[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
*Corresponding author; E-mail address: warut.sak@mail.kmutt.ac.th

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าในวัสดุดิน ได้แก่ ดินลูกรังและทรายละเอียด ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงตามสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดิน อาทิ ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดิน ทั้งนี้สมบัติการต้านทานไฟฟ้าอาจมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของดิน การศึกษานี้ได้ทดลองความต้านทานไฟฟ้าโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟผ่านตัวอย่างดิน ที่บรรจุในแบบจำลองกล่องดิน (Soil box) โดยใช้ตัวอย่างดินลูกรังจาก อำเภอท่าสี่ จังหวัดเลย ประเทศไทย และทราย มจธ. (ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 100) และทำการทดสอบการบดอัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) และความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content) จากนั้นจึงกำหนดปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้ง และทำการบดอัดดินที่เตรียมไว้ที่ความชื้นที่กำหนดลงในกล่องทดลองให้ได้ความหนาแน่นแห้งตามที่กำหนด และควบคุมความต่างศักย์ของการทดสอบให้อยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 30 โวลต์ การทดสอบพบว่าความชื้นและความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์กับความต้านทานไฟฟ้า และได้มีการใช้การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณในการสร้างสมการทำนาย และมีการใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการช่วยวิเคราะห์ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำนายดังกล่าวมีแนวโน้มโดย ค่าความต้านทานมีแนวโน้มที่จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของทั้งความชื้นและความหนาแน่นแห้ง

คำสำคัญ: ความต้านทานไฟฟ้า, การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ, ดินลูกรัง, ทราย, สภาพต้านทานไฟฟ้า, สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี

The study of soil electrical resistivity in various type of soil, which were lateritic soil and fine sand, which may be affected from the change of soil properties for instance, water content and dry density. Meanwhile, there may be a relationship between the property of the resistivity and the properties of soil. In this study, a resistance test was performed by inputting an electric current from the power supply through a soil sample prepared in a soil box, which samples in this study are a lateritic soil from Thali, Loei, Thailand, and KMUTT sand (sand which passed through the No. 40 sieve and retained on the No. 100 sieve). The compaction tests were also done to receive the maximum dry density and the optimum moisture content then the desired water content and the dry density of the soil sample are controlled in the soil box, while the voltage of the experiment was controlled in a range between 3 and 30 volts. The experiment found that there is a relationship between the water content, the dry density and the electrical resistivity, and the response surface methodology was used to create and analysed the correlation. From the experiment, the resistivity predicted from the regression tend to be reduced proportionally to the increased in the water content and the dry density.

Keywords: resistance, multiple variable regression, lateritic soil, sand, electrical resistivity, geotechnical engineering properties

1.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีโครงการขยายการก่อสร้างระบบขนส่ง ซึ่งจำเป็นต้องมีการขุดเจาะและถมดินเพื่อก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง และดินที่สามารถใช้ในการทำงานนี้ได้จะต้องสามารถซ่อมบำรุงได้ในระยาว แต่อย่างไรก็ตาม ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องใช้ดินที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง เพื่อระบายกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้า

ในทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี มีคุณสมบัติของดินหลายสิ่งที่จำเป็นในการใช้งานด้านวิศวกรรม แต่ผลกระทบทางด้านสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินนั้นยังไม่สามารถบ่งชี้และนำไปใช้ได้อย่างแน่ชัด ซึ่งการทำแบบจำลองทางกายภาพและการวิเคราะห์เชิงสถิติยังเป็นสิ่งที่ต้องมีการพัฒนาต่อไป

จากการศึกษาของ Bai et al. [1] ได้มีการเชื่อมโยงสมบัติทางเทคนิคธรณีของดินกับสภาพต้านทานไฟฟ้า อาทิ ลักษณะโครงสร้างของดิน (ความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่าง) และปริมาณน้ำในดิน และยังเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการไหลของกระแสไฟฟ้า และจากการศึกษาที่ผ่านมา [2-4] ได้แสดงว่าการแสไฟฟ้าในดินโดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับน้ำใน

ช่องว่างและปริมาณความชื้นในดิน ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ อาจทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถถูกศึกษาและมีการนำไปใช้มากขึ้น โดยการทดสอบนี้จะนำสมบัติดังกล่าวมาสร้างความสัมพันธ์และวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) แบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central composite design, CCD) ในการวิเคราะห์และสร้างสมการทำนายโดยใช้การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ

2.

