

การเปรียบเทียบความแตกต่างของการต่อหลักดินที่มีผลต่อค่าความต้านทานดิน Comparison of Differential Grounding Electrode with Earth Resistance

ดุสิต อุทิศสุนทร^{1*} จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ถ.จระ ต.ในเมือง
อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ถ.จระ ต.ในเมือง
อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

Dusit Uthitsunthorn^{1*} Cheellawad Vimuttisoongviriya²

¹Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriramrajabhat University, Jira Road, Naimuang Sub-district, Muang District, Buriram 31000

²Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriramrajabhat University, Jira Road, Naimuang Sub-district, Muang District, Buriram 31000

*Corresponding author Email: dusit.ut@bru.ac.th

(Received: April 12, 2024; Revised: November 20, 2024 ; Accepted: April 3, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของหลักดินที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานดิน ซึ่งใช้ข้อมูลทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยมีลักษณะสภาพพื้นที่ทั่วไปเป็นที่ราบสูงและภูมิประเทศที่เกิดจากภูเขาไฟ ใช้พื้นที่ในการทดลองที่มีลักษณะสภาพของดินแตกต่างกัน 3 แหล่ง คือ อำเภอประโคนชัย อำเภอเมืองบุรีรัมย์ และอำเภอกุเมือง ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อหาค่าความต้านทานดินที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลธรณีวิทยา การศึกษานี้ได้ทดลองวัดหาค่าความต้านทานของหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่นที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่า เมื่อใช้หลักดินแบบแท่งทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.20 มิลลิเมตร ความยาวขนาด 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินอำเภอประโคนชัยมีค่าต่ำสุด 6.43 โอห์ม อำเภอเมืองบุรีรัมย์มีค่า 7.18 โอห์ม และอำเภอกุเมืองมีค่ามากที่สุด 353 โอห์ม ตามลำดับ เมื่อใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดงขนาดพื้นที่ 30x30 ตารางเซนติเมตร ฝังลงดินความลึก 150 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินอำเภอประโคนชัยมีค่าต่ำสุด 10.3 โอห์ม อำเภอเมืองบุรีรัมย์มีค่า 12.5 โอห์ม และอำเภอกุเมืองมีค่าสูงสุดสุด 368 โอห์ม ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบการจำแนกประเภทของดินพบว่า ดินอำเภอประโคนชัยและอำเภอเมืองบุรีรัมย์เป็นดินทรายปนดินเหนียวมีความชื้นในดินมากทำให้น้ำไหลซึมผ่านยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดี สำหรับดินอำเภอกุเมืองเป็นดินทรายปนดินตะกอนขนาดอนุภาคละกัณต์มีความชื้นน้อยทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายส่งผลให้ค่าความต้านทานดินมากที่สุด

คำสำคัญ: การต่อลงดิน หลักดิน ค่าความต้านทานดิน การจำแนกดิน

ABSTRACT

This research investigates and compares variations in grounding electrode characteristics affecting soil resistance values, utilizing geological data from Buriram Province. The study area is characterized by plateaus and volcanic terrain. Three distinct areas with varying soil conditions are consists: Prakhon Chai District, Mueang Buriram District, and Khu Mueang District, were selected for experimentation to ascertain soil resistance values correlated with geological features. The study involved measuring the resistance of rods and plates of different dimensions. Results indicate that employing a copper bar ground stake with a diameter of 14.20 millimeters and a length of 240 centimeters yielded the lowest soil resistance values in Prakhon Chai District is 6.43 ohms, followed by Mueang Buriram District is 7.18 ohms, and the highest value was observed in Khu Mueang District is 353 ohms. Similarly, burying a copper sheet is 30x30 square centimeters to a depth of 150 centimeters revealed varying soil resistivity values: Prakhon Chai District is 10.3 ohms, Mueang Buriram District is 12.5 ohms, and Khu Mueang District is 368 ohms. Soil classification tests identified sandy clay soil with high soil moisture content in Prakhon Chai District and Mueang Buriram District, resulting in low soil resistance and efficient electric current conduction. Conversely, Khu Mueang District exhibited sandy soil mixed with silt, facilitating easy water permeation and consequently yielding the highest soil resistance value.

Keyword: Grounding, grounding electrode, soil resistivity, soil classification.

1. บทนำ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน และเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ การขยายเขตติดตั้งระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current) หรือกระแสไฟฟ้ารั่ว (Eating Current) ต้องมีการพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อป้องกันอันตรายความเสียหายและความปลอดภัย ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ได้ต่อสายดินหรือสายดินมีความต้านทานสูงเกินไปย่อมทำให้กระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลออกมาไม่สามารถลงสู่พื้นดิน กรณีที่เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วเมื่อผู้ใช้สัมผัสพื้นผิวหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายไปลงสู่ดินเกิดอันตรายต่อชีวิต โดยทั่วไป

