บทที่ 3
ขั้นตอนการออกแบบการสร้างแท่งรากสายดินชนิดความต้านทานต่ำ

กากโลหะเป็นส่วนผสมหลักที่ได้นำมาใช้เป็นวัสดุลดความต้านทานของแท่งรากสายดิน และเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดจึงมีการทดลองสร้างชิ้นงานตัวอย่างแล้วนำไปวัดค่ากระแสและนำค่ากระแสของชิ้นงานตัวอย่างที่วัดได้มาคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่าง อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่ำที่สุดจะเป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการสร้างแท่งรากสายดินชนิดความต้านทานต่ำ

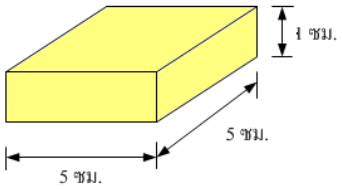
3.1 อุปกรณ์และวิธีการสร้างชิ้นงานตัวอย่างของโครงงานที่ผ่านมา [4]

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานตัวอย่าง

- กากโลหะ
- ปูนซีเมนต์
- น้ำ
- เกลือ
- แผ่นอะลูมิเนียม

3.1.2 วิธีการสร้างชิ้นงานตัวอย่าง

สร้างชิ้นงานตัวอย่างจากคอนกรีตผสมขนาด (5 × 5 × 1) ซม. โดยมีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน โดยที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมแทนขั้วไฟฟ้า เพื่อที่จะนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ที่จะนำไปสร้างชิ้นงานจริง โดยส่งชิ้นงานไปวัดค่าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology Center) หรือเรียกสั้นๆว่า MTEC โดยทำการวัดชิ้นงานที่ห้องปฏิบัติการวัดทางไฟฟ้า



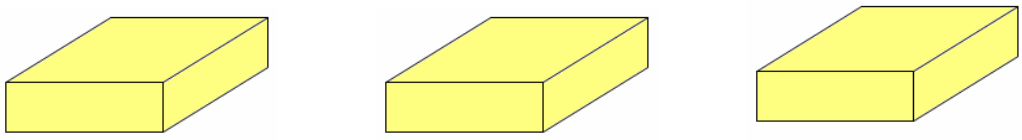
ภาพที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานตัวอย่างคอนกรีต

โดยสร้างชิ้นงานขึ้นทั้งหมด 3 อัตราส่วน ดังนี้

อัตราส่วนที่ 1 สร้างชิ้นงานตามอัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.06 โดยจะใช้ วัตถุดิบจาก ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ: เกลือ ตามลำดับเพื่อศึกษาค่าความต้านทานจำเพาะของแท่งรากสายดิน ชนิดความต้านทานต่ำที่ออกมา

อัตราส่วนที่ 2 สร้างชิ้นงานตามอัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.09 โดยแตกต่างจากชิ้นที่ 1 คือค่าของเกลือที่มีอัตราส่วนไม่เท่ากัน เพื่อดูค่าที่ออกมาว่ามีค่าแตกต่างจาก ชิ้นที่ 1 อย่างไร

อัตราส่วนที่ 3 สร้างชิ้นงานตามอัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12 เพื่อดูค่าความต้านทาน จำเพาะที่ออกมาเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ 1 และ ชิ้นงานที่ 2 ว่าอัตราส่วนผสมไหนทำให้ ชิ้นงานมีความต้านทานจำเพาะต่ำมากที่สุด

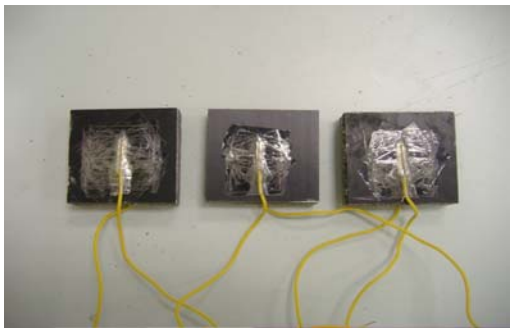


(a) อัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.06 (b) อัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.09 (c) อัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12

ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานแต่ละอัตราส่วนที่สร้างขึ้น