2.1 วัสดุอุปกรณ์

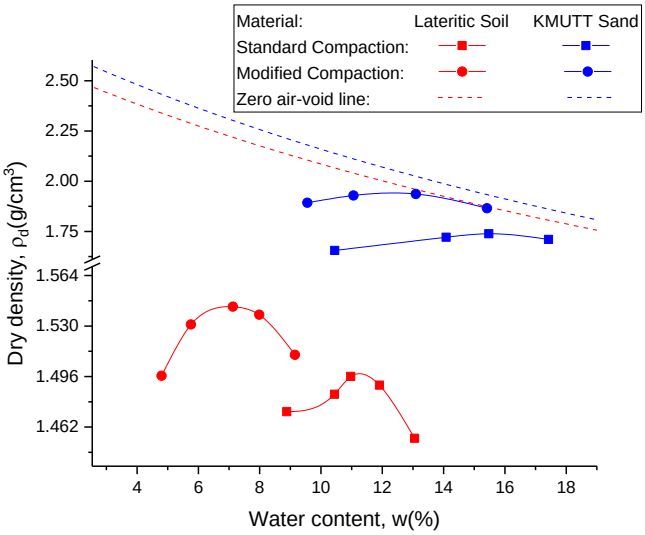
2.1.1 ตัวอย่างดินสำหรับการทดลอง

ดินลูกรังถูกเลือกเป็นตัวอย่างดินชนิดแรก โดยตัวอย่างนี้ได้รับมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นตัวอย่างดินจากอำเภอท่าลี่ จังหวัดเลย เนื่องจากขนาดอนุภาคของเม็ดดินบางส่วนมีขนาดใหญ่ แต่ปริมาตรของกล่องมีความจำกัด ทำให้ต้องมีการควบคุมขนาดของอนุภาคของดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ทดสอบทั้งหมดเป็นดินที่ถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (2 มิลลิเมตร) และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ℃

ทรายเป็นตัวอย่างที่สองของการทดลองนี้ โดยการทดสอบนี้ใช้ทราย มจธ. (KMUTT sand) ซึ่งเป็นทรายที่ทำการล้างด้วยน้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) และค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มิลลิเมตร) และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ℃ ซึ่งค่าสมบัติต่าง ๆ ของดินลูกรังและทรายที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ ได้แสดงดังตารางที่ 1 และผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐานได้แสดงดังรูปที่ 1

ตารางแสดงสมบัติของตัวอย่างดินลูกรังและทราย

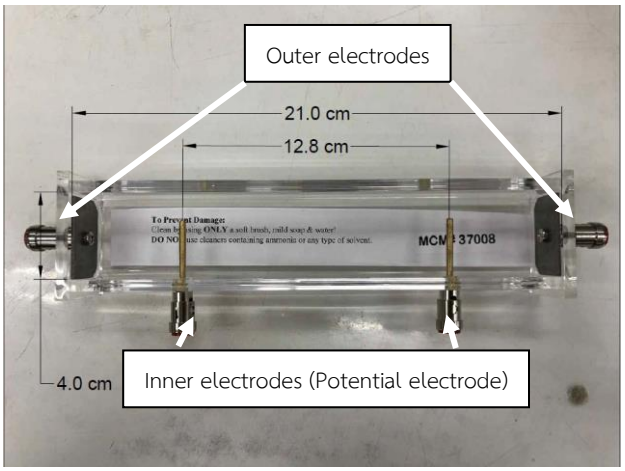
Property	Material		Unit
	Lateritic Soil	Sand	
Specific Gravity	2.75	2.66	-
D50	0.481	0.325	Millimetre
Coefficient of Uniformity, Cu	3.076	1.208	-
Coefficient of Curvature, Cc	0.763	1.270	-
Optimum moisture content (Standard proctor)	1.738	1.498	g/cm^3
Optimum moisture content (Modified proctor)	1.942	1.543	g/cm^3
Maximum dry density (Standard proctor)	15.54	6.95	Percent
Maximum dry density (Modified proctor)	12.35	11.27	Percent



เส้นโค้งการบดอัดดินแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานของทราย มจธ.