กระแสไฟฟ้าส่วนที่รั่วจะใช้สายดินเป็นเส้นทางการไหลลงดิน เพราะสายดินมีความต้านทานต่ำกว่าร่างกายมนุษย์ [1]-[2] อีกทั้งควรมีการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลงดินเพื่อความปลอดภัยทั้งต่ออุปกรณ์และผู้ใช้ ทั้งนี้ดินในแต่ละพื้นที่ย่อมมีค่าความต้านทาน (Soil Resistivity) ของการต่อสายดินแตกต่างกัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบสายดิน เช่น องค์ประกอบทางเคมีของดิน ความชื้น อุณหภูมิ ฤดูกาล สภาพแวดล้อม ขนาดและความลึกของหลักดิน เป็นต้น [3] ระบบไฟฟ้าที่ดีจึงควรติดตั้งสายดินให้มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาค่าความต้านทานดินในพื้นที่ต่างกันโดยใช้ระบบการต่อสายดินที่แตกต่างกัน โดยมุ่งหวังว่าข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการคัดเลือกระบบสายดินที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบค่าความต้านทานดินที่เกิดจากการต่อหลักดินแบบแบ่งทองแดงและแบบแผ่นทองแดง รวมทั้งพิจารณาประเภทของดินที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานดินที่แตกต่างกัน โดยเลือกตำแหน่งพื้นที่ศึกษาที่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยของ 3 อำเภอในจังหวัดบุรีรัมย์ ได้แก่ อำเภอประโคนชัย อำเภอเมืองบุรีรัมย์ และอำเภอคูเมือง ตามลำดับรายละเอียดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

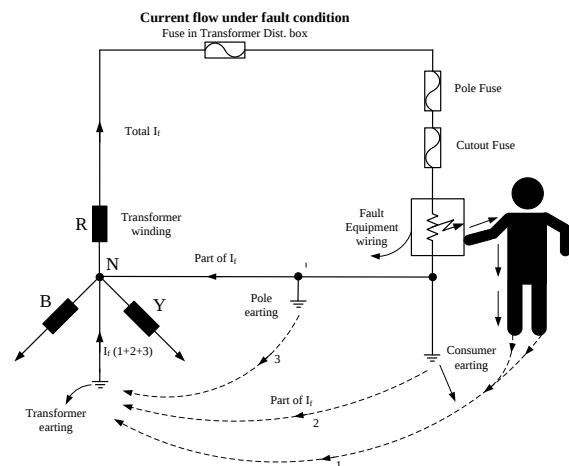
2.1 การต่อลงดิน

การต่อลงดิน (Earthing หรือ Grounding) เป็นการต่อตัวนำระหว่างวงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์กับดิน การต่อลงดินที่ถูกต้องตามมาตรฐานตามหลักวิศวกรรมเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้ไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้า [4] การต่อลงดินในระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ได้ 2 ประเภท คือ การต่อลงดินของระบบ (System Grounding) เป็นการต่อสายนิวตรอนกับสายดินลงหลักดินที่แผงควบคุมไฟฟ้าหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับแรงดันของระบบเมื่อเทียบกับดิน ทั้งนี้จะมีอุปกรณ์ป้องกันตรวจจับเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำลงสู่ดินเกิดการลัดวงจรลงดิน และการต่อลงดินของอุปกรณ์ (Equipment Grounding) เป็นการต่อส่วนโลหะของอุปกรณ์ หรือโครงโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อป้องกันอันตรายต่อบุคคลเนื่องจากไฟฟ้าลัดวงจรและเป็นเส้นทางการไหลของกระแสผิดพร่องลงสู่ดินที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ต่ำเพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับกระแสเกินทำงาน สำหรับหลักการกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมนุษย์เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าลัดวงจรแสดงในรูปที่ 1

2.2 การจำแนกประเภทของดิน

ดินจากแหล่งต่าง ๆ ย่อมมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่างกันตามประเภทของดิน ลักษณะทางกายภาพของดิน โดยทั่วไปประกอบด้วยเม็ดดิน น้ำและอากาศ คุณสมบัติเม็ดดินจะแตกต่างกันตามวัสดุแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม นอกจากนั้นการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินและความชื้น

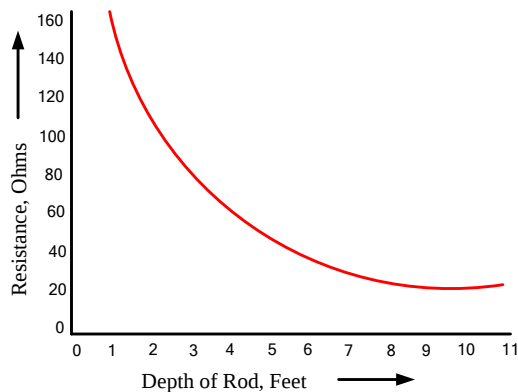
ยังส่งผลทำให้ดินมีค่าความจำเพาะมีค่าต่างกันอีกด้วย ดังนั้นการพิจารณาความชื้นในดินจะมีผลกระทบโดยตรงตามลักษณะพื้นที่และสภาพอากาศ ถ้าบริเวณที่ดินมีความชื้นมากก็จะนำไฟฟ้าได้ดีทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะน้อย เนื่องการจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification) สามารถช่วยให้ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่ทำการศึกษาได้ [6] งานวิจัยนี้เลือกระบบการจำแนกประเภทดินทางวิศวกรรม 2 ระบบ คือ ระบบจำแนกดินร่วม (Unified Soil Classification) และระบบจำแนกดินของสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (AASHTO Classification) ตามลำดับ การจำแนกประเภทดินของทั้งสองระบบอาศัยข้อมูลการกระจายอนุภาคเม็ดดินและค่าขีดความชื้นเหลว (Atterberg's Limits) [7]–[8] ทั้งนี้ประเภทของดินที่ได้จากการจำแนกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด โดยชนิดของดินเม็ดหยาบ เช่น กรวด หรือทราย เป็นต้น ส่วนชนิดของดินเม็ดละเอียด เช่น ดินตะกอน หรือดินเหนียว เป็นต้น



รูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมนุษย์เมื่อเกิด
การลัดวงจร [5]

