

อิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินที่ใช้ทางการเกษตร

Influence of salt types and concentrations on electrical resistivity in agricultural soils

ปรานิน วิเศษแก้ว¹, ฉัตรปวีณ์ เดชจิริรัตนสิริ¹, ณัฐพล จิตมัตย์^{1*} และ สุรเชษฐ์ อร่ามรักษ์¹

Pranin Wisetkaew¹, Chatprawee Dechjiraratthanasiri¹, Natthapol Chittamart^{1*} and Surachet Aramrak¹

¹ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

บทคัดย่อ: เกลือที่ละลายได้ในสารละลายดินและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่แลกเปลี่ยนได้สูงเป็นอันตรายต่อการเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช การตรวจประเมินความเค็มของดินอย่างรวดเร็วโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าดินจะเป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังขาดการศึกษาความสัมพันธ์ของชนิดเกลือและระดับความเข้มข้นกับค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินที่ใช้ทางการเกษตร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของไอออนเกลือในสารละลายดินต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินที่ใช้ทางการเกษตรที่มีเนื้อเป็นดินร่วนปนทราย ดินร่วนปนเหนียว และดินเหนียว โดยทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธี 4-electrodes ในกล่องวัดความต้านทานไฟฟ้าของดินที่มีการเติมสารละลายเกลือ 4 ชนิด คือ NaCl, KCl, CaCl₂ และ Na₂CO₃ โดยเติมเกลือแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 โมลาร์ ผลการศึกษา พบว่า ชนิดที่แตกต่างกันและความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้นในสารละลายดินทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่เกลือชนิด CaCl₂ ทำให้ค่า ER ของทุกเนื้อดินลดลงมากที่สุด รองลงมา คือ NaCl และ Na₂CO₃ ตามลำดับ บ่งชี้ว่า เกลือที่มีไอวาเลนซ์แคตไอออนทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากกว่าไอวาเลนซ์แคตไอออน ค่าความต้านทานไฟฟ้าของทุกเนื้อดินลดลงในลักษณะฟังก์ชันการสลายตัวแบบเลขชี้กำลัง โดยลดลงสูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และคงที่ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 0.25 โมลาร์ อัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินเนื้อร่วนปนทรายและดินเหนียว รวดเร็วกว่าดินร่วนปนเหนียว สมบัติดินที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเมื่อดินได้รับอิทธิพลจากเกลืออย่างมีนัยสำคัญ คือ pH, EC_e, CEC และ total-N ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของเกลือที่ละลายอยู่ในดินสูงขึ้นทำให้ดินมีความหนาแน่นของอิเล็กโทรไลต์และเกิดการเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าผ่านประจุของแคตไอออนในดิน การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินมีศักยภาพสูงในการใช้ประเมินระดับความเค็มและชนิดของเกลือในดินในพื้นที่เกษตรได้อย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ: ความต้านทานไฟฟ้าดิน; เกลือ; ความเค็มของดิน; การตรวจวิเคราะห์ภาคสนาม

ABSTRACT: Soluble salts in the soil solution and a high concentration of exchangeable electrolytes harm plant growth and crop yield. Rapid field estimation of soil salinity by soil resistivity method is a tool for effectively managing soils. However, the relationship between salt types and concentrations and the agricultural soil electrical resistivity (ER) is scarce. Therefore, this study aimed to investigate the influence of salt types and concentrations on the electrical resistivity of agricultural soils with three different textures, including sandy loam, clay loam, and clay. The

* Corresponding author: fagnpc@ku.ac.th

Received: date; July 22, 2022 Accepted: date; October 18, 2022 Published: date; January , 2023

electrical resistance was measured by the 4-electrode method in the soil resistivity box. The soil samples were soaked with 4 different types of salt, including NaCl, KCl, CaCl₂, and Na₂CO₃. Each salt type was varied in the concentration levels of 0.1, 0.25, 0.5, and 1 M. The results showed that the different salt types and higher salt concentrations significantly reduced initial soil ER values in all soil textures. CaCl₂ salt highly reduced ER values of all soil textures and subsequently by NaCl and Na₂CO₃, respectively, indicating that divalent cation salts decreased the ER values more rapidly than monovalent cation salts. Soil ER values of all soil textures were decreased with the exponential decay function, where the maximum drop was at 0.1 M and was consistent from 0.25 M. In addition, the ER reduction rates of sandy loam and clayey soils were faster than that of clay loam soil. Soil properties that significantly affected the rate of change in soil ER after soils were affected by salt were pH, EC_e, CEC, and total-N. The results indicated that higher concentrations of dissolved salts in the soil resulted in soil electrolyte density and the movement of electric current through the cations in the soil. Therefore, soil electrical resistivity measurement has great potential for rapidly assessing soil salinity and salt type in agricultural areas.

Keywords: soil resistivity; salt; soil salinity; field measurement

บทนำ

ความต้านทานไฟฟ้าของดินหรือสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) เป็นสมบัติของดินที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านดิน ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าถือเป็นส่วนกลับของสภาพการนำไฟฟ้าในดิน โดยปกติดินสามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากในดินประกอบไปด้วยของแข็งและเกลือละลายที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ ไอออนหรือประจุไฟฟ้าเหล่านี้จะเคลื่อนที่ระหว่างช่องว่างต่อช่องว่างทำให้เกิดกระแสไหลผ่านได้ดิน (เพียงตา, 2550) ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าดินจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านดินไปได้มากน้อยเพียงใด หลักการพื้นฐานของการวัดความต้านทานไฟฟ้าในดินคือการปล่อยกระแสไฟฟ้าไปสู่ดิน กระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดที่ปล่อยลงสู่ดิน หากดินเป็นตัวนำที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านย่อมสามารถวัดความต่างศักย์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้านี้ได้ เมื่อทราบค่าของกระแสที่ปล่อยลงไปและค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว จะสามารถหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) (Gupta, 1980)

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าของดินจัดอยู่ในประเภทของการสำรวจด้วยไฟฟ้า (electrical survey) ซึ่งเป็นเทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ที่ประยุกต์เอาหลักทฤษฎีทางไฟฟ้ามาตรวจวัดสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน และถูกนำมาใช้ในการสำรวจสมบัติทางดินโดยไม่รบกวนโครงสร้างของดิน ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้าน ทั้งงานด้านธรณีวิทยา วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าในดิน ได้แก่ การสำรวจหาชั้นดินและหินที่มีองค์ประกอบของแร่ (Anbazhagan et al., 2015; Hersir and Árnason, 2009) ใช้ตรวจสอบความลึกของชั้นหินเพื่อการค้นหาแหล่งปิโตรเลียม น้ำมัน แหล่งแร่ (Wahab et al., 2021; Wang and David, 2019) ใช้สำรวจชั้นหินอุ้มน้ำหรือชั้นบาดาล (Alile et al., 2010; Muchingami et al., 2012; Akinlalu et al., 2017) สำรวจเพื่อพัฒนาแหล่งน้ำผิวดิน (สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา, 2562) สำรวจโครงสร้างเขื่อนดิน (Satarugsa and Sangchumpoo, 2011a) การหาโพรงใต้ผิวดิน (Satarugsa and Sangchumpoo, 2011b) ใช้หาขอบเขตการแทรกตัวของชั้นน้ำเค็ม (ปาริชาติ, 2556) การสำรวจความเสียหายทางโครงสร้าง (ทวีพงษ์, 2554) ใช้แก้ปัญหาแหล่งฝังกลบขยะ (Zawadzki et al., 2018) และพัฒนาระบบกราวด์ (ground systems) ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า (Salam et al., 2017) เป็นต้น

ในทางเกษตรเทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ถูกนำมาใช้ศึกษาสมบัติดินแบบไม่รบกวนโครงสร้าง ใช้ในการประเมินสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน (Mohammed et al., 2022) การสำรวจน้ำใต้ดิน (Azffri et al., 2022) การระบุพื้นที่ดินที่มีความหนาแน่นสูงหรือใช้ตรวจสอบชั้นดาน การกำหนดความลึกของชั้นดินเหนียว และความเค็มของดิน (Hardie and Doyle, 2012) นอกจากนี้การศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อสมบัติดินหลายประการ พบว่า ความต้านทานดินจะขึ้นอยู่กับชนิดดินและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในดิน (Islami et al., 2012) ค่าความต้านทานไฟฟ้าบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินทั้งทางฟิสิกส์และเคมีดิน โดยปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของดินมักขึ้นอยู่กับประเภทเนื้อดิน ความชื้น เกลือ อุณหภูมิ ขนาดเม็ดดินและการกระจายตัวของเม็ดดิน (พงศ์พันธุ์, 2553)

ประเทศไทยมีดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือประมาณ 2.302 ล้านเฮกตาร์ และส่วนใหญ่เป็นดินเค็มที่เกิดในพื้นที่ภายในของประเทศ (inland saline soils) ประมาณ 1.904 ล้านเฮกตาร์ และที่เหลือเป็นดินเค็มที่เกิดในพื้นที่ชายฝั่งทะเล ปัญหาที่สำคัญของดิน

เกิดจากดินมีการสะสมเกลือที่ละลายน้ำได้ปริมาณสูงทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของดินมีค่าตั้งแต่ 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตรขึ้นไป ซึ่งจัดว่าเป็นดินเค็ม และหากดินมีโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงหรือมีค่า SAR >13 จัดว่าเป็นดินโซดิก (Sodic soil) โดยสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงนี้บ่งบอกถึงปริมาณเกลือในสารละลายดินที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แลกเปลี่ยนได้สะสมในดินและเป็นปัญหาต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช (Arunin and Pongwichian, 2015) การติดตามปริมาณและการแพร่กระจายของเกลือในพื้นที่ทำการเกษตรนั้นทำได้ยากเนื่องจากมีปัจจัยทั้งทางด้านสภาพพื้นที่ ความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลง การให้น้ำชลประทาน และการจัดการดิน เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณและความเข้มข้นของเกลือภาคสนามแบบรวดเร็วจึงเป็นสิ่งจำเป็นอันดับแรกที่จะช่วยในการประเมินระดับผลกระทบที่เกิดจากการสะสมเกลือภายในดิน จากการศึกษาของ Abidin et al. (2013) ได้พบความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินกับปริมาณเกลือ โดยพบว่า ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในดินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลง เช่นเดียวกับรายงานของ Dafalla and AlFouzan (2012) ที่พบว่า ปริมาณแมกนีเซียม ซัลเฟต แคลเซียม และโซเดียม มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าดิน โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าถูกควบคุมโดยปริมาณเกลือและของเหลวในรูพรุน ในลักษณะที่ความต้านทานดินจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น (Long et al., 2012) จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินมีศักยภาพในการใช้ตรวจสอบสมบัติของดินและเกลือที่ละลายอยู่ในดินได้โดยไม่ต้องขุดรบกวนโครงสร้างของดิน (Cillis et al., 2018; Hovhannissian et al., 2019; Paillet et al., 2010; Samouëlian et al., 2005)

อย่างไรก็ตามการตรวจสอบปริมาณเกลือในดินในปัจจุบันสามารถทำได้โดยการวัดสภาพการนำไฟฟ้าและวัดความเข้มข้นของเกลือในดินด้วยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องมีการเตรียมตัวอย่างและใช้เวลานานในการวิเคราะห์ แต่ปัจจุบันมีเครื่องมือในการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่สามารถพกพาและมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อประเมินระดับความเค็มและสมบัติดินได้อย่างรวดเร็ว แต่ยังขาดข้อมูลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้าดินกับชนิดและความเข้มข้นของเกลือในดินทางการเกษตรที่มีเนื้อดินแตกต่างกันซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนาเป็นแบบจำลองเพื่อใช้ประเมินเชิงปริมาณและชนิดของเกลือที่สะสมในดิน ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของไอออนเกลือในสารละลายดินต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินทางการเกษตร โดยทำการทดลองด้วยวิธีการประยุกต์วิธีอิเล็กโทรดแบบ 4 จุด (Four-electrode method) ในห้องปฏิบัติการ (Angst and Elsener, 2014; Wenner, 1916) ซึ่งทำให้ได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของเกลือและค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินมาใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เครื่องวัดความต้านทานดินในการประเมินระดับความเค็มในกลุ่มของดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือและนำไปใช้เพื่อการติดตามและแก้ปัญหาดินเค็มในดินภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีการศึกษา

เก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินในแปลงปลูกอ้อย จังหวัดสระแก้วทั้งหมด 10 บริเวณ โดยอ้างอิงชุดดินจากแผนที่ดินจังหวัดสระแก้ว กองสำรวจดิน (2561) กรมพัฒนาที่ดินมาตราส่วน 1:25,000 ซึ่งได้ให้ตัวอย่างดินที่เก็บจากแปลงปลูกอ้อยเป็นตัวแทนหลักของดินที่ใช้ทางการเกษตร ดินที่ทำการศึกษประกอบด้วยดินที่มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (Clay) ได้แก่ ชุดดินทับพริก (TpK1, TpK2: Typic Haplustalfs) จำนวน 2 พื้นที่ และชุดดินกลางดง (Kld1: Ultic Paleustalfs) จำนวน 1 พื้นที่ ดินที่มีเนื้อเป็นดินร่วนปนเหนียว (Clay loam) ได้แก่ ชุดดินวังน้ำเย็น (Wny: Typic Haplustalfs) จำนวน 1 พื้นที่ ดินชุดดินทับพริก (TpK3: Typic Haplustalfs) จำนวน 1 พื้นที่ และชุดดินกลางดง (Kld2: Ultic Paleustalfs) จำนวน 1 พื้นที่ และดินที่มีเนื้อเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ได้แก่ ชุดดินดอนไร่ (Dr: Typic Kandistults) จำนวน 1 พื้นที่ ชุดดินคล้ายดินปึกธงชัย (Ptc: Typic (Kandic) Paleustults) จำนวน 1 พื้นที่ และชุดดินบางคล้า (Bka1, Bka2: Typic Haplustults) จำนวน 2 พื้นที่ ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินที่ความลึกในชั้นเขตรากพืช (0-30 ซม.) เก็บตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (Disturbed samples) ประมาณ 2 กิโลกรัม และตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed samples) โดยใช้กระบอกลูกเต๋า (core) หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินแบบถูกรบกวนผึ่งให้แห้งในที่ร่มเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. และ 2 มม. เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดินในขั้นตอนต่อไป