2.1.2 กล่องทดสอบดิน (Soil Box)

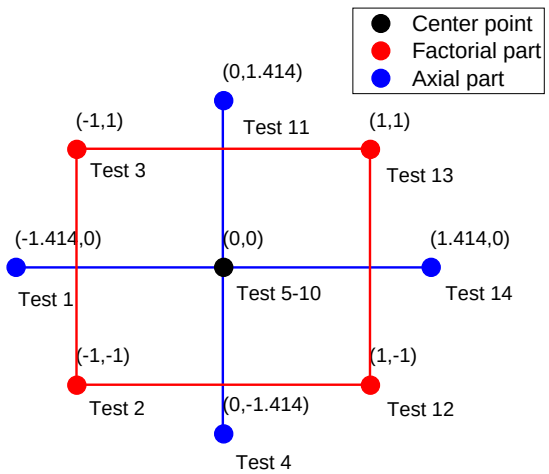
กล่องทดสอบดินของบริษัท M.C. Miller เป็นกล่องที่ถูกใช้ในการทดสอบครั้งนี้ เป็นอุปกรณ์ที่ผ่านตามมาตรฐานการทดสอบแบบสี่ขั้วไฟฟ้าของ ASTM G57 [5] โดยกล่องถูกสร้างจากวัสดุพลาสติกใสชนิด plexiglass โดยมีแผ่นโลหะสเตนเลสที่ยึดติดกับขั้วนอก (Outer electrodes) ทำหน้าที่กระจายกระแสไฟฟ้าที่หัวและท้ายภายในกล่อง และมีขั้วใน หรือหมุดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Inner electrode or potential electrodes) ที่สามารถถอดออกได้ ดังรูปที่ 2 โดยกล่องมีปริมาตร 270 มิลลิลิตร มีพื้นที่หน้าตัด 12.8 ตารางเซนติเมตร ความยาวภายในกล่องทั้งหมด 21.0 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ววัดความต่างศักย์เท่ากับ 12.8 เซนติเมตร



องค์ประกอบของกล่องทดสอบดินของ M.C. Miller

2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดสอบนี้ได้มีการใช้การวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ในรูปแบบการออกแบบของเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central composite design, CCD) ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์สมการพหุคูณแบบถดถอยและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น ความหนาแน่นแห้ง และสภาพต้านทานไฟฟ้าในรูปแบบของกราฟพื้นผิว โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการทดสอบซึ่งอ้างอิงจาก การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) [7] โดยจำนวนครั้งในการทดสอบขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต้นของสมการ ซึ่งในการทดสอบนี้มี 2 ตัวแปรต้น กล่าวคือ การทดลองนี้เป็นการทดลองที่สองระดับ ซึ่งในการทำการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องมีการอ้างอิงค่าจากองค์ประกอบสามส่วนดังรูปที่ 3 ซึ่งคือ ส่วนแกน (Axial part) มีหน้าที่ปรับค่าตัวแปรและวัดค่าความคลาดเคลื่อนของอิทธิพลกำลังสอง (Quadratic effect) ส่วนแฟกทอเรียล (Factorial part) มีหน้าที่ตรวจสอบความโค้งของข้อมูลและวัดความเกี่ยวข้องกันของสองตัวแปร และจุดกึ่งกลาง (Center point) ทำหน้าที่ปรับค่าตัวแปรและเป็นค่ากลางของข้อมูล ซึ่งจำเป็นต้องมีการเก็บค่ามากกว่าหนึ่งครั้งเพื่อวัดค่าความคลาดเคลื่อนโดยตรง (Pure error) โดยสำหรับการทดลองนี้ได้เลือกจำนวนการการทดสอบค่าที่ส่วนแกนเป็นจำนวน 6 ครั้ง [8] จึงทำให้การทดลองนี้มีจำนวนการทดสอบทั้งหมดเป็น 14 ครั้ง โดยหลังจากการทดสอบตามค่าอ้างอิงจากการออกแบบการทดลองและจุดทั้งสามส่วนดังที่กล่าวมา จะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างสมการพหุคูณแบบถดถอย รวมถึงสามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเชิงซ้อน (Coefficient of Multiple Determination, R^2) ได้



การออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับ 2 ตัวแปรต้น

2.3 การเตรียมการทดสอบ

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ในการทดสอบนี้ ตัวอย่างดินได้ถูกเตรียมโดยควบคุมปริมาณความชื้น (water content) และความหนาแน่นแห้ง (dry density) ซึ่งสมบัติทั้งสองชนิดจะถูกอ้างอิงจากค่าความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content) และค่าความหาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) โดยค่ากลางของการทดสอบ (การทดสอบ S1W3D3 และ S2W3D3) ทำหน้าที่เป็นจุดกึ่งกลางของการออกแบบการทดลองและเป็นค่าที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงซึ่งได้จาก การเฉลี่ยค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัดตัวอย่างแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานโดยสมบัติทั้งสองของตัวอย่างดินลูกรังและทรายจะถูกควบคุมตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

ตารางแสดงโปรแกรมการทดสอบของตัวอย่างดินลูกรัง

Test No.	Coordinate from DOE	Test Name	Dry Density, ρ_d (g/cm^3)	Water content, w (%)	Resistivity (Ω.m)
1	(-1.414, 0)	S1D1W3	1.384	13.95	534.20
2	(-1, -1)	S1D2W2	1.447	11.95	524.32
3	(-1, 1)	S1D2W4	1.447	15.95	450.08
4	(0, -1.414)	S1D3W1	1.600	11.12	526.67
5	(0, 0)	S1D3W3	1.600	13.95	443.73
6					444.92
7					427.71
8					441.25
9					443.18
10					440.15
11	(0, 1.414)	S1D3W5	1.600	16.77	415.97
12	(1, -1)	S1D4W2	1.753	11.95	479.85
13	(1, 1)	S1D4W4	1.753	15.95	404.01
14	(1.414, 0)	S1D5W3	1.817	13.95	396.53

ตารางแสดงโปรแกรมการทดสอบของตัวอย่างทราย มจธ.

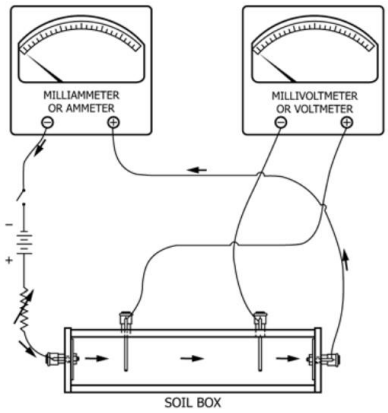
Test No.	Coordinate from DOE	Test Name	Dry Density, ρ_d (g/cm^3)	Water content, w (%)	Resistivity (Ω.m)
1	(-1.414, 0)	S2D1W3	1.238	9.11	534.03
2	(-1, -1)	S2D2W2	1.259	6.61	498.02
3	(-1, 1)	S2D2W4	1.259	11.61	419.94
4	(0, -1.414)	S2D3W1	1.309	5.57	529.73
5	(0, 0)	S2D3W3	1.309	9.11	436.25
6					440.15
7					443.12
8					435.16
9					432.12
10					427.56
11	(0, 1.414)	S2D3W5	1.309	12.64	395.26
12	(1, -1)	S2D4W2	1.359	6.61	437.00
13	(1, 1)	S2D4W4	1.359	11.61	365.42
14	(1.414, 0)	S2D5W3	1.379	9.11	395.50

จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ค่าปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างทั้งสองได้จาก การออกแบบการทดลองที่อ้างอิงจากวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต [6] โดยส่วนแกนของการทดสอบนี้คือการทดสอบที่1, 4,

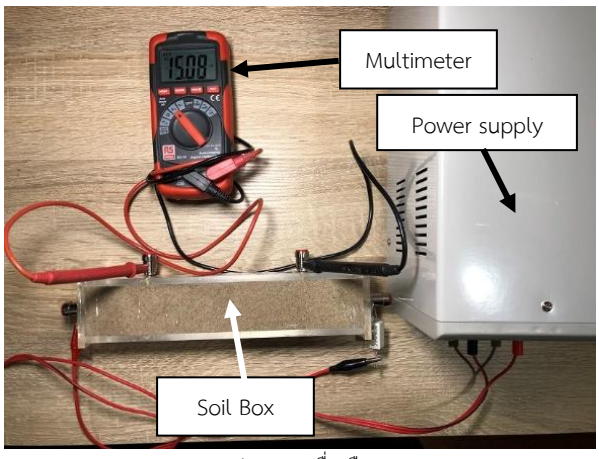
11 และ 14 ส่วนแฟกทอเรียลคือการทดสอบที่ 2, 3, 12 และ 13 และจุดกึ่งกลางคือการทดสอบที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10

2.3.2 การประกอบเครื่องมือทดสอบ

หลังจากการเตรียมตัวอย่างเสร็จสมบูรณ์ กล่องทดลองจะถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกบางเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทดสอบ ซึ่งเครื่องมือทดสอบถูกต่อโดยการใช้เครื่องจ่ายไฟต่อเข้ากับขั้วฝั่งหัวและท้ายของกล่อง และใช้มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ต่อเข้ากับขั้ววัดศักย์ไฟฟ้า ซึ่งอยู่ตรงกลางทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 เมื่อทำการต่อวงจรจะออกมาในรูปแบบของการเรียงตัวของเวนเนอร์แบบสี่ขั้ว (Wenner's 4-electrode array) [5]



การต่อวงจรไฟฟ้า [5]



การประกอบเครื่องมือการทดสอบ

3.

การทดสอบดำเนินการโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้วหัวและท้ายของอุปกรณ์และวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้วตรงกลาง โดยควบคุมความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปในวงจรโดยเริ่มใส่จาก 3 โวลต์ จนถึง 30 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทุก ๆ 1.5 โวลต์ ตัวอย่างเช่น การทดลอง S1W3D3 เมื่อทำการควบคุมความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปที่ 30 โวลต์ จะได้กระแสที่ไหลในวงจรซึ่งวัดจากขั้วนอกมีค่าเท่ากับ 0.34 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมซึ่งวัดได้จากขั้วในหรือหมุดวัดความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ 14.830 โวลต์ โดยค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม และกระแสที่ไหลในวงจรที่วัดได้จะถูกนำไปใส่ในสมการที่ (1)

$$R = \frac{V_{Out}}{I} \quad (1)$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ω) V คือความต่างศักย์ที่ตกคร่อม (V) วัดได้จากขั้วใน และ I คือกระแสที่ไหลในวงจร (I) วัดได้จากขั้วนอก หลังจากได้ความต้านทานไฟการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมและกระแสที่ไหลในวงจร จำเป็นต้องมีการวัดอุณหภูมิของดินที่ทดลองและทำการปรับแก้โดยสมการที่ (2)

$$R_{15.5} = R_T\left(\frac{24.5+T}{40}\right) \quad (2)$$

เมื่อ $R_{15.5}$ คือความต้านทานที่ 15.5℃ (Ω) R_T คือความต้านทานที่อุณหภูมิของดินทีทดสอบ (Ω) และ T คืออุณหภูมิของดินที่ทำการทดสอบ (℃) จากนั้นจึงนำไปหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าดังสมก ารที่ (3)

$$\rho = \pi bR / \left(1-\frac{b}{b+a}\right) \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω.m) b คือระยะระหว่างขั้วด้านนอกถึงขั้วด้านใน (cm) และ a คือระยะระหว่างขั้วด้านใน (cm)

