

พฤติกรรมเชิงธรณีเคมีของธาตุองค์ประกอบหลักในดินปลูกมันสำปะหลัง ที่พัฒนามาจากวัสดุธรณีที่แตกต่างกันในจังหวัดนครราชสีมา Geochemical Behaviors of Major Elements in Cassava Growing Soils Derived from Different Rock Formations in Nakhon Ratchasima Province

ประภัสสร สุโพธิ์¹ ณัฐพล จิตมัตย์^{1,*} เฉลิมชาติ วงศ์ลีเจริญ สุรเชษฐ์ อร่ามรักษ์¹
วรชาติ วิศว์พัฒน์¹ และ เสาวนุช ถาวรพฤษ¹

Prapasara Supo¹, Natthapol Chittamart^{1,*}, Chalermchart Wongleecharoen¹, Surachet Aramrak¹,
Worachart Wisawapipat¹ and Saowanuch Tawornpruek¹

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

รับเรื่อง: 19 สิงหาคม 2565 Received: 19 August 2022

ปรับแก้ไข: 1 ธันวาคม 2565 Revised: 1 December 2022

รับตีพิมพ์: 3 ธันวาคม 2565 Accepted: 3 December 2022

* Corresponding author: fagrnpc@ku.ac.th

ABSTRACT: Investigating the influences of geological parent materials on the behavior, affinity, and bioavailability of major elements in cassava-growing soils in Thailand is lacking. This study aimed to analyze the total major elemental composition of cassava-growing soils and to investigate the relationship between elements and soil properties for grouping elements according to their affinity of major elements in 37 cassava-growing soils derived from different geological parent materials in Nakhon Ratchasima province. The study was conducted by analysis of physicochemical properties, elemental composition, and principal component analysis (PCA) to correlate multivariable soil data influencing elemental behaviors. The results showed that most cassava-growing soils were coarse-textured soils with dominant high sand content, very acidic to moderately alkaline pH, and low soil fertility. The results of PCA analysis grouping by rock formation and soil series could be classified elements into 3 principal components (PC) including PC1 deals with base-associated elements, i.e., Ca, Mg, K, Na, and P, which was closely related to silt content (Silt), cation exchange capacity (CEC), calcium carbonate equivalent (CCE), soil pH (pH), and base saturation (BS). Chatturat series (Ct) developed from Maha Sarakham (KTms) and Quaternary alluvium (Qa) formations were the major soils found in this group. The soils were clayey textured, having high pH, CEC, CCE, and bases. PC2 dealt with metal elements and oxides, i.e., Al, Fe, Mn, and N, which were closely related to clay content (Clay), extractable acidity (EA), and organic matter (OM). Chok Chai (Ci) and Surin (Su) series developed from Khok Kruat formation (Kkk) and Quaternary Basalts (Qbs) were the major soils found in this group and accumulated high metal and sesquioxide content. PC3 associated with silicon (Si) and sand content (Sand). Korat series developed from Phu Phan (Kpp), Sao Khua (Ksk) and Qa formations

were the major soil found in this group. They had a coarse texture with high sand content. The results indicated that soil parent materials strongly influenced the geochemical behavior and affinity associated with soil properties which could affect the bioavailability of elements and be major constraints for cassava production in Nakhon Ratchasima province.

Keywords: Geochemistry, cassava growing soils, principal component analysis, soil major elements

Agricultural Sci. J. (2023) Vol. 54(1): 61–81

ว. วิทย. กษ. (2566) 54(1): 61–81

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของวัสดุธรรมชาติต้นกำเนิดต่อพฤติกรรม ความใกล้ชิด และความเป็นประโยชน์ของธาตุองค์ประกอบหลักในดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุในรูปทั้งหมด และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบหลักกับสมบัติของดินเพื่อจัดกลุ่มธาตุตามความใกล้ชิดของธาตุองค์ประกอบในดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลัง จำนวน 37 บริเวณ ที่พัฒนาจากวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกันในจังหวัดนครราชสีมา โดยวิเคราะห์สมบัติดินทางเคมี-ฟิสิกส์ ปริมาณธาตุองค์ประกอบในดิน และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลดินหลายตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของธาตุในดิน ผลการศึกษา พบว่า ดินปลูกมันสำปะหลังส่วนใหญ่มีอนุภาคทรายเด่น เป็นดินเนื้อหยาบ มีค่าพีเอชเป็นกรดจัดถึงด่างปานกลาง และมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักตามชนิดของหมวดหินและชนิดดินสามารถแบ่งธาตุเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มองค์ประกอบที่ 1 (PC1) เกี่ยวกับธาตุที่สัมพันธ์กับความเป็นด่าง ได้แก่ Ca, Mg, K, Na และ P สัมพันธ์กับอนุภาคทรายแป้ง (Silt) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) สมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (CCE) พีเอชดิน (pH) และร้อยละความอิ่มตัวเบส (BS) ชุดดินจัดรัส (Ct) ซึ่งพัฒนาจากหมวดหินมหาสารคาม (KTms) และตะกอนน้ำพายุควอเทอร์นารี (Qa) เป็นชุดดินหลักที่พบ มีลักษณะเป็นดินเหนียว มีพีเอช (pH) เป็นด่าง

มีสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (CCE) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) และเบสสูง กลุ่มองค์ประกอบที่ 2 (PC2) เกี่ยวกับธาตุโลหะและปริมาณออกไซด์ ได้แก่ Al, Fe, Mn และ N สัมพันธ์กับอนุภาคดินเหนียว (Clay) กรดที่แลกเปลี่ยนได้ (EA) และอินทรีย์วัตถุ (OM) ชุดดินโซคชัย (Ci) และชุดดินสุรินทร์ (Su) ซึ่งพัฒนาจากหมวดหินโคกกรวด (Kkk) และหินภูเขาไฟควอเทอร์นารี (Qbs) เป็นดินหลักที่พบในกลุ่มนี้ ซึ่งเป็นดินที่สะสมเชสควิออกไซด์สูง และกลุ่มองค์ประกอบที่ 3 (PC3) เกี่ยวกับธาตุซิลิคอนและอนุภาคทราย ชุดดินโคราช (Kt) ซึ่งพัฒนาจากหมวดหินภูพาน (Kpp) หมวดหินเสาขัว (Ksk) และตะกอนน้ำพายุควอเทอร์นารี (Qa) เป็นกลุ่มดินหลักที่พบในกลุ่มนี้ ซึ่งเป็นดินเนื้อหยาบและมีอนุภาคทรายเด่น การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า วัสดุต้นกำเนิดดินมีอิทธิพลต่อพฤติกรรม และความสัมพันธ์ในเชิงธรณีเคมีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติดิน ซึ่งส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช และอาจเป็นข้อจำกัดสำหรับการผลิตมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา

คำสำคัญ: ธรรณีเคมี, ดินปลูกมันสำปะหลัง, การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก, ธาตุองค์ประกอบหลักในดิน

บทนำ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* (L.) Crantz) เป็นพืชอาหารที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง โดย

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่สำคัญของประเทศในเขตร้อน และเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มันสำปะหลังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน ประเทศไทยส่งออกมันสำปะหลังในปี พ.ศ. 2564 มีมูลค่ากว่า 13,270 ล้านบาท และมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังในปี พ.ศ. 2564 ทั้งหมดประมาณ 10.92 ล้านไร่ แจกกระจายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากที่สุด คิดเป็นพื้นที่ 6.08 ล้านไร่ หรือร้อยละ 55.69 ของพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทย ทั้งนี้ จังหวัดนครราชสีมาเป็นจังหวัดที่มีเนื้อที่ปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 1,676,987 ไร่ (Office of Agricultural Economics, 2022) สำหรับดินปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทย ส่วนใหญ่จัดอยู่อันดับอัลติซอลส์ (Ultisols) ร้อยละ 75 และอันดับเอนทิซอลส์ (Entisols) ร้อยละ 14.5 (Duangpatra, 1988; Katong and Thongklum, 2004) ลักษณะเด่นของดิน คือ เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ถึงดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam) จำแนกตามระบบอนุกรมวิธานดินเป็น 2 กลุ่มดินใหญ่ (Great group) คือ Paleustults และ Quartzipsamments โดยดินในกลุ่ม Paleustults มีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย มีการสะสมดินเหนียวในดินชั้นล่างและมีพัฒนาการสูง ส่วนดินกลุ่ม Quartzipsamments มีเนื้อดินเป็นทราย เป็นดินลึก และเป็นดินเกิดใหม่ที่มีพัฒนาการต่ำ ดินทั้ง 2 กลุ่มนี้มีศักยภาพทางการเกษตรค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการระบายน้ำดีถึงดีเกินไป มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ และมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ ทำให้ดินมีความชื้นสะสมอยู่น้อย ปริมาณธาตุอาหารพืชต่ำ และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ ทำให้สูญเสียธาตุอาหารพืชจากการชะละลายได้ง่าย นอกจากนี้ ดินมีโครงสร้างดินไม่แข็งแรงและมีความเสถียรของเม็ดดินต่ำ (Kongthod, 2014)

ความอุดมสมบูรณ์ของดินปลูกมันสำปะหลังสามารถลดลงเนื่องจากการสูญเสียธาตุอาหารไปกับผลผลิต (Crop removal) เช่น การเก็บเกี่ยวผลผลิต

หัวมันสำปะหลังสด 7.2 ตันต่อไร่ (45 ตันต่อเฮกตาร์) จะสูญเสียธาตุอาหารประมาณ 10 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ 4 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ และ 32 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ หรือคิดเป็นสัดส่วนการสูญเสีย $N:P_2O_5:K_2O$ เท่ากับ 2.5:1:8 ตามลำดับ (International Fertilizer Industry Association, 1992) ทั้งนี้ ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในระบบการปลูกมันสำปะหลังถูกควบคุมด้วยพฤติกรรมเชิงเคมีของธาตุอาหารพืชและอันตรกริยากับองค์ประกอบของดิน เช่น แร่ดินเหนียว เซสควิออกไซด์ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากวัตถุดิบกำเนิดของดินและอินทรีย์วัตถุ รวมถึงสมบัติและสภาพแวดล้อมของดิน เช่น พีเอชดินและศักย์รีดอกซ์ เป็นต้น (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007)