วิเคราะห์สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ดิน

วิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ เนื้อดิน (soil texture) โดย pipette method (Gee and Bauder, 1986) และแจกแจงประเภทของเนื้อดิน (Soil Survey Staff, 2006) ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density) โดย core method (Blake and Hartge, 1986) และวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในดินที่ความดันแตกต่างกัน 5 ระดับ ประกอบด้วย สภาพดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil: SAT) ความดันที่ 0.1 พาสคัล 0.33 พาสคัล (field capacity: FC) 1 พาสคัล 3 พาสคัล และ 15 พาสคัล (permanent wilting point: PWP) (Klute, 1965) นำข้อมูลปริมาณความชื้นดินโดยปริมาตรที่ความดันต่าง ๆ ไปคำนวณหาปริมาณความจุความชื้นของดินที่จุด SAT, FC และ PWP ที่แท้จริงจากสมการของ van Genuchten et al. (1991) ในโปรแกรม RETC เวอร์ชัน 6.02

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินพื้นฐาน ได้แก่ พีเอชดิน (pH) ใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1:1 (Bockheim et al., 1996) สภาพการนำไฟฟ้า (EC_e) (Blake and Hartge, 1986; Bower et al., 1965) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter: OM) (Walkley and Black, 1934) ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) โดยการกลั่นด้วย Kjeldahl method (Jackson and Messick, 1965) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorous) โดยวิธี Bray II และวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Bray and Kurtz, 1945) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 1 M NH_4OAc pH 7.0 (Chapman, 1965) เบสที่สกัดได้ (extractable bases) ประกอบด้วย โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียม โดยสกัดจากสารละลาย 1 M NH_4OAc pH 7.0 (Peech and Allen, 1974)

การวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดิน

นำตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (Disturbed samples) ทั้งหมดมาวัดความต้านทานไฟฟ้า โดยวิธีการแบบ 4 ขั้ว (Four-electrode method) (Angst and Elsener, 2014; Wenner, 1916) โดยจะวัดค่าเป็นโอห์มต่อเซนติเมตร ตัวอย่างดินละ 3 ซ้ำ ทำโดยการเติมตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนใส่กล่อง soil resistivity box ที่มีพื้นที่หน้าตัดขวาง Cross-sectional area (A) เท่ากับ 7.2 ซม. [3 ซม. (กว้าง) $\times$ 2.4 ซม. (สูง)] มีระยะระหว่าง Pin (L) เท่ากับ 7.2 ซม. และมีสัดส่วนของพื้นที่ตัดขวางต่อระยะระหว่าง pin เท่ากับ 1 ซม. [7.2 ซม.²/7.2 ซม.²] (Figure 1) เติมตัวอย่างดินเป็นชั้นบาง ๆ จนดินเต็มด้านบนของขอบกล่อง ค่อย ๆ อัดดินอย่างระมัดระวังเพื่อให้ดินในกล่องมีค่าความหนาแน่นรวมใกล้เคียงกับความหนาแน่นรวมที่วัดได้ในสนาม หลังจากนั้นเติมน้ำที่ความจุความชื้นสนาม (field capacity) ในภาชนะรองรับ และนำกล่องที่บรรจุตัวอย่างดินวางในภาชนะที่เติมน้ำเพื่อให้ดินค่อย ๆ ซึมซับน้ำขึ้นไปจนปริมาณน้ำถูกดูดซับไว้ในดินจนหมด จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินโดยเชื่อมต่อกล่อง soil resistivity box เข้ากับเครื่อง GEOHM' 5 Earth Tester ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟ และ DC millimeter เพื่อให้กระแสไหลผ่านระหว่างขั้ว ความถี่ที่ใช้ทดสอบ 50 Hz จากนั้นเชื่อมต่อ DC Electronic Voltmeter ที่แท่งทองแดง (pin) ทั้งสองตัว ซึ่งอยู่ใกล้กับศูนย์กลางของกล่อง และที่แผ่นทองแดงที่ปลายกล่องทั้งสองข้าง โดยใช้ช่วงมิลลิแอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ที่เหมาะสมในการวัดความเป็นไปได้ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วของกล่อง ความต้านทานดิน และคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน ตามสมการที่ 1

$$ER = R \frac{A}{L}$$

สมการ 1

เมื่อ ER (electrical resistivity) คือ ความต้านทานไฟฟ้าของดิน หน่วย โอห์ม/ซม. ($\Omega \text{ cm}^{-1}$) หรือ โอห์ม/ม. ($\Omega \text{ m}^{-1}$)

R (Resistance) คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในหน่วยโอห์ม (Ω) ที่วัดได้จากเครื่อง GEOHM's 5 Earth Tester

A คือ พื้นที่หน้าตัดของกล่องวัดความต้านทานไฟฟ้าของดิน หน่วย ซม.³ หรือ ม.³

L คือ ระยะห่างระหว่างแท่งวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หน่วย ซม. หรือ ม.

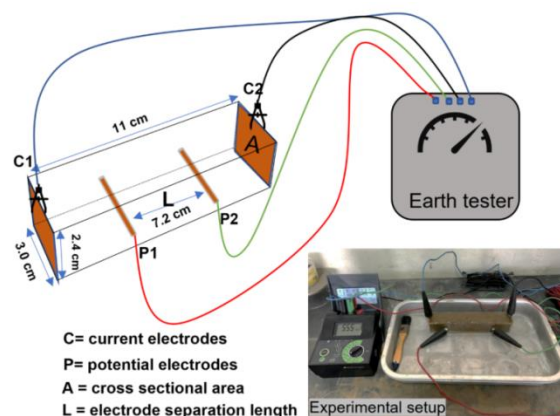


Figure 1 Diagram showing electrical resistivity measurement by the Wenner 4 probe arrangement using GEOHM' 5 Earth Tester in the soil resistivity box

วิเคราะห์อิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของเกลือต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดิน

ศึกษาอิทธิพลของชนิดเกลือต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินที่มีเนื้อเป็นดินเหนียว (Clay) ดินร่วนปนเหนียว (Clay loam) และดินร่วนปนทราย (Sandy loam) โดยการเติมสารละลายเกลือ 4 ชนิด ได้แก่ NaCl, KCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 ซึ่งเกลือที่ใช้เป็นกลุ่มไอออนเกลือที่ละลายได้และพบสะสมภายในดิน โดยใช้ความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิดเดียวกัน คือ 0.5 M เติมสารละลายเกลือตามปริมาตรน้ำที่ความจุความชื้นสนาม (field capacity) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RETC ในตัวอย่างดิน ทำการเติมสารละลายโดยให้ดินที่บรรจุในกล่องวัดความต้านทานดินดูดซับสารละลายเกลือด้วยแรงแคปิลลารีจนปริมาณสารละลายถูกดูดซับจนหมด หลังจากนั้นวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของเกลือ NaCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 ในสารละลายดินต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าในดิน โดยเติมสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0.1 M, 0.25 M, 0.5 M และ 1 M โดยเติมในดินที่มีเนื้อดินเหนียว ร่วนปนเหนียว และร่วนปนทราย เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบชนิดของเกลือ หลังจากนั้นวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินที่เติมสารละลายเกลือด้วยเครื่อง GEOHM' 5 Earth Tester

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (F-test) พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าของดินระหว่างชนิดเกลือโดยวิธี Duncan's Multiple range test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ขึ้นไป และวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) ระหว่างตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน และตัวแปรต้น คือ ความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิด เมื่อได้รูปแบบของฟังก์ชันความสัมพันธ์ทำการแก้สมการด้วย Microsoft Excel และใช้ฟังก์ชัน Solver เพื่อให้ได้ตัวแปรจากฟังก์ชันของความสัมพันธ์ ได้แก่ อัตราความชัน (Slope) และวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) ระหว่างอัตราความชันกับสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของดิน

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติดินที่ทำการศึกษา

สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีบางประการของดินที่ทำการศึกษา (Table 1) พบว่า ลักษณะดินที่ทำการศึกษาคจัดเป็นสามกลุ่มเนื้อดิน ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) ดินร่วนปนเหนียว (Clay loam) และดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ค่าความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.23-1.70 ก./ซม^3 ดินที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นดินกรดจัดไปจนถึงดินเป็นกลาง ซึ่งดินกรดเป็นลักษณะของดินทั่วไปในเขตร้อนที่เกิดการผูกอยู่กับที่และการชะละลาย ซึ่งดินส่วนใหญ่เป็นดินที่มีพัฒนาการสูง เป็นดินลึกมาก ระบายน้ำดี ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงค่อนข้างต่ำจนถึงค่อนข้างสูง อินทรีย์วัตถุมีปริมาณสูงในชั้นดินบนและมีปริมาณลดลงตามความลึกของหน้าตัดดิน มีธาตุไนโตรเจนรวมในดินต่ำมากถึงสูง ดินส่วนใหญ่มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในช่วงต่ำจนถึงสูง โพแทสเซียมที่

แลกเปลี่ยนได้อยู่ในช่วงต่ำมากถึงสูงมาก แคลเซียมอยู่ในช่วงต่ำมากถึงสูงมาก แมกนีเซียมอยู่ในช่วงต่ำมากถึงสูงมาก และมีปริมาณโซเดียมในช่วงต่ำมากจนถึงปานกลาง ซึ่งลักษณะของดินปลูกอ้อยในจังหวัดสระแก้วที่ทำการศึกษามีระดับความอุดมสมบูรณ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ ผ่องพรรณ และคณะ (2560)

อิทธิพลของชนิดเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน

เกลือทั้งสี่ชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินร่วนปนทราย ดินร่วนปนเหนียว และดินเหนียว โดยชนิดของเกลือที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดินร่วนปนทราย (Figure 2a) ที่ไม่เติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 17.38 โอห์ม/ม. เมื่อเติมสารละลายเกลือทั้งสี่ชนิดที่ความเข้มข้นเดียวกัน 0.5 M และความชื้นที่ความจุความชื้นสนาม ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของดินที่มีเกลือ NaCl, KCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 มีค่าเท่ากับ 7.51, 5.42, 5.45 และ 8.22 โอห์ม/ม. ตามลำดับ ส่วนดินร่วนปนเหนียว (Figure 2b) ที่ไม่เติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 15.88 โอห์ม/ม. ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่มี NaCl, KCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 มีค่าเท่ากับ 5.21, 4.44, 3.87 และ 7.03 โอห์ม/ม. ตามลำดับ และดินเหนียว (Figure 2c) ที่ไม่เติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 29.40 โอห์ม/ม. ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยที่มี NaCl, KCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 มีค่าเท่ากับ 5.83, 4.41, 3.74 และ 8.81 โอห์ม/ม. ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าดินที่ได้รับสารละลายเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าในดินที่ลดลงสอดคล้องกับสภาพการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามหลักการทางเคมีไฟฟ้า ไอออนของสารละลายเกลือทั้งสี่ชนิดเป็นตัวกลางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เกลือ NaCl, KCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 เป็นแคตไอออนที่มีประจุบวก เมื่อแคตไอออนเหล่านี้มีอยู่ในสารละลายดินมาก อิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายไฟจะวิ่งเข้าหาประจุบวกในดินเกิดการไหลของกระแสได้มากยิ่งขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลง กล่าวคือ ดินสามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้นเมื่อดินมีการสะสมเกลือ สอดคล้องกับการรายงานของ Hardie and Doyle (2012) ที่รายงานว่า การไหลของกระแสไฟฟ้าภายในดินได้รับอิทธิพลจากความเค็มหรือสารละลายเกลือที่มีอยู่ในดิน ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินลดลง นอกจากนี้การสะสมเกลือในดินปริมาณมากทำให้ดินดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้น โดยสารละลายเกลือที่แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ทำให้แคตไอออนจากเกลือแทรกซึมและที่ถูกดูดซับในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน และแคตไอออนเหล่านี้สามารถดูดซับน้ำเข้าหาตัวเองด้วยแรงออสโมติก จนกลายเป็นแคตไอออนจับกับน้ำ ซึ่งปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเป็นสาเหตุโดยตรงอย่างหนึ่งที่ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลง (หฤทัย, 2553)

Table 1 Some selected physicochemical properties of the studied soils

Code	Particle size distribution (USDA grading)			Texture	Bulk density	pH	EC _e	OM	Total	Avai.	CEC	Exchangeable bases			
	Sand	Silt	Clay									1:1	N	P	K
	(----- % -----)					(g cm ⁻³)		(dS m ⁻¹)		(----- g cm ⁻³ -----)		(mg kg ⁻¹)	(----- cmol kg ⁻¹ -----)		
Kld1	21	36	43	Clay	1.41	6.01	0.23	20.60	1.77	0.74	37.17	0.36	20.51	6.15	0.68
TpK1	19	31	50	Clay	1.28	6.95	0.41	17.55	2.04	10.50	24.65	0.15	21.91	0.84	0.10
TpK2	15	25	60	Clay	1.25	5.54	0.18	24.81	2.62	0.45	40.97	0.16	19.18	9.09	0.12
Wny	25	39	36	Clay loam	1.36	6.59	0.28	15.10	1.60	1.76	23.90	0.10	18.56	6.24	0.25
Tpk3	24	38	38	Clay loam	1.40	6.46	0.26	17.68	1.41	15.52	15.43	0.12	15.09	1.57	0.29
Kld2	41	27	32	Clay loam	1.23	7.73	0.60	20.60	1.77	6.17	37.17	0.36	20.51	6.15	0.68
Dr	57	27	16	Sandy loam	1.65	5.17	0.62	19.73	0.63	14.74	9.86	0.15	1.33	0.84	0.07
Bka1	71	15	14	Sandy loam	1.50	4.61	0.15	7.18	0.79	21.24	6.18	0.10	1.95	0.44	0.06
Ptc	82	2	16	Sandy loam	1.70	5.40	0.25	4.51	0.47	51.48	0.95	0.03	0.84	0.17	0.01
Bka2	75	9	16	Sandy loam	1.69	4.72	0.14	21.92	0.79	34.89	2.55	0.23	8.20	0.47	0.06
Mean					1.45	5.92	0.31	16.97	1.39	15.75	19.88	0.18	12.81	3.20	0.23

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินที่มีการเติมเกลือและดินที่ไม่ได้รับเกลือ (Control) ชนิดเกลือที่มีผลต่อการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด คือ CaCl_2 , KCl, NaCl และ Na_2CO_3 ตามลำดับ โดยเหมือนกันในทุกเนื้อดิน ทั้งนี้การเติมเกลือในกลุ่มคลอไรด์ทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kusim et al. (2013) ที่รายงานว่าปริมาณเกลือ NaCl ที่มีในดินจะไปลดค่าความต้านทานไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเกลือถูกชะละลายออกไปจากดิน นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zohra-Hadjadj et al. (2019) ที่ศึกษาอิทธิพลของเกลือ NaCl, KCl, และ MgCl_2 ที่ความเข้มข้น 0.2 M มีผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการผสมกันของเกลือ NaCl และ KCl ในดิน ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินลดลงไม่แตกต่างกัน ในทางตรงกันข้ามเกลือ MgCl_2 ทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกลือ NaCl และ KCl ทั้งนี้เป็นผลจากความหนาแน่นประจุไดวาเลนต์ในเกลือ MgCl_2 ที่มีสูงกว่าไอออนกลุ่มมอนอวาเลนต์แคตไอออน