3.1 ผลการทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

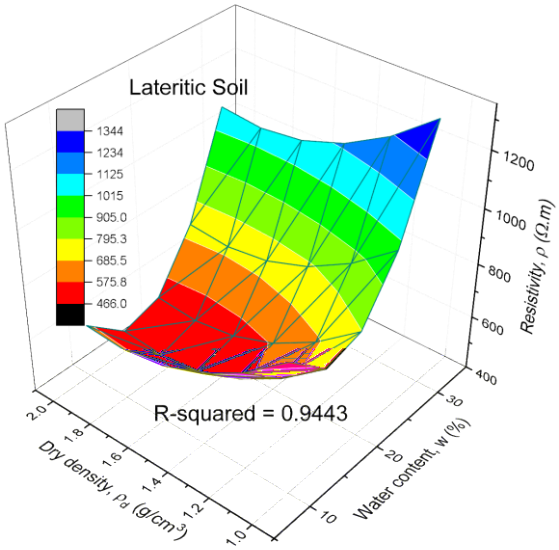
จากการทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งได้มาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินทั้งสองชนิด ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าปริมาณความชื้นในดินและความหนาแน่นแห้ง โดยสำหรับตัวอย่างดินลูกรังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดิน ความหนาแน่นแห้ง และสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดงได้เป็นสมการพหูคูณแบบถดถอยได้ดังสมการที่ (4)

$$\rho = 2759 - 106.7w - 1564\rho_d + 3.21w^2 + 422\rho_d^2 + 1.3w\rho_d \quad (4)$$

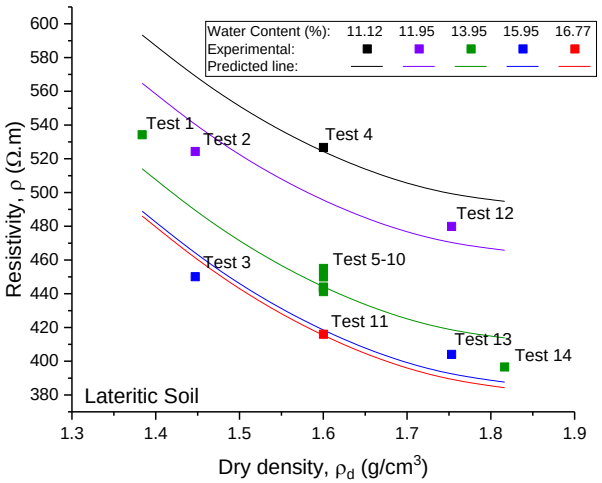
เมื่อ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω.m) w คือปริมาณน้ำในดิน (%) และ ρ_d คือค่าความหนาแน่นแห้ง (g/cm^3) โดยสมการที่ (4) สามารถแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินและความหนาแน่นแห้งมีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงจนถึงจุดหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเพิ่มขึ้นตามค่าปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในดิน โดยจุดวกกลับจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในดินมีค่าเท่ากับ 15% ดังที่แสดงในพื้นที่สีแดง และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเชิงซ้อน (R^2) ของการสร้างสมการพหุคูณนี้เท่ากับ 0.9443

เมื่อนำกราฟพื้นผิวในรูปที่ 6 มาสร้างเส้นของการทำนายที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและความหนาแน่นแห้งมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อค่าปริมาณความชื้นมากกว่า 18% จะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Bai et al. [1] ที่ได้ศึกษาไว้ว่าลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน

ไฟฟ้าและความหนาแน่นแห้งของดินลูกรังจะเปลี่ยนไปเมื่อน้ำมีปริมาณถึงจุดของความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content)



ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำในดินและสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างดินลูกรัง

