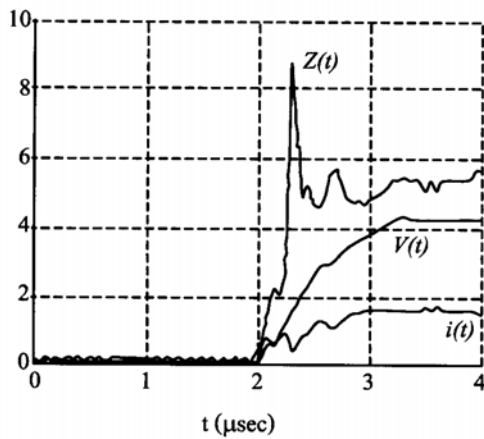
รูปที่ 2.5.2 อิมพีแดนซ์ของดินเมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสเป็นอิมพัลส์

อิมพีแดนซ์ของดิน 
$$Z = \frac{V_{MAX}}{I_{MAX}}$$

เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ที่ได้จากงานวิจัย (2) ด้วยการป้อนสัญญาณกระแสอิมพัลส์  $8/20 \mu s$   $3 kA$  ทำให้ได้รูปร่างคลื่นแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์ของดินแปรเปลี่ยนตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.5.3 และรูปที่ 2.5.4 โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่ามากที่สุดไม่ได้เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณแรงดันหรือกระแสมีค่าสูงสุด อิมพีแดนซ์ของดินที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากกระแสอิมพัลส์มีค่าไม่สูงมากพอที่จะทำให้ดินไอออไนซ์หรือแตกตัวจาก

รูปที่ 2.5.3 และรูปที่ 2.5.4 ต้องการให้ทราบเพียงว่าอิมพีแดนซ์ของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ไม่ได้มีค่าคงที่ เหมือนความต้านทานดินที่วัดได้จากเครื่องวัด

รูปที่ 2.5.3 แสดงรูปร่างคลื่นของแรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ตามเวลาของแท่งหลักดินแท่งเดียว ส่วนรูปที่ 2.5.4 แสดงรูปร่างคลื่นของแรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ตามเวลาของแท่งหลักดินสามแท่งวางขนานกัน



(ก) ความต้านทานดินที่วัดได้ 15.7 โอห์ม

ค่าต่างๆที่อ่านได้ในรูปให้คูณแฟกเตอร์ โดย ;

$Z(t)$  คูณด้วย 35 โอห์ม

$V(t)$  คูณด้วย 700 โวลต์

$i(t)$  คูณด้วย 10 แอมแปร์

(ข) ความต้านทานดินที่วัดได้ 33.1 โอห์ม

ค่าต่างๆที่อ่านได้ในรูปให้คูณแฟกเตอร์ โดย ;

$Z(t)$  คูณด้วย 40 โอห์ม

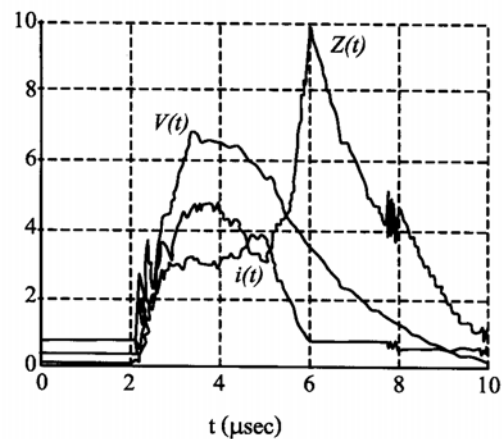
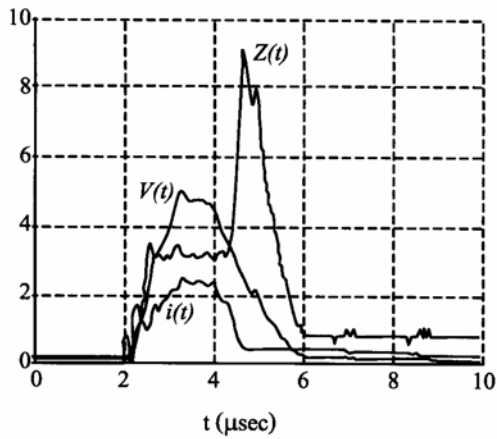
$V(t)$  คูณด้วย 500 โวลต์

$i(t)$  คูณด้วย 5 แอมแปร์

รูปที่ 2.5.3 แรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ของแท่งหลักดินแท่งเดียว

เมื่อสัญญาณที่ป้อนเป็นอิมพัลส์ 8/20 , 3kA.





(ก) ความต้านทานดินของชุดหลักดินวัดได้ 9.9 โอห์ม  
ค่าต่างๆที่อ่านได้ในรูปให้คูณแฟกเตอร์ โดย ;

- Z(t) คูณด้วย 50 โอห์ม
- V(t) คูณด้วย 800 โวลต์
- i(t) คูณด้วย 10 แอมแปร์

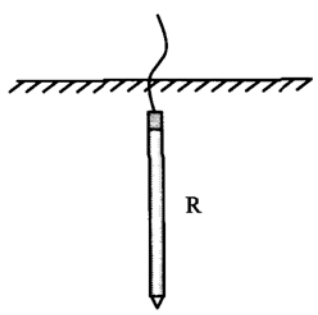
(ข) ความต้านทานดินของชุดหลักดินวัดได้ 15.4 โอห์ม  
ค่าต่างๆที่อ่านได้ในรูปให้คูณแฟกเตอร์ โดย ;

- Z(t) คูณด้วย 55 โอห์ม
- V(t) คูณด้วย 600 โวลต์
- i(t) คูณด้วย 5 แอมแปร์

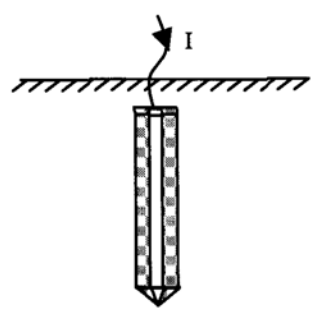
รูปที่ 2.5.4 แรงดัน กระแส และค่าอิมพีแดนซ์ของแท่งหลักดินสามแท่งวางขนานกัน  
เมื่อสัญญาณที่ป้อนเป็นอิมพัลส์ 8/20 , 3kA.

**2.6 อิมพีแดนซ์ของดินเนื่องจากสัญญาณอิมพัลส์เทียบกับความต้านทานจากเครื่องวัด**

อิมพีแดนซ์ของดินเนื่องจากสัญญาณอิมพัลส์มีค่าน้อยกว่าความต้านทานดินที่วัดได้จากเครื่องมือวัด  
ทั้งนี้เป็นเพราะกระแสอิมพัลส์ส่วนใหญ่มีขนาดสูงทำให้ดินรอบแท่งหลักดินเกิดการไอออไนซ์หรือแตกตัว ทำให้  
เหมือนกับแท่งหลักดินมีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6.1 ทำให้ความต้านทานดินมีค่าลดลงเพราะแท่งหลัก  
ดินที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ความต้านทานดินลดลง