2.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ในการติดตั้งสายดินถ้าความต้านทานภายในดินที่มีค่ามาก การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าจะน้อย แสดงว่าสภาพดินมีลักษณะแห้งและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในดินสูง ซึ่งสัมพันธ์ต่อการไหลซึมของน้ำ ดังนั้นดินที่ดีจึงต้องมีช่องว่างให้น้ำไหลซึมผ่านได้ดีทำให้เกิดความชื้นมีค่าความต้านทานภายในน้อยเพื่อให้กระแสไหลผ่านลงสู่ดินได้ง่าย [9]-[10] ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินและความลึกของหลักดินแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การลดลงของค่าความต้านทานดินตามความลึก [11]

ลักษณะดินแต่ละแห่งจะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินไม่เท่ากัน โดยทั่วไปในทางปฏิบัติเมื่อหลักดินมีความยาวมากจะทำให้ค่าความต้านทานลดลงดังรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานดิน สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = 2\pi aR \quad (1)$$

กำหนดให้

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

a คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เมตร)

R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)

2.4 หลักดิน (Grounding Electrode)

หลักดินเป็นตัวนำที่ฝังใต้ดินโดยจะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและบริภัณฑ์ในการพิจารณาโดยทั่วไปมีศักย์เป็นศูนย์ ซึ่งมีการกำหนดหลักดินตามมาตรฐาน NEC250 [12] วัตถุประสงค์ในการเลือกใช้หลักดินสำหรับการต่อสายดินแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความลึกที่มีอยู่ ทั้งนี้เพื่อป้องกันในจุดที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน หลักดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ [13] - [19] ประกอบด้วย

1. แท่งดิน (Ground Rod) ทำด้วยแท่งเหล็กชุบทองแดง (Copper-bonded Steel) ตามข้อกำหนดวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยระบุว่า แท่งดินควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว หรือ 14.2 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 2.4 เมตร เป็นหลักดินในแนวดิ่ง หรือแท่งดิน โดยฝังกลบอยู่ในดินแต่ละพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้ค่าความต้านทานดินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

กำหนดให้

R คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

L คือ ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน (เมตร)

2. แผ่นฝัง (Buried Plate) หลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงจะถูกนำมาใช้เมื่อไม่ต้องการขุดดินลงไปลึก [16]-[17] การฝังแผ่นทองแดงจะทำในแนวดิ่งแล้วกลบด้วยดิน ดังรูปที่ 4 ค่าความต้านทานดินจากหลักดินแบบนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

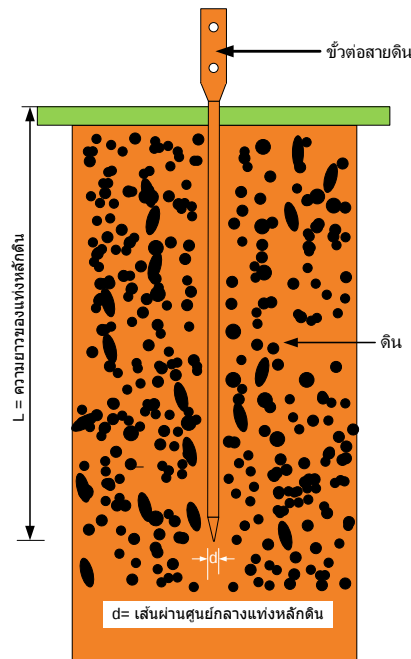
$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (3)$$

กำหนดให้

R คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

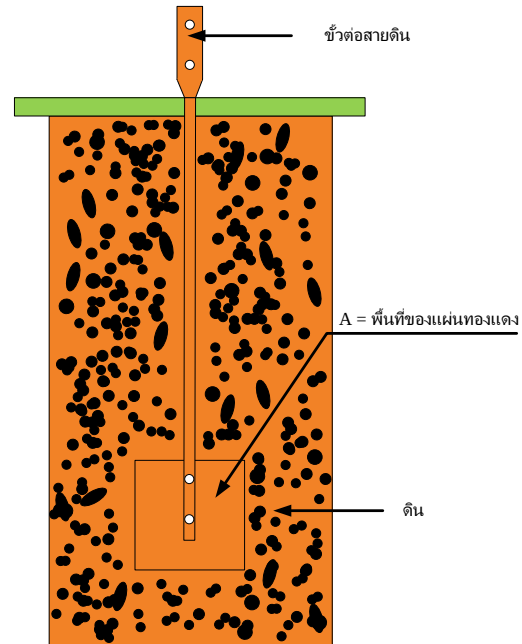
A คือ พื้นที่ของแผ่นทองแดง (ตารางเมตร)