ในประเทศไทยมีการศึกษาด้านธรณีเคมีดินและความสัมพันธ์และพฤติกรรมของธาตุและสมบัติของดินอยู่หลายบริเวณ เช่น การศึกษาธรณีเคมีของดินตามตำแหน่งของสภาพภูมิประเทศ (Toposequence) ของหินบะซอลต์ (Thanachit *et al.*, 2006a) และหินตะกอน (Thanachit *et al.*, 2006b) ในจังหวัดนครราชสีมา การศึกษาธรณีเคมีของดินนาในประเทศไทย (Prakongkep *et al.*, 2007) การศึกษาการแจกกระจายและความเข้มข้นของจุลธาตุในดินนาในแอ่งโคราช (Inboonchuay *et al.*, 2015) การศึกษาธรณีเคมีของดินเวอร์ทิซอลส์ (Chittamart *et al.*, 2010) การศึกษาธรณีเคมีของธาตุเหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสีในดินเนื้อปูน (Inkam *et al.*, 2017) การศึกษาแร่วิทยาและธรณีเคมีของดินกรด กำมะถันหรือดินเปรี้ยวจัด (Sukitprapanon *et al.*, 2014) การศึกษาการแยกส่วนและการดูดซับของธาตุสังกะสีในดินเนื้อปูน (Chittamart *et al.*, 2016) การจัดการธาตุอาหารพืชที่เหมาะสมเพื่อการผลิตมันสำปะหลังในดินทรายชุดดินสัดหีบ (Amonpon *et al.*, 2013) และการศึกษาวัฏจักรธรณีเคมีของธาตุสังกะสีในดินปลูกมันสำปะหลัง (Leksungnoen *et al.*, 2022) การศึกษาวิจัยเหล่านี้ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของธาตุและความสัมพันธ์ของธาตุกับวัตถุดิบกำเนิดดินใน

สภาพแวดล้อมและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การศึกษาพฤติกรรมและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในระบบการปลูกมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงกับปัจจัยแวดล้อมทางดิน โดยเฉพาะลักษณะทางธรณีวิทยายังมีน้อยมาก และอิทธิพลของวัตถุดิบกำเนิดดินและลักษณะทางธรณีวิทยาอาจมีผลต่อพฤติกรรมและความใกล้ชิดกันของธาตุองค์ประกอบในดินปลูกมันสำปะหลัง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาระดับความเข้มข้นและความสัมพันธ์กันระหว่างธาตุองค์ประกอบทั้งหมดในดิน ประกอบด้วย ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซิลิคอน (Si) เหล็ก (Fe) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) และศึกษาปัจจัยทางดิน เช่น วัตถุดิบกำเนิดของดินที่เกิดจากหมวดหินแตกต่างกัน ชนิดดิน และสมบัติของดินที่ควบคุมพฤติกรรมของธาตุองค์ประกอบหลักด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle component analysis, PCA) ในระบบดินปลูกมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา ผลที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์เชิงระบบของดินในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังด้วยวิธีทางธรณีเคมีดินจะทำให้เข้าใจถึงปัจจัยทางดินและสมบัติของดินที่มีผลต่อการกระจายตัวของธาตุ โดยเฉพาะกลุ่มธาตุอาหารพืช (Plant nutrients) ในองค์ประกอบของดิน (Soil constituents) นำไปสู่การจัดการธาตุอาหารพืชที่เหมาะสมและลดข้อจำกัดทางธรณีเคมีของดิน เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของมันสำปะหลังที่ปลูกในดินที่มีพัฒนาการลักษณะทางธรณีที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาและการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างดิน

เลือกพื้นที่ศึกษาและเก็บตัวอย่างจากข้อมูลการกระจายตัวของเนื้อที่ปลูกมันสำปะหลังรายอำเภอของจังหวัดนครราชสีมาในปีเพาะปลูก 2561/2562 พื้นที่ศึกษาแจกกระจายอยู่ใน 9 อำเภอ เรียงตามอำเภอ

ที่มีเนื้อที่ปลูกมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด ดังนี้ นครบุรีรัมย์ หนองบุญมาก ด้านขุนทด สีคิ้ว สูงเนิน ปักธงชัย พระทองคำ และโนนไทย ตามลำดับ กำหนดจุดเก็บตัวอย่างดินตามขอบเขตชุดดินที่พัฒนาจากหมวดหินที่แตกต่างกัน 6 หมวดหิน อ้างอิงจากแผนที่ชุดดินจังหวัดนครราชสีมา มาตราส่วน 1:100,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน (Department of Agriculture, 2011) และแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 ของกรมทรัพยากรธรณี (Department of Mineral Resources, 2016) ดินที่ศึกษาจำแนกอยู่ในอันดับ Ultisols, Alfisols และ Oxisols พัฒนาจากหมวดหินโดยเรียงจากอายุหมวดหินน้อยไปมาก (Figure 1) ดังนี้

1) กลุ่มดินตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี (Quaternary alluvium, Qa) จำนวน 4 จุด ได้แก่ ชุดดินสตึก (Satuk series, Suk: Typic (Kandic) Paleustult) จำนวน 1 จุด และชุดดินจตุรัส (Chatturat series, Ct: Typic Haplustalfs) จำนวน 3 จุด

2) กลุ่มดินที่พัฒนาจากหินบะซอลต์ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary volcanos, Qbs) จำนวน 7 จุด ได้แก่ ชุดดินโชคชัย/ชุดดินสุรินทร์ (Chok Chai series and Surin series association, Ci/Su: Rhodic Kandustox/Typic Rhodustalfs) จำนวน 4 จุด และชุดดินโชคชัย (Chok Chai series, Ci: Rhodic Kandustoxs) จำนวน 3 จุด

3) กลุ่มดินที่พัฒนาจากหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham formation, KTms) ซึ่งประกอบด้วยหินดินดานและชั้นเกลือหิน จำนวน 12 จุด ได้แก่ ชุดดินโคราช (Korat series, Kt: Typic (Oxyaquic) Kandustult) จำนวน 1 จุด ชุดดินจตุรัส (Chatturat series, Ct: Typic Haplustalfs) จำนวน 9 จุด และชุดดินน้ำพอง (Nam Phong series, Ng: Grossarenic Haplustalfs) จำนวน 2 จุด

4) กลุ่มดินที่พัฒนาจากหมวดหินโคกกรวด (Khok Kruat formation, Kkk) ซึ่งประกอบด้วยหินทรายแป้งและหินดินดานสีแดง จำนวน 6 จุด ได้แก่

ชุดดินสุรินทร์ (Surin series, Su: Typic Rhodustalfs) จำนวน 2 จุด ชุดดินสตึก (Satuk series, Suk: Typic (Kandic) Paleustult) จำนวน 1 จุด ชุดดินวาริน (Warin series, Wn: Typic Kandistult) จำนวน 1 จุด และชุดดินสีคิ้ว (Si Kheu series, Si: Typic Rhodustalfs) จำนวน 2 จุด

5) กลุ่มดินที่พัฒนามาจากหมวดหินภูพาน (Phu Phan formation, Kpp) ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มหินทรายและหินกรวดมน จำนวน 5 จุด ได้แก่ ชุดดิน

โคราช (Korat series, Kt: Typic (Oxyaquic) Kandistults) จำนวน 5 จุด

6) กลุ่มดินที่พัฒนามาจากหมวดหินเสาขัว (Sao Khua formation, Ksk) ซึ่งประกอบด้วยหินดินดานและหินทรายแป้งสีน้ำตาลแดง เนื้อตะกอนขนาดเล็กเอียง จำนวน 3 จุด ได้แก่ ชุดดินเรณู (Renu series, Rn: Plinthic Aeris Paleaquult) จำนวน 1 จุด และชุดดินวาริน (Warin series, Wn: Typic Kandistults) จำนวน 2 จุด

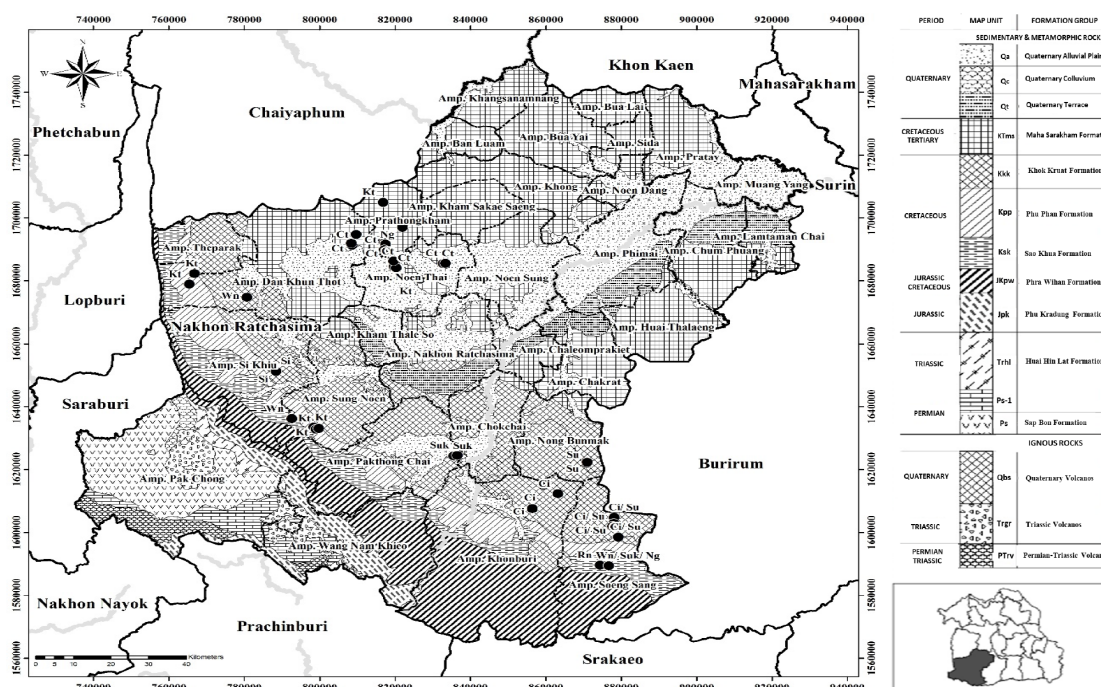


Figure 1 Sampling sites of cassava growing soils and the geologic map of Nakhon Ratchasima province