(ก) แท่งหลักดินในภาวะปกติ

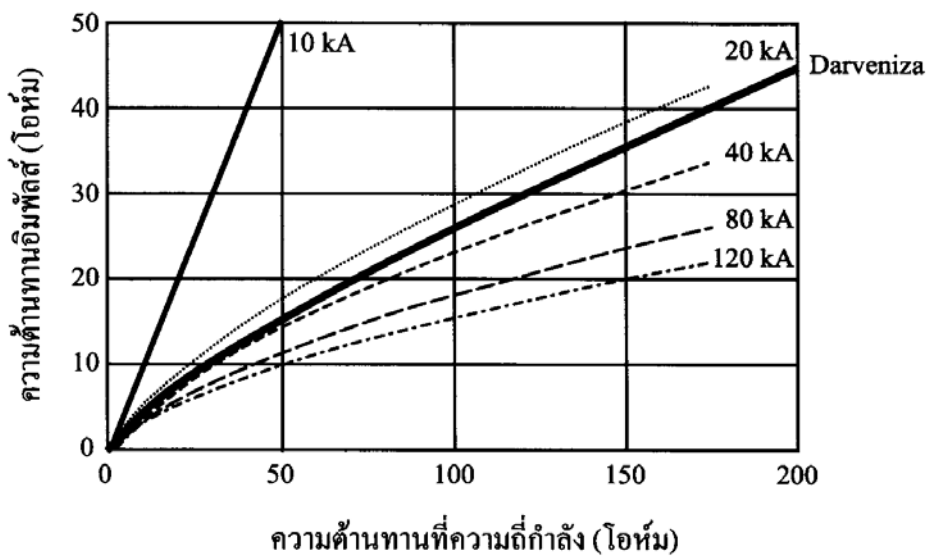


(ข) เมื่อมีกระแสสูงไหลผ่าน  
ทำให้ดินรอบแท่งหลักดินเกิดการไอออไนซ์

รูปที่ 2.6.1 แท่งหลักดินในภาวะปกติและภาวะที่มีกระแสสูงไหลผ่าน

ความต้านทานจำเพาะของดินยิ่งสูงก็ทำให้ความต้านทานดิน  $R$  มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีกระแส  $I$  ไหลผ่านทำให้  $V = IR$  มีค่าสูงมากก็เกิดไอออนไนซ์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ดินที่มีความต้านทานจำเพาะสูงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้ความต้านทานอิมพัลส์ลดลงได้มากเมื่อเทียบกับความต้านทานดินที่ได้จากเครื่องวัด และถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นแรงดัน  $V$  ที่ทำให้เกิดไอออนไนซ์ก็มากขึ้น สรุปได้ว่าถ้ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้น หรือความต้านทานจำเพาะของดินมากขึ้น ทำให้ความต้านทานอิมพัลส์ลดลงได้มากเมื่อเทียบกับความต้านทานดินที่วัดได้จากเครื่องวัด

รูปที่ 2.6.2 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์เทียบกับความต้านทานกระแสสลับขนาดต่างๆ ที่ความถี่กำลัง ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่ากระแสที่ 10 กิโลแอมแปร์ จะให้ค่าความต้านทานอิมพัลส์เท่ากับความต้านทานกระแสสลับ

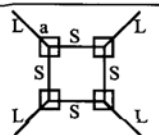
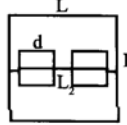
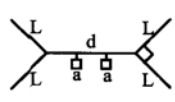
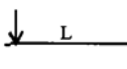
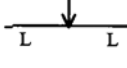



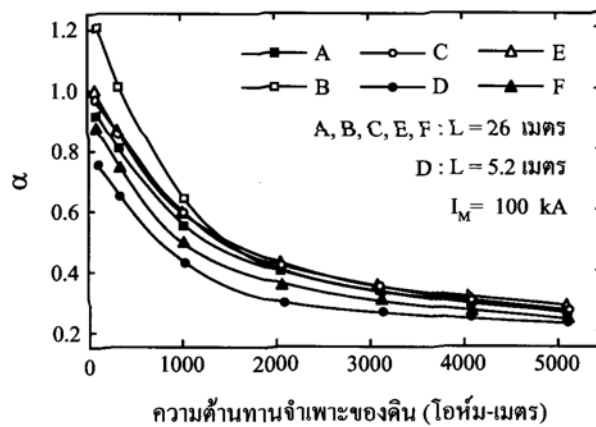
รูปที่ 2.6.2 ความต้านทานอิมพัลส์เทียบกับความต้านทานกระแสสลับเมื่อกระแสมีขนาดต่างๆ ที่ความถี่กำลัง

ตารางที่ 2.6.1 แสดงรูปแบบการต่อลงดินของโครงสร้างเสาแบบต่างๆ และรูปที่ 2.6.3 แสดงความต้านทานดินอิมพัลส์เมื่อเทียบกับความต้านทานดินที่กระแสสลับตามความต้านทานจำเพาะของดินและกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับโครงสร้างเสาในตารางที่ 2.6.1

ตารางที่ 2.6.1 การจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างเสาแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.6.1 การจำลองการต่อลงดินของโครงสร้างเสาแบบต่างๆ [4]

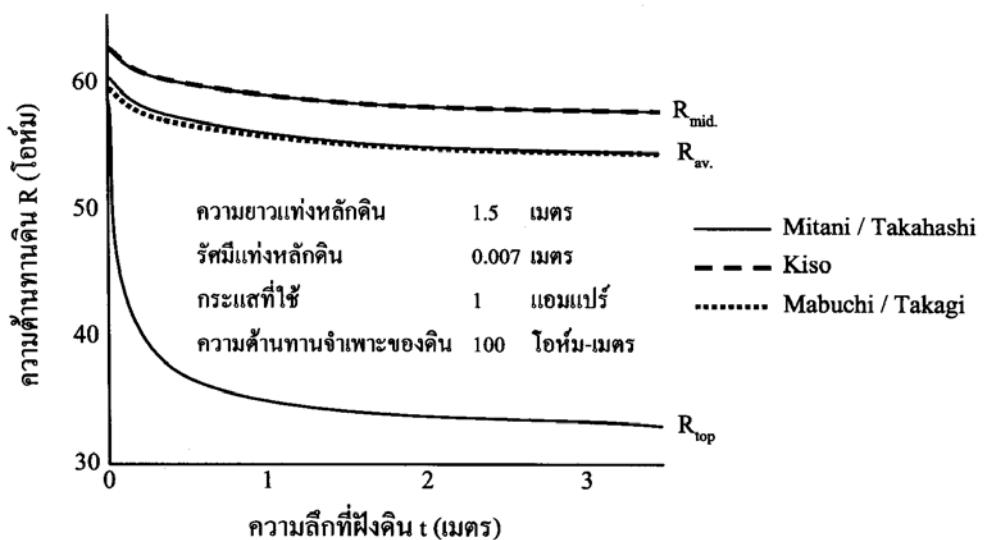
รูปแบบ	โครงสร้าง	ขนาด		
		ระยะจริง (เมตร)	ระยะจำลอง (มิลลิเมตร)	
A. การต่อลงดินของเสาสี่ต้น		a S L	4 80 0-1,000	
B. การต่อลงดินของเสาสองต้นและมี การต่อลงดินวนรอบนอก		d L L2	2.5 0-14 7	50 0-500 135
C. การต่อลงดินของเสาสองต้นโดย เดินสายแวนอนแยกเป็นแฉก		a d L	1.5 10 5-53	30 192 100-1,000
D. การต่อลงดินโดยใช้ตัวนำติดตั้งใน แวนอน		L	5-100	100-1,923
E. การต่อลงดินโดยใช้ตัวนำติดตั้งใน แวนอน แยกออกเป็นสองแฉก		L	5-60	100-1,150
F. การต่อลงดินโดยใช้แท่งตัวนำแนวตั้ง		L	5-60	100-1,150



รูปที่ 2.6.3 ความต้านทานอิมพัลส์  $R = \alpha R_{AC}$  ของโครงสร้างเสาต่างๆ ที่ความต้านทานจำเพาะของดินต่างๆ

**2.7 ความต้านทานดินกับความลึกของการฝังแท่งหลักดิน**

ความต้านทานดินมีค่าลดลงเมื่อมีการฝังแท่งหลักดินลึกมากขึ้นลงในดิน แต่เมื่อฝังลึกลงไปถึงจุดหนึ่ง ความต้านทานดินก็ไม่ลดลงอีก ด้วยเหตุนี้เองแท่งหลักดินจึงได้มีการทำออกมาให้มีความยาว 2 – 3 เมตร พิจารณา รูปที่ 2.7.1 แสดงความต้านทานกับความลึกของการฝังแท่งหลักดินในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ (5) สังเกตจะเห็นว่ากรณีนี้กราฟที่ใช้มีค่าต่ำมาก ดังนั้นความต้านทานดินสัมพันธ์กับความต้านทานดินที่ได้จากการวัด จึงมีค่าเกือบเท่ากัน



จากกราฟ  $R_{mid}$  ความต้านทานที่กึ่งกลางแท่งหลักดิน  
 $R_{av}$  ความต้านทานเฉลี่ยทั้งแท่งหลักดิน  
 $R_{top}$  ความต้านทานที่โคนแท่งหลักดิน