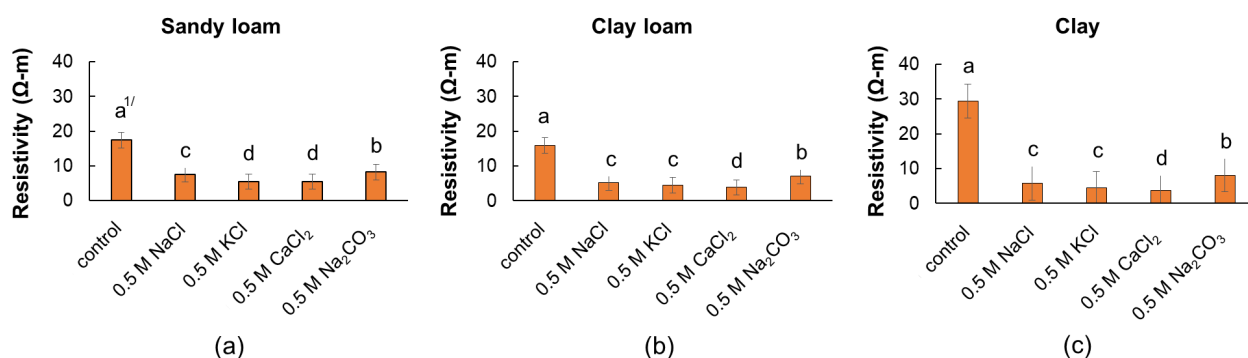


Figure 2 Effect of salt types on soil resistivity of (a) sandy loam; (b) clay loam and (c) clay. ^{1/}Mean followed by the same letters are not significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test

อิทธิพลของความเข้มข้นของเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดิน

ผลของความเข้มข้นของเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเนื้อร่วนปนทราย (sandy loam)

ณ ความจุความชื้นสนาม (field capacity) ดินร่วนปนทรายที่ไม่มีการเติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 82.07 โอห์ม/ม. (Figure 3) เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 M ดินที่เติมเกลือ NaCl มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 10.58, 4.58, 2.45 และ 1.33 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 3a) ดินที่เติม CaCl_2 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 1.48, 1.03, 0.59 และ 0.34 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 3b) ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินที่เติมเกลือ Na_2CO_3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 5.12, 1.98, 1.01 และ 0.58 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 3c) พิจารณาที่ความเข้มข้น 0.1 M พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินร่วนปนทรายมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเติมเกลือทั้งสามชนิดลงไปในดิน และเมื่อความเข้มข้นเข้าใกล้ 0.2 M ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงคงที่มากยิ่งขึ้น

ผลของความเข้มข้นของเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเนื้อร่วนปนเหนียว (clay loam)

ณ ความจุความชื้นสนาม (field capacity) ดินร่วนปนเหนียวที่ไม่เติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 15.46 โอห์ม/ม. (Figure 4) เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 M ดินที่เติมเกลือ NaCl มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4.60, 2.55, 1.53 และ 0.82 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 4a) ดินที่เติมเกลือ CaCl_2 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.90, 0.68, 0.38 และ 0.23 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 4b) และการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเมื่อเติมเกลือ Na_2CO_3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 3.53, 1.60, 0.77, 0.14 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 4c)

ผลของความเข้มข้นของเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเหนียว (Clay)

ณ ความจุความชื้นสนาม (field capacity) ดินเหนียวที่ไม่มีการเติมเกลือมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 20.84 โอห์ม/ม. (Figure 5) เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, CaCl_2 และ Na_2CO_3 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 0.1 0.25 0.5 และ 1 M พบว่า ดินที่เติมเกลือ NaCl มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4.85, 2.80, 1.53 และ 0.88 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 5a) ในดินที่เติมเกลือ CaCl_2 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.95, 0.69, 0.39 และ 0.22 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 5b) และเมื่อเติมเกลือ Na_2CO_3 พบว่า ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยลดลงเท่ากับ 2.83, 1.36, 0.66 และ 0.34 โอห์ม/ม. ตามลำดับ (Figure 5c)

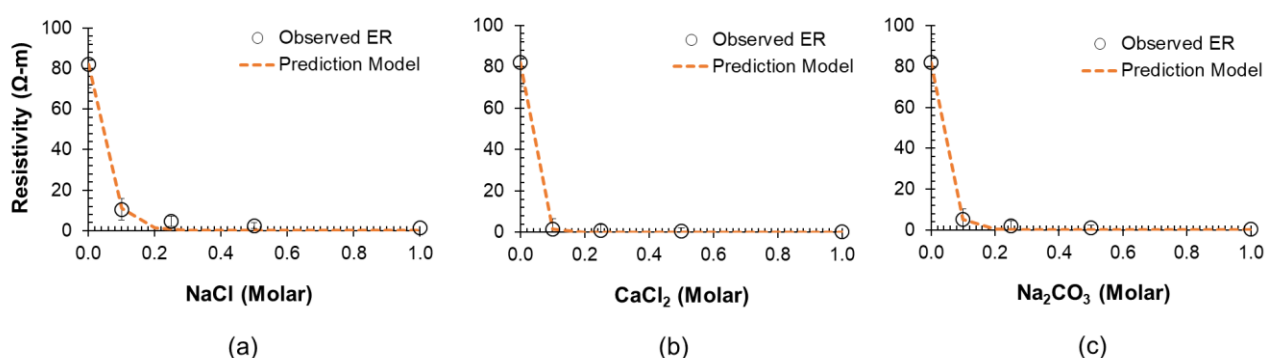


Figure 3 Effect of salt concentrations on resistivity of sandy loam after soaking with (a) NaCl; (b) CaCl_2 and (c) Na_2CO_3

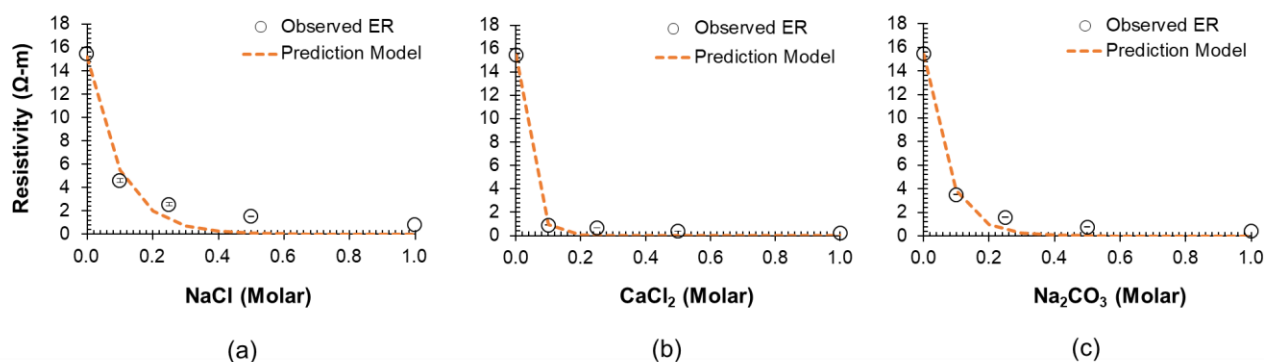


Figure 4 Effect of salt concentrations on resistivity of clay loam after soaking with (a) NaCl; (b) CaCl_2 and (c) Na_2CO_3