จำนวนจุดเก็บตัวอย่างดินพิจารณาจากขนาดพื้นที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังจากมากไปน้อย ซึ่งการแจกกระจายของชุดดินกับพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังที่พบในแต่ละหมวดหินมีขนาดพื้นที่แตกต่างกัน จึงสุ่มเก็บตัวอย่างดินครอบคลุมชุดดินหลักที่เป็นตัวแทนที่ใช้ปลูกมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา จึงทำให้

จำนวนจุดเก็บในแต่ละหมวดหินไม่เท่ากัน โดยเก็บตัวอย่างดินในช่วงมันสำปะหลังมีอายุประมาณ 2 เดือน เก็บข้อมูลผลผลิตหัวมันสำปะหลังสดเมื่อมันสำปะหลังมีอายุประมาณ 12 เดือน ซึ่งพบว่าผลผลิตหัวมันสำปะหลังสดอยู่ในพิสัย 2.30-10.1 ตันต่อไร่ (Table 1)

Table 1 Rock formations, soil series, soil classification, cassava cultivars and tuber yield of cassava in the studied sites in Nakhon Ratchasima province

Rock formation	Soil series ¹	Soil classification ²	Cassava cultivar ³	Fresh tuber yield in 2018/2019 (t ra ⁻¹)		
				Range	Mean	Median
Quaternary alluvium (Qa)	Suk (1)	Typic Paleustult	RY 11 (3)	2.30–5.13	3.47	3.14
	Ct (3)	Typic Haplustalfs	RY11/KU 72 (1)			
Quaternary Basalts (Qbs)	Ci/Su (4)	Rhodic Kandustox/ Typic Rhodustalfs	CMR 43–8–89 (4) RY 72 (2)	3.94–7.03	5.53	5.05
	Ci (3)	Rhodic Kandustoxs	KU 13 (1)			
Maha Sarakham (KTms)	Kt (1)	Typic (Oxyaquic) Kandustult	RY 72 (2) RY 11 (6)	3.24–10.1	5.72	4.69
	Ct (9)	Typic Haplustalfs	RY 11/RY 60 (1)			
	Ng (2)	Grossarenic Haplustalfs	HB 80/HB 90 (1)			
			Unknown (2)			
Khok Kruat (Kkk)	Su (2)	Typic Rhodustalfs	RY 11 (1)	3.71–10.1	6.39	5.82
	Suk (1)	Typic Paleustult	RY 72 (1)			
	Wn (1)	Typic Kandustults	RY 90 (1)			
	Si (2)	Typic Rhodustalfs	HB 80 (1) HB 90 (2)			
Phu Phan (Kpp)	Kt (5)	Typic (Oxyaquic) Kandustults	HB 90 (3) HB 80/HB 90 (1) HB 80 (1)	4.11–9.19	6.78	6.12
Sao Khua (Ksk)	Rn (1)	Plinthic Aeric Paleaquult	CMR 43–8–89 (2) Unknown (1)	6.75–8.57	5.11	7.66
	Wn (2)	Typic Kandustults				

¹ Number in parenthesis is the number of sampling sites of soil series. ² Subgroups classified by Land Development Department (2005). ³ Number in parenthesis is the number of sites in which cassava cultivar was observed in the area. Ci = Chok Chai series, Ct = Chatturat series, Kt = Korat series, Ng = Nam Phong series, Rn = Renu series, Si = Si Khiu series, Su = Surin series, Suk = Satuk series, Wn = Warin series, Ci/Su = Chok Chai series and Surin series association, HB = Huay Bong, RY = Rayong, KU = Kasetart, CMR = cross Manihot Rayong, Unknown = not classified

การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ดินในห้องปฏิบัติการ

เก็บตัวอย่างดินปลูกมันสำปะหลังตามขอบเขตของชุดดินที่คัดเลือกไว้ในแต่ละหมวดหิน โดยคัดเลือกจากพื้นที่แปลงปลูกมันสำปะหลังของเกษตรกร จำนวนทั้งสิ้น 37 แปลง และใช้สว่านเจาะดิน (Soil auger) ในการเก็บตัวอย่างดินภายในความลึก 100 เซนติเมตร และแบ่งช่วงชั้นของตัวอย่างดินเป็น 2 ช่วงชั้น คือ ชั้นดินบน ความลึก 0–20 เซนติเมตร และชั้นดินล่าง ความลึก 20–100 เซนติเมตร ซึ่งได้รวมเอาค่าวิเคราะห์ดินในชั้น 20–60 เซนติเมตร มาเฉลี่ยตามความลึกเพื่อเป็นตัวแทนของชั้นดินล่าง ให้ครอบคลุมเขตราก เตรียมตัวอย่างดินโดยผสมคลุกเคล้าตัวอย่างดินในแต่ละช่วงชั้นความลึกให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่มประมาณ 2 สัปดาห์ บดตัวอย่างดินและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีตามวิธีการวิเคราะห์ดินมาตรฐาน (National Soil Survey Center, 1996)

การวิเคราะห์สมบัติดินพื้นฐาน

นำตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร มาวิเคราะห์การแจกกระจายของอนุภาคดิน (Particle size distribution) ได้แก่ อนุภาคทราย (Sand) อนุภาคทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคดินเหนียว (Clay) ด้วยวิธีปิเปตต์ (Pipette method) (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965) และวิเคราะห์สมบัติดินทางเคมี ประกอบด้วย พีเอชดิน (Soil pH) ในอัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 ด้วยเครื่อง pH meter (National Soil Survey Center, 1996) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter, OM) โดยการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี Walkley and Black titration แล้วแปลงค่าเป็นปริมาณอินทรีย์วัตถุโดยใช้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์คูณด้วยค่า 1.724 (Walkley and Black, 1934; Nelson and Sommers, 1996) วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total

nitrogen, Total N) ด้วยวิธี Kjeldahl method (Jackson, 1965) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity, CEC) ด้วยวิธี 1 M NH_4OAc ที่เป็นกลาง (pH 7.0) (Chapman, 1965) วิเคราะห์ปริมาณสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate equivalent, CCE) โดยการละลาย CaCO_3 ด้วย 1 M HCl และไทเทรตกลับด้วย 1 M NaOH (National Soil Survey Center, 1996) ปริมาณกรดที่แลกเปลี่ยนได้ (Extractable acidity, EA) โดยการสกัดดินด้วยแบเรียมคลอไรด์ สารละลายไฮดรอกไซด์ที่ pH 8.2 แล้วไทเทรตด้วยกรดเกลือ 0.2 M HCl (Thomas, 1982) คำนวณอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส (BS) โดยผลรวมของเบสที่สกัดด้วย NH_4OAc (pH 7.0) ที่เป็นกลางหารด้วยค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) แล้วคูณด้วย 100 (National Soil Survey Center, 1996)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุหลัก (Major element) ในดิน

วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุในกลุ่มธาตุองค์ประกอบหลักในทางธรณีวิทยา (Geochemical major element) โดยธาตุเหล่านี้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1 %w/w และเป็นองค์ประกอบในหินและดินรวมกันคิดเป็นร้อยละ 95 ในรูปทั้งหมด ประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) ซิลิคอน (Si) เหล็ก (Fe) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และแมงกานีส (Mn) โดยวิเคราะห์ในตัวอย่างดินที่สุ่มจากดินขนาด 2 มิลลิเมตร มาบดละเอียด (0.5 มิลลิเมตร) และย่อยตัวอย่างดินด้วยกรดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริกเข้มข้น (Aqua regia) อัตราส่วนกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก 3:1 (Chen and Ma, 2001) และนำไปวัดปริมาณ Al, Si, Ca, Mg, K, Na, Fe และ Mn ด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES; Westerman, 1990) และย่อยตัวอย่างดินด้วย digestion mixture ของ Na_2SO_4 และผง Se กับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้น นำ

สารละลายที่ย่อยแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Kjeldahl method (Jackson, 1965) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดโดยวิธี Vanadomolybdate และวัดปริมาณด้วยเครื่อง spectrophotometer

การวิเคราะห์ข้อมูล

รายงานผลการวิเคราะห์ดินด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ด้วยโปรแกรม XLSTAT เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลหลายตัวแปร ได้แก่ องค์ประกอบของธาตุ สมบัติดินตามกลุ่มชนิดดิน และกลุ่มหินวัตถุดิบกำเนิด

ผลการทดลองและวิจารณ์

การแจกกระจายขนาดอนุภาคของดินตามประเภทหมวดหิน

การแจกกระจายขนาดอนุภาคดินของดินบน (0–20 เซนติเมตร) และดินล่าง (20–100 เซนติเมตร) ของดินปลูกมันสำปะหลังที่ศึกษา จำนวน 37 บริเวณที่อธิบายจาก box plot ซึ่งได้แสดงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่ากลาง และค่าเฉลี่ยของอนุภาคดินแต่ละชนิด โดยค่าเฉลี่ยและค่ากลางของข้อมูลอนุภาคดินร้อยละ 50 แจกกระจายอยู่ใน quartile ที่ 1 ถึง quartile ที่ 3 (Interquartile range) โดยแบ่งตามหมวดหิน (Figure 2) พบว่า ดินปลูกมันสำปะหลังที่พัฒนาจากหมวดหินเสาขัว (Ksk; Figure 2A) ซึ่งได้แก่ ชุดดินเรณู (Rn) และชุดดินวาริน (Wn) มีปริมาณอนุภาคทรายเด่นทั้งในดินบน (Topsoil) และดินล่าง (Subsoil) เช่นเดียวกับดินที่พัฒนามาจากหมวดหินภูพาน (Kpp; Figure 2B) ซึ่งได้แก่ ชุดดินโคราช (Kt) มีปริมาณอนุภาคทรายสูงกว่าอนุภาคดินเหนียวและทรายแป้ง ตามลำดับ ทั้งนี้อนุภาคทรายในดินที่พัฒนามาจากทั้งสองหมวดหินอาจได้รับอิทธิพลจากหินทรายแป้งและหินทรายเนื้อ

ละเอียดในหมวดหินเสาขัว และอนุภาคทรายจากกลุ่มหินทรายขาวเนื้อปานกลางถึงหยาบที่มีการคัดขนาดไม่ค่อยดีในหมวดหินภูพาน เมื่อพัฒนาเป็นดินอนุภาคทรายซึ่งทนทานต่อการผุพัง ทำให้กลุ่มชุดดินทั้ง 3 ชุด ได้แก่ ชุดดินโคราช (Kt) ชุดดินวาริน (Wn) และชุดดินเรณู (Rn) เป็นดินเนื้อหยาบ (Coarse textured soil)