รูปที่ 2.7.1 ความต้านทานดินแปรผกผันกับความลึกที่ฝังดิน จากงานวิจัยต่างๆ

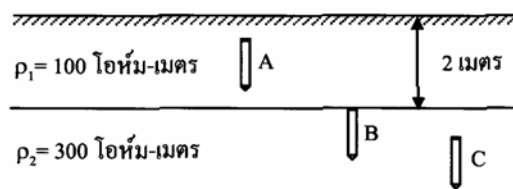
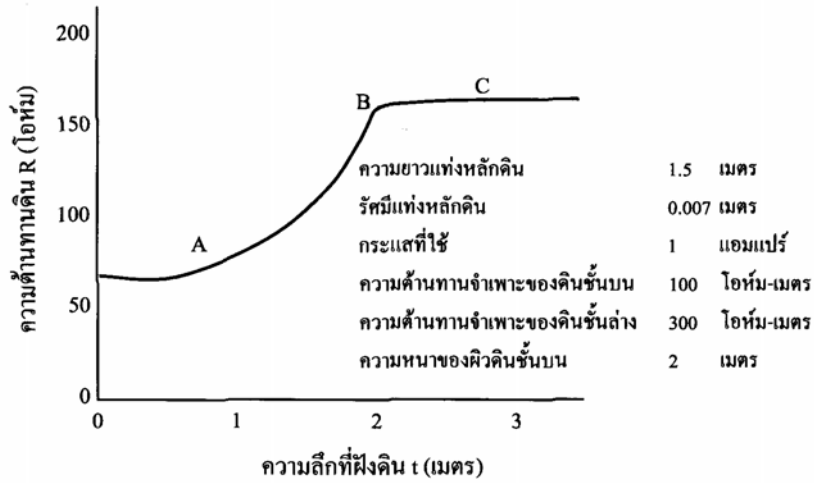
จากรูปที่ 2.7.1 ค่าความต้านทานดินเริ่มมีค่าคงที่เมื่อฝังแท่งหลักดินลึกลงไป 1.5 – 2 เมตร นั่นคือ ปลายของแท่งหลักดินอยู่ลึกลงไปในพื้นดิน 3 – 3.5 เมตร (ความยาวแท่งหลักดิน 1.5 เมตร) ด้วยเหตุนี้เองแท่งหลักดินที่ขายจึงมักมีความยาว 3 เมตร

สำหรับการฝังแท่งหลักดินในดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะไม่เท่ากันจะได้ผลต่างกัน มีนักวิจัยทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบที่มีการฝังแท่งหลักดินที่มีความลึกต่างๆ ในดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและชั้นล่างไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 2.7.2

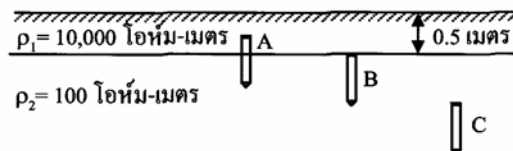
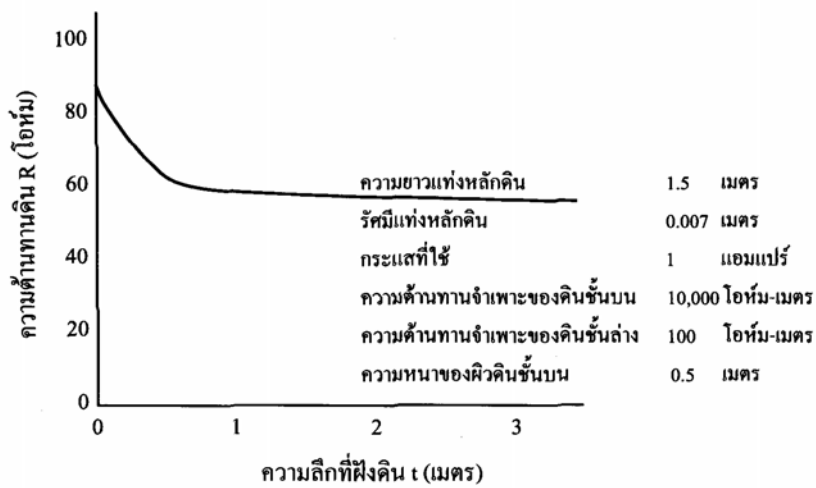
รูปที่ 2.7.2 (ก) แสดงการฝังแท่งหลักดินในดินสองชั้น โดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าต่ำกว่าดินชั้นล่าง จากผลในรูปทำให้ทราบว่าเมื่อต้องการฝังแท่งหลักดินในกรณีนี้ ควรพยายามให้แท่งหลักดินอยู่ในชั้นดีที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำ และกรณีนี้ถ้าฝังลึกมากกลับให้ผลเสียมากกว่าผลดี

รูปที่ 2.7.2 (ข) แสดงการฝังแท่งหลักดินในดินสองชั้น โดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าสูงกว่าดินชั้นล่างซึ่งในทางปฏิบัติก็มักเป็นเช่นนั้น เพราะจะมีการปรับพื้นดินบนและโรยหินกรวดซึ่งมีความต้านทาน

จำเพาะสูงมาก กรณีนี้จำเป็นต้องพยายามฝังแท่งหลักดินให้ลึกเกินชั้นดินที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูงลงไปจนถึงชั้นดินที่มีความต้านทานจำเพาะของดินต่ำ



(ก) ดินสองชั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าของดินชั้นล่าง ( $\rho_1 < \rho_2$ )



(ข) ดินสองชั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง ( $\rho_1 > \rho_2$ )

รูปที่ 2.7.2 ความต้านทานดินของแท่งหลักดินที่ฝังในดินสองชั้น

### บทที่ 3

#### ความต้านทานร่างกายมนุษย์และกระแสที่อันตราย

- 3.1 ความต้านทานร่างกายมนุษย์
- 3.2 กระแสที่เป็นอันตรายกับมนุษย์

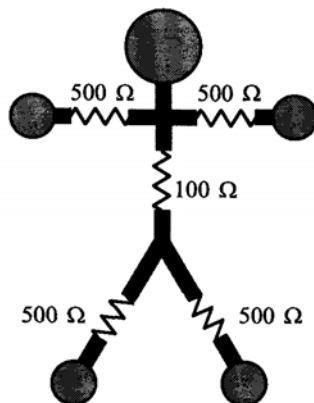
การต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย จำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานร่างกายมนุษย์ เพื่อไปใช้คำนวณหากระแส และต้องทราบว่ากระแสขนาดเท่าใดที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์แล้วทำให้เสียชีวิตได้ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงความต้านทานร่างกายมนุษย์ว่าแทนได้ด้วยค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์เท่าใด และกระแสที่ไหลผ่านร่างกายแล้วทำให้มนุษย์เสียชีวิตมีค่าเท่าใด โดยศึกษาจากทั้งมาตรฐาน *IEEE* และ *IEC* ประกอบและเปรียบเทียบกัน

#### 3.1 ความต้านทานร่างกายมนุษย์

ความต้านทานที่ต่ำที่สุดของร่างกายอยู่ระหว่าง 500 – 1,000 โอห์ม คำนี้นี้วัดโดยไม่คิดความต้านทานของผิวหนัง ถ้าผิวหนังค่อนข้างแห้งจะให้ความต้านทานสูงมาก

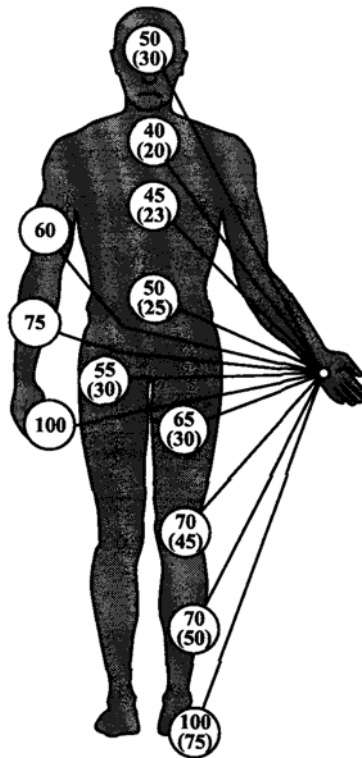
ปริมาตรกระแสที่ไหลผ่านร่างกายได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความชื้น เส้นทางการไหลของกระแส ขนาดของร่างกาย เพศ ความหยาบของผิวหนัง ความต้านทานของร่างกายมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1,000 โอห์มไปจนถึงมากกว่า 100,000 โอห์ม

จากรูปที่ 3.1.1 สมมติให้ความต้านทานจากแขนข้างหนึ่งถึงแขนอีกข้างหนึ่งมีค่า  $500 + 500 = 1,000$  โอห์ม ที่แรงดันกระแสสลับ 120 โวลต์จะมีกระแสไหลผ่านร่างกายในเส้นทางดังกล่าวเท่ากับ  $120/1,000 = 0.12$  แอมแปร์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความต้านทานของร่างกายมีค่าไม่คงที่แต่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลาและแรงดัน



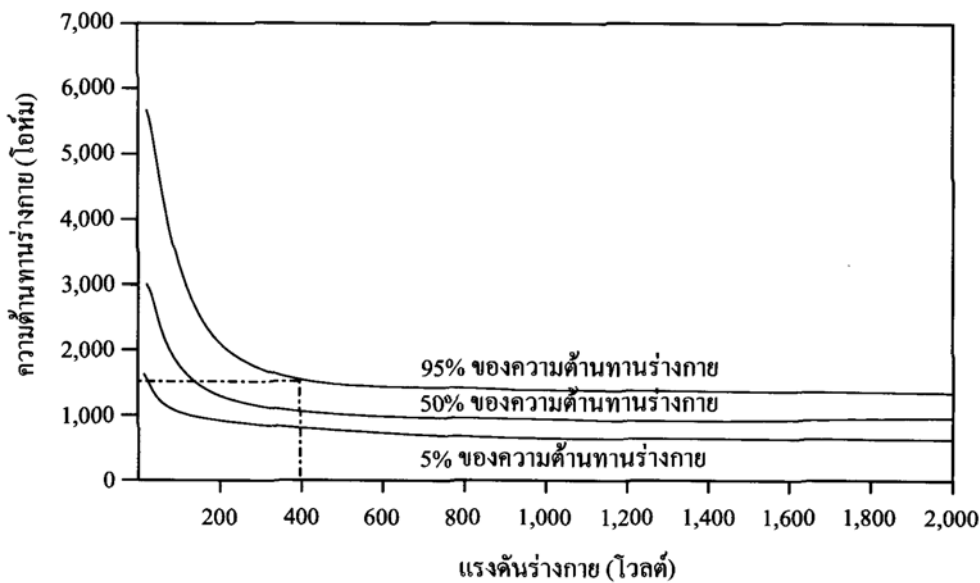
รูปที่ 3.1.1 โมเดลความต้านทานร่างกายมนุษย์อย่างง่ายตามมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาให้ละเอียดมากยิ่งขึ้นพบว่า ร่างกายของคนประกอบด้วยเนื้อเยื่อและของเหลวมากมายซึ่งมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าต่างกัน ในปี ค.ศ. 1984 *Commission Electro-technique International (Geneva)* ได้ตีพิมพ์รายงานความสัมพันธ์ระหว่างส่วนต่างๆ ของร่างกายสำหรับพื้นที่สัมผัสขนาดใหญ่ ค่าอิมพีแดนซ์แสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์เทียบกับอิมพีแดนซ์จากแขนข้างหนึ่งไปยังแขนอีกข้างหนึ่ง ซึ่งมีค่า 500 โอห์ม โดยมี 5% *percentile rank* ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานร่างกายเมื่อคิดความต้านทานจากแขนข้างหนึ่งไปยังแขนอีกข้างหนึ่งเป็น 100% มีค่าเท่ากับ 500 โอห์ม



รูปที่ 3.1.2 เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ของร่างกาย (100%=500 โอห์ม)

ตัวเลขนอกวงเล็บคือ เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์เมื่อกระแสไหลจากแขนข้างหนึ่งไปยังส่วนต่างๆ เหล่านี้  
ตัวเลขในวงเล็บคือเปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์เมื่อกระแสไหลจากแขนทั้งสองข้างไปยังส่วนต่างๆ เหล่านี้ตาม IEC



รูปที่ 3.1.3 ขอบเขตของความต้านทานร่างกายมนุษย์เมื่อมีแรงดันกระทำกับร่างกายที่ค่าต่างๆ กัน

รูปที่ 3.1.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ความต้านทานของร่างกายและแรงดันที่ป้อนให้กับร่างกาย โดยได้แบ่งกราฟออกเป็นสามส่วน เพื่อกำหนดว่าเปอร์เซ็นต์ของความต้านทานร่างกายมนุษย์เป็นอย่างไร ตัวอย่างเช่น ที่แรงดัน 400 โวลต์ ความต้านทานร่างกายของคนส่วนใหญ่ 95% มีค่าต่ำกว่า 2,000 โอห์ม

### 3.2 กระแสที่เป็นอันตรายกับมนุษย์

ปริมาณกระแสที่ผ่านร่างกายนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความชื้น เส้นทางของร่างกายที่กระแสไหลผ่าน เช่น จากแขนซ้ายไปแขนขวา เพศ ขนาดของร่างกาย สภาพผิวหนัง หรือแม้แต่อาหารและเครื่องดื่มล้วนมีผลทั้งสิ้น ความต้านทานของร่างกายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 1,000 ถึง มากกว่า 100,000 โอห์ม ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น

#### 3.2.1 ผลของเส้นทางการไหลของกระแส

เส้นทางการไหลของกระแสที่ต่างกันให้ผลต่อร่างกายมนุษย์ต่างกัน เช่น กระแสที่ไหลผ่านร่างกายระหว่างเท้า-เท้า มีอันตรายน้อยกว่ากระแสขนาดเดียวกันที่ไหลผ่านร่างกายจากมือถึงเท้าทั้งสองข้าง ซึ่ง Loucks (4) ได้ทดสอบเรื่องนี้แล้วพบว่า อัตราส่วนระหว่างกระแสที่ไหลผ่านระหว่างเท้า - เท้า กับกระแสที่ไหลผ่านมือ - เท้า โดยมีกระแสที่ไหลผ่านบริเวณหัวใจเท่ากัน มีอัตราส่วนของกระแสเท่ากับ 25 : 1

#### 3.2.2 ผลของความถี่

ผลของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนและทำให้เกิดอันตราย ขึ้นกับระยะเวลา และความถี่ของกระแสอันตรายที่เกิดขึ้นมากที่สุด ได้แก่ หัวใจเต้นผิดจังหวะ เนื่องจากเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจทำงานไม่สัมพันธ์กัน (Ventricular Fibrillation) ทำให้ไม่สามารถสูบฉีดเลือดออกจากหัวใจได้



มนุษย์จะได้รับอันตรายเนื่องจากไฟฟ้าที่ความถี่ 50 – 60 เฮิร์ตซ์ เมื่อความถี่สูงกระแสที่จะทำให้เกิดอันตรายกับมนุษย์ก็จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในมาตรฐาน IEC 60479-2 (1987-03) ได้มีการกำหนดขนาดกระแสที่มีอันตรายกับมนุษย์ตามฟังก์ชันของความถี่

อันตรายจากปริมาณกระแสพิจารณาที่ความถี่ 50/60 เฮิร์ตซ์ และความถี่อื่นๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่

### 3.2.1

ตารางที่ 3.2.1 จำนวนเท่ากระแสที่ความถี่ต่างๆ เมื่อเทียบกับที่ความถี่ 50/60 เฮิร์ตซ์ โดยทำให้เกิดอันตรายกับร่างกายมนุษย์เท่ากัน

ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ	จำนวนเท่ากระแส
50/60 เฮิร์ตซ์	1
300 เฮิร์ตซ์	5
1 กิโลเฮิร์ตซ์	15
กระแสตรง	3

### 3.2.3 ผลของขนาดกระแส

ผลของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ตามขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้น คือ รู้สึกถึงไฟดูด กล้ามเนื้อเกร็ง ไม่รู้สึกตัว หัวใจไม่ทำงาน ระบบประสาทควบคุมการหายใจไม่ทำงาน และการเผาไหม้ ตามลำดับ ซึ่งระดับของกระแสที่พิจารณามีตั้งแต่ กระแสเริ่มรับรู้ (*Threshold of Perception*) กระแสปลดปล่อยให้ (*Let-go current*) กระแสที่ทำให้กล้ามเนื้อเกร็ง (*Muscular Contraction*) และกระแสที่ทำให้หัวใจไม่ทำงาน (*Ventricular Fibrillation*) การเสียชีวิตที่ระดับแรงดันต่ำเช่น 120/240 โวลต์ เชื่อว่าเกิดจากอาการกล้ามเนื้อหัวใจเกร็ง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของการสัมผัสทางไฟฟ้าและระดับกระแสที่สร้างขึ้นจากแรงดัน