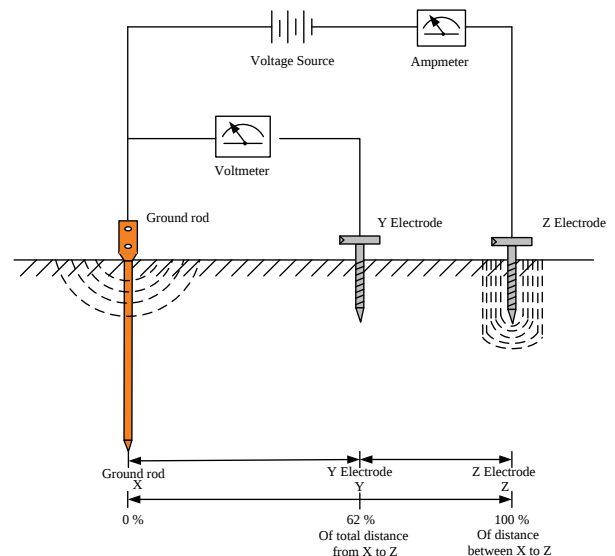
รูปที่ 3 หลักดินแบบแท่ง

2.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานดิน

ความต้านทานของดินไม่สามารถบอกได้ด้วยชนิดของดิน ในการหาความต้านทานของดินทำได้จากการวัดดินในแต่ละพื้นที่ตามลักษณะของดินที่แตกต่างกันทางธรณีวิทยา จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานของดินมีความแตกต่างกันด้วย [20] งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความต้านทานดินวิธีการวัดด้วยแบบสามจุด (Three Point Method) โดยใช้โอห์มมิเตอร์ปักดินต่อเข้ากับขั้วของเครื่องวัดกราวด์เป็นอิเล็กโทรดตัวเดียวแบบแท่งเดียว ท่อ หรือแผ่น เป็นต้น ตามที่แสดงในรูปที่ 5 กำหนดค่าระยะห่างการทดสอบระหว่างแท่งอิเล็กโทรด X-Y ประมาณ 62 % ของระยะทั้งหมดจาก X-Z ดังรูปที่ 5 เมื่อหลักดินมีความลึกคงที่ แต่เมื่อต้องการ



รูปที่ 4 หลักดินแบบแผ่น



รูปที่ 5 วิธีการวัดแบบ 3 โพล [21]

3. ลักษณะทางธรณีวิทยาจังหวัดบุรีรัมย์

การศึกษานี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าความต้านทานของการต่อหลักดินตามลักษณะของดินที่แตกต่างกันทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ จากข้อมูลเบื้องต้นสภาพ

พื้นที่โดยทั่วไปเป็นที่ราบสูงและภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ลาดจากทิศใต้ลงไปทางทิศเหนือ พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นน้อยเป็นที่ราบขั้นบันไดช่องเขาและภูมิประเทศที่เกิดจากภูเขาไฟ [22]-[23] ดังรูปที่ 6 ลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญแบ่งได้ 3 ลักษณะมีรายละเอียดดังนี้

- พื้นที่สูงและภูเขาทางตอนใต้เป็นภูเขาและช่องเขาบริเวณเทือกเขาพนมดงรักมีความสูงตั้งแต่ 200 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 25 ของพื้นที่จังหวัด ได้แก่ บริเวณทิศตะวันตกของอำเภอหนองหงส์และหนองกี่ ตอนใต้ของอำเภอนางรอง ปะคำ ละหานทราย และบ้านกรวด

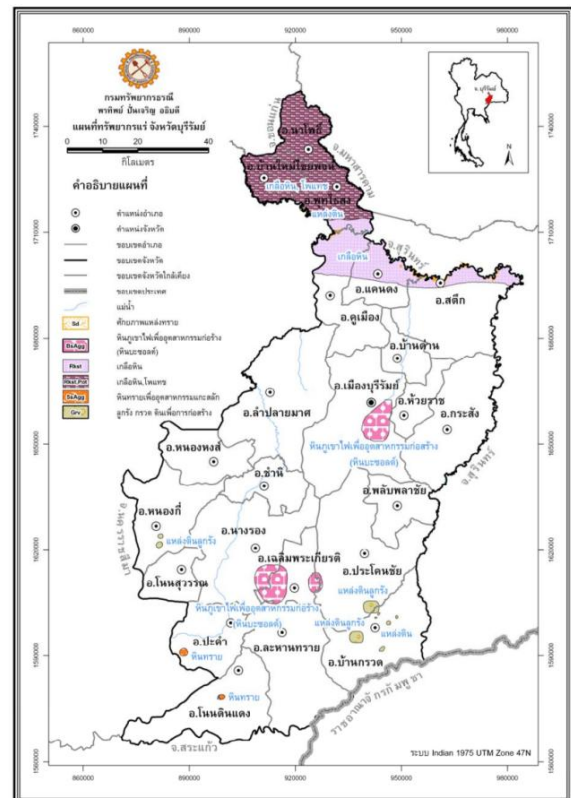
- พื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้นตอนกลางของจังหวัด มีความสูงประมาณ 150 -200 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลางพื้นที่ทอดขนานเป็นแนวยาวทางทิศตะวันออกและตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่ประมาณร้อยละ 60 ของพื้นที่จังหวัดได้แก่ บริเวณ อำเภอประโคนชัย พลับพลาชัย เมืองบุรีรัมย์ กระสัง ลำปลายมาศ คูเมือง บางส่วนของอำเภอนางรอง หนองกี่ หนองหงส์ สตึก พุทไธสง บริเวณอำเภอบ้านกรวด นางรอง ลำปลายมาศ จะมีพื้นที่ราบลุ่มบริเวณริมฝั่งลำน้ำและลำห้วย ได้แก่ ลำปลายมาศ ลำนางรอง ลำปะเทียบ ลำทะเมนชัย ห้วยราช และห้วยตาตุ่ง สำหรับพื้นที่ตอนใต้ของอำเภอพุทไธสง คูเมือง และเมืองบุรีรัมย์ จะเป็นพื้นที่ภูเขาสูงและพื้นที่ป่าไม้

- พื้นที่ราบลุ่มฝั่งแม่น้ำมูลทางตอนเหนือมีความสูงเฉลี่ยต่ำกว่า 150 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ได้แก่ พื้นที่ตอนบนของอำเภอพุทไธสง คูเมือง สตึก และนาโพธิ์

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการวัดค่าความต้านทานดินตามลักษณะทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยเก็บผลการทดลองในช่วงเดือน กรกฎาคม - สิงหาคม 2566 ด้วยเครื่องมือที่ตรวจระบบกราวด์ของดินในการวัดค่าความต้านทานดินแบบดิจิตอล Metrel MI 2120 RCD / Loop / Line ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำการทดสอบแบบ 3 จุดตาม

