บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน [3]

คำว่า “ดิน”ในระบบไฟฟ้า หมายถึงพื้นโลกหรือพื้นดินซึ่งส่วนใหญ่แล้วผิวโลกจะประกอบด้วยซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และยังมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น สารละลายเกลือและความชื้นซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของดินก็จะมีความแตกต่างกันมากในแต่ละภูมิประเทศ ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญดังนี้

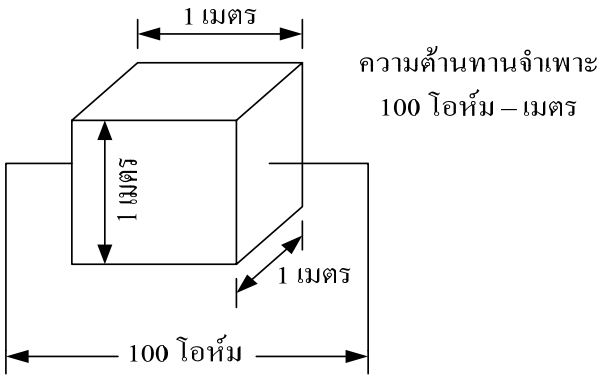
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ค่าดังกล่าวนี้จะมีค่าที่แตกต่างกันมากซึ่งอาจอยู่ระหว่าง 2 ถึง 30,000 โอห์ม-เมตร โดยมีปัจจัยหลายๆ อย่างด้วยเช่น อุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของดินสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลง และยังมีอีกหลายตัวแปรดังนี้ ชนิดของเนื้อดิน ปริมาณความชื้นในดิน ส่วนประกอบของแร่ธาตุในดิน อุณหภูมิของดิน ความอัดแน่นของเนื้อดิน เป็นต้น ความต้านทานจำเพาะของดินยิ่งสูงก็ทำให้ความต้านทานดิน R มีค่าสูง ดังนั้นเมื่อมีกระแส I ไหลผ่านทำให้ V = IR มีค่ามากก็ทำให้เกิดไอออไนซ์ได้ง่ายขึ้นนั้นคือดินที่มีความต้านทานจำเพาะ สูงเมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลทำให้ความต้านทานอิมพัลส์ลดลงได้มากเมื่อเทียบกับความต้านทานที่ได้จากเครื่องวัด และถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่ามากขึ้นแรงดัน V ที่ทำให้เกิดไอออไนซ์มากขึ้น สรุปได้ว่าถ้ากระแสฟ้าผ่าสูงขึ้นหรือความต้านทานจำเพาะของดินมากขึ้นทำให้ความทานต้านอิมพัลส์ลดลงได้มาก เมื่อเทียบกับความต้านทานดินที่วัดได้จากเครื่องวัด

ตามมาตรฐาน NEC 250-81 หรือ NEC 250-83ได้กำหนดไว้คือ ในกรณีที่มีการต่อลงดินเป็นแบบหลักดินแท่งเดียว จะต้องมีค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินไม่เกิน 25 โอห์ม และสำหรับมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่ก็จะอ้างถึง มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 ซึ่งได้กำหนดไว้ คือระบบการต่อลงดินจะต้องมีค่าความต้านทานไม่เกิน 5 โอห์ม เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบ ตรวจวัด หรือทำการปรับปรุงให้ค่าความต้านทานอยู่ในข้อกำหนดมาตรฐาน

ความต้านทานดินที่วัดจากเครื่องวัด และค่าความต้านทานดินที่แปรเปลี่ยนไป ตามสัญญาณกระแสอิมพัลส์เนื่องจากฟ้าผ่า ปริมาณน้ำฝนความร้อนความชื้นและลมมีผลต่อดินเฉพาะในส่วนที่มีความลึกอยู่ระหว่าง 0-1.5 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีการแปรเปลี่ยนมากที่สุดความชื้นของดิน

ประมาณ 5-40% (โดยน้ำหนัก) ความนำจะมีค่าสูงมากเมื่อความชื้นมีค่าถึง 14-18% และส่วนประกอบของเกลือมีผลมากในดินที่ลึกลงไปมากกว่าที่ผิว

ความต้านทานจำเพาะของดิน 100 โอห์ม-เมตร หมายถึงความต้านทานของดินที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร โดยวัดระหว่างผิวหน้าตรงข้ามได้ 100 โอห์ม



ภาพที่ 2.1 ความหมายของความต้านทานจำเพาะของดิน 100 โอห์ม-เมตร

ความต้านทานจำเพาะของดินไม่สามารถบอกได้ด้วยชนิดของดินเพราะค่าความต้านทานจำเพาะเป็นค่าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากองค์ประกอบหลายอย่าง ทำให้ต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะแต่ละพื้นที่และแต่ละฤดูกาลด้วย ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความต้านทานจำเพาะของดินอีกอย่างหนึ่งก็คือความชื้น ดังนั้นการวัดความต้านดินจึงควรทำภายใต้สภาวะที่แห้งเพื่อให้เห็นถึงสภาวะที่เลวร้ายหรือสภาวะที่ดินมีความต้านทานจำเพาะสูงสุด

ข้อสังเกตบางประการเกี่ยวกับความต้านทานจำเพาะของดิน

- ดินที่เย็นจัดหรือก้อนน้ำแข็งจะมีความต้านทานจำเพาะของดินสูง เมื่อเทียบกับดินชนิดอื่น
- ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะเปลี่ยนไปมาก เมื่อความหนาของชั้นดินเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย
- หลุมหรือโพรงอากาศในดินทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนไป
- ดินที่มีตะกอนของแร่หรือกราฟไฟล์รวมทั้งธาตุและโลหะนำไฟฟ้าอื่น ๆ ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำ

2.1.1 การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

การวัดความต้านทานจำเพาะดินมีหลายวิธีแต่ละวิธีมีความถูกต้องแตกต่างกันไปความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับขนาดกระแส ถ้าต้องการวัดความต้านทานดินสูงมากกว่า 1,000 โอห์ม-เมตร ก็ต้องเพิ่มวิธีการเพื่อเพิ่มขนาดกระแสให้สูงขึ้น

โครงสร้างของเครื่องมือวัดค่าความต้านทานของระบบดินนั้นจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter) สำหรับ R ก็คือค่าความต้านทานของจุดที่ต้องการตรวจวัด

2.1.1.1 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยใช้วิธี Werner ดังแสดงไว้ในรูป 2.2 ซึ่งเป็นการวัดความต้านทานจำเพาะโดยมีปลายแหลมสี่ชุดวางห่างเท่ากันด้วยระยะ a เมตร ลึก b เมตรเครื่องวัดโดยทั่วไปแนะนำให้ฝังลึก 0.3-0.5 เมตร เมื่ออ่านค่าความต้านทานจากเครื่องวัดแล้วคำนวณความต้าน ทานจำเพาะจากสมการดังนี้

$$\rho_a = \frac{4\pi aR}{\left[1+\frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}}-\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right]} \qquad (2.1)$$