- ก. การรับรู้ถึงกระแส (*Threshold of Perception*) ค่าเฉลี่ย 1 มิลลิแอมแปร์ เป็นขนาดกระแสที่ทำให้มนุษย์รับรู้ได้ถึงกระแสที่ไหลผ่าน
- ข. กระแสปลดปล่อย (*Let-go current*) ค่าเฉลี่ย 1-6 มิลลิแอมแปร์ เป็นขนาดกระแสที่ทำให้รู้สึกไม่พอใจที่จะจับต่อ แต่ไม่ทำให้สูญเสียการควบคุม
- ค. กล้ามเนื้อเกร็ง (*Muscular Contraction*) ค่าเฉลี่ย 9-25 มิลลิแอมแปร์ เป็นขนาดกระแสที่ทำให้กล้ามเนื้อเกร็งและไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ ผลไม่ถาวรและหายได้เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่าน
- ง. หัวใจไม่ทำงาน (*Ventricular Fibrillation*) ค่าเฉลี่ย 60-100 มิลลิแอมแปร์ เป็นขนาดกระแสที่ทำให้หัวใจไม่ทำงาน หรือ ทำงานไม่สัมพันธ์ ทำให้ไม่สามารถสูดฉีดโลหิตไปเลี้ยงร่างกายได้

ผลของการศึกษาวิจัยผลของไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ที่มีต่อร่างกายมนุษย์ พบว่าผลตอบสนองของร่างกายที่มีผลต่อกระแสตรงและกระแสสลับแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2.2

ตารางที่ 3.2.2 ผลของร่างกายที่มีต่อขนาดกระแสไฟฟ้าตรงและไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ [6]

ผลที่เกิดขึ้น	กระแสตรง (mA)		กระแสสลับ (mA)	
	ชาย	หญิง	ชาย	หญิง
ไม่มีความรู้สึก	1	0.6	0.4	0.3
รับรู้ว่ามีกระแสไหลผ่าน	5.2	3.5	1.1	0.7
ช็อก – ไม่เจ็บปวดและยังควบคุมกล้ามเนื้อได้	9	6	1.8	1.2
ช็อก – เจ็บปวดและยังควบคุมกล้ามเนื้อได้	62	41	9	6
ช็อก – เจ็บปวดแต่ยังปลดออกจากไฟได้	76	51	16	10.5
ช็อก – เจ็บปวดรุนแรงและเกิดการเกร็งของกล้ามเนื้อและหายใจลำบากขึ้น	90	60	23	15

จากตารางที่ 3.2.2 อาจแบ่งขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายเป็นช่วงต่างๆ ได้ดังนี้

$\leq 1$ มิลลิแอมแปร์	ไม่มีความรู้สึก
$\geq 3$ มิลลิแอมแปร์	ช็อกเจ็บปวด
$\geq 5$ มิลลิแอมแปร์	กล้ามเนื้อหัวใจเกร็ง (50%) ไม่สามารถเดินต่อไปได้
$\geq 30$ มิลลิแอมแปร์	หายใจติดขัด อาจทำให้ไม่รู้สึกตัวได้
50-100 มิลลิแอมแปร์	มีโอกาสเกิดการเกร็งของกล้ามเนื้อหัวใจ
$\geq 200$ มิลลิแอมแปร์	ผิวหนังไหม้และกล้ามเนื้อเกร็ง หัวใจมักจะหยุดเต้น
$\geq 1$ แอมแปร์	ร่างกายถูกทำลาย

จากค่ากระแสข้างต้นพบว่าช่วงกระแสที่ทำให้ร่างกายได้รับบาดเจ็บมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ขนาดกระแสในช่วง 20-30 มิลลิแอมแปร์ ทำให้เกิดอาการหายใจติดขัด หายใจไม่ออก ขนาดกระแสในช่วง 50-200 มิลลิแอมแปร์ จะทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้อหัวใจเกร็ง คือ การทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจไม่สัมพันธ์กัน หัวใจเต้นไม่เป็นจังหวะ มักจะพบเมื่อกระแสไหลผ่านหน้าอก เช่น ไหลระหว่างแขนไปแขน หรือ แขนไปขา

### 3.2.4 ผลของระยะเวลา

ขนาดกระแสที่ระบุในตารางที่ 3.2.2 เป็นกระแสที่ไหลต่อเนื่องและไม่มีอุปกรณ์ป้องกันตัววงจร แต่ในกรณีที่มีอุปกรณ์ป้องกันไฟรั่วตัววงจรออก กระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ก็มีค่าสูงขึ้นกว่าที่กำหนดข้างต้น

ความเร็วในการตัดวงจรเป็นตัวจำกัดระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์เมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบ เมื่อมนุษย์ไปสัมผัสโครงโลหะหรือส่วนอื่นในขณะที่มีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบจะทำให้กระแสไหลผ่านร่างกาย ซึ่งมนุษย์จะสามารถทนกระแสได้มากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นกับระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย

ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายนานอย่างน้อยเพียงใด ขึ้นกับความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจรพิจารณาได้สองระดับ คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลัก (*Main Protection*) ทำงาน และระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริม (*Backup Protection*) ทำงาน ซึ่งเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงานมีค่าน้อยกว่าเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริมทำงาน โดยทั่วไปจะพิจารณาเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงาน เพราะส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ป้องกันหลักในการตัดวงจร ยกเว้นกรณีที่ต้องการให้มีความปลอดภัยมากก็ ต้องใช้ระยะเวลาในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันเสริมมาวิเคราะห์

จากการวิจัยของ *Biegelmeier* และ *Lee* (8) พบว่า ระยะเวลาการตัดวงจรที่น้อยกว่า 0.5 วินาทีเมื่อมีกระแสตัดวงจรเกิดขึ้น ทำให้ร่างกายมนุษย์ได้รับอันตรายเนื่องจากหัวใจไม่ทำงานมากเมื่อมีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้าระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์อยู่ระหว่าง 0.06 – 0.3 วินาที ก็จะเกิดอันตรายเนื่องจากหัวใจไม่ทำงานน้อยลง เพราะค่าระยะเวลาดังกล่าว ใกล้เคียงกับจังหวะที่หัวใจทำงาน

### 3.2.5 ขีดจำกัดกระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านร่างกายแล้ว จะเกิดอันตรายต่อมนุษย์อย่างน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับขนาดกระแสและระยะเวลา นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดว่าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรง แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะที่เกี่ยวกับไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น ซึ่งตามมาตรฐาน *IEEE 80-2000* ขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านร่างกายมนุษย์ภายในระยะเวลา 0.03 – 3.0 วินาที แล้วพบว่าประชากร 99.5% ยังไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต แสดงได้ดังสมการที่ (3.2.1) สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม และตามสมการที่ (3.2.2) สำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$I_{B,50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.2.1)$$

$$I_{B,70} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.2.2)$$

เมื่อ	$I_{B,50}$	ขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (แอมแปร์) เมื่อคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม
	$I_{B,70}$	ขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (แอมแปร์) เมื่อคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม
	$t_s$	ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (วินาที)

เมื่อนำมาคำนวณตามสมการที่ (3.2.1) มาเขียนตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกระแสได้ตามตารางที่ 3.2.3 และเมื่อพิจารณาระยะเวลาตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน จะได้ขนาดกระแสต่ำสุดที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม และไม่ทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากหัวใจหยุดเต้น ตามตารางที่ 3.2.4

ตารางที่ 3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกระแสที่ยังไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

ระยะเวลา t (ms)	10	30	100	300	1,000	3,000	10,000
ขนาดกระแส I (mA)	1,160	670	367	211	116	67	37