3.1.3 การวัดความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่าง

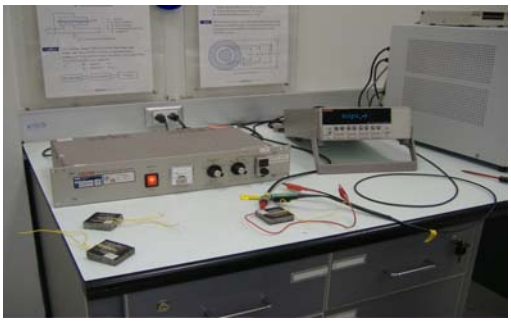
การวัดค่าของชิ้นงานตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนเพื่อที่จะนำค่ากระแสที่วัดได้ของแต่ละ อัตรา ส่วนมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะ



ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วน

3.1.4 ความสามารถของเครื่องวัดค่าชิ้นงานตัวอย่าง

เครื่องวัดรุ่น (Keithley 617) จะใช้ในการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านของตัวชิ้นงานคอนกรีต โดยจะใช้งานร่วมกับเครื่อง (High Voltage Supply) ควบคู่กันไปในการวัด



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดค่าชิ้นงานตัวอย่าง

3.1.5 การใช้งานเครื่องมือวัดความต้านทาน

เครื่องนี้ใช้วัดค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) และความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) ของวัสดุในสถานะของแข็งผิวเรียบ ขีดจำกัดของเครื่องมือวัด

- วัสดุที่นำมาปิดต้องมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 64 มิลลิเมตรถึง 102 มิลลิเมตร และมีความหนาอยู่ในช่วงระหว่าง 1.59 มิลลิเมตร ถึง 6.35 มิลลิเมตร
- สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่วัดได้อยู่ในช่วง $10^3 - 10^{19}$ (โอมห์-เมตร)
- สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวที่วัดได้อยู่ในช่วง $10^3 - 10^{18}$ (โอมห์)

- สัญญาณรบกวน 1fa
- ความต้านทานไฟฟ้ากระสลับอินพุต 200($T\Omega$) ของการวัดแรงดันไฟฟ้า
- การวัดค่าจาก 10μC ถึง 20μC
- ด้วยความเร็วสูง-สูงถึง 1200 ที่อ่าน/วินาที
- ใช้งานร่วมกับสวิทซ์, คอมพิวเตอร์

3.1.6 ขั้นตอนการวัดของชิ้นงานตัวอย่าง

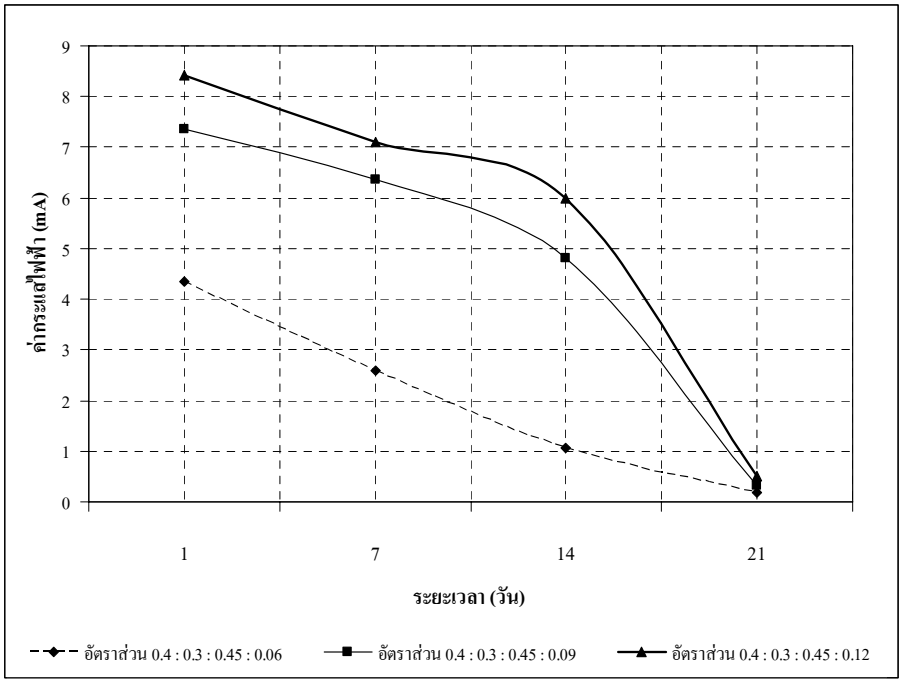
- การวัดค่าของชิ้นงานตัวอย่างจะใช้เครื่องวัดรุ่น (Keithley 617) โดยจะทำหน้าที่ วัดค่าของกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณต่อไปเพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะและความนำไฟฟ้า
- การใช้เครื่องวัดรุ่น (Keithley 617) จะใช้งานร่วมกับเครื่อง (High Voltage Supply)
- ต่อชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการวัดค่าเข้ากับเครื่องวัดรุ่น (Keithley 617) และเครื่อง (High Voltage Supply) โดยต่อวงจรตามภาพที่ 2.16 เป็นการวัดค่าการนำกระแสของชิ้นงาน
- จ่ายแรงดัน 300 V จากเครื่อง (High Voltage Supply) ให้กับชิ้นงานตัวอย่าง
- เทียบกับเวลาที่ 1 นาที แล้วทำการบันทึกค่าผลการทดลอง