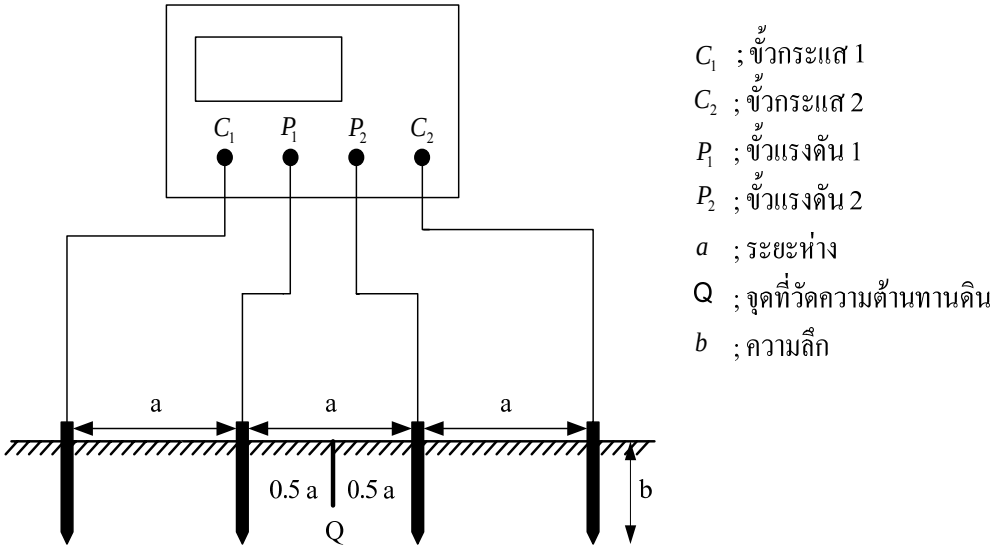
เมื่อ a ระยะห่าระหว่างปลายแหลม (เมตร)

b ความลึกของแท่งปลายแหลมที่ฝังดิน (เมตร)

c ความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (โอห์ม)

กรณีที่ระยะห่าง a มีค่ามากกว่าความลึก b มาก ($a >> b$) สมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ (2.2)

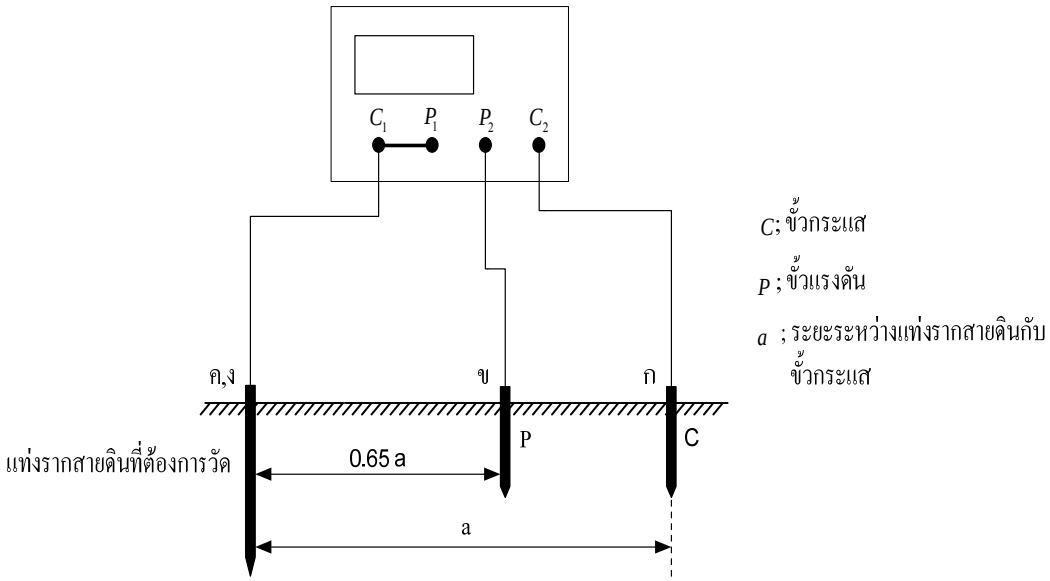
$$\rho = 2\pi aR \qquad (2.2)$$



ภาพที่ 2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่ขั้ว

การเพิ่มระยะ a ให้มากขึ้นทำให้กระแสสามารถไหลลึกลงไปในดินมากขึ้น โดยทั่วไประยะระหว่างอิเล็กโทรดเป็นตัวกำหนดความลึกของดินที่ต้องการวัดความต้านทานจำเพาะของดิน เช่นระยะ a = 3 เมตรเป็นการวัดความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินด้านบนที่ลึก 3 เมตร

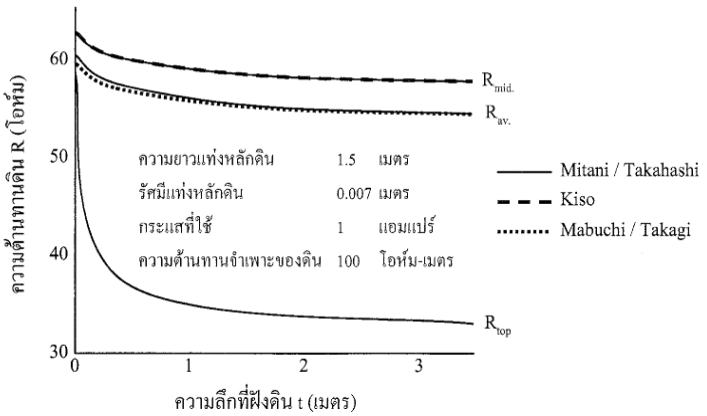
2.1.1.2 การวัดความต้านทานแบบสามขั้ว ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.3 ซึ่งมิเตอร์ในภาพเป็นมิเตอร์ที่ใช้วัดได้ทั้งการหาความต้านทานจำเพาะแบบสี่ขั้วหรือการวัดหาความต้านทานจำเพาะดินของอิเล็กโทรดแบบสามขั้วโดย ก. และ ง. เป็นขั้วกระแส ส่วนขั้ว ข. และ ค. เป็นขั้วแรงดันถ้าต้องการวัดความต้านทานจำเพาะดินแบบสามขั้วก็ให้ต่อขั้ว ค. และ ง. เข้าด้วยกันเพื่อไปต่อกับแท่งรากสายดินหรืออิเล็กโทรดที่ต้องการวัดค่าการวัดความต้านทานจำเพาะดินแบบสามขั้วได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.8 โดยให้วางขั้วแรงดัน P ห่างจาก แท่งรากสายดินที่ต้องการวัดประมาณ 65% ของระยะระหว่างขั้วกระแสแท่งหลักดิน a คือ 0.65 เท่าของระยะทาง a ในกรณีที่วัดความต้านทานของการต่อลงดินทั้งระบบ ระยะ a ต้องมีค่ามากกว่าสิบเท่าของระยะห่างของอิเล็กโทรดจึงจะได้ค่าการวัดที่ถูกต้องมากขึ้น