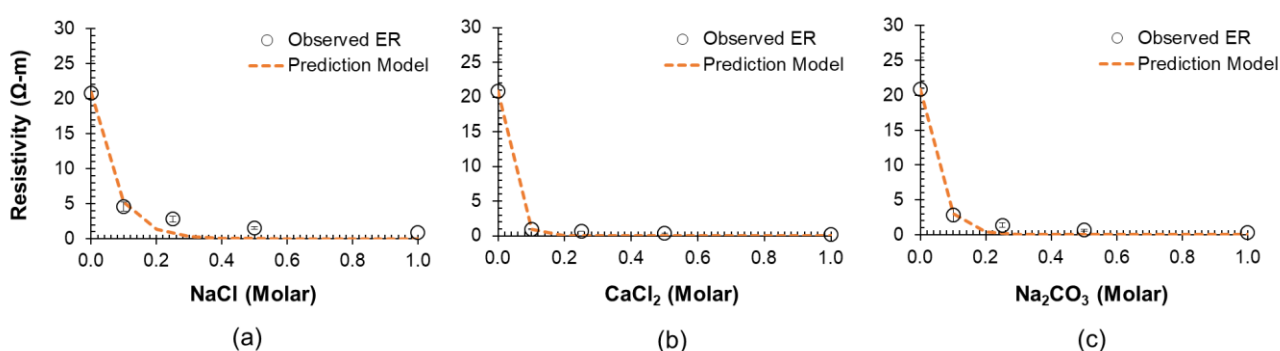


Figure 5 Effect of salt concentrations on resistivity of clay after soaking with (a) NaCl; (b) CaCl_2 and (c) Na_2CO_3

ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิดต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดิน แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิดทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินทั้งสามชนิดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเนื้อหยาบ (sandy loam) ดินร่วนปนเหนียว (clay loam) และดินเหนียว (clay) มีการเปลี่ยนแปลงลดลงแบบ 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้นของเกลือต่ำจะเห็นค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็ว และในช่วงท้ายที่ความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินน้อยและคงที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งอัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดเกลือและชนิดเนื้อดิน โดยดินเนื้อหยาบมีค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเริ่มต้นสูงกว่าดินร่วนปนเหนียว และดินเหนียว ทั้งนี้เป็นผลจากดินเนื้อหยาบมีอนุภาคทรายในสัดส่วนที่สูงซึ่งอนุภาคทรายนำไฟฟ้าได้ดีกว่าดินเนื้อละเอียดที่ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคขนาดดินเหนียวและอนุภาคทรายแป้งซึ่งนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่า ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอนุภาคดินเหนียว (Long et al., 2012) อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินลดลงอย่างรวดเร็วในทุกเนื้อดินเมื่อมีการเติมสารละลายเกลือให้กับดินเพียงเล็กน้อย และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะคงที่มากขึ้นเมื่อได้รับปริมาณเกลือมากกว่า 0.2 M โดยเฉพาะในดินร่วนปนทรายที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเกลือส่งเสริมการนำไฟฟ้าในดินมากขึ้นค่าความต้านทานไฟฟ้าจึงลดลง โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยปริมาณและชนิดของของเหลวในรูพรุน ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีเกลือเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของเกลือ NaCl และ KCl ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Long et al. (2012) และ Zohra-Hadjadj et al. (2019) นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ โดยเฉพาะ NaCl ในดินมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของรูพรุน และสมบัติด้านการกักเก็บน้ำในดินซึ่งจะทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอออนเกลือ และเกลือ NaCl ยังป้องกันการลดลงของปริมาณช่องว่างขนาดใหญ่ในดินทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเกลือและทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงเมื่อดินมีความชื้นเพิ่มขึ้น (Lu et al., 2021)

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน (Table 2) ซึ่งได้จากการแก้สมการจากฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับระดับความเข้มข้นของเกลือแต่ละชนิด exponential decay function ($ER = A * e^{(-B*(salt\ conc.))}$) เมื่อ ER คือความต้านทานไฟฟ้าของดิน A (initial ER) คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าดินเริ่มต้น B คือความชันของการเปลี่ยนแปลง (slope) และ Salt conc. คือ ความเข้มข้นของเกลือ โดยพบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ยของดินเหนียว (Clay) (A) เท่ากับ 21 โอห์ม/ม. และลดลงด้วยอัตราความชื้น (B) เท่ากับ 14 15 และ 30 เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, Na_2CO_3 และ $CaCl_2$ ตามลำดับ ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินร่วนปนเหนียว (Clay Loam) พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 15 โอห์ม/ม. และลดลงด้วยอัตราความชื้น (B) เท่ากับ 10, 15 และ 28 เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, Na_2CO_3 และ $CaCl_2$ ตามลำดับ สำหรับดินร่วนปนทราย พบว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินคล้ายกับดินเหนียวและดินร่วนปนเหนียว แต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้ามากกว่าดินเหนียวและดินร่วนปนเหนียว โดยมีความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 82 โอห์ม/ม. และลดลงด้วยอัตราความชื้น (B) เท่ากับ 18, 30 และ 39 เมื่อเติมสารละลายเกลือ NaCl, Na_2CO_3 และ $CaCl_2$ ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า เมื่อดินมีการสะสมเกลือ $CaCl_2$ ในปริมาณสูงทำให้ดินมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมาคือ Na_2CO_3 และ NaCl ในทุกเนื้อดิน โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของเกลือเข้าใกล้ 0.2 M ซึ่งความชื้นที่ลดลงสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินแต่ละชนิดดินเมื่อได้รับเกลือที่มีความเข้มข้นต่างกัน ทั้งนี้ เกลือ $CaCl_2$ ทำให้อัตราการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดเป็นผลจากสารละลายเกลือ $CaCl_2$ มีแคลเซียมที่มีประจุแบบไดวาเลนต์และมีความหนาแน่นประจุสูงกว่ากลุ่มมอนอวาเลนต์ ทำให้ไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้เร็ว และทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากที่สุดทั้งสามเนื้อดิน โดยเฉพาะในดินที่มีเนื้อหยาบ คือ ดินร่วนปนทรายมีค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงสูงที่สุดหลังการเติมเกลือ เป็นผลมาจากดินมีสัดส่วนของอนุภาคทรายสูงกว่าอนุภาคดินเหนียว ซึ่งในกรณีที่ดินมีอนุภาคดินเหนียวน้อยจะทำให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านสารละลายดินที่มีเกลือได้อย่างรวดเร็วและทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงอย่างรวดเร็ว

Table 2 The parameters associated with exponential decay function^{1/} of soil resistivity are influenced by salt type and concentrations

Soil	NaCl		$CaCl_2$		Na_2CO_3	
	A initial ER	B slope	A initial ER	B slope	A initial ER	B slope
Clay	21	14	21	30	21	15
Clay loam	15	10	15	28	15	15
Sandy loam	82	18	82	39	99	30

^{1/} exponential decay function expresses as $ER = A * e^{(-B*(salt\ conc.))}$ where A = initial ER of the soil without salt treating, B = slope of the function, salt conc. = salt concentration (mol/L) applied to the studied soils.