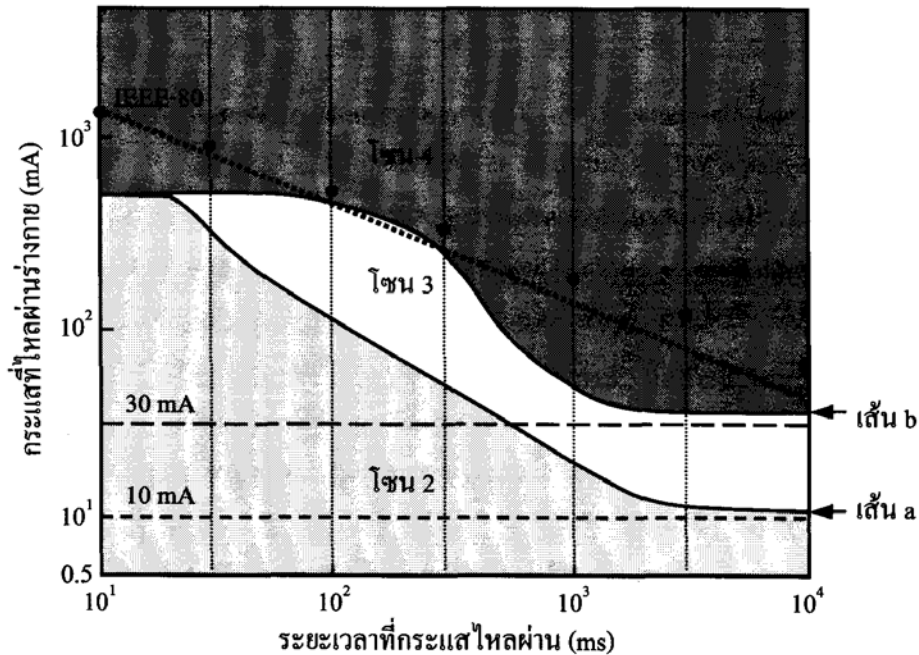
ตารางที่ 3.2.4 ขนาดกระแสต่ำสุดและระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันตัววงจรเมื่อกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัมและสามารถทนได้ 99.5% โดยหัวใจยังทำงาน

ระยะเวลาตัววงจร (วินาที)	ขนาดกระแสต่ำสุด (มิลลิแอมแปร์)
0.03	670
0.1	367
0.5	164
1.0	116
2.0	82
3.0	67
15.0	30

รูปที่ 3.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์โดยแบ่งย่านอันตรายออกเป็น 4 โซน ตามมาตรฐาน IEC 479-1 ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.2.5 โดยโซน 1 คือ เส้นที่ต่ำกว่าแกนระยะเวลาในรูปที่ 3.2.1

ตารางที่ 3.2.5 การแบ่งโซนอันตรายของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ [2]

โซน	ผลของร่างกายที่กระแสไหลผ่าน
1	ถ้ากระแสไฟฟ้าไม่เกิน 0.5 มิลลิแอมแปร์ จะไม่มีปฏิกิริยาต่อร่างกาย
2	เริ่มมีความรู้สึกรับรู้ว่าได้รับกระแสไฟฟ้า แต่ยังไม่เป็นอันตราย
3	เริ่มมีผลต่อการควบคุมกล้ามเนื้อ เช่น กล้ามเนื้อหดรัดตัวเอง
4	โอกาสหรือความเป็นไปได้ที่จะเสียชีวิต



- จากกราฟ เมื่อแบ่งโซนด้วยเส้นทึบ ตามผลของร่างกายที่กระแสไหลผ่าน ดังนี้
- โซน 2 (ระหว่าง 0.5 mA และ เส้น a) - โดยทั่วไปไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย
  - โซน 3 (ระหว่างเส้น a และ เส้น b) - โดยทั่วไปจะไม่พบความเสียหายต่ออวัยวะ
  - โซน 4 (เหนือเส้น b) - อาจเกิดอาการกล้ามเนื้อหัวใจเกร็ง

เมื่อนำสมการที่ (3.2.1) ของ IEEE 80-2000 มาเขียนในรูปที่ 3.2.1 จะได้เส้นประที่มีความชันคงที่ดังแสดงในรูป ซึ่งความหมายของเส้น IEEE-80 หมายถึง กระแสและเวลาที่มีอันตรายต่อมนุษย์ถึงขั้นหัวใจไม่ทำงานหรือทำงานไม่สัมพันธ์กัน ซึ่งมีความหมายเดียวกับเส้นแบ่งระหว่างโซน 3 และ โซน 4 ของ IEC 497-1 นั่นเอง

นอกจากนี้ในรูปที่ 3.2.1 ให้สังเกตเส้นประ เมื่อขนาดกระแส 10 มิลลิแอมแปร์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมักกำหนดไว้สำหรับการทำงานของเครื่องป้องกันไฟรั่ว จะพบว่าถ้าใช้เครื่องป้องกันไฟรั่วแบบ 10 มิลลิแอมแปร์ ก็จะไม่เกิดอันตรายต่อมนุษย์เลย เมื่อถูกดูดด้วยกระแสไฟฟ้าขนาดดังกล่าว หรือถ้าเป็นขนาด 30 มิลลิแอมแปร์ ก็จะเห็นว่าไม่ว่ากระแสไหลผ่านร่างกายเป็นระยะเวลาสั้นเท่าใดก็ตามก็ยังคงอยู่ในโซน 3 เท่านั้น

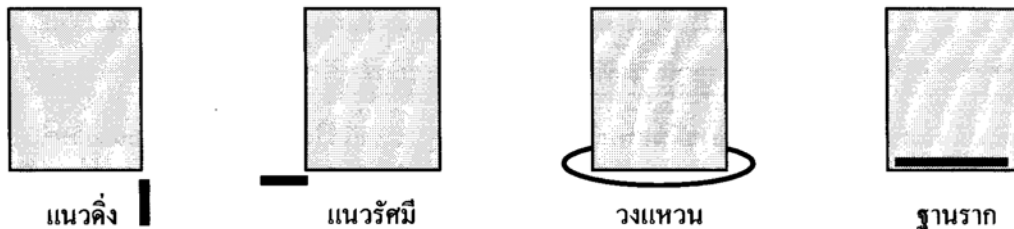
## บทที่ 4 ระบบรากสายดิน

- 4.1 รากสายดินแนวตั้ง
- 4.2 รากสายดินแนวรัศมี
- 4.3 รากสายดินวงแหวน
- 4.4 รากสายดินฐานรากคอนกรีต
- 4.5 รากสายดินโครงโลหะ
- 4.6 สูตรการคำนวณความต้านทานของรากสายดินแบบต่างๆ

การต่อลงดินมีไว้เพื่อให้มีความต้านทานดินมีค่าต่ำ ซึ่งมีการต่อได้หลายแบบขึ้นอยู่กับสถานการณ์และความสะดวกในการใช้ ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการต่อลงดินมักนึกถึงรากสายดินแนวตั้ง เพราะใช้กันบ่อยมากจนแทบไม่ทราบว่ามี การต่อลงดินของรากสายดินแบบอื่นๆ อีกหลายแบบ

การต่อลงดินไม่จำเป็นต้องเป็นแท่งโลหะยาวตอกในแนวตั้งเท่านั้น แต่อาจอยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้ เพื่อให้ได้เป้าหมายเหมือนเดิม

รากสายดินแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการต่อลงดินมีทั้งแบบรากสายดินแนวตั้ง แนวรัศมี วงแหวน และฐานรากคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.1

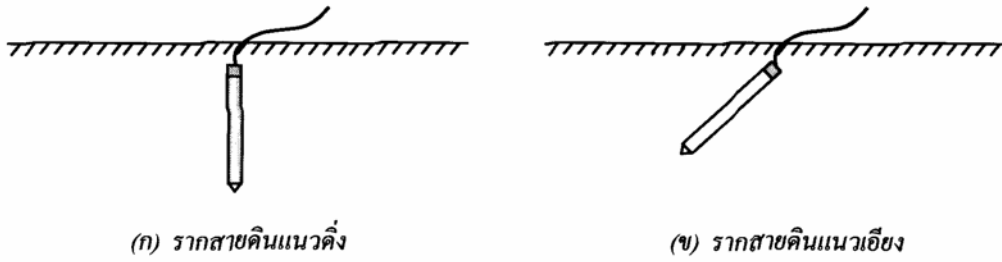


รูปที่ 4.1 การต่อลงดินด้วยรากสายดินแบบต่างๆ

### 4.1 รากสายดินแนวตั้ง

รากสายดินแนวตั้ง ได้แก่ รากสายดินแบบแท่ง เป็นแท่งเหล็กชุบทองแดง ขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 2.4-3 เมตร ติดตั้งในแนวตั้งหรือแนวเอียง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมาก สะดวกและง่ายต่อการติดตั้ง แต่บางครั้งก็มีปัญหาเนื่องจากดินแข็งไม่สามารถตอกในแนวตั้งได้ ก็ต้องหาทางตอกในแนวเอียงดังแสดงในรูปที่ 4.1.1 แต่ถ้าไม่สามารถตอกในแนวตั้งหรือแนวเอียงได้ ก็ต้องสร้างรากสายดินด้วยวิธีการอื่นแทน