ภาพที่ 2.3 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบสามขั้ว

2.1.2 ความต้านทานจำเพาะดินกับความลึกของการฝังแท่งรากสายดิน

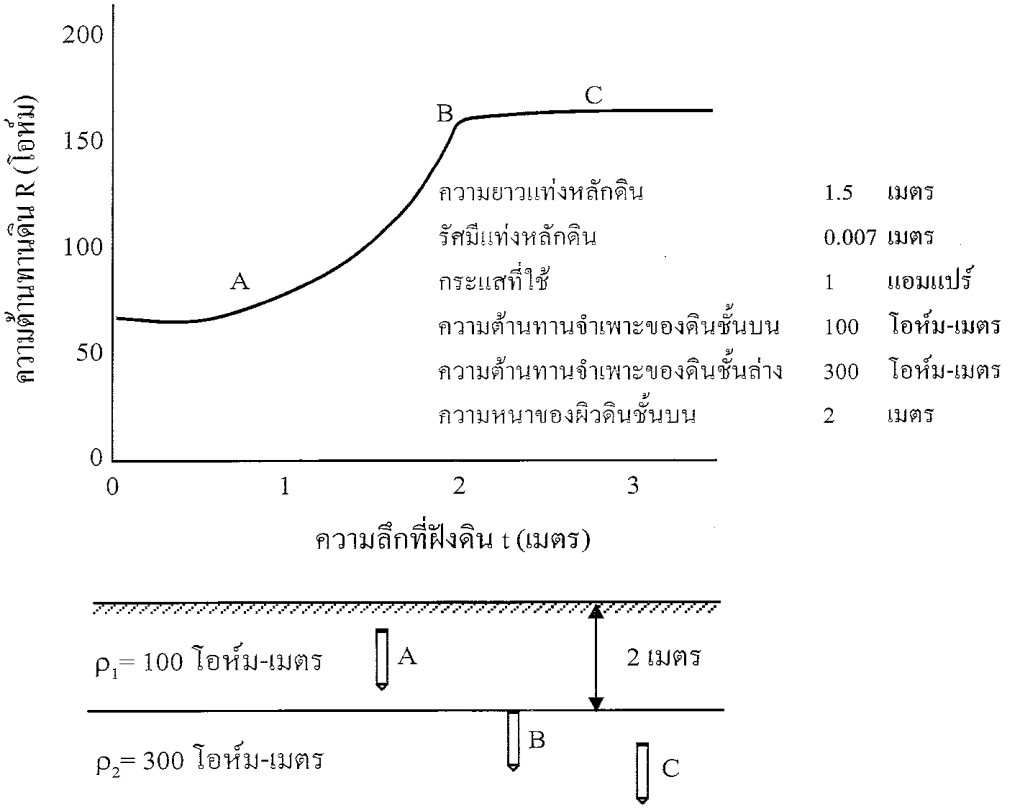
ความต้านทานจำเพาะดินมีค่าลดลงเมื่อมีการฝังแท่งรากสายดินลึกมากขึ้นลงในดิน แต่เมื่อฝังลึกลงไปถึงจุดหนึ่งความต้านทานจำเพาะดินก็ไม่ลดลงอีก ด้วยเหตุนี้เองแท่งรากสายดินจึงได้มีการทำออกมาให้มีความยาว 2 – 3 เมตร พิจารณาภาพที่ 2.4 แสดงความต้านทานกับความลึกของการฝังแท่งรากสายดินในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ สังเกตจะเห็นว่ากรณีนี้กระแสที่ใช้มีค่าต่ำมากดังนั้นความต้านทานจำเพาะดินอิมพัลส์ กับความต้านทานดินที่ได้จากการวัด จึงมีค่าเกือบเท่ากัน



ภาพที่ 2.4 ความต้านทานจำเพาะของดินแปรผกผันกับความลึกที่ฝังดิน

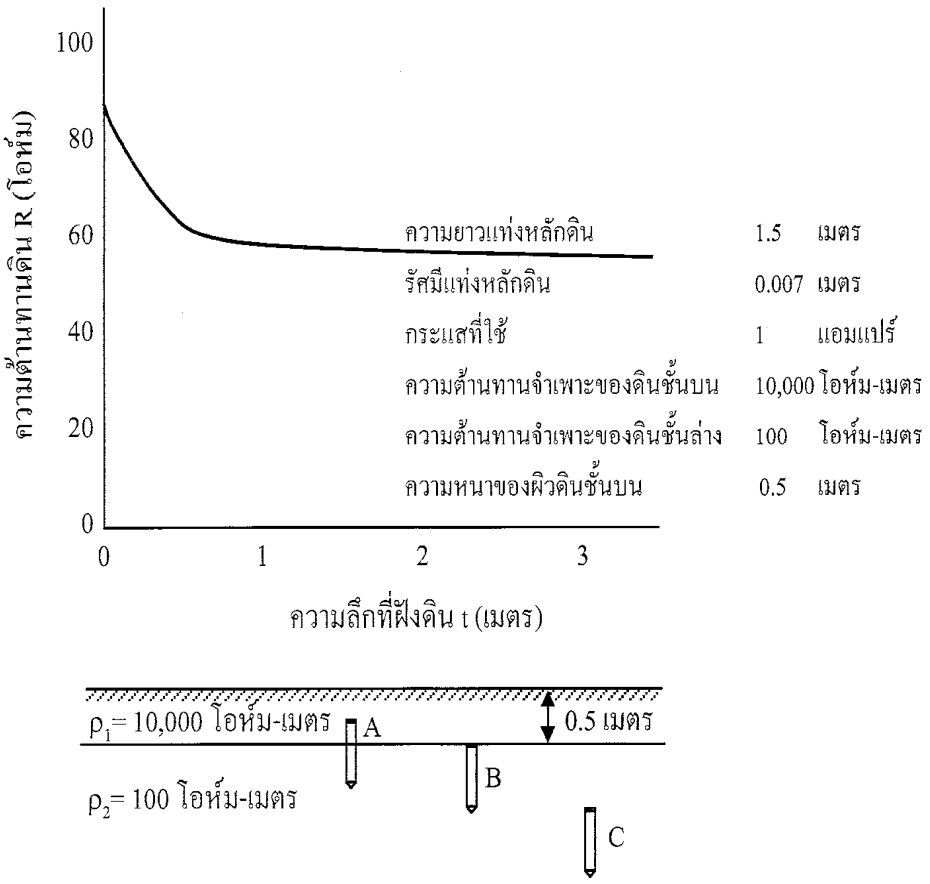
จากภาพที่ 2.4 ค่าความต้านทานจำเพาะดิน เริ่มมีค่าคงที่เมื่อฝังแท่งรากสายดินลึกลงไป 1.5-2 เมตร นั่นคือ ปลายของแท่งรากสายดินอยู่ลึกลงไปในพื้นดิน 3-3.5 เมตร (ความยาวแท่งรากสายดิน 1.5 เมตร) ด้วยเหตุนี้เองแท่งรากสายดินที่ขายจึงมักมีความยาว 3 เมตร

สำหรับการฝังแท่งรากสายดินในดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะไม่เท่ากันจะได้ผลต่างกัน มีนักวิจัยทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบที่มีการฝังแท่งรากสายดินที่ความลึกต่างๆ ในดินสองชั้นที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและชั้นล่างไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 (a) แสดงการฝังแท่งรากสายดินในดินสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าต่ำกว่าดินชั้นล่าง