ดินที่พัฒนาจากหมวดหินมหาสารคาม (KTms) ชุดดินหลัก คือ ชุดดินจัตุรัส (Ct) พบว่า ดินมีสัดส่วนการแจกกระจายปริมาณอนุภาคทราย ทรายแป้ง และอนุภาคดินเหนียวในปริมาณใกล้เคียงกัน แต่มีอนุภาคดินเหนียวสูงกว่าอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคทราย (Figure 2C) ทั้งนี้ หมวดหินมหาสารคามมีหินเนื้อละเอียด ได้แก่ หินดินดาน ซึ่งเมื่อผุพังกลายเป็นดินจะให้อนุภาคดินเหนียวในดิน การแจกกระจายอนุภาคในดินที่พัฒนาจากหมวดหินโคกกรวด (Kkk; Figure 2D) ซึ่งได้แก่ ชุดดินสีคิ้ว (Si) ชุดดินสตึก (Suk) ชุดดินสุรินทร์ (Su) และชุดดินวาริน (Wn) พบว่า ดินมีอนุภาคทรายและอนุภาคดินเหนียวสูงในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน มีพิสัยกว้างทั้งในดินบนและดินล่าง ทั้งนี้ เป็นผลจากดินได้รับอิทธิพลจากการผุพังของหินทรายและหินทรายแป้งที่อยู่ในหมวดหินโคกกรวด

การแจกกระจายของอนุภาคในดินที่พัฒนาจากหินบะซอลต์ยุคควอเทอร์นารี (Qbs; Figure 2E) ชุดดินหลัก คือ ชุดดินโชคชัย (Ci) พบว่า ดินมีสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวสูงกว่าอนุภาคทรายและทรายแป้ง ตามลำดับ ทั้งในดินบนและดินล่าง โดยอนุภาคดินเหนียวที่มีสัดส่วนสูงได้รับอิทธิพลจากการผุพังของหินบะซอลต์ ซึ่งจะให้ดินมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว ส่วนการแจกกระจายของอนุภาคในดินที่พัฒนาจากตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี (Qa; Figure 2F) ซึ่งได้แก่ ชุดดินสตึก (Suk) และชุดดินจัตุรัส (Ct) พบว่า ดินมีปริมาณอนุภาคทรายและดินเหนียวในสัดส่วนสูงในดินบน โดยดินบนมีความแปรปรวนของเนื้อดินสูง ทั้งนี้ เป็นผลจากตะกอนที่มีความหลากหลายที่พัดพามาทับถม ซึ่งมีทั้งตะกอนหยาบ ปานกลาง และละเอียด ซึ่งสัมพันธ์กับหมวดหินในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาที่มีทั้งหินเนื้อ

หยาบถึงเนื้อละเอียด ทำให้ตะกอนน้ำพายุควอเทอร์นารีมีความแปรปรวนด้านการแจกกระจายอนุภาคของดิน และมีลักษณะดินขึ้นกับแหล่งที่มาของตะกอน โดยจะเห็นว่า ชุดดินจตุรัส (Ct) พบได้ทั้งในหมวดหิน KTms และ Qa อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงหรือต่อเนื่องกัน กล่าวคือ ชุดดินจตุรัส (Ct) ที่พบในหมวดหิน Qa ได้รับอิทธิพลจากตะกอนน้ำที่มาจากหินในหมวดหิน KTms คือ หินดินดานและชั้นหินเกลือ ซึ่งมีเบสสูง ทำให้ชุดดินจตุรัสมีพีเอชสูงและพบปูนหุติยภูมิสะสมในดิน จากผลการวิเคราะห์การแจกกระจายอนุภาคดิน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณอนุภาทรายและอนุภาคดินเหนียวมีความแปรปรวนอย่างเด่นชัดภายในกลุ่มหมวดหินและระหว่างกลุ่มหมวดหิน เนื่องจากได้อิทธิพลจากหินต้นกำเนิดที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อปริมาณและการแจกกระจายขนาดของอนุภาคดิน ซึ่งเป็นแหล่งของการแจกกระจายของธาตุองค์ประกอบและสมบัติของดิน สอดคล้องกับการศึกษาของ Thanachit *et al.* (2006a) ซึ่งได้ศึกษาธรณีเคมีของดินตามลำดับภูมิฐาน (Catena) ที่พัฒนาตัวบนหินบะซอลต์ และ Thanachit *et al.* (2006b) ได้ศึกษาธรณีเคมีของดินตามลำดับภูมิฐานที่พัฒนาจากหินตะกอนในอำเภอน้ำพอง จังหวัดนครราชสีมา แสดงให้เห็นว่า ชนิดหินที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะเนื้อดินและการแจกกระจายของธาตุมีความสัมพันธ์กับอนุภาคนาขนาดทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งแตกต่างกันตามตำแหน่งภูมิฐานและลักษณะทางแร่วิทยาของดิน เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Inboonchuay *et al.* (2015) ที่พบว่า อนุภาคนาขนาดดินเหนียวจากตะกอนน้ำพาในพื้นที่ดินนาในแอ่งโคราชมีผลต่อการแจกกระจายของธาตุองค์ประกอบหลักและจุลธาตุ

สมบัติทางเคมีด้านการแลกเปลี่ยน (Exchange properties) ของดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลัง

ดินบน (Topsoil) ที่พัฒนาจากทุกหมวดหินมีพิสัยของค่าพีเอช ($pH_{1:1}$) อยู่ในระดับเป็นกรดรุนแรงมากถึงเป็นด่างจัด (พีเอช 4.2–8.1) ในขณะที่ ดินล่าง (Subsoil) มีพิสัยของค่าพีเอชสูงกว่าดินบน (Figure 3A) และอยู่ในระดับเป็นกรดรุนแรงมากถึงด่างจัด (พีเอช 4.3–8.1) ดินที่พัฒนาจากหมวดหินเสาขัว (Ksk) และหมวดหินภูพาน (Kpp) ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินเนื้อหยาบมีค่าพีเอชเป็นกรดรุนแรง สำหรับดินที่เกิดจากหมวดหินมหาสารคาม (KTms) ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินเนื้อละเอียด (Fine textured soil) ดินมีค่าพีเอชเป็นกลางถึงเป็นด่างทั้งชั้นดินบนและดินล่าง ส่วนดินที่พัฒนาจากหมวดหินโคกกรวด (Kkk) หมวดหินบะซอลต์ยุคควอเทอร์นารี (Qbs) และตะกอนน้ำพายุควอเทอร์นารี (Qa) มีเนื้อดินเป็นเนื้อปานกลาง (Medium-textured soil) ถึงเนื้อละเอียด มีค่าพีเอชอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยทั้งดินบนและดินล่าง ค่าพีเอชดินบ่งบอกปริมาณโปรตอน (H^+) ที่มีในดิน การควบคุมกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน อัตราการย่อยสลาย และความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช ค่าพีเอชของดินจะขึ้นกับชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดิน ปฏิกิริยารีดอกซ์ และระบอบความชื้นดิน (Mobilian and Craft, 2021) วัตถุต้นกำเนิดดินส่งผลต่อพีเอชดิน โดยการเป็นแหล่งของธาตุกรด (Acid-forming elements) คือ H และ Al ซึ่งพบได้ในดินในหมวดหิน Ksk, Kpp และ Kkk ที่มีพัฒนาการสูง และธาตุด่าง (Base-forming elements) ได้แก่ Ca, Na และ K (Jackson *et al.*, 2014) ซึ่งพบอิทธิพลของธาตุต่างได้เด่นชัดในชุดดินจตุรัสที่พัฒนาจากหมวดหิน KTms และ Qa

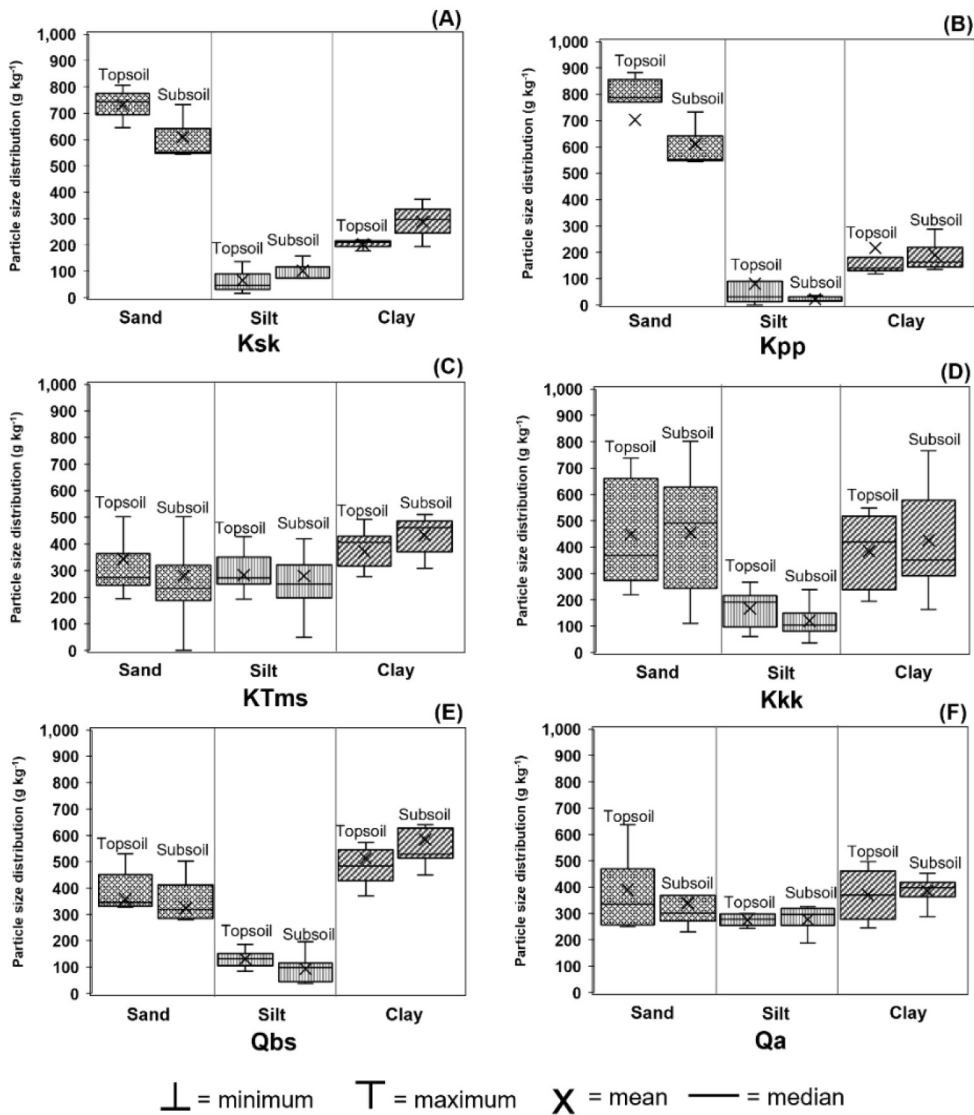


Figure 2 Box plot of the particle size distribution of soils from different rock formations: (A) Sao Khua formation (Ksk), (B) Phu Phan Formation (Kpp), (C) Maha Sarakham Formation (KTms), (D) Khok Kruat Formation (Kkk), (E) Quaternary Volcanoes (Qbs) and (F) Quaternary alluvium (Qa)