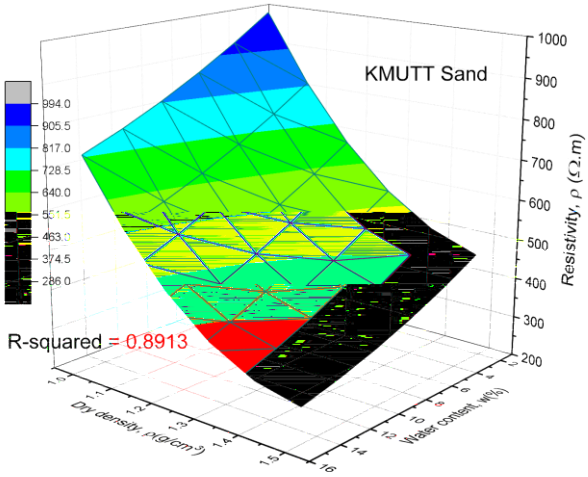


เส้นการทำนายและค่าจากการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ ของตัวอย่างดินลูกรัง

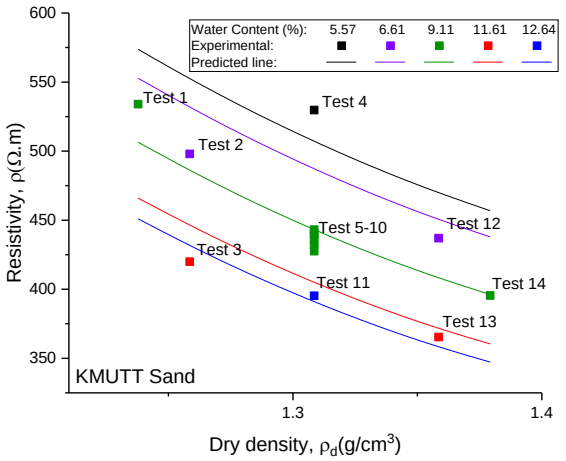
สำหรับการทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างทราย มจธ. เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าปริมาณความชื้นในดินและความหนาแน่นแห้ง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นใน ความหนาแน่นแห้ง และสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดงได้เป็นสมการพหุคูณแบบถดถอยได้ดังสมการที่ (5)

$$\rho = 4579 - 42w - 5135\rho_d + 42w^2 + 1619\rho_d^2 + 13w\rho_d \quad (5)$$

เมื่อ ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω.m) w คือปริมาณน้ำในดิน (%) และ ρ_d คือค่าความหนาแน่นแห้ง (g/cm^3) ซึ่งสมการที่ (5) สามารถแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินและความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างทรายมีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเช่นเดียวกับตัวอย่างดินลูกรัง แต่สำหรับตัวอย่างทรายไม่มีจุดวกกลับ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเชิงซ้อน (R^2) ของการสร้างสมการพหุคูณนี้เท่ากับ 0.8913



ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง ปริมาณน้ำในดินและสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างทราย มจธ.

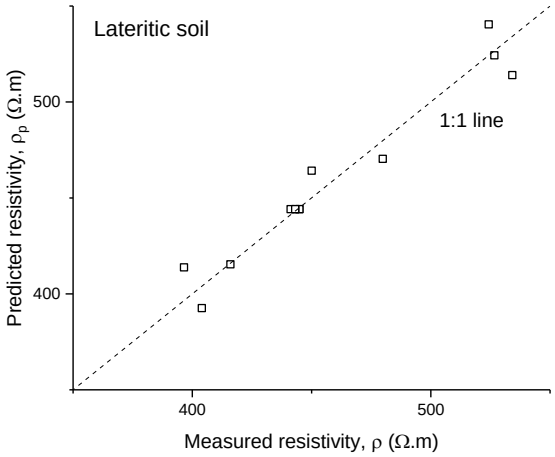


เส้นการทำนายและค่าจากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ ของตัวอย่างทราย มจธ.