จากผลในรูปทำให้ทราบว่าเมื่อต้องการฝังแท่งรากสายดินในกรณีนี้ควรพยายามให้แท่งรากสายดินอยู่ในชั้นดินที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำ และกรณีนี้ถ้าฝังลึกมากกลับให้ผลเสียมากกว่าผลดี



ภาพที่ 2.5 (b) แสดงการฝังแท่งรากสายดินในดินสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่ามากกว่าดินชั้นล่าง

ซึ่งในทางปฏิบัติก็มักเป็นเช่นนั้น เพราะจะมีการปรับพื้นด้านบนและโรยหินกรวดซึ่งมีความต้านทานจำเพาะสูงมาก กรณีนี้จำเป็นต้องพยายามฝังแท่งรากสายดินให้ลึกเกินชั้นดินที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูงลงไปจนถึงชั้นดินที่มีความต้านทานจำเพาะของดินต่ำ

2.2 ทฤษฎีของการลดความต้านทานของแท่งรากสายดินโดยใช้กากโลหะ [1]

2.2.1 คุณสมบัติของตัวลดความต้านทาน

ตัวลดความต้านทานต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

- มีความปลอดภัย
- สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้
- มีความคงทน
- ไม่กัดกร่อนขั้วไฟฟ้า
- ใช้ง่าย

ความปลอดภัยจะรวมถึงความปลอดภัยจากสิ่งแวดล้อม การนำไฟฟ้าและการคงทนของตัวลดความต้านทานมีผลต่อการลดความต้านทานโดยตรงไม่เกิดกัดกร่อนต่อแท่งตัวนำไฟฟ้าและใช้ง่ายเกี่ยวพันกับผลในด้านเศรษฐกิจและการบริหารการจัดการ ซึ่งแต่ละอย่างนั้นจะถูกพิจารณาแยกออกจากกัน

ตัวลดความต้านทานไม่ได้ใช้ในการลดความต้านทานของพื้นดินอย่างเดียวโดยตรงในคำกล่าวหนึ่งถ้าความต้านทานของพื้นดินมีค่าสูงมากๆ มันไม่สามารถถูกคาดหวังที่จะไปลดความต้านทานของดินการใช้ตัวลดความต้านทาน เพื่อไปเพิ่มรัศมีและความยาวของขั้วไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ความต้านทานของพื้นดินลดลงได้ ตัวลดความต้านทานสามารถถูกนำมาใช้ใน 2 สถานการณ์

1. ในบริเวณพื้นดินที่มีความต้านทานสูง ดินที่อยู่รวมกับก้อนหินและดินแบบ อื่นๆ

2. ในสถานที่ที่ไม่มีพื้นที่เพียงพอที่จะสร้างเครือข่ายใต้ดินหรือแบบขนานในใต้ดินตัวอย่างเช่น บริเวณในเมืองหรือในตึกจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แบบ (Highly concentrated microelectronic) จะถูกฝังใต้ดินได้อย่างดี มันจะถูกใช้เมื่อกำลังไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า ต้องใช้ความต้านทานของพื้นดินระหว่าง 0.5 - 1 โอห์มหรือมีค่าคงที่ 0.1 โอห์มซึ่งตัวลดความต้านทานเป็นสิ่งที่เหมาะสม

2.2.2 กากโลหะ [1]

ภาพที่ 2.6 กากโลหะ

สิ่งที่หลงเหลืออย่างหนึ่งจากการถลุงเหล็กคือกากขี้โลหะชิ้นเล็กๆ ที่ถูกหลอมซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นขยะเมื่อมันถูกนำมาใช้ โดยจะถูกนำมาใช้ในงานของวิศวกรโยธา และวิศวกรก่อสร้าง และส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการสร้างถนน อีกไม่นานมันจะถูกนำมาใช้ในด้านสิ่งแวดล้อมอีกมากมายกากโลหะชิ้นเล็กๆ ที่ถูกหลอมมีลักษณะคล้ายกาวและมีความต้านทานต่ำโดยใช้ตัวเร่งที่เป็นปูนซีเมนต์ผสมน้ำกากขี้โลหะเหล่านี้สามารถนำมาผลิตกาวได้และมันยังถูกนำมาใช้เป็นตัวลดความต้านทานของพื้นดินอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง กากโลหะ: ซีเมนต์: น้ำ:เกลือ ถูกทำการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนส่วนที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการสร้างตัวลดความต้านทานของแท่งรากสายดินในส่วนของการต้านทานและความแข็งแรงของการจับตัวเป็นก้อน สัดส่วนที่เหมาะสมนั้นสามารถถูกนำมาใช้ในการลดความต้านทานของแท่งรากสายดิน โดยแท่งรากสายดินได้ถูกฝังลงภายในดิน การประเมินแสดงให้เห็นว่า วิธีนี้สามารถลดความต้านทานของแท่งรากสายดิน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวลดความต้านทานเมื่อมีซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนผสม ระหว่าง กากโลหะ : ซีเมนต์ : น้ำ	ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวลดความต้านทาน (โอห์ม-เมตร)		
	ตัวลดความต้านทาน ชิ้นที่ 1	ตัวลดความต้านทาน ชิ้นที่ 2	ตัวลดความต้านทาน ชิ้นที่ 3
1:0.3:0.3	108.91	98.74	100.53
1:0.4:0.3	265.55	239.02	206.65
1:0.5:0.3	452.39	488.13	459.43
1:0.6:0.3	628.32	678.56	611.56

2.2.3 ผลกระทบจากกากโลหะ ซีเมนต์ น้ำ และ เกลือ ต่อความต้านทาน

กากโลหะที่มีลักษณะคล้ายทราย ใช้เป็นวัสดุหลักของสารลดความต้านทาน อัตราส่วนที่แตกต่างกันของน้ำ ซีเมนต์ และเกลือ ผสมเข้าด้วยกันและจัดวางลงในท่อพลาสติก เส้นผ่าศูนย์กลา 7.6 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ปลายด้านหนึ่งของท่อพลาสติกถูกผนึกด้วยสลักเพื่อให้จับตัวกันและก่อตัวเป็นเม็ดขี้แร่และกระบอกซีเมนต์ แผ่นเหล็กถูกนำมาใช้เป็นอิเล็กโตรดยึดติดที่ปลาย 2 ข้างของท่อพลาสติกทีมีกากโลหะ ซีเมนต์ และน้ำ การใช้ Wheatstone Bridge1 วัดความต้านทานของกระบอกนี้ และใช้วิธีการวัดนี้เพื่อหาความต้านทาน ปัจจัยบางตัวอย่างเช่น ความต้านทานและความเข้มข้นของการจับตัว ต้องนำมาพิจารณาด้วยเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดและดีที่สุด