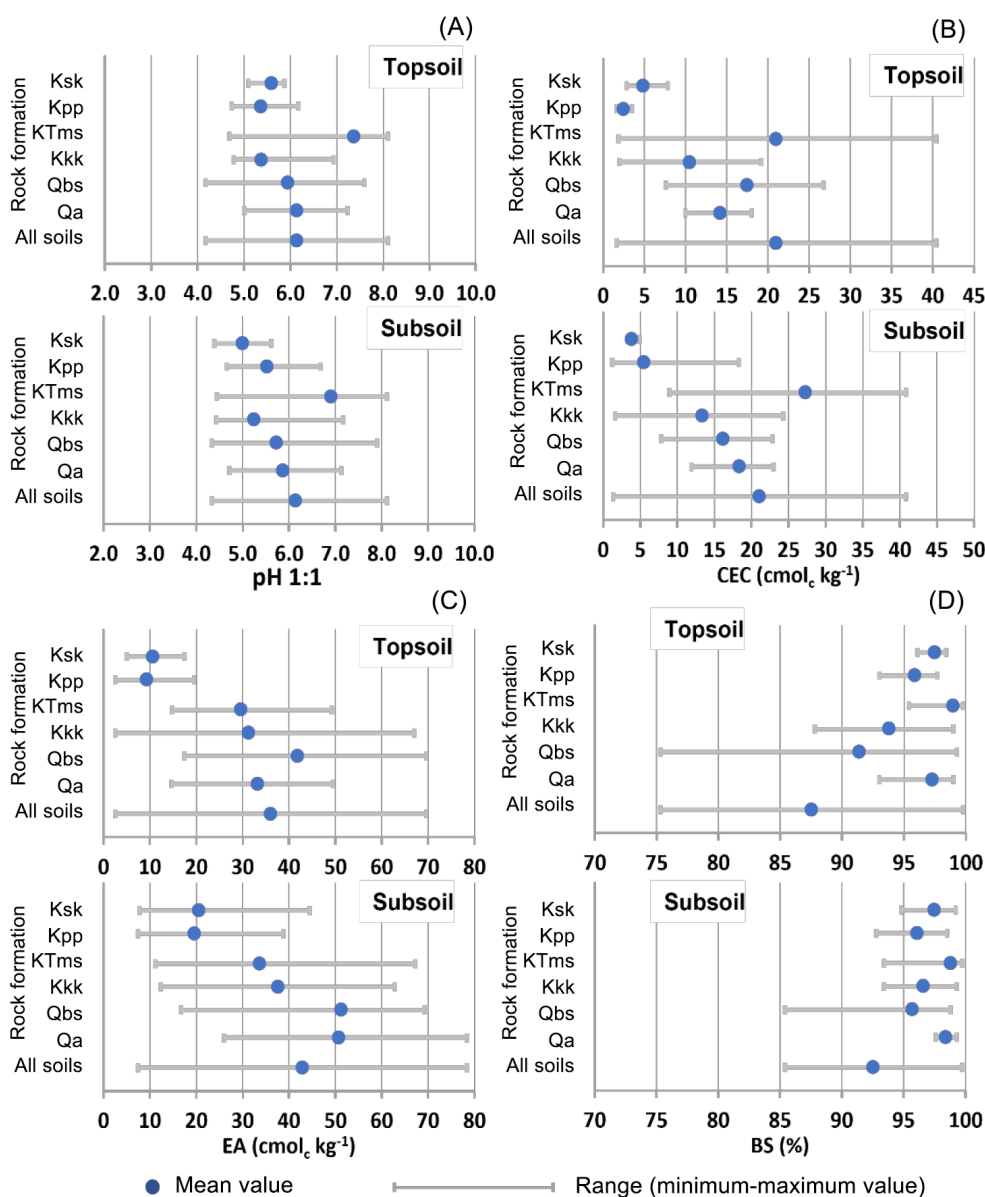


Figure 3 Range and mean values of soil exchange properties of cassava growing soils developed from the different rock formations: (A) pH 1:1, (B) cation exchange capacity (CEC), (C) extractable acidity (EA) and (D) base saturation percentage

ดินทุกหมวดหินมีพิสัยค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ในดินบนอยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก (1.62–40.40 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) และดินล่างมีระดับต่ำมากถึงสูงมากระหว่าง 1.25–40.80 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (Figure 3B) ค่า CEC เฉลี่ยของดินบนและดินล่างมีค่าใกล้เคียงกัน ดินที่พัฒนามาจากหมวดหินมหาสารคามมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงกว่ากลุ่มดินจากหมวดหินอื่น ๆ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ (Helling *et al.*, 1964) ดังนั้น ดินที่พัฒนามาจากดินเนื้อละเอียดจึงมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำในกลุ่มหมวดหิน Ksk และ Kpp

ดินในทุกหมวดหินมีพิสัยปริมาณกรดที่สกัดได้ (EA) ในดินบนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก (2.49–69.60 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) และมีค่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูงถึงสูงมาก (7.40–78.00 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ในดินล่าง (Figure 3C) ค่า EA เฉลี่ยของดินล่างมีค่าสูงกว่าดินบน ปริมาณกรดที่สกัดได้ของดินที่พัฒนามาจากหมวดหิน Qbs และ Qa มีค่าสูงกว่ากลุ่มดินที่พัฒนามาจากหมวดหินอื่น ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณของไฮโดรเจนไอออนและอะลูมิเนียมในดินเนื้อละเอียดที่มีมากกว่าดินเนื้อหยาบในกลุ่ม Ksk และ Kpp อย่างเด่นชัด ปริมาณกรดที่สกัดได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชและปริมาณดินเหนียวของดิน ซึ่งบ่งชี้ถึงพัฒนาการของดิน ดินที่มีพัฒนาการสูงมักมีกรดที่แลกเปลี่ยนได้สูง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเบสที่สกัดได้ในรูปของร้อยละความอิ่มตัวเบส (BS) พบว่า ดินที่พัฒนามาจากทุกกลุ่มหินมีร้อยละความอิ่มตัวเบสอยู่ในระดับสูงในชั้นดินบน โดยมีค่าพิสัย 75–99 ส่วนในชั้นดินล่างอยู่ในพิสัย 92–99 (Figure 3D) ซึ่งโดยเฉลี่ยสูงกว่าชั้นดินบน ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในชั้นดินบนผันแปรตามกลุ่มดิน ส่งผลให้เบสที่สกัดถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่วนดินในชั้นดินล่างมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ เบสจึงดูดซับไว้ในดินด้วยอิทธิพลของชนิดและปริมาณดินเหนียวรวมถึงแหล่งของแคตไอออนที่เป็นต่าง ซึ่งพบว่าดินที่พัฒนามาจากหมวดหิน Kkk และ Qbs มีร้อยละความอิ่มตัวเบสต่ำกว่ากลุ่ม

ดินที่พัฒนามาจากหมวดหินอื่น เนื่องจากดินมีปริมาณกรดที่สกัดได้ในปริมาณสูงกว่า ชี้ให้เห็นว่า ในบริเวณที่แลกเปลี่ยนได้ของดินมีปริมาณกรดโดยเฉพาะไฮโดรเจนและอะลูมิเนียมอยู่สูงกว่าแคตไอออนที่เป็นต่าง และดินมีพัฒนาการสูง และเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อกรด (Acidification) และความรุนแรงของการชะละลายในดิน (Haynes and Swift, 1986) จากผลการศึกษาดินที่มีเนื้อละเอียดที่พัฒนามาจาก Qa และ Qbs กระบวนการชะละลายเกิดได้ช้า ทำให้อะลูมิเนียมและธาตุต่างถูกดูดซับไว้ในอนุภาคดินเหนียวในดินในปริมาณสูงกว่าดินเนื้อหยาบที่พัฒนามาจากหมวดหิน Kpp และ Ksk

สมบัติทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของดิน (Soil constituents) ที่ใช้ปลูกมันสำปะหลัง

นอกจากแร่องค์ประกอบที่อยู่ในอนุภาคขนาดต่าง ๆ ของดินแล้ว ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) สมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (CCE) หรือสารประกอบคาร์บอเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบของดินย่อมมีผลต่อพฤติกรรมของธาตุในดิน (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007) โดยพบว่า ดินที่ศึกษาทุกหมวดหินมีพิสัยของปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Figure 4A) อยู่ในระดับต่ำมากถึงค่อนข้างสูงในดินบน (ร้อยละ 0.4–2.58) และในดินล่าง (ร้อยละ 0.05–2.54) โดยดินบนมีค่า OM เฉลี่ยสูงกว่าในชั้นดินล่าง ทั้งนี้ กลุ่มดินที่พัฒนามาจากกลุ่มหินเนื้อละเอียด ได้แก่ หมวดหิน Qbs, KTms, Kkk และ Qa มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยสูงกว่าดินที่พัฒนามาจากหมวดหินเนื้อหยาบ ได้แก่ หมวดหิน Ksk และ Kpp เนื่องจากดินที่มีปริมาณดินเหนียวและทรายแบ่งสูงจะมีความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนอินทรีย์ได้สูงกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำ และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินขึ้นกับชนิดของดินและการจัดการดินที่แตกต่างกัน (Ingram and Fernandes, 2001; Zhao *et al.*, 2006)