3.1.7 ผลของการวัดค่ากระแสของชิ้นงานตัวอย่าง

ผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสของชิ้นงานเพื่อที่จะดูว่ากระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนชิ้นไหนได้ดีที่สุด โดยจะแสดงผลทั้งหมดอยู่ในตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 กระแสที่วัดได้ในแต่ละอัตราส่วนของชิ้นงานตัวอย่าง

อัตราส่วน ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ	ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (มิลลิแอมป์)			
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.06	4.357	2.593	1.058	0.181
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.09	7.362	6.374	4.820	0.335
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12	8.415	7.105	5.983	0.498



ภาพที่ 3.5 กระแสที่วัดได้ของชิ้นงานตัวอย่างในอัตราส่วนของ ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ

3.1.8 ความนำไฟฟ้า

กระแสที่วัดได้จากตารางที่ 3.1 มาคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจากสมการ (3.1) และ (3.2)

ความนำไฟฟ้า $\sigma = \frac{GL}{A}$ (3.1)

$$G = \frac{I}{V} \tag{3.2}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)

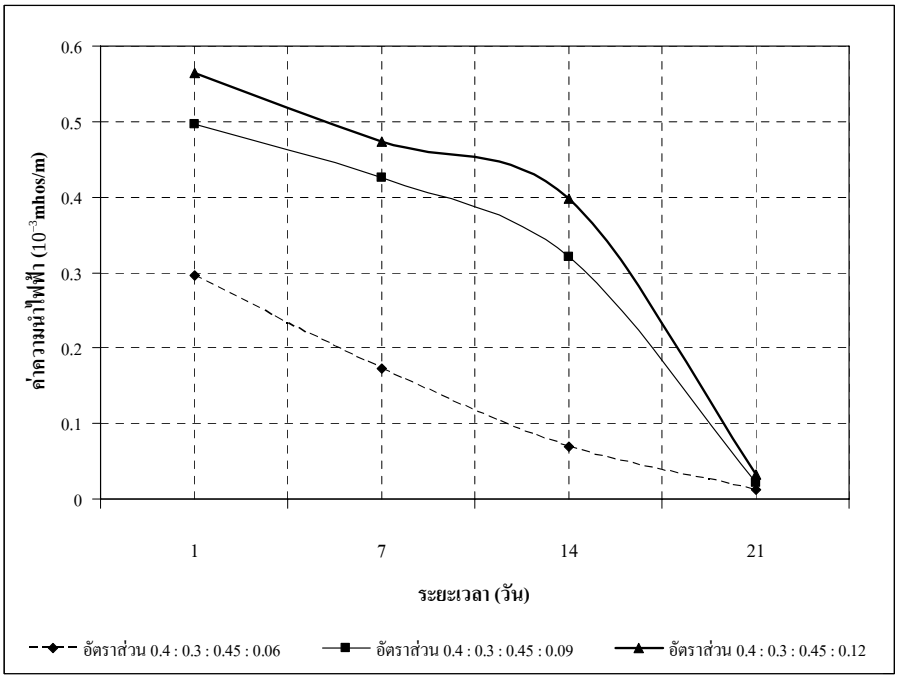
L คือ ความยาวของวัสดุ (เมตร)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงาน (โวลต์)

ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (3.1) และสมการ (3.2) จะแสดงผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 3.2 โดยนำค่ากระแสที่วัดได้ในแต่ละอัตราส่วนมาเป็นค่ากระแสที่ใช้ในการคำนวณ ค่าแรงดันที่จ่ายให้กับชิ้นงานกำหนดให้มีค่าแรงดัน (V) เท่ากับ 300 โวลต์ ความยาวของวัสดุมีค่า L = 0.05 เมตร และมีค่าพื้นที่หน้าตัด A = 25 ตร.ซม. เพื่อจะดูว่าอัตราส่วนผสมใดที่มีความนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด ผลจากการคำนวณจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลของความนำไฟฟ้า

อัตราส่วน ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ	ความนำไฟฟ้า (10^{-3} โอห์ม - เมตร)			
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.06	0.296	0.172	0.070	0.012
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.09	0.496	0.425	0.321	0.022
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12	0.564	0.473	0.398	0.033



ภาพที่ 3.6 ความนำไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างในอัตราส่วนของ ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ

3.1.9 ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วน

นำค่ากระแสที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่างจากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4)

ความต้านทานจำเพาะ $$\rho = \frac{RA}{L} \tag{3.3}$$

$$R = \frac{V}{I} \tag{3.4}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

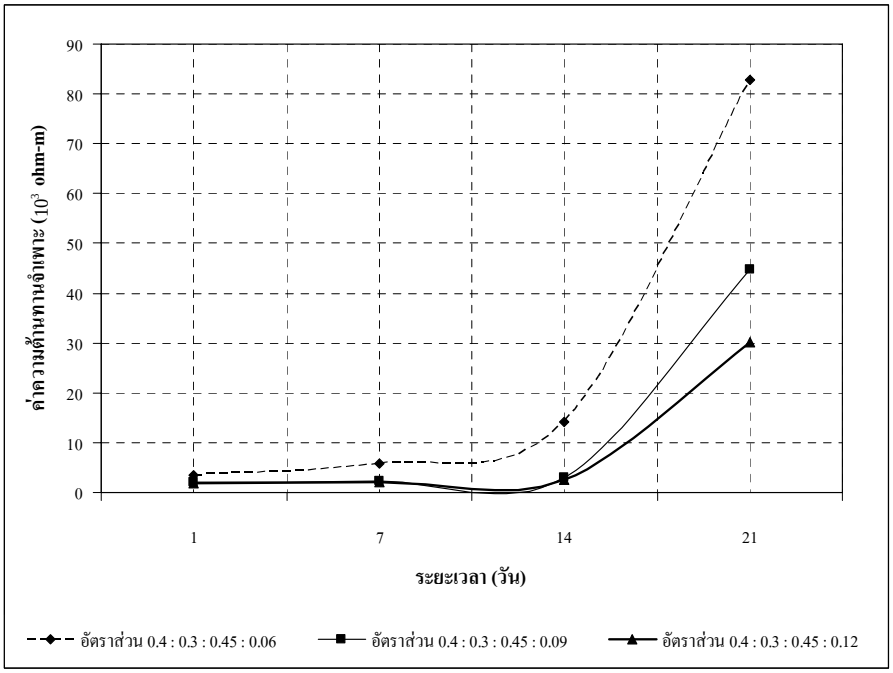
L คือ ความยาวของวัสดุ (เมตร)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงาน (โวลต์)

ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (3.3) และสมการ (3.4) จะแสดงผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.7 โดยนำค่ากระแสที่วัดได้ในแต่ละอัตราส่วนมาเป็นค่ากระแสที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วน

ตารางที่ 3.3 ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่าง

อัตราส่วน ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ	ความต้านทานจำเพาะ (10^3 โอมห์ - เมตร)			
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.06	3.442	5.784	14.177	82.872
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.09	2.037	2.353	3.112	44.776
0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12	1.782	2.111	2.507	30.120