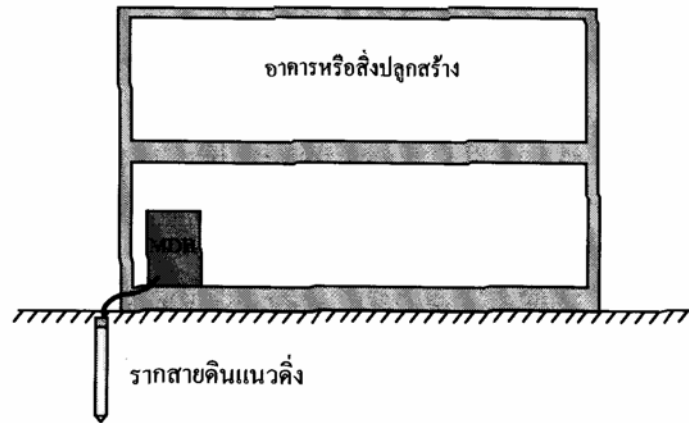
ระบบรากสายดินแนวตั้งใช้กับอาคารหรือบ้านอยู่อาศัยขนาดเล็กที่ต้องการให้มีการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.1.2 แต่ถ้าเป็นอาคารขนาดใหญ่หรืออาคารที่มีระบบป้องกันฟ้าผ่ามักใช้ระบบรากสายดินวงแหวนซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป



(ก) รากสายดินแนวตั้ง

(ข) รากสายดินแนวเอียง

รูปที่ 4.1.1 รากสายดินติดตั้งในแนวตั้งและแนวเอียง



รูปที่ 4.1.2 ระบบรากสายดินแนวตั้งเพื่อการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า

#### 4.2 รากสายดินแนวรัศมี

รากสายดินแนวรัศมี ได้แก่ รากสายดินแบบตัวนำติดตั้งในแนวราบ ใช้ในกรณีที่ต้องการติดตั้งรากสายดินในแนวตั้งได้ลำบาก เช่น บริเวณที่พื้นดินแข็ง หรือเป็นบริเวณหินกรวด เป็นต้น โดยทั่วไปความยาวของรากสายดินในแนวราบจะต้องยาวประมาณสองเท่าของรากสายดินในแนวตั้ง จึงจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน เช่น รากสายดินแนวตั้งใช้ความยาว 3 เมตร รากสายดินในแนวราบให้ใช้ 6 เมตร เป็นต้น แต่ถ้าต้องการคำนวณค่าอย่างละเอียดว่ารากสายดินแนวรัศมีควรมีความยาวเท่าใด เมื่อเทียบกับรากสายดินแนวตั้ง ก็สามารถคำนวณได้จากสูตรคำนวณตารางที่ 4.6.1



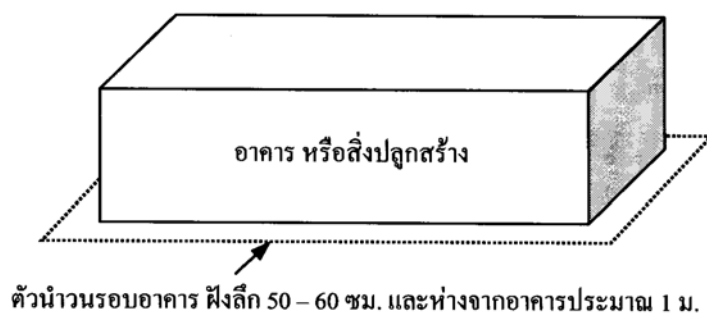
รากสายดินแนวรัศมีหรือในแนวราบ โดยทั่วไปให้ยาวสองเท่าของรากสายดินแนวตั้ง และฝังลึกจากหน้าดินประมาณ 50 – 60 ซม.

รูปที่ 4.2.1 รากสายดินแนวรัศมี

ระบบรากสายดินแนวรัศมีใช้กับอาคารหรือบ้านอยู่อาศัยขนาดเล็กที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นหินกรวด ซึ่งไม่สามารถติดตั้งระบบรากสายดินแนวตั้งได้ นอกจากนี้ระบบรากสายดินแนวรัศมียังใช้กับเสาสูงที่ติดตั้งบนเขา หรือบนพื้นหินกรวด ซึ่งสามารถติดตั้งระบบรากสายดินแนวรัศมีที่สามารถฝังตัวนำได้ยาวในพื้นที่ของตนเอง

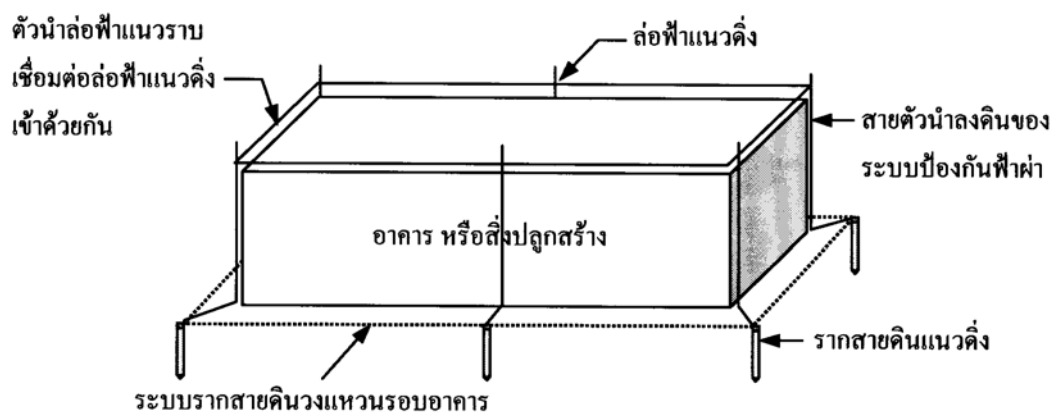
### 4.3 รากสายดินวงแหวน

รากสายดินวงแหวนเป็นรากสายดินที่มีตัวนำวนรอบเป็นวงแหวน หรือวนตัวนำรอบอาคาร ทำหน้าที่ให้ความต้านทานดินต่ำ นอกจากนี้ทำให้แรงดันอย่างก้าวน้อยลง (Step Voltage) สำหรับคนที่ก้าวออกจากตัวอาคาร ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าหรือเกิดลัดวงจรระบบไฟฟ้าลงดิน



รูปที่ 4.3.1 รากสายดินวงแหวนรอบอาคาร

ระบบรากดินวงแหวนรอบอาคารมักใช้กับอาคารขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วย เพื่อรองรับการต่อสายตัวนำลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าเข้ากับรากสายดินแบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3.2



รูปที่ 4.3.2 การติดตั้งร่วมกันระหว่างระบบรากสายดินวงแหวนรอบอาคาร และระบบป้องกันฟ้าผ่า

### 4.4 รากสายดินฐานรากคอนกรีต

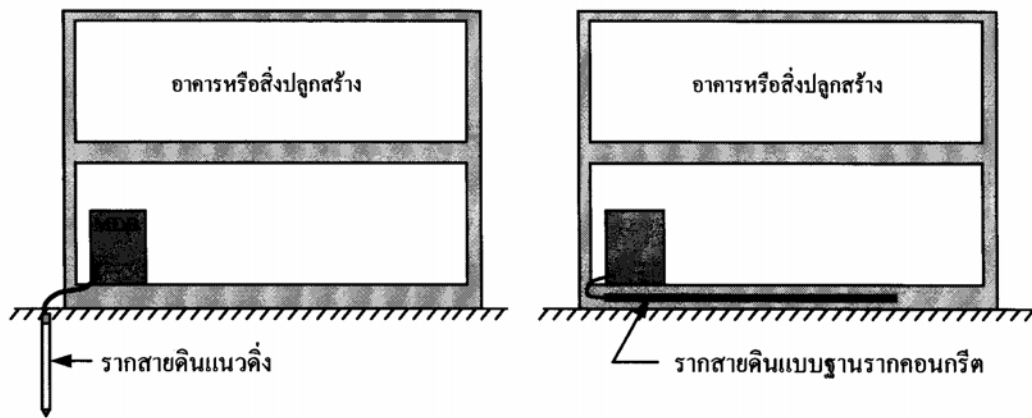
รากสายดินฐานรากคอนกรีต ได้แก่ ตัวนำทองแดง หรือเหล็กชุบสังกะสีฝังในคอนกรีต ซึ่งรากสายดินแบบนี้ต้องดำเนินการติดตั้งตั้งแต่ตอนที่เริ่มก่อสร้างอาคาร โดยทั่วไปรากสายดินแบบนี้ยังไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้ เนื่องจากช่างหรือวิศวกรยังไม่คุ้นเคย ทำให้เกิดความไม่แน่ใจว่าใช้ได้จริงหรือไม่