ประการแรกเขย่ากากโลหะ ซีเมนต์ และน้ำ ในอัตราส่วนน้ำหนัก 1:0.2:0.3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักนี้ หลังจากส่วนผสมรวมเข้าด้วยกันกับกากโลหะและกระบอกซีเมนต์ สภาพการทำให้แข็งตัวไม่ค่อยดีนัก ส่วนผสมจะไม่ประสานเข้าด้วยกันเป็นเวลานาน และจะแตกตัวหากถูกกระทบ อัตราส่วนน้ำหนักของกากโลหะ ซีเมนต์ และน้ำ อยู่ระหว่าง 1:0.3:0.3 ถึง 1:0.6:0.3 กระบอก 3 อันใช้สำหรับแต่ละอัตราส่วนที่ทำการผสม หลังจากส่วนผสมรวมตัวกันแล้ว ต่อไปคือ วัดความต้านทาน (ดูตาราง 2.1) ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม เกือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทาน ยิ่งมีซีเมนต์ในส่วนผสมมากเท่าไร ความต้านทานจะสูงมากเท่านั้น อัตราส่วนน้ำหนักของกากโลหะ ซีเมนต์ และน้ำ คือ1:0.2:0.3 ซึ่งเป็นการรวมตัวกันได้ไม่ดีนัก การรวมกันได้ดีและมีความต้านทานต่ำนั้น จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพของสารลดความต้านทาน ดังนั้น จึงได้เพิ่มเกลือเข้ากับส่วนผสมดังกล่าวในอัตราส่วนน้ำหนัก1:0.4:0.3 และพบว่าค่าความต้านทานของตัวลดความ

ต้านทานที่เพิ่มเกลือ ลดลงทันที การลดลงของความต้านทานนี้พบได้เมื่อใช้เกลือในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังปรากฏในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานจำเพาะของตัวลดความต้านทานเมื่อมีเกลือในปริมาณที่แตกต่างกัน

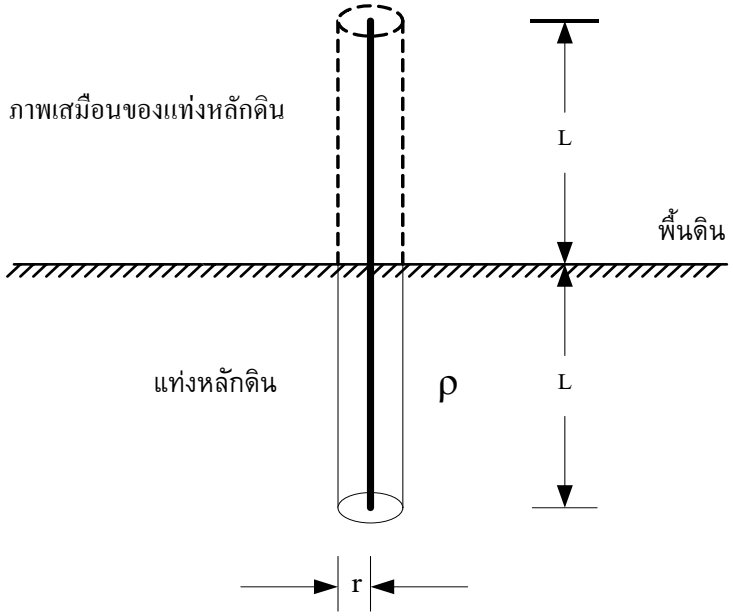
อัตราส่วนผสมระหว่าง กากโละหะ : ซีเมนต์ : น้ำ : เกลือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวลดความต้านทาน (โอห์ม-เมตร)		
	ตัวลดความต้านทาน ชิ้นที่1	ตัวลดความต้านทาน ชิ้นที่ 2	ตัวลดความ ต้านทานชิ้นที่ 3
1:0.4:0.3:0.06	33.69	42.17	30.77
1:0.4:0.3:0.09	16.40	18.20	15.86
1:0.4:0.3:0.12	7.25	6.67	4.60

2.2.4 การศึกษาวิธีลดความต้านทานของแท่งรากสายดินโดยใช้กากโลหะ [1]

การต่อลงดิน คือขบวนการเชื่อมต่อศักย์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าลงสู่พื้นดินโดยผ่านขั้วไฟฟ้าและสายไฟ ทำให้มีความต้านทานระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อลงสู่พื้นดิน โดยที่พื้นดินจะถูกเรียกว่าความต้านทานพื้นดินซึ่งจะเป็นสาเหตุของปัญหาศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสาเหตุของการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าและจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหายและยังเป็นสาเหตุของเสียงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าเหมือนกัน ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วความต้านของพื้นดินยิ่งน้อยยิ่งเป็นผลดี

เนื่องจากองค์ประกอบของดินซับซ้อนการประเมินความทานต้านของพื้นดินของขั้วไฟฟ้าที่ฝังลงสู่พื้นดินโดยตรงอาจไม่สามารถทำได้ ดังนั้นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปที่ใช้ในการลดความต้านทานของพื้นดินนั้น สามารถแบ่งได้เป็นการลดความต้านทานของพื้นดินทางกายภาพและการลดความต้านทานของพื้นดินทางเคมีทางด้านกายภาพนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่นทำขั้วไฟฟ้าที่ลงดินให้ใหญ่ขึ้นฝังขั้วลงดินให้ลึกๆ และมีขั้วไฟฟ้าลงดินหลายๆขั้วโดยต่อแบบขนานทางด้านเคมีนั้นสามารถทำได้โดยการลดความต้านทานของพื้นดินรอบๆ ก่อนที่ลงดินโดยเติมสารลดความต้านทานของพื้นดินดังแสดงในภาพที่ 2.7

2.2.2 ความต้านทานของแท่งรากสายดิน

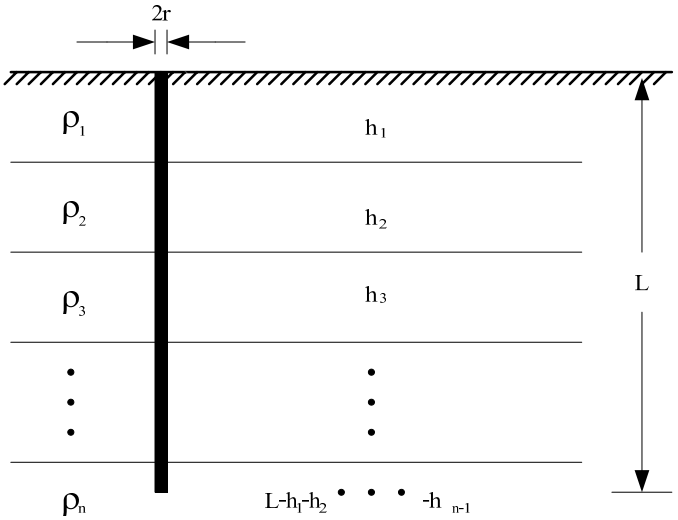


ภาพที่ 2.7 แท่งรากสายดิน

ภาพที่ 2.7 แสดงถึงความยาว L (เมตร) และรัศมี r (เมตร) ของแท่งรากสายดินที่ฝังลงในพื้นดิน มาตรฐานของแท่งรากสายดินที่ฝังลงในดิน ความต้านทานจำเพาะของ ρ (โอห์ม-เมตร) และวิธีการฝังแสดงในภาพที่ 2.7 ความต้านทานของดิน (R)สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left\{\ln\frac{2l}{r}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right]+\frac{r}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right\} \qquad (2.3)$$

2.2.3 ความต้านทานของแท่งรากสายดินในดินไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.8 แท่งรากสายดินในดินไม่สม่ำเสมอ