ภาพที่ 3.7 ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่าง

3.2 อัตตราส่วนผสมและรัศมีของตัวลดความต้านทาน

จากตารางที่ 3.3 ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 0.4 : 0.3 : 0.45 : 0.12 ซีเมนต์ : น้ำ : กากโลหะ : เกลือ ตามลำดับ เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าความต้านทาน

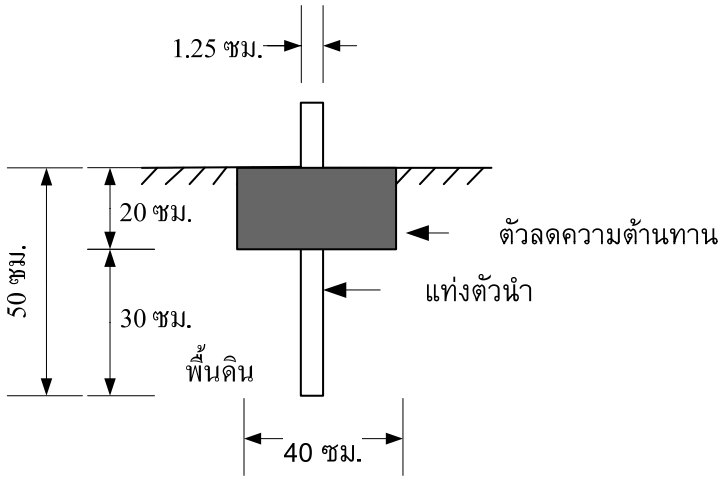
จำเพาะต่ำที่สุด แต่อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองแล้วในโครงงานที่ผ่านมา จึงมีการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมตาม ตารางที่ 2.2 ความต้านทานจำเพาะของตัวลดความต้านทานเมื่อมีเกลือในปริมาณที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 1 : 0.4 : 0.3 : 0.12 กากโละหะ : ซีเมนต์ : น้ำ : เกลือ ตามลำดับ เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่ำที่สุด ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วน 1 : 0.4 : 0.3 : 0.12 กากโละหะ : ซีเมนต์ : น้ำ : เกลือ เป็นอัตราส่วนผสมของตัวลดความต้านทานในโครงงานนี้

จากภาพที่ 2.13 สังเกตว่าเส้นโค้งทั้ง 3 เส้น ค่าความต้านทานเริ่มต้นคงตัวที่ระยะรัศมีประมาณ 40% ของความยาวของแท่งหลักดิน ดังนั้นระยะรัศมี 40% ของความยาวของแท่งหลักดินจึงเป็นสัดส่วนที่ดีที่จะใช้เป็นรัศมีของตัวลดความต้านทานสำหรับโครงงานนี้

3.3 ลักษณะโครงสร้างของโครงงาน

3.3.1 การสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณด้านบนของแท่งตัวนำ

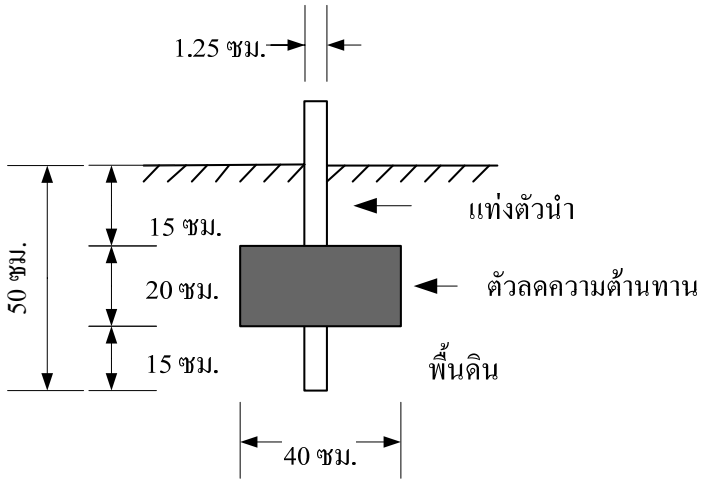
เป็นการสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มตัวลดความต้านทานบริเวณด้านบนของแท่งตัวนำ โดยที่แท่งรากสายดินทั้งหมดฝังในดิน เพื่อที่จะดูว่าในการขนานของตัวลดความต้านทานที่สร้างกับพื้นดินแต่ละชั้น มีค่าความต้านทานจำเพาะและความสามารถในการนำกระแสได้เป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งรากสายดินปกติ