ค่าสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (CCE) ในดินบ่งชี้ถึงการสะสมของสารประกอบคาร์บอเนตหรือปูนทุติยภูมิในดินซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของดินที่มีค่า CCE สูงมักมีค่าพีเอชสูง ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุและการละลายได้ของธาตุอาหารพืช (Lin *et al.*, 2017) ผลการ

ศึกษาพบว่า ดินที่พัฒนามาจากทุกหมวดหินมีพิสัยค่าสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 65–79.6 ในดินบน และร้อยละ 66.0–77.6 ในดินล่าง (Figure 4B) ค่าสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสัมพันธ์กับปริมาณปูนทุติยภูมิและธาตุที่เป็นด่างที่สะสมในดิน และพบว่าดินที่พัฒนามาจากหมวดหินมหาสารคาม ได้แก่ ชุดดินจัตุรัส (Ct) มีค่าสมมูลแคลเซียม

คาร์บอเนตสูง และพบการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ดินมีพีเอชสูง นอกจากนี้ ค่า CCE ของดินที่พัฒนามาจากหมวดหินที่ให้ดินเนื้อละเอียด ได้แก่ Kkk, Qbs และ Qa มีค่าสูงกว่าในดินที่มีเนื้อหยาบที่พัฒนามาจากหมวดหิน Ksk และ Kpp เนื่องจากดินเนื้อละเอียดสามารถดูดซับแคตไอออนที่เป็นด่างได้สูงกว่าดินเนื้อหยาบ

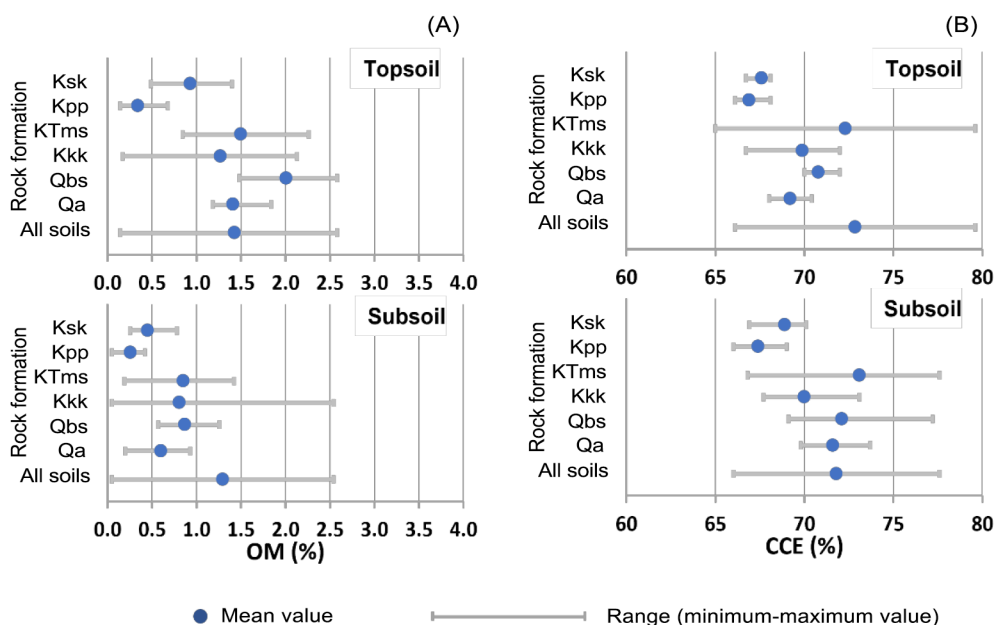


Figure 4 Range and mean values of properties related to soil constituents: (A) organic matter (OM) and (B) calcium carbonate equivalent (CCE)

ระดับความเข้มข้นรูปทั้งหมดของธาตุองค์ประกอบหลักในดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลัง

ระดับความเข้มข้นของธาตุหลักในรูปทั้งหมด (Total) ในดินบนและดินล่างที่พัฒนามาจากหมวดหินที่แตกต่างกันแสดงใน Table 2 พบว่า ดินปลูกมันสำปะหลังส่วนใหญ่มีปริมาณของธาตุเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้ $Al > N > P > Si > K > Ca > Mg > Fe > Na > Mn$ ตามลำดับ ปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมที่มีอยู่สูงกว่าธาตุอื่น เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นธาตุองค์ประกอบในโครงสร้างของแร่ในกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate minerals) ซึ่งมีทั้งแร่ปฐมภูมิและทุติยภูมิหรือในกลุ่มของแร่ดินเหนียว (Phyllosilicates)

ส่วนธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดิน ธาตุฟอสฟอรัสมีอยู่ในดินทั้งในรูปอินทรีย์และอนินทรีย์ ส่วนธาตุในกลุ่มอัลคาไลน์ (K และ Na) และอัลคาไลน์เอิร์ธ (Ca และ Mg) ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแร่ปฐมภูมิและถูกดูดซับไว้ที่ผิวของดินเหนียว ขณะที่ เหล็กและแมงกานีสส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของทั้งแร่และออกไซด์ (Kabata-Pendias, 2010) ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของธาตุหลักกับระดับความเข้มข้นของธาตุในดินบนทั่วโลก พบว่า ดินที่ศึกษามีระดับความเข้มข้นของธาตุอยู่ในพิสัยของดินโดยทั่วไป (Kabata-Pendias, 2010; Essington, 2015)

Table 2 Total concentrations of major elements (g kg⁻¹) in cassava growing soils developed from different rock formations

Total elements	Sao Khua (Ksk) (n=3)		Phu Phan (Kpp) (n=5)		Maha Sarakham (KTms) (n=12)		Khok Kruat (Kkk) (n=6)		Quaternary Basalt (Qbs) (n=7)		Quaternary alluvium (Qa) (n=4)		Normal soil ¹
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
Topsoil (0–20 cm)													
N	2.76–2.70	3.72	2.77–5.58	4.46	4.12–12.5	7.50	4.19–9.80	6.97	0.56–15.3	7.75	4.17–8.32	5.89	–
P	2.70–3.75	3.33	2.36–2.86	2.69	1.72–13.4	4.81	1.74–6.55	3.21	2.32–4.62	3.33	1.56–10.9	5.21	0.035–5.3
K	0.05–1.08	0.47	0.08–0.82	0.30	0.36–8.90	5.96	0.08–6.11	1.82	0.26–1.52	0.71	1.74–5.62	3.60	0.08–37
Ca	0.00–1.05	0.36	0.00–0.00	0.00	0.00–16.4	6.82	0.00–2.93	0.78	0.00–3.92	1.61	0.83–4.13	2.31	0.7–500
Mg	0.10–0.55	0.26	0.02–0.30	0.09	0.14–7.41	4.87	0.02–3.03	1.03	0.34–2.44	1.03	1.54–4.49	2.76	0.4–9
Na	0.00–0.04	0.01	0.00–0.00	0.00	0.00–0.24	0.11	0.00–0.15	0.02	0.00–0.35	0.05	0.01–0.10	0.04	0.15–25
Al	5.18–12.29	9.04	1.87–11.0	4.95	6.93–59.5	40.3	1.87–71.3	33.1	43.4–92.7	73.8	16.7–38.4	29.0	10–300
Si	0.31–1.19	0.70	0.63–1.64	1.00	0.00–1.48	0.57	0.00–1.01	0.44	0.03–0.99	0.40	0.00–1.24	0.61	250–410
Fe	0.13–0.25	0.19	0.03–0.13	0.07	0.11–0.74	0.56	0.03–1.42	0.54	1.11–3.26	2.13	0.34–0.60	0.47	2–550
Mn	nd–0.01	0.001	0.00–0.01	0.001	nd–0.06	0.02	nd–0.01	0.01	nd–0.05	0.01	0.01–0.03	0.02	0.3–0.53
Subsoil (20–100 cm)													
N	3.09–3.64	3.29	2.28–3.48	3.20	2.34–8.49	5.44	2.79–6.95	4.78	3.93–9.29	6.18	1.39–9.66	5.36	
P	2.64–4.75	3.50	2.35–3.00	2.79	2.56–9.54	4.86	2.35–4.00	3.54	2.61–10.1	4.43	3.66–8.03	5.65	
K	0.18–1.93	1.10	0.19–1.16	0.43	0.35–11.2	6.36	0.28–7.67	2.29	0.27–2.01	0.74	2.73–7.58	5.32	
Ca	0.14–0.77	0.45	0.00–0.32	0.06	0.06–59.4	15.5	0.00–2.88	0.56	0.00–9.98	2.11	1.26–4.08	2.69	
Mg	0.15–0.84	0.42	0.09–0.49	0.18	0.16–7.87	5.50	0.11–3.93	1.28	0.35–2.14	1.05	2.34–5.89	3.88	
Na	0.00–0.08	0.03	0.00–0.00	0.00	0.02–0.35	0.20	0.00–0.07	0.02	0.00–0.28	0.06	0.05–0.40	0.19	
Al	19.00–35.80	27.5	4.75–18.2	9.32	10.5–72.0	45.8	5.93–104	50.5	73.2–120	97.4	26.7–56.7	44.6	
Si	0.20–3.46	1.61	0.85–1.36	1.09	0.23–1.71	0.69	0.27–1.00	0.75	0.76–1.27	1.05	0.53–0.98	0.67	
Fe	0.42–0.61	0.49	0.05–0.18	0.10	0.16–0.85	0.58	0.05–1.14	0.56	1.55–3.89	2.53	0.42–0.79	0.61	
Mn	nd–0.00	<0.001	0.00–0.01	<0.001	nd–0.03	0.02	0.00–0.01	<0.001	nd–0.04	0.02	0.01–0.03	0.02	

^{1/} Mean of total concentrations of elements in the surface horizon of normal worldwide soil. Normal mean that the data do not include contaminated or mineralized soils (Kabata-Pendias, 2010; Essington, 2015)