รากสายดินฐานรากดังกล่าวต้องติดตั้งตั้งแต่ตอนเริ่มก่อสร้างอาคาร โดยดินตัวนำทองแดงหรือเหล็กชุบสังกะสีขนานไปกับเหล็กเส้น โครงสร้างที่พื้นคอนกรีตชั้นล่างและผูกเข้ากับเหล็กโครงสร้าง ความยาวของตัวนำให้ยาวอย่างน้อย 6 เมตร เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับรากสายดินแนวตั้งลึก 3 เมตร แต่โดยทั่วไปก็ติดตั้งตัวนำ

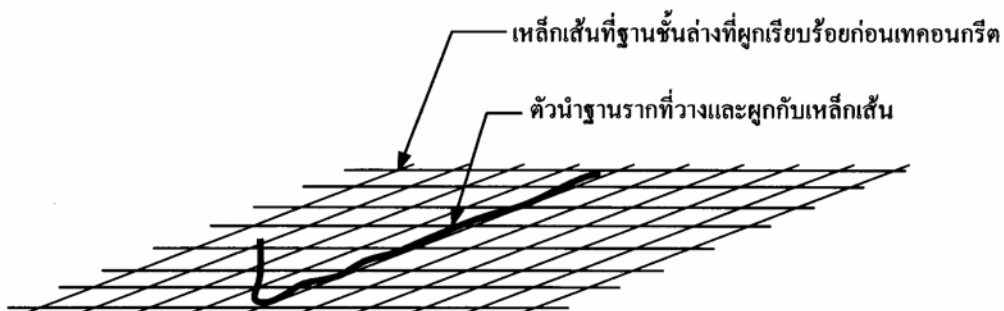


ดังกล่าวให้ยาวเท่ากับความกว้างหรือความยาวของอาคารตลอดแนว เนื่องจากก็ไม่ได้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้นเท่าใดนัก ถ้าอาคารไม่ใหญ่โตมาก

ตัวนำทองแดงหรือเหล็กชุบสังกะสีที่ติดตั้งต้องไม่เชื่อมกับเหล็กเส้นของโครงสร้างยกเว้นจะได้รับอนุญาตจากวิศวกรโครงสร้าง ตัวนำทองแดงหรือเหล็กชุบสังกะสีที่ผูกเข้ากับเหล็กเส้นก็ถือว่าเป็นเพียงพอ เพราะตัวนำดังกล่าวถือว่าเป็นทำหน้าที่รอกสายดินแล้ว ส่วนถ้าเหล็กเส้น โครงสร้างช่วยเป็นตัวนำกระแสเพื่อให้กระจายไหลไปก็ถือว่าเป็นผลพลอยได้

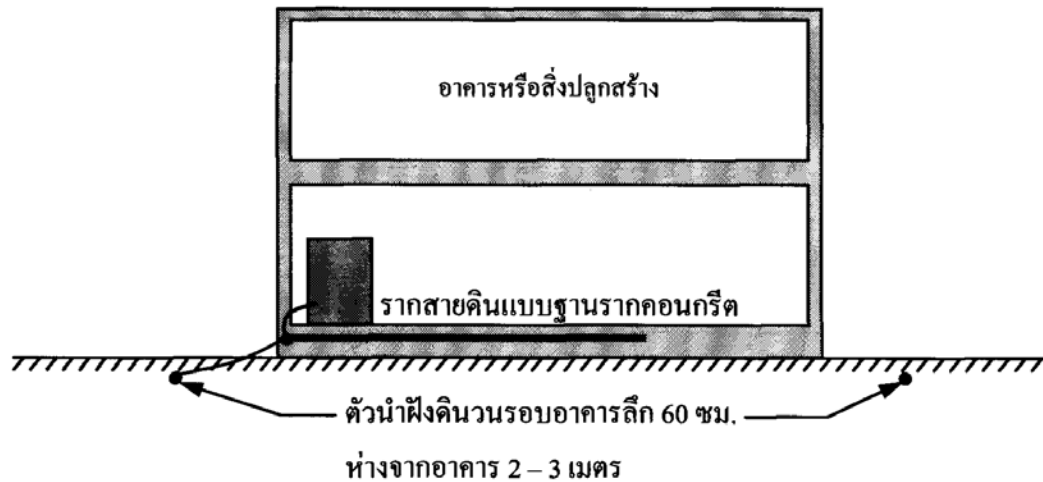


รูปที่ 4.4.1 รอกสายดินแบบฐานรอกเปรียบเทียบกับรอกสายดินแนวตั้ง



รูปที่ 4.4.2 การทำรอกสายดินแบบฐานรอกคอนกรีตก่อนเทคอนกรีต

สำหรับอาคารที่อยู่บนเขาหรือพื้นที่เป็นหินกรวดส่วนใหญ่ก็ควรติดตั้งตัวนำวนรอบอาคารเพิ่มเพื่อลดแรงดันอย่างก้าวดังแสดงในรูปที่ 4.4.3



#### 4.5 รากสายดินโครงโลหะ

รากสายดินโครงโลหะ ได้แก่ โครงโลหะที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร โดยมีฐานโลหะฝังลงในดิน หรือพื้นคอนกรีต และนำมาทำเป็นรากสายดิน ที่เห็นบ่อยได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เสาเหล็กเป็นโครงสร้างโรงงาน และเสาเหล็กดังกล่าวได้ฝังลงดินที่พื้น ดังนั้นเสาเหล็กดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นรากสายดินได้

#### 4.6 สูตรการคำนวณความต้านทานของรากสายดินแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.6.1 แสดงสูตรในการคำนวณค่าความต้านทานดินของรากสายดินรูปแบบต่างๆ ซึ่งรัศมี ( $a$ ) เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D, d$ ) ความยาว ( $L$ ) ระยะห่าง ( $s$ ) และความลึก ( $s/2$ ) ที่ใช้ในการคำนวณต้องมีหน่วยเป็นเซนติเมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ( $p$ ) ต้องมีหน่วยเป็น โอม์ - เซนติเมตร ค่าความต้านทานดิน ( $R$ ) ที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นโอม์ โดยสูตรดังกล่าวได้คิดผลของจินตภาพ (*Imaginary*) แล้ว

สำหรับรากสายดินยาว 3 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $1/2$ ,  $5/8$  และ  $3/4$  นิ้ว (12.7, 15.88 และ 19.05 มิลลิเมตร) ค่าความต้านทานดินสามารถหาได้รวดเร็วโดยหารความต้านทานจำเพาะของดินด้วยค่า 288, 298 และ 307 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6.1 สูตรสำหรับการคำนวณค่าความต้านทานดิน [2]

	ครึ่งทรงกลม รัศมี $a$	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	แท่งหลักดิน ยาว $L$ , รัศมี $a$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• • $s > L$	แท่งหลักดิน 2 แท่ง ยาว $L$ , ระยะห่าง $s$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
• • $s < L$	แท่งหลักดิน 2 แท่ง ยาว $L$ , ระยะห่าง $s$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
—	ลวดตัวนำสี่เหลี่ยม ยาว $2L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
L	ลวดหักฉาก ความยาวจากแต่ละด้าน $L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
	ดาวสามแฉก ความยาวแฉก $L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
+	ดาวสี่แฉก ความยาวแฉก $L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
*	ดาวหกแฉก ความยาวแฉก $L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
* *	ดาวแปดแฉก ความยาวแฉก $L$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
○	ตัวนำเป็นวงแหวน เส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวน $D$ , เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด $d$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	แถบตัวนำฝังดิน แนวราบยาว $2L$ , ขนาด $a \times b$ , $b < a/8$ ความลึก $s/2$ ,	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
⊗	แผ่นกลมฝังแนวราบ รัศมี $a$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$
⊗	แผ่นกลมฝังแนวตั้ง รัศมี $a$ , ความลึก $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

หมายเหตุ  $a$  รัศมีตัวนำ (เซนติเมตร)

$L$  ความยาวตัวนำ (เซนติเมตร)

$s/2$  ความลึกของการฝัง (เซนติเมตร)

$\rho$  ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เซนติเมตร)