ภาพที่ 3.8 แท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณด้านบนของแท่งตัวนำ

3.3.2 การสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณตรงกลางของแท่งตัวนำ

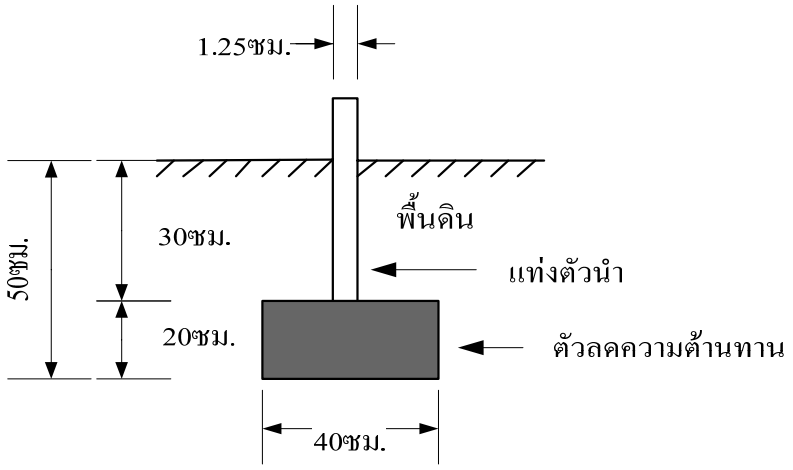
เป็นการสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณตรงกลางของแท่งตัวนำโดยที่แท่งรากสายดินทั้งหมดฝังในดิน เพื่อที่จะดูว่าในการขนานของตัวลดความต้านทานที่สร้างกับพื้นดินแต่ละชั้น มีค่าความต้านทานจำเพาะและความสามารถในการนำกระแสได้เป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งรากสายดินปกติ



ภาพที่ 3.9 แท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณตรงกลางของแท่งตัวนำ

3.3.3 การสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณด้านล่างของแท่งตัวนำ

เป็นการสร้างแท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณด้านล่างของแท่งตัวนำ โดยที่แท่งรากสายดินทั้งหมดฝังในดิน เพื่อที่จะดูว่าการขนานของตัวลดความต้านทานที่สร้างกับพื้นดินแต่ละชั้น มีค่าความต้านทานจำเพาะและความสามารถในการนำกระแสได้เป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งรากสายดินปกติ



ภาพที่ 3.10 แท่งรากสายดินที่ห่อหุ้มด้วยตัวลดความต้านทานบริเวณด้านล่างของแท่งตัวนำ

3.4 การคำนวณหาอัตราส่วนผสมของตัวลดความต้านทานดิน

ในการออกแบบแท่งรากสายดินชนิดความต้านทานต่ำโดยมีตัวลดความต้านทานห่อหุ้มแท่งตัวนำในอัตราของส่วนผสมของ กากโลหะ ซีเมนต์ น้ำ เกลือ (1: 0.4: 0.3: 0.12) ตามลำดับซึ่งในการผสมของอัตราส่วนคิดได้ดังนี้

ลักษณะของตัวลดความต้านทานในแต่ละตำแหน่งคำนวณหาอัตราส่วนผสมของตัวลดความต้านทานที่มีส่วนผสมเหมือนกัน เนื่องจากแท่งตัวนำมีขนาด 50 เซนติเมตร และรัศมีของตัวลดความต้านทาน r เท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีความหนาของตัวลดความต้านทาน h เท่ากับ 20 เซนติเมตร แต่มีลักษณะการวางตำแหน่งตัวลดความต้านทานที่แตกต่างกัน ดังนั้นอัตราส่วนผสมที่ใช้หาได้จากสมการ (3.5)

$$v = \pi r^2 h \tag{3.5}$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรทรงกระบอกของตัวลดความต้านทาน (ลูกบาศก์เมตร)

r คือ รัศมีของตัวลดความต้านทาน (เมตร)

h คือ ความหนาของตัวลดความต้านทาน (เมตร)