โครงสร้างดินมีความซับซ้อนมากมีความแตกต่างทั้งด้านคุณภาพและความต้านทาน ซึ่งต่างกันในความลึกที่แตกต่างกัน ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่ฝังลงในดินในแนวตั้งจะมีความต้านทานของดินหลายอย่าง ดังภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นความยาวเป็นเมตรและรัศมีเป็นเมตรของแท่งตัวนำที่ฝังลงในพื้นดิน ที่มีลักษณะแตกต่างกันและเจาะทะลุลงพื้นดินในแนวตั้งเป็นจำนวน n ชั้นความต้านทานของชั้นต่างๆของดิน ที่มีลักษณะที่แตกต่างกันจะเริ่มจากบนสุดของกราฟไปจนถึงก้นสุดของกราฟ

นั้นก็ คือ ρ_1 (โอห์ม-เมตร) ,..... ρ_2 (โอห์ม-เมตร) ,..... ρ_n (โอห์ม-เมตร) ความลึกของดินมีความต้านทานที่แตกต่างกัน นั่นคือ h_1 (เมตร), h_2 (เมตร),...., $L - h_1 - h_2 - ..... h_n$ (เมตร) ความต้านทานจำเพาะที่จุดสมดุล ρ_m คือ

$$\rho_m = \frac{L}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \square + \frac{L - h_1 - h_2 \square - h_{n-1}}{\rho_n}}$$

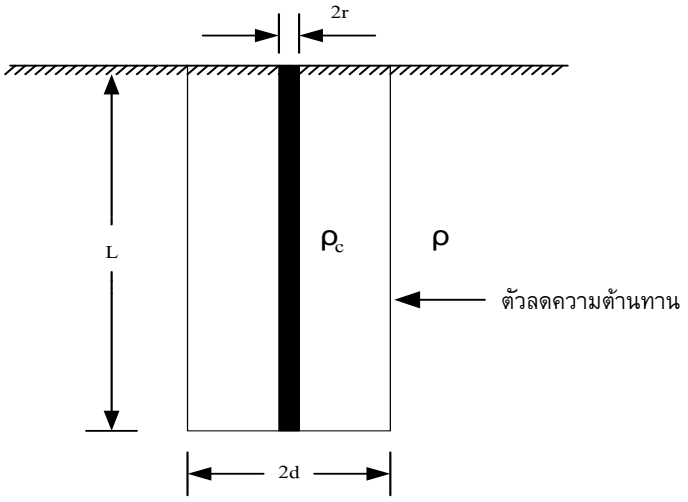
$$= \frac{L}{L - \sum_{j=1}^{n-1} h_j} \qquad (2.4)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{j=1}{\rho_n}$$

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดินปกติในดินไม่สม่ำเสมอสามารถหาได้จากสมการ (2.5)

$$R = \frac{\prod_{k=1}^{n} \rho_k}{2\pi\left[\sum_{j=1}^{n-1}\prod_{k=1}^{n} \rho_k h_j + \left(L - \sum_{j=1}^{n-1} h_j\right)\prod_{k=1}^{n-1} \rho_k\right]} \times\left\{\ln\frac{2L}{r}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right]+\frac{r}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right\} \quad (2.5)$$

2.2.5 ความต้านทานของแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทาน



ภาพที่ 2.9 แท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทาน

แท่งตัวนำที่ถูกห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานจะมีความหนาของตัวลดความต้านทานเท่ากับ d - r (เมตร) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9

$$R = \frac{\rho_c}{2\pi L}\left\{\ln\frac{2L}{r}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right]+\frac{r}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right\} + \frac{\rho-\rho_c}{2\pi L}\times\left\{\ln\frac{2L}{d}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{d}{2L}\right)^2}\right]+\frac{d}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{d}{2L}\right)^2}\right\} \quad (2.6)$$

สมการที่ 2.6 ใช้สำหรับแท่งรากสายดินที่ถูกห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทาน ρ_c (โอห์ม-เมตร) ตลอดแท่งตัวนำ เมื่ออยู่ในดินที่เป็นแบบเดียวกันซึ่งมีความต้านทานเท่ากับ ρ (โอห์ม-เมตร) ดังนั้นอัตราการลดความต้านทานดินสามารถหาได้จากสมการ (2.7)

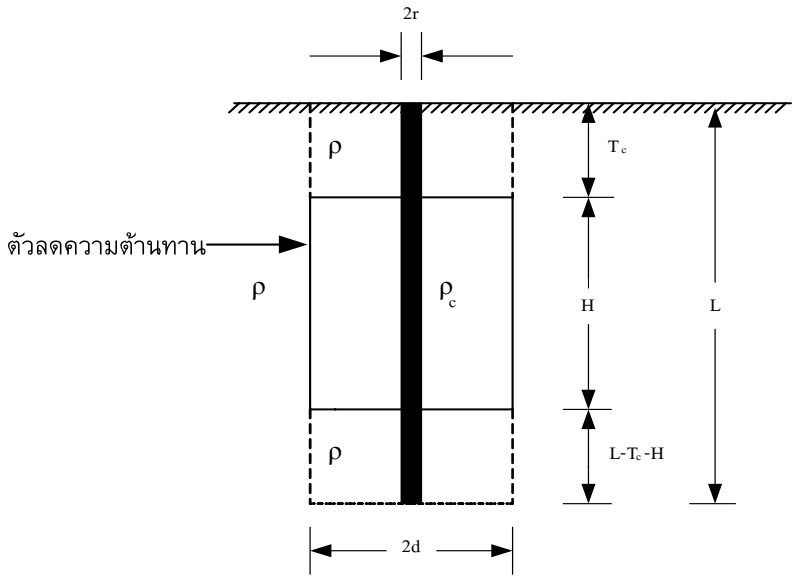
$$Rg = \frac{Rgwo - Rgw}{Rgwo} \times 100\% \tag{2.7}$$

โดยที่ *Rg* คือ อัตราการลดความต้านทานของพื้นดิน

Rgwo คือ ความต้านทานของพื้นดินโดยปราศจากตัวลดความต้านทาน (โอห์ม)

Rgw คือ ความต้านทานของพื้นดินโดยมีตัวลดความต้านทาน (โอห์ม)

2.2.6 ความต้านทานของแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานเพียงบางส่วน



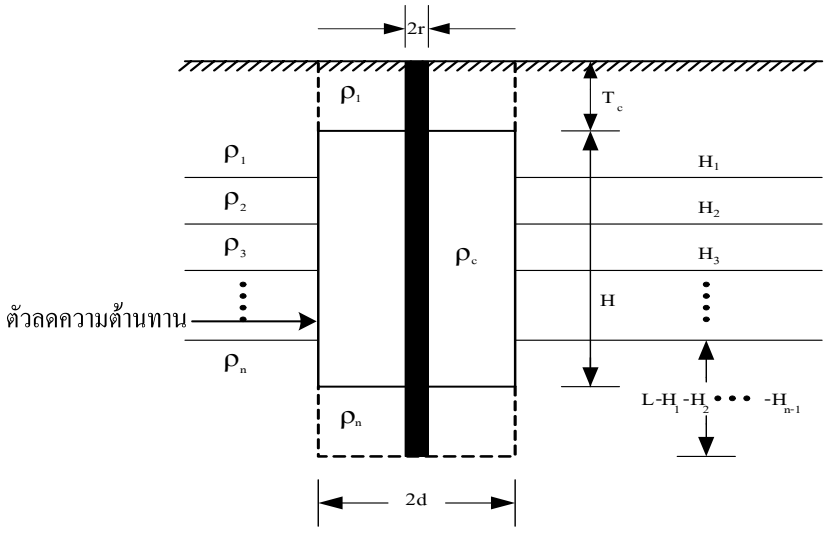
ภาพที่ 2.10 แท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานเพียงบางส่วน

