

การใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพส่งผลต่อฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินทรายเขตร้อนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทย

Application of Organic Residues of Different Qualities Affects Available Phosphorus in a Tropical Sandy Soil of Northeast Thailand

เมธาวี จันทะเมนชัย^{1, 2}, ธนัทธสรณ์ สุกิจประพานนท์^{1, 2*}, ดวงสมร ตูลาพิทักษ์³ และ ปัทมา วิทยากร^{1, 2}

Jantamenchai, M.^{1, 2}, Sukitprapanon, T.^{1, 2*}, Tulaphitak, D.³ and Vityakon, P.^{1, 2}

¹ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

Department of Soil Science and Environment, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

² กลุ่มวิจัยการจัดการอินทรีย์วัตถุของดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

Soil Organic Matter Management Research Group, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

³ ศูนย์ศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกษตรกรรมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Agricultural Development Research Center in Northeast Thailand, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

* Corresponding author: tanasuk@kku.ac.th

Received 29 September 2021; Revised 27 December 2021; Accepted 13 January 2022

บทคัดย่อ

การใส่วัสดุอินทรีย์ในดินมีบทบาทสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติของดินทรายเขตร้อน หนึ่งในปัญหาหลักของดินทรายเขตร้อนคือปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ (1) ศึกษาสมบัติทางเคมีและปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และ (2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับสมบัติทางเคมีของดินทรายเขตร้อนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ได้รับอิทธิพลของการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพ การทดลองประกอบด้วย 5 การจัดการทดลอง ได้แก่ การควบคุม (CT) การใส่ขี้กบ (GN) การใส่ใบมะขาม (TM) การใส่ใบพลู (DP) และการใส่ฟางข้าว (RS) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ โดยเฉพาะวัสดุอินทรีย์ที่มีลิกนินและโพลีฟีนอลต่ำ เช่น RS และ GN ช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินซึ่งได้รับการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ที่เติมลงในดิน ในทางตรงข้ามปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณแร่ออกไซด์ของอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ในดิน

คำสำคัญ: ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์, วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพ, ดินทรายเขตร้อน, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ประเทศไทย

Abstract

Application of organic residue plays a crucial role in solving problems of tropical sandy soils. One of the major problems derived from tropical sandy soils is low available phosphorus (P). The objectives of this study were (1) to determine soil chemical properties and available P concentration and (2) to determine the relationships between available P and soil chemical properties in a tropical sandy soil influenced by applications of different quality organic residues. This study consisted of 5 treatments including control (CT), groundnut stover (GN), tamarind leaf litter (TM), dipterocarp leaf litter (DP), and rice straw (RS). The results showed that organic residue additions, especially those low in lignin and polyphenols (e.g., RS and GN) help increase available P concentrations. The concentration of available P was positively associated with total P concentration in soil which was derived from the mineralization of organic residues. On the other hand, available P concentration had a negative relationship with concentration of poorly crystalline Al and Fe oxides.

Keywords: Available phosphorus, Organic residues of different quality, Tropical sandy soil, Northeast, Thailand

บทนำ

ดินทรายเขตร้อนเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ อินทรีย์วัตถุต่ำ พีเอชดินอยู่ในช่วง 4.5-5.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์เป็นกรดจัดถึงกรดจัดมาก และปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสฟอรัส (phosphorus: P) (Noble *et al.*, 2008) นอกจากนี้ ดินทรายเขตร้อนประกอบด้วยแร่ขนาดอนุภาคดินเหนียว (clay fractions) ที่สำคัญ