พฤติกรรมและความใกล้ชิดระหว่างธาตุ สมบัติดิน และองค์ประกอบของดิน

การศึกษาพฤติกรรมและความใกล้ชิด (Behavior and affinity) ของธาตุองค์ประกอบหลักในดินโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของธาตุในรูปทั้งหมดและสมบัติดิน ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบหลักของดินที่ทำให้สามารถแยกกลุ่มของธาตุองค์ประกอบและกลุ่มของดินออกจากกันโดยปัจจัยที่ 1 และ 2 (F1 and F2) และอธิบายชุดข้อมูลรวมกันร้อยละ 58.18 โดยแยกออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงใน Figure 5

กลุ่มองค์ประกอบที่ 1 (PC1) ประกอบด้วยกลุ่มธาตุที่เป็นต่าง ได้แก่ Ca, Mg, K และ Na มีความสัมพันธ์กับสมบัติดิน ได้แก่ ค่า CEC, CCE, Silt, $pH_{1:1}$, P และ BS ซึ่งเกี่ยวข้องกับกลุ่มดินที่พัฒนาจากหมวดหินมหาสารคาม (KTms) และดินที่พัฒนาจากหมวดหินตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี (Qa) และมีกลุ่มดินจากหมวดหิน Qbs ที่มีสมบัติใกล้เคียงจัดอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย (Figure 5B) ชุดดินจัตุรัส (Ct) เป็นชุดดินหลักที่พบในกลุ่มนี้ แสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของธาตุในกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กับดินที่มีค่าพีเอชเป็นต่าง โดยธาตุที่เป็นต่างมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับสมบัติด้านการแลกเปลี่ยนของดิน คือ CEC และ CCE โดยธาตุที่เป็นต่างถูกดูดซับด้วยประจุลบของแร่ดินเหนียวและเป็นองค์ประกอบของสารประกอบคาร์บอนเนตในอนุภาคขนาดทรายแป้ง ชุดดินจัตุรัสพัฒนาจากหินตะกอนเนื้อทรายแป้งที่มีปูนในหมวดหินมหาสารคาม (KTms) ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอนเนตเป็นองค์ประกอบสูง สารประกอบคาร์บอนเนตที่มีอยู่ในดินมีผลต่อการกระจายตัวของธาตุในดิน (Chittamart *et al.*, 2010) จำกัดการเติบโตมันสำปะหลังหากดินที่มีปฏิกิริยาเป็นต่าง พีเอชมากกว่า 8 ทำให้มันสำปะหลังแสดงอาการขาดจุลธาตุจำพวกธาตุเหล็กและสังกะสี เนื่องจากธาตุดังกล่าวไม่ละลายในสภาวะที่เป็นต่างสูง สำหรับดินที่พัฒนาจากหมวดหินตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี (Qa) ประกอบด้วยตะกอนกรวด และทรายแป้ง และตะกอนจากหมวดหิน

มหาสารคามมักพบเกลือที่เป็นหินปูน โพแทสเซียม และแอนไฮไดรต์ ซึ่งเป็นแหล่งของธาตุที่เป็นต่างกลุ่ม alkali และ alkaline earth สะสมอยู่ในดิน ส่งผลต่อการละลายธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะธาตุสังกะสีให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ (Leksungnoen *et al.*, 2022) ประกอบกับดินที่พัฒนาจากหมวดหินมหาสารคามเป็นดินเนื้อละเอียดและมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ส่วนธาตุฟอสฟอรัสมีความใกล้ชิดกับธาตุแคลเซียม แสดงให้เห็นว่า ธาตุฟอสฟอรัสในกลุ่มดินนี้อาจก่อกองอยู่ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต (Delgado and Torrent, 2000; Zhang *et al.*, 2014; Taalab *et al.*, 2019) และธาตุฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์กับดินที่พัฒนาจากหินบะซอลต์ (Thanachit *et al.*, 2006a)

กลุ่มองค์ประกอบที่ 2 (PC2) ประกอบด้วยกลุ่มธาตุ Al, Fe, Mn และ N มีความสัมพันธ์กับ Clay, EA และ OM (Figure 4A) และเกี่ยวข้องกับดินที่พัฒนาจากหมวดหินโคกกรวด (Kkk) และหมวดหินบะซอลต์ยุคควอเทอร์นารี (Qbs) และตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารีที่มาจากกลุ่มหินดังกล่าว (Figure 5B) ได้แก่ ชุดดินโซคชัย (Ci) และชุดดินสุรินทร์ (Su) ซึ่งเป็นกลุ่มชุดดินหลักที่พบ และมีชุดดินสตึก (Suk) บางบริเวณที่มีสมบัติใกล้เคียงปะปนในกลุ่มนี้ (Figure 5C) แสดงให้เห็นว่า ธาตุกลุ่มโลหะอาจอยู่ในรูปของ oxides ของ Fe กับ Al ซึ่งเป็นแร่ในกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียวจึงมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับอนุภาคดินเหนียว (Clay) โดยเฉพาะธาตุอะลูมิเนียมที่เป็นทั้งองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวและออกไซด์และทำให้ดินมีค่ากรดที่สกัดได้ (EA) ในดินสูงกว่ากลุ่มดินอื่น นอกจากนี้ ดินเหนียวยังเป็นแหล่งดูดซับธาตุและโลหะไว้ในดิน (Thanachit *et al.*, 2006a) ส่วนธาตุไนโตรเจน (N) มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับอินทรีย์วัตถุ (OM) ซึ่งเมื่ออินทรีย์วัตถุสลายตัวสามารถปลดปล่อยให้ธาตุไนโตรเจนแก่ดิน ทั้งนี้ ดินที่พัฒนามาจากหินบะซอลต์ที่พบในกลุ่มนี้ คือ ชุดดินโซคชัยและชุดดินสุรินทร์ หินบะซอลต์มีธาตุ Fe และ Al เป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อผุพังอยู่กับที่จะให้ดิน

เหนียวในปริมาณสูง ดินกลุ่มนี้มีสีแดงและเป็นกรด รุนแรง อย่างไรก็ตาม มันสำปะหลังสามารถทนต่อ

สภาพดินที่เป็นกรดจัด (พีเอช 4.4) โดยไม่มีผลกระทบ ต่อผลผลิตพืช (Weerasilp, 1999)

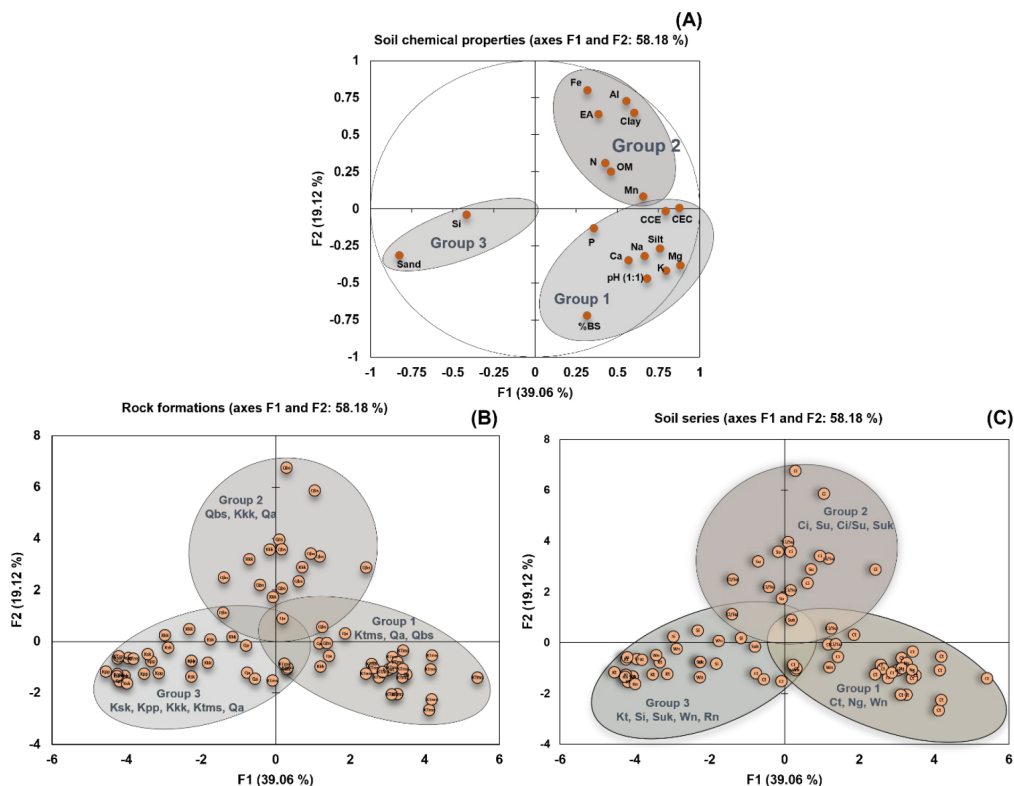


Figure 5 Principal component analysis (PCA) of cassava growing soils: (A) grouping by major elemental and physicochemical properties, (B) grouping by rock formations and (C) grouping by soil series

กลุ่มองค์ประกอบที่ 3 (PC3) ปัจจัยเชิงธาตุที่แยกกลุ่มดินออกจากกลุ่มอื่น คือ ดินมีปริมาณธาตุซิลิคอน (Si) สูง และมีความสัมพันธ์กับอนุภาคขนาดทราย (Sand; Figure 5A) เป็นกลุ่มดินที่พัฒนาจากหมวดหินเสาขัว (Ksk) และภูพาน (Kpp; Figure 5B) และมีกลุ่มดินจากหมวดหิน Kkk, KTms และ Qa รวมในกลุ่มในสัดส่วนน้อย โดยหินในหมวดหินเสาขัวประกอบด้วยหินดินดานและหินทรายแป้ง และหินในหมวดหินภูพาน (Kpp) ประกอบด้วยหินทรายขาว ดิน

ที่พัฒนามาจากกลุ่มหินเหล่านี้ ได้แก่ ชุดดินโคราช (Kt) ชุดดินสีคว (Si) ชุดดินสตึก (Suk) ชุดดินวาริน (Wn) และชุดดินเรณู (Rn; Figure 5C) ซึ่งเป็นดินที่มีเนื้อดินที่มีอนุภาคทราย และมีธาตุซิลิคอนเป็นองค์ประกอบในอนุภาคขนาดทรายสูง ทั้งนี้ ดินในกลุ่มนี้เป็นดินที่เป็นทรายจัดเกือบตลอดหน้าตัดดิน ทำให้อุ้มน้ำได้น้อยมาก และระบายน้ำดีเกินไป (Weerasilp, 1999) และมีระดับความอุดมสมบูรณ์ต่ำกว่าดินในกลุ่มองค์ประกอบที่ 1 และกลุ่มองค์ประกอบที่ 2