ความต้านทานของแท่งรากสายดินที่ถูกห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานเพียงบางส่วน ตามภาพที่ 2.10 สามารถหาได้จากสมการ (2.8)

$$R = \frac{\rho\rho_c}{2\pi\left[H_\rho + (L-H)\rho_c\right]} \times \left\{ \ln\frac{2L}{r}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2} \right\}$$

$$+\frac{H_\rho(\rho-\rho_c)}{2\pi L\left[H_\rho+(L-H)\rho_c\right]}\times\left\{\ln\frac{2L}{d}\left[1+\sqrt{1+\left(\frac{d}{2L}\right)^2}\right]+\frac{d}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{d}{2L}\right)^2}\right\} \qquad (2.8)$$

สมการที่ (2.8) สำหรับแท่งรากสายดินที่ฝังลงในดินชนิดเดียวกันโดยมีความต้านทานจำเพาะเท่ากับ ρ (โอห์ม-เมตร) และตัวลดความต้านทานมีความต้านทานจำเพาะเท่ากับ ρ_c (โอห์ม-เมตร) ดัง แสดงให้เห็นในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.11 แท่งรากสายดินที่ถูกห่อหุ่มด้วยตัวลดความต้านทานเพียงบางส่วนในดินที่ไม่สม่ำเสมอ

จากภาพที่ 2.11 สามารถหาความต้านทานของแท่งรากสายดินที่ถูกห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานเพียงบางส่วนในดินที่ไม่สม่ำเสมอ ความต้านทานดินสามารถหาได้จากสมการ (2.9)

$$R = \frac{\rho_1 \rho_c \rho_n}{2\pi \left[T_c \rho_n \rho c + H \rho_n \rho_c + \left(L - T_c - H \right) \rho_1 \rho_c \right]} \times \left\{ \ln \frac{2\pi}{r} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} + \frac{\prod_{k=1}^{n} \rho_k}{2\pi \left[\sum_{j=1}^{n-1} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq 1}}^{n} \rho_k h_j + \left(L - \sum_{j=1}^{n-1} h_j \right) \prod_{k=1}^{n-1} \rho_k \right]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right\} - \frac{\rho_1 \rho_c \rho_n}{2\pi \left[T_c \rho_n \rho_c + H \rho_1 \rho_n + \left(L - T_c - H \right) \rho_1 \rho_c \right]} \times \left\{ \ln \frac{2L}{d} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right] + \frac{d}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2L} \right)^2} \right\} \tag{2.9}$$

2.3 เกณฑ์ในการวิเคราะห์สำหรับการคำนวณหารัศมีของตัวลดความต้านทาน[2]

หลักดินมีรัศมี R ฝังอยู่ในดินที่ความลึกเท่ากับ l ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 สมมติถ้าค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่ ค่าความต้านทานดินสามารถหาได้จากสมการ (2.10)

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.10}$$

พิจารณาจากวงชั้นความหนารวมศูนย์เชิงส่วนประกอบ dx และระยะห่าง x จากศูนย์กลางของหลักดิน ดังนั้นความต้านทาน dR หาได้จากสมการ (2.11)

$$dR = \frac{\rho}{2\pi x^2 + 2\pi xl} dx = \frac{\rho}{2\pi d} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{x+1} \right] dx \tag{2.11}$$

ดังนั้นความต้านทานที่ x สามารถให้เป็นสมการ (2.12)

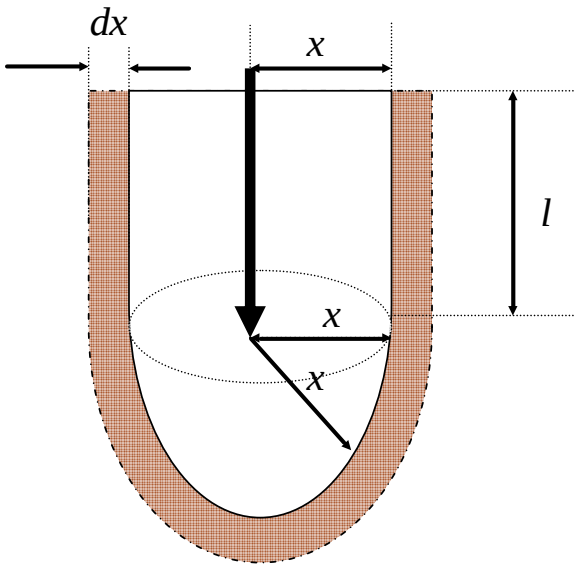
$$R(x)=\frac{\rho}{2\pi l}\int\left[\frac{1}{x}-\frac{1}{x+1}\right]dx=\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left(\frac{x}{r}\right)-\ln\left(\frac{x+l}{r+l}\right)\right] \tag{2.12}$$

และสามารถเขียนใหม่เป็นสมการ (2.13)

$$R(x)=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\left[\left(\frac{r+l}{r}\right)\left(\frac{x}{x+l}\right)\right] \tag{2.13}$$

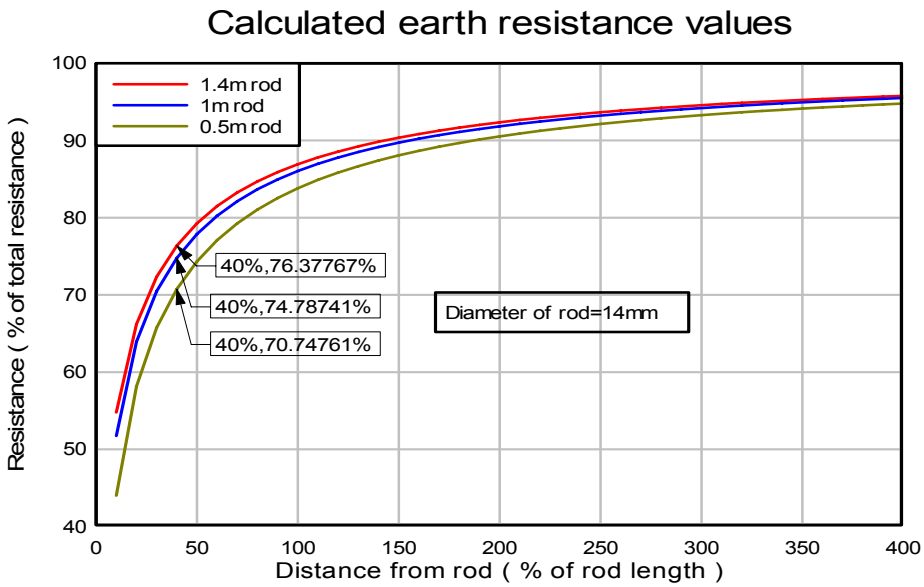
เนื่องจากมีการพิจารณามวลของดินส่วนใหญ่ค่าความต้านทานดินรวมที่ได้จะคิดได้จากสมการ (2.14)

$$R=\lim_{x\to\infty}R(x)=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\left[\frac{r+l}{r}\right] \tag{2.14}$$