ความสัมพันธ์ของรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ากับสมบัติของดิน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติดินและความชื้นของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า (Table 3) พบว่าค่าความชื้นของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเมื่อดินได้รับอิทธิพลจากเกลือ NaCl, $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับสมบัติดิน คือ pH, EC, total-N และ CEC แสดงให้เห็นว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น (B) แปรผกผันกับค่า pH EC และ ค่า CEC กล่าวคือ ดินที่มีค่า pH, EC และ CEC สูง เมื่อได้รับปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับรายงานของ Murad (2012) และ Chik and Islam (2011) ที่รายงานว่าปริมาณประจุและการดูดซับแคตไอออนไอออนของดินซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า (electrolytes) จะขึ้นอยู่กับระดับของ pH และปริมาณไอออนที่มีอยู่ในดินบ่งชี้ได้จากค่า EC ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเมื่อดินมีค่า EC สูง ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินจะต่ำลง ส่วนค่า total-N มีสหสัมพันธ์เชิง

บวกหรือแปรผันตามกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินตั้งต้น (initial ER) โดย total-N สัมพันธ์กับปริมาณ OM ในดิน อินทรีย์วัตถุที่เพิ่มขึ้นทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Chik and Islam, 2011; Murad, 2012; Turki et al., 2019) ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุส่วนใหญ่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้ดินนำไฟฟ้าได้ต่ำ นอกจากนี้ค่า CEC มีสหสัมพันธ์แปรผกผันกับความชันของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน กล่าวคือ ดินที่มีค่า CEC สูงสามารถดูดซับแคตไอออนที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ได้มาก ทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง สอดคล้องกับการทดลองของ Paillet et al. (2010) และ Weisenberger et al. (2020) ซึ่งกล่าวว่า CEC จะควบคุมปริมาณของแคตไอออนที่ละลายและแลกเปลี่ยนอยู่ในช่องว่างของรูพรุนดิน ได้แก่ Ca Mg และ Na ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลง (Dafalla and Alfouzan, 2012; Kibria and Hossain, 2012; Murad, 2012) ซึ่งแคตไอออนเหล่านี้จะถูกอิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายไฟวิ่งเข้าหาเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้ามากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลง

Table 3 Correlation coefficients between the initial ER and declining slope and soil properties after amended with different salt types

Soil properties	NaCl		CaCl ₂		Na ₂ CO ₃	
	A	B	A	B	A	B
	initial ER	slope	initial ER	slope	initial ER	slope
pH	-0.726*	-0.733*	-0.726*	-0.787*	-0.727*	-0.758*
EC _e	-0.720*	-0.450	-0.722*	-0.660	-0.721*	-0.673*
Total-N	0.775*	0.407	0.776*	0.564	0.774*	0.601
CEC	-0.867**	-0.756*	-0.867**	-0.896**	-0.866**	-0.891**

*, ** Significance at the 0.05% and 0.01% levels of probability, pH = soil pH, EC_e = effective electrical conductivity (dS/m), Total-N = total nitrogen content (g/kg), CEC = cation exchange capacity (cmol_c/kg)

สรุป

ชนิดและความเข้มข้นของไอออนเกลือในสารละลายดินที่แตกต่างกันทำให้ดินที่ใช้ทางการเกษตรมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแตกต่างกันทางสถิติ โดยเกลือที่มีแคตไอออนที่เป็นประจุแบบไดวาเลนต์ (divalent cations) เช่น CaCl₂ ทำให้ดินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากกว่าดินที่ได้รับเกลือที่มีแคตไอออนแบบมอโนวาเลนต์ (monovalent cations) โดยชนิดของเกลือที่ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงมากที่สุดคือ CaCl₂ KCl NaCl และ Na₂CO₃ ตามลำดับ

ความเข้มข้นของไอออนเกลือในดินที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ดินที่ใช้ทางการเกษตรมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงแบบ exponential decay function ($ER = A * e^{(-B * (salt \ conc.))}$) โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเติมสารละลายเกลือความเข้มข้นต่ำ (0.1 M) และมีค่าความต้านทานดินคงที่เมื่อดินได้รับเกลือความเข้มข้นสูงกว่า 0.2 M การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเมื่อดินได้รับความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นทำให้ดินร่วนปนทรายมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าดินเหนียว และดินร่วนปนเหนียว ตามลำดับ ทั้งนี้ไอออนของเกลือจะส่งเสริมให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในดินเหนียวโดยทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเร็วขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินลดลงอย่างรวดเร็ว ปัจจัยทางดินที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของดินเมื่อได้รับอิทธิพลของเกลือ ได้แก่ pH, EC_e, CEC และ total-N ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือและค่าความต้านทานไฟฟ้าสามารถประยุกต์เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือประเมินระดับความเค็มในกลุ่มของดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือนำไปสู่การติดตามและแก้ปัญหาที่ดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือในภาคสนาม อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทำการทดสอบในภาคสนามและเก็บข้อมูลปริมาณเกลือและค่าสภาพการนำไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่เพื่อสร้างแบบจำลองในการประเมินในพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณฉันทพร ปนะวงศ์ และคุณประไพพิศ ศรีมาวงษ์ ในการให้คำแนะนำด้วยการใช้โปรแกรม RETC เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- กองสำรวจดิน. 2561. แผนที่ดินจังหวัดสระแก้ว ประเทศไทย มาตราส่วน 1: 25,000. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ทวีพงษ์ สุขสวัสดิ์. 2554. การประยุกต์ใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในดินเพื่อใช้สำรวจความเสียหายของโครงสร้างทาง กรมศึกษาของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย. 2011. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา. กรุงเทพฯ.
- ปาริชาติ ศรีเสน. 2556. การประยุกต์เทคนิคการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อประเมินการรุกรานของน้ำทะเลในชั้นน้ำใต้ดิน อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. ปรินญาวิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ผ่องพรรณ วงศ์เขียว, เสาวนุช ถาวรพฤษ และณัฐพล จิตมาตย์. 2560. ลักษณะดินและศักยภาพผลผลิตของดินที่ใช้ปลูกอ้อยในจังหวัดสระแก้ว. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 35(2): 10-18.
- พงศ์พันธุ์ ปิยะวงศ์. 2553. หลักการระบายสายดินและการประยุกต์ใช้งาน. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เพ็ญตา สาทรักษ์. 2550. ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา. 2562. รายงานการศึกษารณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเพื่อหาพื้นที่พัฒนาและบริหารจัดการแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่ดินเค็ม อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.
- หฤทัย มาศโค้ง. 2553. การควบคุมความเค็มของดินร่วนปนทรายโดยการตัดกระบวนการคาพิวลารี. วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- Abidin, M.H.Z., F. Ahmad, D.C. Wijeyesekera, R. Saad, and M.F.T. Baharuddin. 2013. Soil resistivity measurements to predict moisture content and density in loose and dense soil. In *Applied Mechanics and Materials*. 353: 911-917.
- Akinlalu, A.A., A. Adegbuyiro, K.A.N. Adiat, B.E. Akeredolu, and W.Y. Lateef. 2017. Application of multi-criteria decision analysis in prediction of groundwater resources potential: a case of Oke-Ana, Ilesa Area Southwestern, Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 6(1): 184-200.
- Alile, M.O., S.I. Jegede, and O.M. Ehigior. 2010. Underground water exploration using electrical resistivity method in Edo State, Nigeria. *Asian Journal of Earth Sciences*. 3(1): 57-61.
- Anbazhagan, S., R. Indhirajith, S. Uma Maheshwaran, A. Jothibas, A. Venkatesan, and V. Ramesh. 2015. Electrical resistivity survey and shallow subsurface geological study in hard rock terrain, Southern India. *Journal of the Geological Society of India*. 85(3): 305-312.
- Angst, U.M., and B. Elsener. 2014. On the Applicability of the Wenner Method for Resistivity Measurements of Concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*. 111(6): 661-672.
- Arunin, S., and P. Pongwichian. 2015. Salt-affected soils and management in Thailand. *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*. 69(5): 319-325.
- Azzfri, S.L., M.F. Ibrahim, and S.H. Gödeke. 2022. Electrical resistivity tomography and induced polarization study for groundwater exploration in the agricultural development areas of Brunei Darussalam. *Environmental Earth Sciences*. 81(8): 1-12.