สรุป

พฤติกรรมเชิงธรณีเคมีของธาตุในดินปลูกมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา จำนวน 37 บริเวณ มีลักษณะทางธรณีที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะและสมบัติของดินแตกต่างกันระหว่างหมวดหิน และส่งผลให้พฤติกรรมและความใกล้ชิดของธาตุมีความแตกต่างกันตามองค์ประกอบของดิน แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มปัจจัยหลัก ได้แก่ กลุ่มองค์ประกอบที่ 1 กลุ่มธาตุที่เกี่ยวข้องกับความเป็นด่าง ได้แก่ Ca, Mg, K, Na และ P โดยธาตุที่เป็นต่างมีความสัมพันธ์กับสมบัติด้านการแลกเปลี่ยนของดิน คือ pH, CEC และ CCE โดยธาตุที่เป็นต่างถูกดูดซับด้วยประจุลบของแร่ดินเหนียว และเป็นองค์ประกอบของสารประกอบคาร์บอเนตในอนุภาคขนาดทรายแป้ง ได้แก่ ชุดดินจัตุรัส (Ct) ที่พัฒนาจากหินตะกอนเนื้อทรายแป้งที่มีปูนในหมวดหินมหาสารคาม (KTms) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดทำให้มันสำปะหลังขาดจุลธาตุและฟอสฟอรัส กลุ่มองค์ประกอบที่ 2 คือ ธาตุกลุ่มโลหะที่อยู่ในรูปของ oxides ของ Fe กับ Al ซึ่งเป็นแร่ในกลุ่มขนาดอนุภาคดินเหนียว มีความสัมพันธ์กับอนุภาคดินเหนียว (Clay) โดยเฉพาะธาตุอะลูมิเนียมที่เป็นทั้งองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวและออกไซด์ส่งผลให้ดินมีค่ากรดที่สกัดได้ (EA) สูง ได้แก่ ชุดดินโซคซัย (Ci) และชุดดินสุรินทร์ (Su) ที่พัฒนามาจากกลุ่ม

หินบะซอลต์ (Qbs) และจากหมวดหินโคกกรวด (Kkk) ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมสูง และพิเอชเป็นกรด และกลุ่มองค์ประกอบที่ 3 เกี่ยวข้องกับธาตุซิลิคอนและอนุภาคขนาดทราย เนื่องจากซิลิคอนเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในอนุภาคขนาดทรายที่พัฒนามาจากหินตะกอนที่มีเนื้อหยาบ มีปริมาณอนุภาคทรายสูง พบมากในดินที่พัฒนาจากหมวดหินภูพาน (Kpp) หมวดหินเสาขัว (Ksk) และตะกอนน้ำพายุคควอเทอร์นารี (Qa) ชุดดินหลักในกลุ่มนี้ คือ ชุดดินโคราช (Kt) มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ดินที่เป็นทรายจัดมักมีปัญหาการระบายน้ำที่มากเกินไป และความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำกว่าดินในกลุ่มองค์ประกอบที่ 1 และกลุ่มองค์ประกอบที่ 2 และอาจเป็นสาเหตุทำให้มันสำปะหลังขาดน้ำ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า วัตถุต้นกำเนิดดินจากวัสดุธรณีที่แตกต่างกันเป็นตัวควบคุมทั้งลักษณะและสมบัติของดิน รวมถึงควบคุมพฤติกรรมและความใกล้ชิดของธาตุในดินปลูกมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจากฝ่ายบริหารคลัสเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) รหัสโครงการ P-18-52700

เอกสารอ้างอิง

- Amonpon, W., T. Anakad, S. Luanmanee and K. Paisanchaoen. 2013. Optimal crop nutrient management for cassava production on sandy soil Sattahip series. Thai Agric. Res. J. 31(2): 167–179. (in Thai)
- Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity, pp. 891–901. In C.A. Black, ed. Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.

- Chen, M. and L.Q. Ma. 2001. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(2): 491–499.
- Chittamart, N., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2010. The pedo-geochemistry of Vertisols under tropical savanna climate. *Geoderma* 159(3–4): 304–316.
- Chittamart, N., J. Inkam, D. Ketrot and T. Darunsontaya. 2016. Geochemical fractionation and adsorption characteristics of zinc in Thai major calcareous soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 47(20): 2348–2363.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis, pp. 545–567. *In* C.A. Black, ed. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling.* Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Delgado, A. and J. Torrent. 2000. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(6): 2031–2037.
- Department of Agriculture. 2011. Soil series map of Nakhon Ratchasima scale 1:100,000. Available Source: <http://sql.ldd.go.th/ldddata/mapsoilA4.html>, November 30, 2022. (in Thai)
- Department of Mineral Resources. 2016. Nakhon Ratchasima provincial landscaping part 1:250,000. Available Source: http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=8904, November 30, 2022. (in Thai)
- Duangpatra, P. 1988. Soil and climate characterization of major cassava growing areas in Thailand, pp. 157–184. *In* R.H. Howeler and K. Kawano, eds. *Cassava Breeding and Agronomy Research in Asia: Proceedings of a Regional Workshop held in Rayong, Thailand, Oct. 26–28, 1987.* Centro Internacional de Agricultura Tropica, Bangkok, Thailand.
- Essington, M.E. 2015. *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach.* 2nd edition. CRC Press, Bosa Roca, USA.
- Haynes, R.J. and R.S. Swift. 1986. Effects of soil acidification and subsequent leaching on levels of extractable nutrients in a soil. *Plant Soil.* 95: 327–336.
- Helling, C.S., G. Chesters and R.B. Corey. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 28(4): 517–520.
- Inboonchuay, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, S. Anusontpornperm and R.J. Gilkes. 2015. Distribution and concentration of major and trace elements in paddy soils and rice plant of Khorat Basin, northeast Thailand. *Thai J. Agric. Sci.* 48(3): 147–156.

- Ingram, J.S.I. and E.C.M. Fernandes. 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agric. Ecosyst. Environ.* 87(1): 111–117.
- Inkam, J., N. Chittamart and D. Ketrot. 2017. Geochemical forms and availabilities of zinc, copper, iron and manganese in agricultural calcareous soils. *Agricultural Sci. J.* 48(1): 60–69. (in Thai)
- International Fertilizer Industry Association. 1992. IFA World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Jackson, C.R., J.A. Thompson and R.K. Kolka. 2014. Wetland soils, hydrology, and geomorphology, pp. 23–60. *In* D.P. Batzer and R.R. Sharitz, eds. *Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands*. 2nd edition. University of California Press, California, USA.
- Jackson, M.L. 1965. *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*. Department of Soils, University of Wisconsin, Wisconsin, USA.
- Kabata-Pendias, A. 2010. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 548 pp.
- Kabata-Pendias, A. and A.B. Mukherjee. 2007. Trace elements of group 12 (previously group IIb), pp. 283–319. *In* *Trace Elements from Soil to Human*. Springer, Berlin, Germany.
- Katong, S. and A. Thongklum. 2004. *Cassava*. Department of Agriculture, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Kilmer, V.J. and L.T. Alexander. 1949. Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Sci.* 68(1): 15–24.
- Kongthod, T. 2014. Effect of Biochars and Organic Soil Amendments on Plant Nutrient Availability in Major Cassava Soil of the Northeast. MS Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Land Development Department. 2005. Characteristics and properties of established soil series in the northeast region of Thailand. Available Source: https://oer.learn.in.th/search_detail/result/113516, November 30, 2022. (in Thai)
- Leksungnoen, P., S. Aramrak, N. Chittamart and W. Wisawapipat. 2022. Biogeochemical cycling of zinc in soil-cassava cropping system in Thailand. *Geoderma* 406: 115496.
- Lin, C., D. Ceburnis, S. Hellebust, P. Buckley, J. Wenger, F. Canonaco, A.S.H. Prévôt, R.J. Huang, C. O'Dowd and J. Ovadnevaite. 2017. Characterization of primary organic aerosol from domestic wood, peat, and coal burning in Ireland. *Environ. Sci. Technol.* 51(18): 10624–10632.

- Mobilian, C. and C.B. Craft. 2021. Wetland soils: physical and chemical properties and biogeochemical processes. *In* Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- National Soil Survey Center. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter, pp. 961–1010. *In* D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner, eds. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Office of Agricultural Economics. 2022. Cassava production data. Available Source: <https://www.oae.go.th>, November 30, 2022. (in Thai)
- Prakongkep, N., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2007. Smectite in selected Thai paddy soils. *Thai J. Agric. Sci.* 40(1–2): 27–36.
- Sukitprapanon, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, S. Anusontpornperm and R.J. Gilkes. 2014. Mineralogy and geochemistry of some Thai acid sulfate soils, pp. 11–15. *In* Proc. the 23rd Australian Clay Minerals Conference, 3–5 February 2014. Perth, Australia.
- Taalab, A.S., G.W. Ageeb, H.S. Siam and S.A. Mahmoud. 2019. Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East J. Agric. Res.* 8(1): 96–105.
- Thanachit, S., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2006a. The geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. *Geoderma*. 135: 81–96.
- Thanachit, S., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2006b. The geochemistry of soils on a catena on sedimentary rock at Nam Phong, north-east Thailand. *Aust. J. Soil Res.* 44(2) 143–154.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations, pp. 159–165. *In* A.L. Page, ed. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd edition. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1): 29–38.

- Weerasilp, T. 1998. Plant Cassava: Academic Manual for Extension and Training Officers. Field and Renewable Energy Crops Research Institute, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Westerman, R.L. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. 3rd edition. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Zhang, F., X. Wan, Y. Zheng, L. Sun, Q. Chen, X. Zhu, Y. Guo and M. Liu. 2014. Effects of nitrogen on the activity of antioxidant enzymes and gene expression in leaves of *Populus* plants subjected to cadmium stress. *J. Plant Interact.* 9(1): 599–609.
- Zhao, X., Z. Cheng, X. Xu and P.J. Makovicky. 2006. A new ceratopsian from the upper Jurassic Houcheng Formation of Hebei, China. *Acta Geol. Sin.* 80(4): 467–473.