ได้แก่ แร่เคลโอไลน์ (kaolinite) และแร่ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Fe and Al oxides) (Khawmee et al., 2013) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ จากข้อมูลของการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า 50-75% ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินถูกตรึงโดยแร่ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Schmieder et al., 2018; Sukitprapanon et al., 2021) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินสามารถแก้ไขปัญหาการตรึงฟอสฟอรัสโดยแร่เหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ (Sukitprapanon et al., 2021) Abdala และคณะ (2015) รายงานว่า การใส่วัสดุอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก สามารถเปลี่ยนฟอสฟอรัสจากรูปที่ถูกตรึงอยู่กับแร่เหล็กออกไซด์แบบเป็นผลึก (crystalline Fe oxides) มาเป็นรูปเหล็กออกไซด์ที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (poorly crystalline Fe oxides) เนื่องจากกระบวนการรีดักชันของแร่เหล็กและอะลูมิเนียมซึ่งได้รับอิทธิพลจากกรดอินทรีย์ เช่น ซิเตรท ออกซาเลท และมาเลท ที่ถูกปลดปล่อยออกมาผ่านกระบวนการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์ นอกจากนี้ Vincent และคณะ (2010) และ Maranguit และคณะ (2017) แสดงให้เห็นว่า ระบบวนเกษตรและการใส่วัสดุอินทรีย์ในดินเขตร้อนส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นประมาณ 0.3% Lemming และคณะ (2019) พบว่า ฟอสฟอรัสที่ตกค้าง (residual P) ในดินสามารถนำกลับมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้เพิ่มขึ้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอินทรีย์ที่ใช้ โดยชนิดและอัตราการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ถูกจำแนกโดยองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ไนโตรเจน (nitrogen) (N) ลิกนิน (lignin) (L) และโพลีฟีนอลส์ (polyphenols) (Pp) (Palm et al., 2001) ประเทศไทยมีพื้นที่ดินทรายประมาณ 12 ล้านไร่ ซึ่งพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 9.4 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) การศึกษาด้านการจัดการดินทรายที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เช่น การเกิดเม็ดดิน การสะสมคาร์บอนอินทรีย์ การเพิ่มไนโตรเจน และการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ในดิน (Lin et al., 2019; Soares et al., 2020; Sukitprapanon et al., 2020) งานวิจัยของ Sukitprapanon และคณะ (2021) พบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพในดินทรายเขตร้อนภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และลดฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงอยู่กับแร่อะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ การใส่วัสดุอินทรีย์ช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่าย (exchangeable and easily mineralizable organic P) รูปของแร่แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 -bound P) และ รูปที่อยู่กับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอินทรีย์วัตถุและแร่ในดิน (residual P associated with organo-mineral complexes) งานวิจัยล่าสุดของ Jantamenchai และคณะ (2022) พบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์จะส่งผลให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ ในรูปออร์โทฟอสเฟต (orthophosphate) และ ฟอสเฟสโมโนเอสเตอร์ (phosphate monoester) เป็นหลัก นอกจากนี้การใส่วัสดุอินทรีย์คุณภาพสูง ซึ่งประกอบด้วยปริมาณไนโตรเจนสูง ($> 17 \text{ g kg}^{-1}$) ลิกนินต่ำ ($< 150 \text{ g kg}^{-1}$) และโพลีฟีนอลส์ต่ำ ($< 40 \text{ g kg}^{-1}$) จะช่วยเพิ่มฟอสฟอรัสอินทรีย์กลุ่มเคลื่อนที่ได้ง่าย เช่น diester, DNA, RNA และ teichoic acids ส่วนการเติมวัสดุอินทรีย์คุณภาพต่ำ ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจนต่ำ ($< 17 \text{ g kg}^{-1}$) ลิกนินสูง ($> 150 \text{ g kg}^{-1}$) และ โพลีฟีนอลส์สูง ($> 40 \text{ g kg}^{-1}$) จะพบการสะสมฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อย เช่น ฟอสเฟตโมโนเอสเตอร์ สูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่กับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอินทรีย์วัตถุและแร่เคลโอไลน์ (kaolinite) และที่สำคัญฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อยมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่เคลื่อนที่ได้ง่าย (labile inorganic P) (Palm et al., 2001; Jantamenchai et al., 2022) อย่างไรก็ตามการศึกษากการใช้วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินและความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และสมบัติทางเคมีของดินทรายเขตร้อนของประเทศไทยยังมียังอยู่อย่างจำกัดด้วยเหตุนี้วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ ประกอบด้วย (1) ศึกษาสมบัติทางเคมีของดินและปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน และ (2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์กับสมบัติทางเคมีของดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ได้รับอิทธิพลของการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพ

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

1. สถานที่ทำวิจัยและการวางแผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานทดลองระยะยาวภายใต้กลุ่มวิจัยการจัดการอินทรีย์วัตถุของดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เริ่มต้นในปี พ.ศ. 2538 ซึ่งตั้งอยู่ในสถานีวิจัยของสำนักงานเกษตรและสหกรณ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น (พิกัด UTM: 48Q 267649E 1808317N) แปลงวิจัยตั้งอยู่บนภูมิประเทศแบบลูกคลื่นลอนลาด ความสูงจากระดับน้ำทะเล 160 m สภาพอากาศแบบสะวันนาเขตร้อน อุณหภูมิเฉลี่ย 23°C ในฤดูหนาว และ 33°C ในฤดูร้อน และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 224 mm ในฤดูร้อน และ 1,104 mm ในฤดูฝน (Meteorological Department., 2019) ดินในพื้นที่วิจัยถูกจำแนกเป็น Typic Kandiusult ตามระบบอนุกรมวิธานดิน (Soil Taxonomy) (Soil Survey Staff, 2014) ลักษณะดินบน (0-15 cm) เป็นดินทราย (sand) ประกอบด้วย อนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เท่ากับ 93, 5, และ 2% ตามลำดับ พีเอชดินเป็นกรดจัด (soil pH 5.5) คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดต่ำ (2.1 g kg^{-1}) ไนโตรเจนทั้งหมดต่ำ (0.20 g kg^{-1}) และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ (3.5 cmol kg^{-1}) (Vityakon et al., 2000)

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) ซึ่งประกอบด้วย 5 ตำรับการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ ตำรับการทดลอง ประกอบด้วย (1) ควบคุมซึ่งไม่ใส่วัสดุอินทรีย์ (control) (CT), (2) ซากต้นถั่วลิสง (groundnut (*Arachis hypogaea*) stover) (GN), (3) ใบมะขามร่วง (tamarind (*Tamarindus indica*) leaf litter) (TM), (4) ใบพลวงร่วง (dipterocarp (*Dipterocarpus tuberculatus*) leaf litter) (DP) และ (5) ฟางข้าว (rice (*Oryza sativa*) straw) (RS) วัสดุอินทรีย์แต่ละชนิดอัตรา $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ถูกใส่ลงในดินที่ไม่มีการปลูกพืชขนาด $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ช่วงก่อนเริ่มต้นฤดูฝนของทุกปี ปีละ 1 ครั้ง จากนั้นไถพรวนวัสดุลงในดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตรจากผิวดิน อัตราวัสดุอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษานี้คำนวณจากปริมาณวัสดุอินทรีย์ เช่น ฟางข้าว และ ซากต้นถั่วลิสง ที่เหลืออยู่ในแปลงเกษตรกรหลังการเก็บเกี่ยว (Vityakon et al., 2000)

ซากต้นถั่วลิสง (GN) เป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงเนื่องจากมีปริมาณ N สูง (17 g kg^{-1}) L (99 g kg^{-1}) และ Pp (16 g kg^{-1}) สำหรับ DP และ RS มีคุณภาพต่ำเนื่องจากมีปริมาณ N ต่ำ (10 และ 4.0 g kg^{-1} ตามลำดับ) โดย DP มีปริมาณ L (249 g kg^{-1}) และ Pp (50 g kg^{-1}) สูงกว่า RS (36 และ 15 g kg^{-1} สำหรับ L และ Pp ตามลำดับ) TM มีคุณภาพปานกลางเนื่องจากมีปริมาณ N, L, และ Pp อยู่ในระดับปานกลาง (12 , 169 , และ 46 g kg^{-1} ตามลำดับ) (Vityakon et al., 2000) นอกจากนี้ Sukitprapanon และคณะ (2020) รายงานว่า GN, TM, DP, และ RS มีปริมาณ P ทั้งหมด เท่ากับ 2169 , 763 , 480 , และ 655 mg kg^{-1} ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ศึกษาดินในปีการทดลองที่ 22 ของแปลงทดลองการใส่วัสดุอินทรีย์ระยะยาว โดยเก็บตัวอย่างดินจำนวน 5 จุด ที่ระดับความลึก 0-15 cm จากผิวดิน ในพื้นที่ขนาด $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ กลางแปลงทดลองแต่ละตัวรับการทดลองหลังครบระยะเวลา 1 ปีหลังใส่วัสดุอินทรีย์ ประมาณปลายเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 จากนั้นนำตัวอย่างดินมาผสมให้เข้ากันและนำมาตากในที่ร่ม ตัวอย่างดินจะถูกบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm เพื่อเตรียมการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในห้องปฏิบัติการ แปลงทดลองมีการกำจัดวัชพืชและนำวัชพืชออกนอกแปลง

2. การวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

วิเคราะห์ค่าพีเอชดิน (soil pH) ที่อัตราส่วน 1:1 ดินต่อน้ำ และ อัตราส่วน 1:1 ดินต่อสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 1 M ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ที่อัตราส่วน 1:5 ดินต่อน้ำ (Rayment and Lyons, 2011) วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในดิน (total organic carbon: TOC) ด้วยวิธี wet oxidation (Walkley and Black, 1934) วิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ที่แลกเปลี่ยนได้ ด้วยวิธีการสกัดด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (NH_4OAc) ความเข้มข้น 1 M , pH 7 จากนั้นวัดปริมาณ Ca, Mg, K, Na ในสารสกัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer วิเคราะห์ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity: CEC) ด้วยวิธี 1 M NH_4OAc , pH 7 วิเคราะห์ปริมาณกรดที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable acidity: EA) ด้วยวิธี Triethanolamine (Rayment and Lyons, 2011) วิเคราะห์ปริมาณแร่อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์อสัณฐาน (poorly crystalline Al and Fe oxides) ในดินโดยการสกัดด้วยสารละลายกรดออกซาลิก (acid oxalate solution) จากนั้นวัดปริมาณ Al และ Fe ในสารสกัดด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) (Analytik Jena PQ 9000) (Rayment and Lyons, 2011) วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P) ด้วยวิธี aqua regia digest (APHA, 1988) และวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยการสกัดดินด้วยน้ำยาสกัด Mehlich 3 จากนั้นวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ด้วยเครื่อง ICP-OES และ วิธี Molybdenum Blue Method ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 nm ตามลำดับ (Mehlich, 1984; Rayment and Lyons, 2011)

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) ตามด้วยการใช้ least significant difference (LSD) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีของดินและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis: PCA) เพื่อหาการกระจายตัวของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในกลุ่มตัวอย่างดินโดยอาศัยพื้นฐานของสมบัติทางเคมีของดิน การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Statistica 8.0 สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สมบัติทางเคมีของดินหลังได้รับการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพ

สมบัติทางเคมีของดินหลังได้รับวัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพแสดงใน Table 1 การใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้พีเอชดิน (pH (H_2O)) อยู่ในพิสัย 5.1-6.9 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ารับควบคุม (soil pH 4.5) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ โดยเฉพาะใบมะขามร่วง ส่งผลให้ pH (H_2O) เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลจากความเป็นด่าง (alkalinity effect) ซึ่งแสดงออกในรูปของสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate equivalent) ที่ถูกปลดปล่อยออกจากวัสดุอินทรีย์ (Noble et al., 1996) โดย Sukitprapanon et al. (2020) รายงานว่า ใบมะขามร่วงมีความเป็นด่างมากกว่าซากต้นถั่วลิสง ใบพลวงร่วง และฟางข้าว ในทางตรงข้ามดินที่ใส่ซากต้นถั่วลิสงซึ่งมีคุณภาพสูงส่งผลให้ pH (H_2O) เท่ากับ 5.1 ซึ่งน้อยกว่าดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์คุณภาพต่ำกว่า และน้อยกว่า pH (H_2O) ดินช่วงเริ่มการทดลองในปี พ.ศ. 2538 (soil pH (H_2O) 5.5) เนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) จะปลดปล่อยโปรตอน (H^+) ลงสู่สารละลายดินส่งผลให้ pH (H_2O) ลดลง (Cleemput and Boeckx, 2006) นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่า pH (KCl) ของดินทุกตัวรับการทดลอง (พิสัย 3.7-5.1) ยกเว้นตัวรับที่ใส่ใบมะขามร่วง (pH (KCl) 7.0) น้อยกว่าค่า pH (H_2O) (Table 1) แสดงให้เห็นว่าดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ยังคงมีปริมาณกรดแฝงในดิน ซึ่งเกิดจากการกระบวนการไฮโดรไลซิสของเหล็กและอะลูมิเนียมในดิน (Vorob'eva and Avdon'kin, 2006) ในขณะที่การใส่ใบมะขามร่วงซึ่งมีความเป็นด่าง (alkalinity) สูง ช่วยลดกรดแฝงในดินได้ ดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์มีค่าการนำไฟฟ้า (EC) อยู่ในพิสัย 76 - $226 \mu\text{S cm}^{-1}$ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ใส่วัสดุอินทรีย์ ($53 \mu\text{S cm}^{-1}$) (Table 1) เนื่องจากการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์จะปลดปล่อยเกลือที่ละลายน้ำได้ลงสู่สารละลายดิน (Sukitprapanon et al., 2020)

จากผลการศึกษาพบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ดินมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งอยู่ในพิสัย $3.0\text{--}5.2\text{ g kg}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม (1.5 g kg^{-1}) (Table 1) ดินที่ใส่ใบมะขามร่วงมี TOC สูงสุดเท่ากับ 5.2 g kg^{-1} (Table 1) สอดคล้องกับ Puttaso et al. (2013) ซึ่งรายงานว่าการใส่วัสดุอินทรีย์เป็นเวลา 13 ปี ในดินทรายเขตร้อนส่งผลให้การสะสม TOC ในดินเพิ่มขึ้น โดยดินที่ใส่ใบมะขามร่วงมีการสะสม TOC มากที่สุด เนื่องจาก TOC ถูกสะสมในเม็ดดินที่มีขนาด $0.053\text{--}2\text{ mm}$ นอกจากนี้ ใบมะขามร่วงมีสารอัลลีโลพาตี (allelopathic substances) ซึ่งต้านทานกระบวนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ดิน (Parvez et al., 2003) ผลการศึกษาพบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพิ่มขึ้น ($1.24\text{--}2.99\text{ cmol kg}^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับที่ไม่ใส่วัสดุอินทรีย์ (0.75 cmol kg^{-1}) (Table 1) จากความสัมพันธ์เชิงเส้น พบว่า TOC มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ CEC ($R^2 = 0.73$) ($P < 0.05$) (Figure 1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม TOC สามารถเพิ่ม CEC ในดินเนื่องจาก TOC ที่สะสมในดินมีประจุพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นลบ (Oorts et al., 2003)

ดินทุกค่ารับการทดลองมีปริมาณกรดที่แลกเปลี่ยนได้ (EA) อยู่ในพิสัย $2.7\text{--}3.3\text{ cmol kg}^{-1}$ ซึ่งไม่แตกต่างกับค่ารับควบคุม (Table 1) สำหรับปริมาณแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ที่แลกเปลี่ยนได้ ผลการศึกษาพบว่าดินที่ได้รับวัสดุอินทรีย์มีปริมาณแคลเซียม ($0.03\text{--}0.08\text{ cmol kg}^{-1}$) และ แมกนีเซียม ($0.14\text{--}0.37\text{ cmol kg}^{-1}$ ตามลำดับ) ที่แลกเปลี่ยนได้ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้รับวัสดุอินทรีย์ (0.01 และ 0.05 cmol kg^{-1} สำหรับ Ca และ Mg ที่แลกเปลี่ยนได้ ตามลำดับ) (Table 1) ดินที่ใส่ใบมะขามร่วงมีปริมาณ Ca, Mg, และ Na ที่แลกเปลี่ยนได้สูงสุด เท่ากับ 0.08 , 0.37 , และ 0.07 cmol kg^{-1} ตามลำดับ (Table 1) เนื่องจากใบมะขามร่วงมีปริมาณ Ca, Mg, และ Na ประมาณ 19837 , 5723 , และ 61 mg kg^{-1} ตามลำดับ (Sukitprapanon et al., 2020) ปริมาณ K ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่ได้รับวัสดุอินทรีย์อยู่ในพิสัย $0.04\text{--}0.07\text{ cmol kg}^{-1}$ (Table 1) ซึ่งในทุกค่ารับการทดลอง ($0.04\text{--}0.06\text{ cmol kg}^{-1}$) ยกเว้นค่ารับที่ใส่ฟางข้าว (0.07 cmol kg^{-1}) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม (0.04 cmol kg^{-1}) (Table 1) เนื่องจากดินทรายมีอนุภาคดินเหนียวต่ำ แร่ดินเหนียวในดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นแร่เคลโอไลน์ (Sukitprapanon et al., 2021) ซึ่งมี CEC ต่ำ ส่งผลให้ K ถูกชะล้างได้ง่าย (Mendes et al., 2016) อย่างไรก็ตาม การใส่ฟางข้าวสามารถเพิ่ม K ที่แลกเปลี่ยนได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม เนื่องจากฟางข้าวมีการสะสม K สูง เมื่อฟางข้าวผ่านการย่อยสลาย K จะถูกปลดปล่อยลงสู่ดิน (Sukitprapanon et al., 2020)

การใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P) ในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (พิสัย $119\text{--}123\text{ mg kg}^{-1}$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม (106 mg kg^{-1}) (Table 1) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lemming et al. (2019) ซึ่งรายงานที่ดินที่ได้รับวัสดุอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และเศษซากอินทรีย์ จะช่วยเพิ่มการสะสม total P ในดิน ผลการศึกษาพบว่าวัสดุอินทรีย์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กออกไซด์ออกไซด์ (Fe-ox) (พิสัย $238\text{--}399\text{ mg kg}^{-1}$) อย่างไรก็ตาม การใส่วัสดุอินทรีย์มีแนวโน้มทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ออกไซด์ (Al-ox) (พิสัย $94\text{--}181\text{ mg kg}^{-1}$) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับควบคุม (225 mg kg^{-1}) (Table 1) สะท้อนให้เห็นว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ช่วยลดปริมาณ Al-ox ในดิน เนื่องจาก Al ออกไซด์เปลี่ยนสภาพมาอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น (Grand and Lavkulich, 2011)

2. ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินทรายเขตร้อนหลังได้รับการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพ

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) ที่สกัดด้วยสารละลาย Mehlich 3 อยู่ในพิสัย $29\text{--}47\text{ mg kg}^{-1}$ (Figure 2) ($24\text{--}38\%$ ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ในระดับปานกลาง ($25\text{--}40\text{ mg kg}^{-1}$) ถึงสูง ($>40\text{ mg kg}^{-1}$) ตามเกณฑ์การประเมินปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยสารละลาย Mehlich 3 (Mylavarapu et al., 2017) ปริมาณ available P ในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์ ดินที่ใส่ฟางข้าวมีปริมาณ available P สูงสุด เท่ากับ 47 mg kg^{-1} (38% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด) รองลงมาคือ ดินที่ใส่ซากต้นถั่วลิสง ใบพลวงร่วง และใบมะขามร่วง เท่ากับ 39 , 30 , และ 29 mg kg^{-1} ตามลำดับ (Figure 2) (คิดเป็น 32 , 25 , และ 24% ของ total P ตามลำดับ) การเพิ่มขึ้นของ available P ในดินที่ใส่วัสดุอินทรีย์สะท้อนให้เห็นถึงการได้รับปุ๋ยฟอสเฟตจากวัสดุอินทรีย์ Sukitprapanon และคณะ (2020) รายงานว่า ซากต้นถั่วลิสง ฟางข้าว ใบพลวงร่วง และใบมะขามร่วง มีสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ (water soluble P) ในสัดส่วนเท่ากับ 93 , 63 , 36 , และ 34% ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในพืชตามลำดับ นอกจากนี้ การศึกษานี้พบว่าวัสดุอินทรีย์ที่มีลิกนินและโพลิฟีนอลส์ต่ำส่งผลให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยสู่สารละลายดินผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบจากอินทรีย์เป็นอนินทรีย์ (mineralization) ได้ง่ายกว่าวัสดุอินทรีย์ที่มีลิกนินและโพลิฟีนอลส์สูง เช่น ใบมะขามร่วง และใบพลวงร่วง อย่างไรก็ตาม ปริมาณ available P ในดินที่ใส่ฟางข้าวมีค่ามากกว่าดินที่ใส่ซากต้นถั่วลิสง (Figure 2) เนื่องจากดินที่ใส่ฟางข้าวมี pH (H_2O) สูงกว่า pH (H_2O) ของดินที่ใส่ซากต้นถั่วลิสง (Table 1) ซึ่งดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 จะส่งผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส เนื่องจากฟอสฟอรัสจะถูกตรึงด้วยแร่อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ในดิน (Penn et al., 2019)

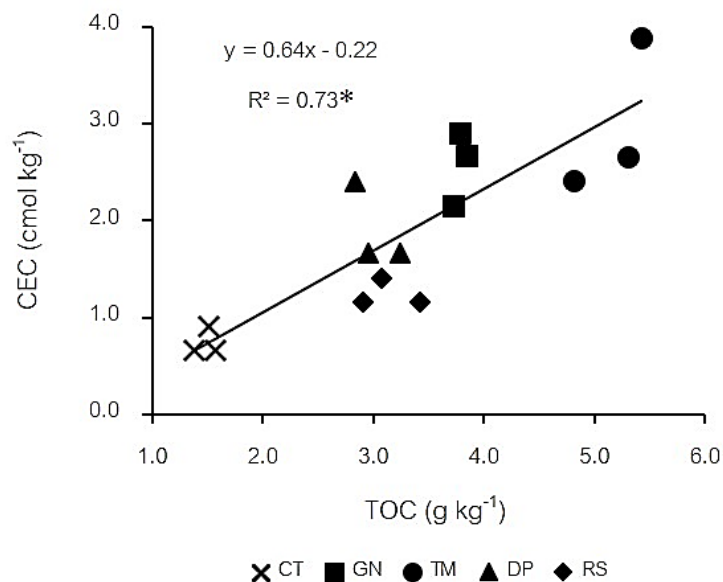
Table 1 Mean values of chemical properties of tropical sandy soil influenced by incorporation of different quality organic residues