ดังนั้น ปริมาตรของตัวลดความต้านทานทั้งหมด

$$v = (\pi)(0.20^2\, m)(0.20m)$$
$$= 0.0251m^3$$

ในการผสมสามารถหาปริมาตรของมวลแต่ละตัวได้จากสมการ (3.6)

$$v_m = \frac{m}{\rho} \tag{3.6}$$

เมื่อ v_m คือ ปริมาตรของมวลแต่ละตัว (ลูกบาศก์เมตร)
m คือ ค่าของมวลแต่ละตัว (กิโลกรัม)
ρ คือ ปริมาตรจำเพาะของมวลแต่ละตัวเท่ากับ 1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

หาปริมาตรของกากโลหะจากสมการ

$$v_m = \frac{1kg}{1000kg/m^3} = 0.001\ m^3$$

หาปริมาตรของซีเมนต์จากสมการ

$$v_m = \frac{0.4kg}{1000kg/m^3} = 0.0004\ m^3$$

หาปริมาตรของน้ำจากสมการ

$$v_m = \frac{0.3kg}{1000kg/m^3} = 0.0003\ m^3$$

หาปริมาตรของเกลือจากสมการ

$$v_m = \frac{0.12kg}{1000kg/m^3} = 0.00012\ m^3$$

ดังนั้นจะได้ปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ

$$v_{mtotal} = (0.001m^3) + (0.0004m^3) + (0.0003m^3) + (0.00012m^3) = 0.00182m^3$$

จากมวลรวมสามารถหาปริมาตรของส่วนผสมแต่ละตัวที่ใช้ผสมจริงคิดเป็น % จากสมการ (3.7)

$$\%v_m = \frac{v_m}{v_{mtotal}} \tag{3.7}$$

เมื่อ v_m คือ ปริมาตรของมวลแต่ละตัว (ลูกบาศ์กเมตร)

v_{mtotal} คือ ปริมาตรของมวลรวม (ลูกบาศ์กเมตร)

หา % ปริมาตรของกากโลหะจากสมการ

$$\%v_m = \frac{0.001m^3}{0.00182m^3} = 0.5494\%$$

หา % ปริมาตรของซีเมนต์จากสมการ

$$\%v_m = \frac{0.0004m^3}{0.00182m^3} = 0.2197\%$$

หา % ปริมาตรของน้ำจากสมการ

$$\%v_m = \frac{0.0003m^3}{0.00182m^3} = 0.1648\%$$

หา % ปริมาตรของเกลือจากสมการ

$$\%v_m = \frac{0.00012m^3}{0.00182m^3} = 0.0659\%$$

จากค่า % ที่คำนวณสามารถนำมาคิดเป็นปริมาตรที่นำมาผสมเป็น (กิโลกรัม) จากสมการ (3.8)

$$v_{red} = (\%v_m \times v) \times 1000 \tag{3.8}$$

เมื่อ $\%v_m$ คือ ค่า % ของมวลแต่ละชนิด

v คือ ค่าปริมาตรของตัวลดความต้านทานทรงกระบอก

หาปริมาตรของกากโลหะที่นำมาผสมจากสมการ

$$v_{red} = (0.5494 \times 0.025m^3) \times 1000 = 13.73kg/m^3$$

หาปริมาตรของซีเมนต์ที่นำมาผสมจากสมการ

$$v_{red} = (0.2197 \times 0.025m^3) \times 1000 = 5.49kg/m^3$$

หาปริมาตรของน้ำที่นำมาผสมจากสมการ

$$v_{red} = (0.1648 \times 0.025m^3) \times 1000 = 4.12kg/m^3$$

หาปริมาตรของเกลือที่นำมาผสมจากสมการ

$$v_{red} = (0.0659 \times 0.025m^3) \times 1000 = 1.647kg/m^3$$

ดังนั้นในการสร้างตัวลดความต้านทานจะใช้วัสดุที่นำมาผสมในอัตราส่วนของ กากโลหะ : ซีเมนต์ : น้ำ : เกลือ (1: 0.4: 0.3: 0.12) ตามลำดับดังนี้

กากโลหะ	13.73	กิโลกรัม / หลุม
ซีเมนต์	5.49	กิโลกรัม / หลุม
น้ำ	4.12	กิโลกรัม / หลุม
เกลือ	1.647	กิโลกรัม / หลุม