- Bockheim, J.G., J.M. Kimble, and C.L. Ping. 1996. The National Soil Survey Center Database for Permafrost-Affected Soils (Gelisols). *Soil Survey Horizons*. 37(4): 111-119.
- Bower, T.G.R. 1965. Stimulus variables determining space perception in infants. *Science*. 149(3679): 88-89.
- Bray, R.H., and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*. 59(1): 39-46.
- Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*. 5: 377-382.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*. 9: 891-901.
- Chik, Z., and T. Islam. 2011. Study of chemical effects on soil compaction characterizations through electrical conductivity. *International journal of electrochemical science impact factor*. 6: 6733-6740.
- Cillis, D., A. Pezzuolo, F. Marinello, and L. Sartori. 2018. Field-scale electrical resistivity profiling mapping for delineating soil condition in a nitrate vulnerable zone. *Applied Soil Ecology*. 123: 780-786.
- Dafalla, M.A., and F.A. AlFouzan. 2012. Influence of physical parameters and soil chemical composition on electrical resistivity: a guide for geotechnical soil profiles. *International Journal of Electrochemical Science*. 7: 3191-3204.
- Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p.383-409. In: A. Klute. *Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Inc, Wisconsin USA.
- Gupta, M.S. 1980. Georg Simon ohm and Ohm's law. *IEEE Transactions on Education*. 23(3): 156-162.
- Hardie, M., and R. Doyle. 2012. Measuring soil salinity. *Plant salt tolerance*. Humana Press. 415-425.
- Hersir, G.P., and K. Árnason. 2009. "Resistivity of rocks" Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources. In *Proceedings of Ahuachapan and Santa Tecla 17-30 October 2009*. El Salvador.
- Hovhannissian, G., P. Podwojewski, Y. Le Troquer, S. Mthimkhulu, and R. Van Antwerpen. 2019. Mapping spatial distribution of soil properties using electrical resistivity on a long term sugarcane trial in South Africa. *Geoderma*. 349: 56-67.
- Islami, N., S.H. Taib, I. Yusoff, and A.A. Ghani. 2012. Integrated geoelectrical resistivity, hydrochemical and soil property analysis methods to study shallow groundwater in the agriculture area, Machang, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*. 65(3): 699-712.
- Jackson, P.W., and S. Messick. 1965. The person, the product, and the response: conceptual problems in the assessment of creativity. *Journal of personality*. 33: 309-329.
- Kibria, G., and M.S. Hossain. 2012. Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 138(12): 1520-1529.
- Klute, A. 1965. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. 9: 210-221.
- Kusim, A.S., N.E. Abdullah, H. Hashim, and S.B. Kuty. 2013. Effects of salt content on measurement of soil resistivity, pp. 124-128. In *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*. IEEE.

- Long, M., S. Donohue, J.S.L'Heureux, I.L. Solberg, J.S. Rønning, R. Limacher, and I. Lecomte. 2012. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 49(10): 1158-1168.
- Lu, P.H., Y. He, Z. Zhang, and W.M. Ye. 2021. Predicting chemical influence on soil water retention curves with models established based on pore structure evolution of compacted clay. *Computers and Geotechnics*. 138: 104360.
- Mohammed, M., A. El Mahmoudi, and Y. Almolhem. 2022. Applications of Electromagnetic Induction and Electrical Resistivity Tomography for Digital Monitoring and Assessment of the Soil: A Case Study of Al-Ahsa Oasis, Saudi Arabia. *Applied Sciences*. 12(4): 2067.
- Muchingami, I., D.J. Hlatywayo, J.M. Nel, and C. Chuma. 2012. Electrical resistivity survey for groundwater investigations and shallow subsurface evaluation of the basaltic-greenstone formation of the urban Bulawayo aquifer. *Physics and Chemistry of the Earth*. 50: 44-51.
- Murad, O.F. 2012. Obtaining chemical properties through soil electrical resistivity. *Journal of Civil Engineering Research*. 2(6): 120-128.
- Paillet, Y., N. Cassagne, and J.J. Brun. 2010. Monitoring forest soil properties with electrical resistivity. *Biology and Fertility of Soils*. 46(5): 451-460.
- Peech, J., and S. Allen. 1974. Far infrared cyclotron resonance in metals, 166-168. In. *IEEE*.
- Salam, M.A., Q.M. Rahman, S.P. Ang, and F. Wen. 2017. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 5(2): 290-297.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*. 83(2): 173-193.
- Satarugsa, P., and S. Sangchumpoo. 2011a. Applied 2-d resistivity survey for determination of an internal structure of an earth-fill embankment of irrigation reservoirs in the northeastern Thailand. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*. 16(6): 655-667.
- Satarugsa, P., and S. Sangchumpoo. 2011b. Comparison of rates for expansion of surface and subsurface sinkholes: a case study at Ban Bo Deang Amphoe Ban Muang Changwat Sakon Nakhon. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*. 16(8): 993-1002.
- Soil Survey Staff. 2006. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey*. 10th ed. United States Dep. of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Turki, N., A. Elaoud, H. Gabtni, I. Trabelsi, and K.K. Khalfallah. 2019. Agricultural soil characterization using 2D electrical resistivity tomography (ERT) after direct and intermittent digestate application. *Arabian Journal of Geosciences*. 12(14): 1-11.
- Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. USEPA, Washington, DC.
- Wahab, S., H. Saibi, and H. Mizunaga. 2021. Groundwater aquifer detection using the electrical resistivity method at Ito Campus, Kyushu University (Fukuoka, Japan). *Geoscience Letters*. 8(1): 1-8.
- Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1): 29-38.

- Wang, T., and J. David. 2019. Deep resistivity "turnover" effect at oil generation "peak" in the Woodford Shale, Anadarko Basin, USA. *Petroleum Science*. 16(5): 972-980.
- Weisenberger, T.B., H. Ingimarsson, G.P. Hersir, and Ó.G. Flóvenz. 2020. Cation-exchange capacity distribution within hydrothermal systems and its relation to the alteration mineralogy and electrical resistivity. *Energies*. 13(21): 5730.
- Wenner, F. 1916. A method of measuring earth resistivity. US Government Printing Office. D.C.
- Zawadzki, Ł., D. Wychowaniak, and M. Lech. 2018. Electrical resistivity methods for landfill monitoring. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Land Reclamation* (50 (2)).
- Zohra-Hadjadj, F., N. Laredj, M. Maliki, H. Missoum, and K. Bendani. 2019. Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 90: 101-112.