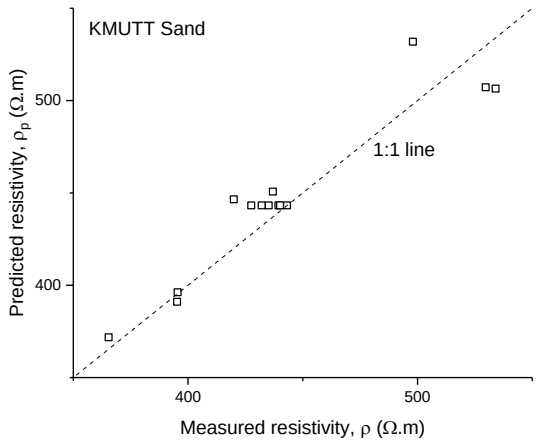
เมื่อนำกราฟพื้นผิวในรูปที่ 8 มาสร้างเส้นของการทำนายที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าและความหนาแน่นแห้งมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นแห้งคงที่จะทำให้ค่าความต้านทานลดลง

รูปที่ 7 และรูปที่ 9 ยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการเรียงตัวของผลการทดสอบจะมีรูปแบบที่เหมือนกับ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ของการออกแบบของเซ็นทรัลคอมโพสิตดังที่แสดงในรูปที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินทั้งสองจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบจากค่าปริมาณความชื้นในดินและความหนาแน่นแห้งจะมีลักษณะที่อ่อนไหวต่อการ

เปลี่ยนแปลงในช่วงแรกและการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น



การเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดสอบของตัวอย่างดินลูกรัง



การเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดสอบของตัวอย่างทราย มจธ.

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่าจากการทดสอบและค่าจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่เกาะกลุ่มกันมากที่สุดจะเป็นค่าจากจุดกลาง ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบของจุดอ้างอิง (การทดสอบ S1W3D3 และ S2W3D3)

4.

จากการศึกษาพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของดินที่ได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติทางกายภาพของดิน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินและความหนาแน่นแห้ง โดยในการศึกษานี้พบว่าปริมาณของสมบัติทั้งสองชนิดดังกล่าวแปรผกผันกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน ซึ่งจากการทดสอบที่กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ดินนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ยังสามารถอ้างอิงได้จากเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า [9] และการศึกษานี้ได้มีการสร้างสมการพหุคูณแบบถดถอยของดินทั้งสองชนิดเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้ในการคำนวนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต้องการกำหนดได้

[1] Bai, W., Kong, L. and Guo, A. (2013). Effects of Physical Properties on Electrical Conductivity of Compacted Lateritic Soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), pp.406-411.

[2] Cardoso, R. and Dias, A.S. (2017). Study of the Electrical Resistivity of Compacted Kaolin Based on Water Potential. *Engineering Geology*, 226, pp.1-11.

[3] Zhang, T., Liu, S. and Cai, G. (2018). Correlations between Electrical Resistivity and Basic Engineering Property Parameters for Marine Clays in Jiangsu, China. *Journal of Applied Geophysics*, 159, pp.640-648.

[4] Kumar, S.C.P. and Gowda, J.P. (2017). The Correlation between Resistivity and Soil Properties as an Alternative to Soil Invelsigation. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(6), pp.1-5.

[5] ASTM G57-06 (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[6] Pradubsri, W., Chomtee, B. and Thongteeraparp, A. (2015). A Study of Small Response Surface Designs for the Full Second Order Model and a Set of Reduced Models in a Spherical Model. *Thai Science and Technology Journal*, 23(3), pp.363-376.

[7] Sabseree, J. (2009). Doe Central Composite Design. *for Quality*, 145, pp.72-74.

[8] Phutthananon, C., Jongpradist, P., Jongpradist, P., Dias, D. and Baroth, J. (2020). Parametric Analysis and Optimization of T-Shaped and Conventional Deep Cement Mixing Column-Supported Embankments. *Computers and Geotechnics*, 122.

[9] Rhoades JD, Corwin DL, Lesch SM. (1999). Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. *Geophysical Monograph*, 108, pp.197–215.