มาตรฐาน IEC61557 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการติดตั้งหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่น โดยการเปลี่ยนแปลงระดับความยาวของหลักดินแบบแท่งและขนาดพื้นที่หน้าตัดของหลักดินแบบแผ่นเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานดินใน [25]- [28]



รูปที่ 6 แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาจังหวัดบุรีรัมย์ [24]



รูปที่ 7 เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน

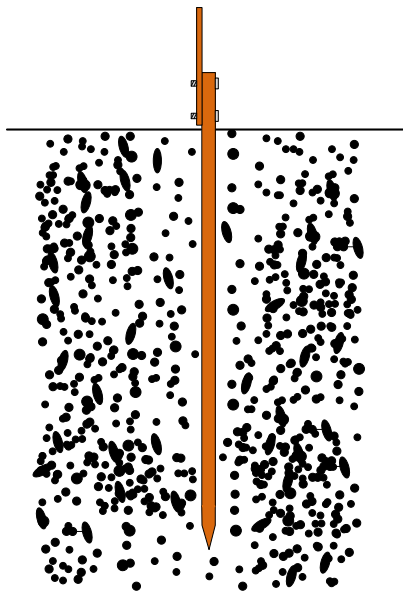
จากนั้นทำการจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification) ตามสภาพของดินแต่ละพื้นที่ในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 แท่งทองแดง (Ground Rods)

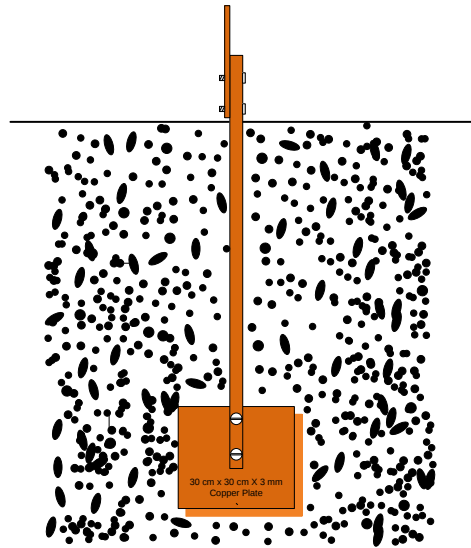
หลักดินแบบแท่งทองแดงในการทดลองใช้หลักดินที่ทำด้วยเหล็กหุ้มทองแดง (Copper Clad) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 นิ้วหรือ 14.20 มิลลิเมตร ปักลงในดินของแต่ละพื้นที่ โดยมีความยาวแตกต่างกันคือ 30 เซนติเมตร 50 เซนติเมตร 100 เซนติเมตร 180 เซนติเมตร และ 240 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างการฝังแท่งทองแดงดังรูปที่ 8

4.2 แผ่นทองแดง (Buried Plate)

หลักดินที่นำมาใช้มีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงทำการฝังในแนวตั้ง ทดสอบเปรียบเทียบความต้านทานแผ่นทองแดงขนาด 10x10 เซนติเมตร ขนาด 20x20 เซนติเมตร และขนาด 30x30 เซนติเมตร ทุกขนาดมีความหนา 3 มิลลิเมตร ความลึกที่ใช้การทดสอบจะอยู่ที่ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การออกแบบหลักดินแบบแท่ง



รูปที่ 9 การออกแบบหลักดินแบบแผ่น

5. ผลการทดสอบตรวจวัดค่าความต้านทานหลักดิน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการวัดค่าความต้านทานดินเพื่อเปรียบเทียบวิธีการติดตั้งหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่น เปลี่ยนแปลงระดับความยาวของหลักดินแบบแท่งและขนาดพื้นที่ของหลักดินแบบแผ่น เพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานดินตามสภาพดินที่มีลักษณะที่ต่างกันอย่างชัดเจนในจังหวัดบุรีรัมย์ 3 อำเภอ ดังนี้

5.1 พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย

พื้นที่บ้านหนองม่วงมีลักษณะดินเป็นทรายละเอียดปนดินเหนียว ดินมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลอ่อนตลอดชั้นดินในฤดูแล้งพบคราบเกลือบริเวณผิวหน้าดิน ดังรูปที่ 11 และค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย แสดงดังตารางที่ 3-4

จากตารางที่ 3 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 760 โอห์ม แต่เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 6.43 โอห์ม

การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร
ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 99.15



รูปที่ 11 ลักษณะดินบ้านหนองม่วง อำเภอประโคนชัย

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย

ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	760
50	322
100	50.1
180	9.46
240	6.43

ตารางที่ 4 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดง
พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย เมื่อ
เปลี่ยนแปลงขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตาราง เซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้าน ทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	102
20x20	150	45
30x30	150	10.3

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มี
พื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า

แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 102 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 45 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 10.3 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30
ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ
89.9

5.2 พื้นที่บ้านหนองตาด ตำบลหนองตาด อำเภอเมือง
บุรีรัมย์

พื้นที่บ้านหนองตาดมีลักษณะสภาพเนื้อดินเป็นทราย
ละเอียดปนดินเหนียว ดินมีสีเทาเข้มหรือสีน้ำตาลปนเทาเข้ม
มีจุดประสีน้ำตาลปนแดงเข้ม ในฤดูแล้งจะมีรอยแตกแหว่ง
กว้างและลึกและมีรอยไถในหน้าตัดดิน ดังรูปที่ 10 และค่า
ความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้าน
หนองตาด อำเภอเมืองบุรีรัมย์ แสดงดังตารางที่ 5-6



รูปที่ 10 ลักษณะดินตำบลหนองตาด อำเภอเมืองบุรีรัมย์

จากตารางที่ 5 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30
เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 347 โอห์ม แต่
เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240

เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 7.18 โอห์ม การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 97.93

ตารางที่ 5 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองตาต อำเภอกุเมืองบุรีรัมย์

ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	347
50	209
100	29.3
180	12.9
240	7.18

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองตาต อำเภอกุเมืองบุรีรัมย์ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	37.5
20x20	150	21.2
30x30	150	12.5

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 6 พบว่า

แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 37.5 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 21.2 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 12.5 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30 ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 66.67

5.3 พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกุเมือง

พื้นที่บ้านคูบอนมีลักษณะเนื้อดินเป็นทรายละเอียดปนตะกอนทรายมีขนาดคละกัณดี ดินมีสีน้ำตาลปนแดงและดินตอนล่างมีสีแดงหรือสีแดงเข้มดังรูปที่ 12 และค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกุเมือง แสดงดังตารางที่ 7-8



รูปที่ 12 ลักษณะดินบ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกุเมือง

จากตารางที่ 7 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 3,872 โอห์ม แต่เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 353 โอห์ม การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 90.88

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 8 พบว่า

แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 536 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 457 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 368 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30 ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 31.34

ตารางที่ 7 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกูเมือง

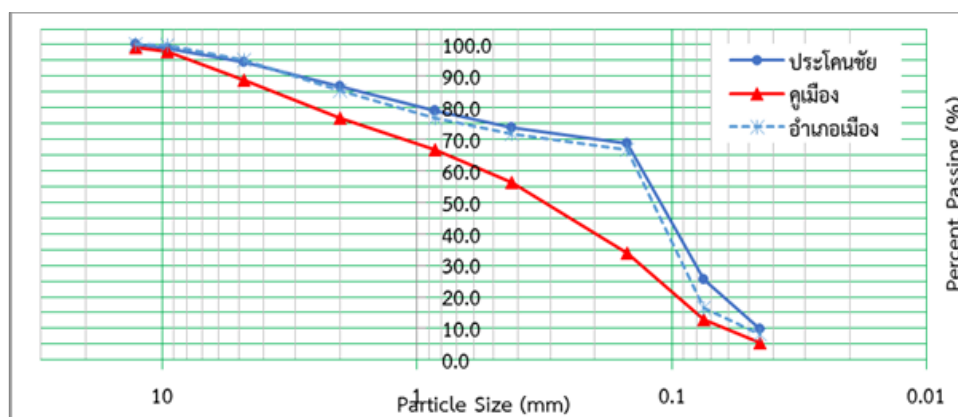
ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	3,872
50	2,432
100	1,256
180	654
240	353

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดง
พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกูเมือง เมื่อเปลี่ยนแปลง
ขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	536
20x20	150	457
30x30	150	368

6. การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทดินจากทั้งสามแหล่งในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ระบบจำแนกดินร่วม (Unified Soil Classification) มาตรฐาน ASTM D2487 และระบบจำแนกดินของสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (AASHTO Classification) มาตรฐาน AASHTO M145 [29]-[31] โดยอาศัยผลการทดสอบหาการกระจายอนุภาคเม็ดดินวิธีร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน AASHTO T88 ดังแสดงในรูปที่ 13 และผลการทดสอบหาค่าขีดความชันเหลวดินด้วยเครื่องมือ Casagrande มาตรฐาน AASHTO T89 และ AASHTO T90 ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยประเภทของดินที่ได้จากการจำแนกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด โดยชนิดของดินเม็ดหยาบประกอบด้วยกรวดและทราย ส่วนดินเม็ดละเอียดประกอบด้วยดินตะกอนและดินเหนียว โดยดินเม็ดหยาบจะมีค่าความต้านทานดินสูงเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินกว้างจึงมีความชื้นน้อย ส่วนดินเม็ดละเอียดจำพวกดินเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มดินเชื่อมแน่นจะมีค่าความต้านทานดินน้อยเนื่องจากสามารถกักเก็บความชื้นได้ดี สำหรับดินตะกอนโดยทั่วไปจะมีความต้านทานดินมากกว่าดินเหนียวเนื่องจากความชื้นสูญเสียได้ง่ายกว่า [32]-[35] ลักษณะตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน



ก. ดินจากอำเภอประโคนชัย



ข. ดินจากอำเภอเมืองบุรีรัมย์



ค. ดินจากอำเภอคูเมือง

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบลักษณะของดิน

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของดิน

รายการ	อำเภอประโคนชัย	อำเภอเมืองบุรีรัมย์	อำเภอคูเมือง
พิกัดเหลว (Liquid Limit : LL)	22.16	21.51	20.12
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit : PL)	20.74	19.44	14.59
ดัชนีพลาสติก (Plastic Index : PI)	1.42	2.07	5.53
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 60 : D_{60}	0.12	0.12	0.50
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 30 : D_{30}	0.080	0.081	0.120
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 10 : D_{10}	0.045	0.048	0.050
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ Coefficient of Uniformity : Cu $Cu = D_{60}/D_{10}$	2.66	2.50	10.00
สัมประสิทธิ์ความโค้ง Coefficient of Concavity : Cc $Cc = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$	1.185	1.139	0.576
มาตรฐาน Unified	SP	SP	SW
มาตรฐาน AASHTO	A-2-6	A-2-6	A-2-6
ประเภทของดิน	ทรายละเอียดปนดินเหนียวและมีขนาดโคลงันไม่ดี	ทรายละเอียดปนดินเหนียวและมีขนาดโคลงันไม่ดี	ทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดโคลงันดี

การพิจารณาการกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดดินในรูปที่ 14 พบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 2.66 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 1.185 จัดอยู่ในกลุ่มดินทรายละเอียดปนดินเหนียวมีขนาดคละกันไม่ดี ดินอำเภอมืองบุรีรัมย์มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 2.50 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 1.139 จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีขนาดคละกันไม่ดี สำหรับดินอำเภอกุเมืองมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 10.00 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 0.576 จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดคละกันดี ทั้งนี้ดินอำเภوبرะโคนชัยและดินอำเภอมืองบุรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันแต่ดินอำเภوبرะโคนชัยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเล็กน้อย

จากผลการทดลองตารางที่ 9 พบว่า เมื่อพิจารณาค่าพิกต์เหลว LL ซึ่งเป็นความชื้นในดินที่เปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นของเหลว อำเภوبرะโคนชัยมีค่าพิกต์เหลวมากที่สุดเท่ากับ 22.16 อำเภอมืองบุรีรัมย์เท่ากับ 21.51 และอำเภอกุเมืองมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 20.12 เมื่อพิจารณาค่าพิกต์พลาสติก PL ซึ่งเป็นค่าความชื้นในดินที่เปลี่ยนสภาพจากกึ่งของแข็งเป็นพลาสติก อำเภوبرะโคนชัยมีค่าพิกต์พลาสติกมากที่สุดเท่ากับ 20.74 อำเภอมืองบุรีรัมย์เท่ากับ 19.44 และอำเภอกุเมืองมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 14.59 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีพลาสติก PI ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าพิกต์เหลว LL และค่าพิกต์พลาสติก PL อำเภوبرะโคนชัยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.42 อำเภอมืองบุรีรัมย์เท่ากับ 2.07 และดินอำเภอกุเมืองมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5.53 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยมีค่าดัชนีพลาสติกน้อยกว่าความชื้นในดินมากจึงส่งผลทำให้ทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำ ผลการจำแนกประเภทดินระบบ Unified พบว่า ดินจากอำเภوبرะโคนชัยและอำเภอมืองบุรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่ม SP คือ ดินทรายละเอียดปนดินเหนียว และดินอำเภอกุเมืองจัดอยู่ในกลุ่ม SW คือ ดินทรายละเอียดปนดินตะกอน สำหรับผลการ

จำแนกประเภทดินระบบ AASHTO พบว่า ดินจากทั้งสามแหล่งเป็นดินกลุ่ม A-2-6 เช่นเดียวกัน แต่ดินจากอำเภوبرะโคนชัยและอำเภอมืองบุรีรัมย์มีค่าพิกต์พลาสติกที่มากกว่าดินจากอำเภอกุเมือง

7. สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบความแตกต่างของหลักดินต่อค่าความต้านทานดินในซึ่งอยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพื้นที่ภายในจังหวัดบุรีรัมย์มีบทสรุปการอภิปรายผลและข้อเสนอแนะดังนี้

7.1 สรุปผลและอภิปรายผล

เมื่อพิจารณาดินในพื้นที่ประเภทเดียวกันการใช้หลักดินแบบแท่งทองแดงเมื่อความยาวมากโดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันผลจะทำให้มีค่าความต้านทานดินลดลง และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานดินจากการใช้แท่งหลักดินแบบแผ่นที่มีขนาดพื้นที่มากขึ้นจะมีค่าความต้านทานดินลดลง ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าความต้านทานดินนั้นประกอบด้วยความต้านทานจำเพาะของดิน ความยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทองแดง และพื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดงสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน [27] – [28] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจำแนกประเภทของดินแต่ละแหล่งทดสอบตามหลักวิศวกรรมพบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยจัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีความชื้นมากและน้ำไหลซึมยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อย ดินอำเภอมืองบุรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีความชื้นมากและน้ำไหลซึมยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อยเช่นเดียวกับดินอำเภوبرะโคนชัย ส่วนดินอำเภอกุเมืองจัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินตะกอนมีความชื้นน้อยและน้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายส่งผลให้ค่าความต้านทานดินสูง จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าส่วนประกอบของดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกน้อยค่าความต้านทานดินจะต่ำ ประเภทของดินที่มีลักษณะเป็นทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดคละกันดีจะมีค่าความต้านทานมาก ดังนั้นขนาดอนุภาคเม็ดดิน

ส่งผลต่อความต้านทานดินดังใน [5]-[9] จากผลการทดสอบดินพื้นที่ที่มีส่วนผสมของดินเหนียวจะมีความชื้นมากและมีค่าความต้านทานดินน้อยส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดี สำหรับดินทรายปนดินตะกอนจะมีความแห้ง ดังนั้นถ้าต้องการลดค่าความต้านทานดินให้น้อยลงควรใช้หลักดินที่มีความยาวมากขึ้นหรือมีพื้นที่มากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มกระแสไหลผ่านลงดิน ถ้าค่าความต้านทานดินน้อยจะมีความนำไฟฟ้าสูงดินจะมีความชื้นมากมีขนาดคลื่นกันไม่ดีเป็นแนวทางในการพัฒนาศึกษาทำวิจัยในอนาคต