ภาพที่ 2.12 แสดงจุดเครื่องหมายของความต้านทาน R ต่อระยะห่าง X

จากภาพที่ 2.12 แสดงจุดเครื่องหมายของความต้านทาน R ต่อระยะห่าง x สำหรับหลักดินทั้งสามแท่งที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 หลักดินทั้งสามแท่งมีความยาว 0.5 เมตร และแต่ละหลักมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร ความต้านทานสามารถอธิบายเป็นอัตราส่วนคิดเป็นร้อยละ 95% ของความต้านทานดินรวม ที่กำหนดระยะห่างยังแสดงเป็นอัตราส่วนคิดเป็นร้อยละของความยาวของหลักดิน (*l*)



ภาพที่ 2.13 ค่าความต้านทานเริ่มต้นคงตัวที่ระยะรัศมีประมาณ 40% ของความยาวของแท่งหลักดิน

2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต [4]

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่

1. องค์ประกอบของส่วนผสม (Mix Design) เช่น ชนิดของซีเมนต์ สารผสมเพิ่ม
2. โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของคอนกรีต (Concrete pore Structure)
3. ปริมาณความชื้นในคอนกรีต และ ความชื้นสัมพัทธ์
4. องค์ประกอบของสารละลาย (Composition of Pore Solution)
5. ระดับของการอิ่มตัว (Degree of Saturation)
6. อุณหภูมิ

7. ความต้านทานจำเพาะของสารละลายที่ซึมอยู่ในเนื้อคอนกรีต (Resistivity of the pore Solution)
8. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
9. ระดับของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Degree of Hydration)

เมื่อมองคอนกรีตในแง่ของคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 เฟสด้วยกัน ได้แก่

- เฟสความต้านทานเพียงอย่างเดียวก็คือส่วนของมวลรวม
- เฟสอนุภาคในการนำไฟฟ้าก็คือส่วนของเนื้อซีเมนต์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอออน
- เฟสของเหลว เช่น สารละลายที่ซึมอยู่ในเนื้อคอนกรีต

ในความเป็นจริงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีเมนต์เพลสมอร์ทาร์และคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนกระทั่งมีอายุเกิน 200 วัน จากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานจำเพาะขึ้นอยู่กับการเกิดปฏิกิริยาไฮดรชั่นของซีเมนต์เพลสและปริมาตรของซีเมนต์เพลสในส่วนผสม

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในคอนกรีตเกิดขึ้นเนื่องจาก การเคลื่อนที่อยู่ของอิเล็กตรอนไปด้านตรงข้ามไอออนที่มีเครื่องหมายหนึ่งจะไปสะสมอยู่ที่ด้านหนึ่งและไอออนที่มีเครื่องหมายตรงข้ามก็จะสะสมอยู่ด้านตรงข้ามเพื่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้า

2.4.1 ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต

ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่มีผลอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้งานความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าหรือส่วนกลับก็คือความนำไฟฟ้าถือว่าเป็นเกณฑ์ในการวัดความสามารถของคอนกรีตในการต่อต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการนำไปใช้งาน

ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์ที่สึกกร่อนภายในเหล็กเสริม ถ้ามีความต้านทานจำเพาะสูงจะทำให้ลดอัตราการสึกกร่อนลง และความต้านทานจำเพาะสัมพันธ์โดยพื้นฐานกับความซึมซาบได้ของของเหลวและการแพร่กระจายของไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต ด้วยเหตุนี้ค่าความต้านทานจำเพาะจึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะวัดความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันสารละลายคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมภายในถูกกัดกร่อน

การนำคอนกรีตไปใช้งาน เช่น ใช้เป็นโครงสร้างของเสาไฟฟ้าเพื่อป้องกัน Stray Currents หรือ ใช้เป็นไม้หมอนรถไฟ หรือใช้งานคอนกรีตใกล้กับเคเบิลใต้ดินคอนกรีตอาจเกิดปรากฏการณ์

ทางไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหล แต่ในสภาวะทำงานปกติคอนกรีตจะมีความต้านทานสูงมากทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านได้หรือกระแสไม่สามารถไหลจากเหล็กที่เป็นโครงสร้างไปยังเนื้อคอนกรีต

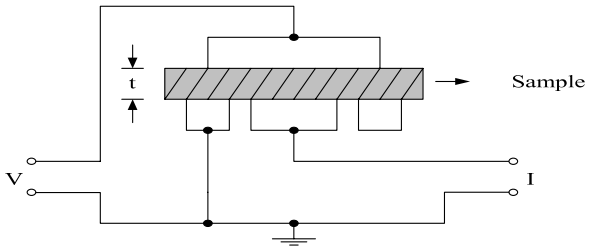
2.4.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่างคอนกรีต

ก). หลักการ

จะให้ความต่างศักย์ผ่านวัสดุที่ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวหรือสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรและวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านวัสดุนั้น หลังจากนั้นนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาคำนวณเพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวหรือสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรต่อไป

ข). การใช้งานของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานเชิงปริมาตร

- เครื่องวัดค่าความต้านทาน หรือ (Resistivity Chamber) จะใช้งานร่วมกับเครื่อง (High Voltage Supply)
- เครื่องมือวัดแบบ (Keithley Model 247) ซึ่งจะทำหน้าที่ให้ความต่างศักย์และ (Electro-meter / Source)
- เครื่องมือวัดแบบ (Keithley Model 617) ซึ่งจะทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2.14 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร

ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรสามารถหาได้จากสมการ (2.15)

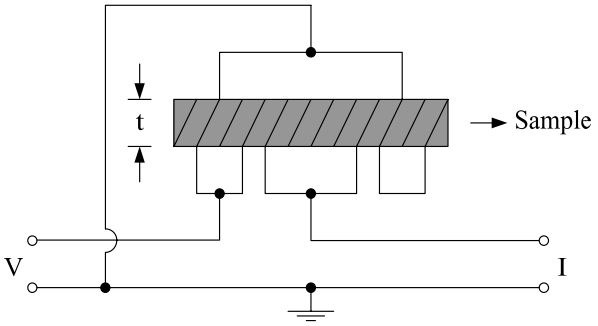
$$\rho = \frac{AV}{It} \tag{2.15}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของอิเล็กโทรด

t คือ ความหนาเฉลี่ยของวัสดุที่จะทำการวัด

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวัสดุที่จะทำการวัด

I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้



ภาพที่ 2.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวสามารถหาได้จากสมการ (2.16)

$$\sigma = (P \times V) \times (I \times g) \tag{2.16}$$

เมื่อ P คือ เส้นรอบวงของอิเล็กโทรด

G คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวัสดุที่จะทำการวัด

I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณต่อไปจากสูตรสำเร็จ (เฉพาะ Model 6105)

$$\sigma = (53.4 \times V) \times I \tag{2.17}$$

$$\rho = \frac{(22.9)(V)}{(I)(t)} r \tag{2.18}$$