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1). ควรเก็บตัวอย่างดินที่มีความหลากหลายซึ่งจะทำให้ผลที่แตกต่างกันตามค่าความจำเพาะของดินแต่ละชนิดของแต่ละพื้นที่
- 2). ค่าความต้านทานดินของกลุ่มตัวอย่างดินนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นตามระยะเวลาของฤดูกาลของแต่ละพื้นที่จึงควรเก็บผลวิเคราะห์ตลอดปี
- 3). ควรทำการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำเที่ยงตรงของวิธีการทดลองจนองค์ประกอบต่าง ๆ แนวโน้มค่าความต้านทานจากการทดลองกับการคำนวณ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. M. Michaels, "Earth ground resistance testing for low-voltage power systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 139-144, 1995.
- [2] Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standard 142-2007, 2007.
- [3] S. Damrongkittikul et al., "Code of Professional Practices: Design, Installation, Inspection, and Testing of Grounding Connections," Council of Engineers, 2011.
- [4] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [5] P. Gupta, "Handbook on Electrical Earthing System," Indian Railways Centre for Advanced Maintenance Technology, 2011.
- [6] W. Yuyongwattana, *Soil Mechanics*, Bangkok: Four Pace Publishing House, 2011.
- [7] C. T. Kongvorakul, "Relationship between Attenberg Limit and Subsidence Properties of Fine-Grained Soil Mass," M.S. thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2010.
- [8] C. Muktapahan and K. Nakasawa, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bangkok: Duangkamon Publishing House, 2003.
- [9] N. Somala, E. Srisuk, C. Charoenrak, T. Thepluen and S. Suphapon, "Study of soil specific resistance," *Acad. J. Southern Vocational Educ. Inst.*, vol. 1, no. 1, pp. 25-30, 2012.
- [10] L. W. Choun, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad, "Analysis of earth resistance of electrodes and soil resistivity at different environments," in *Proc. Int. Conf. Lightning Protection (ICLP)*. Vienna, 2012, pp. 1-9.
- [11] O. S. Peters, "Ground Connections for Electrical Systems," Technological Paper 108, U.S. National Bureau of Standards, June 20, 1918.
- [12] V. Chernikhovska. (2024, Sep. 28), Explaining NEC Article 250 on Grounding and Bonding, [Online]. Available: <https://nassaunational>

- cable.com/blogs/blog/explaining-nec-article-250-on-grounding-and-bonding
- [13] Indian Standard Code of Practice for Earthing, Bureau of Indian Standards, 1998.
- [14] F. P. Dawalibi, J. Ma and R. D. Southey, "Behaviour of Grounding Systems in Multilayer Soils," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 334-342, 1994.
- [15] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard 80-2000, 2000.
- [16] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Standard 81-2012, 2012.
- [17] M. H. bin Hamzah, "Study on grounding grid performance using copper and galvanised steel," B.E. thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, Malaysia, 2009.
- [18] M. A. Salam, "Grounding resistance measurement using vertically driven rods near residential area," *Int. J. Power Energy Convers.*, vol. 4, no. 3, pp. 238-250, 2013.
- [19] S. Yunus, A. Suratman, N. Mohamad Nor and M. Othman, "Effectiveness of earthing system in vertical configurations," *World Acad. Sci., Eng. Technol. Int. J. Electrical and Computer Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 38-41, 2021.
- [20] C. J. Blattner, "Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1758-1763, 1980.
- [21] Test Equipment Depot (2023, Oct.). Getting Down to Earth: A Practical Guide to Earth Resistance Testing, [Online]. Available: <https://www.testequipmentdepot.com>.
- [22] G. F. Tag, Earth Resistance. London: George Newnes Limited, 1964.
- [23] G. E. Thomas, "Soil Properties and the Unified Soil Classification System (USCS)," PDH Online Course, 2012.
- [24] Department of Mineral Resources, "Classification of Zones to Manage Geology and Mineral Resources, Buriram Province," Thailand, 2010.
- [25] P. Phonsonchai, "Soil Genesis and Classification: Case Study Chok Chai Series," Soil Survey and Classification Division, Department of Land Development, Academic Document No. 466, Jan. 2000.
- [26] Bureau of Soil Survey and Land Use Planning, "Characteristics and Properties of Soil Series in the Northeastern Region of Thailand," Department of Land Development, Academic Document No. 55, Sep. 2005.
- [27] Y. Kongchin, N. Koonmuang, K. Suthamano, K. Chinnabut, K. Phumkittipit, S. Tonpho, P. Apichatkul and K. Buayai, "Comparison of Earth Resistance Measurement with Analog and Digital Measuring Instruments," in *11th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference*. Thailand, 2020.
- [28] B. Marangsri, H. Wongthieng and R. Sriphongwilaiyakul, "Study of the feasibility of using galvanized steel pipes in place of copper ground stakes in the lower northeastern region: Nakhon Ratchasima province and

- Buriram province,” *Suranaree Technol. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 51-60, 2002.
- [29] D. Daryati, I. Wideasanti, E. Septiandini, M. A. Ramadhan, K. A. Sambowo and A. Purnomo, “Soil characteristics analysis based on the unified soil classification system,” in *4th Annual Applied Science and Engineering Conference, Journal of Physics: Conference Series*, Dec. 2019.
- [30] S. W. Buol, F. D. Hole and R. J. McCracken, *Soil Genesis and Classification*, 5th ed. Ames, IA, USA: Iowa State University Press, 2003.
- [31] T. Rattanathanakit and T. Tiyaikhom, “Properties of Water Permeability in Soil,” M.S. thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [32] N. Deeyai, S. Anusontpornperm, I. Kheoruenromne and W. Wiriyakitnateekul, “Characteristic of soils along toposequence on limestone mountain footslope,” *Khon Kaen Agric. J.*, vol. 40, no. 2, 2012.
- [33] P. A. Sanchez, *Properties and Management of Soil in the Tropics*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [34] C. Ditzler, K. Scheffe and H. C. Monger, “Soil Survey Manual,” Soil Science Division Staff, USDA Handbook 18, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 2017.
- [35] C. A. Black, D. D. Evans, J. L. White, L. E. Ensminger and F. E. Clark, “Methods of soil analysis. Part 2,” *Agronomy Monograph*, vol. 9, Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1965.