Treatment	pH	pH	EC	CEC	TOC	EA	Exc. Ca
	(H ₂ O)	(KCl)	($\mu\text{S cm}^{-1}$)	(cmol kg^{-1})	(g kg^{-1})	(cmol kg^{-1})	
Control	4.5e	3.7d	53e	0.75c	1.5d	2.7	0.01d
Groundnut stover	5.1d	4.9c	155b	2.57a	3.8b	3.3	0.04b
Tamarind leaf litter	6.9a	7.0a	226a	2.99a	5.2a	2.7	0.08a
Dipterocarp leaf litter	5.7b	5.1b	77d	1.91ab	3.0c	3.0	0.03c
Rice Straw	5.5c	4.9c	97c	1.24b	3.1c	2.7	0.03c
<i>p</i> -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.903	<0.001
C.V. (%)	15	21	53	49	38	32	66

Treatment	Exc. Mg	Exc. Na	Exc. K	Total P	Al-ox	Fe-ox
	(cmol kg^{-1})			(mg kg^{-1})		
Control	0.05e	0.02	0.04b	106b	225a	399
Groundnut stover	0.20c	0.01	0.04b	122a	181ab	340
Tamarind leaf litter	0.37a	0.07	0.06ab	123a	143b	315
Dipterocarp leaf litter	0.26b	0.01	0.04b	119a	161ab	315
Rice Straw	0.14d	0.03	0.07a	122a	94b	238
<i>p</i> -value	<0.001	0.277	0.041	<0.001	0.031	0.085
C.V. (%)	54	86	38	6	35	23

EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity; TOC = total organic carbon; EA = exchangeable acidity; Exc.Ca = exchangeable calcium; Exc.Mg = exchangeable magnesium; Exc.Na = exchangeable sodium; Exc.K = exchangeable potassium; Total P = total phosphorus; Al-ox = oxalate-extractable aluminum; Fe-ox = oxalate-extractable iron; CV = coefficient of variation

Mean values of each property followed by different letters indicate statistical differences at $P < 0.05$.

**Figure 1** Bivariate relationships between total organic carbon (TOC) and cation exchange capacity (CEC) for a tropical sandy soil under influence of application of different quality organic residues.

CT = control soil, GN = groundnut stover-treated soil, TM = tamarind leaf litter-treated soil, DP = dipterocarp leaf litter-treated soil, and RS = rice straw-treated soil

* Significant differences at $P < 0.05$.

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และสมบัติทางเคมีของดินทรายเขตร้อน

วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) โดยอาศัยข้อมูลของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) พีเอชดิน (pH H₂O และ pH KCl) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) กรดที่แลกเปลี่ยนได้ (EA)

แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Ca) แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Mg) โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Na) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P) แร่อะลูมิเนียมออกไซด์พื้นฐาน (Al-ox) และแร่เหล็กออกไซด์พื้นฐาน (Fe-ox) จากผลการวิเคราะห์ PCA แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วน ประกอบด้วย 75% ของการเปลี่ยนแปลงข้อมูล และสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 2 กลุ่ม (Figure 3) ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย Al-ox และ Fe-ox ซึ่งมีความสัมพันธ์กับดินในตำรับควบคุม (Figure 3) available P ในดินมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญกับ Al-ox และ Fe-ox ($R = -0.59$ และ -0.58 ตามลำดับ) ($P < 0.05$) (Table 2) สะท้อนให้เห็นว่าดินทรายเขตร้อนที่ไม่ได้รับการใส่วัสดุอินทรีย์จะมีปริมาณแร่อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์พื้นฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการตรึงฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น และนำไปสู่การลดลงของปริมาณ available P ในดิน (Yan et al., 2017)

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย pH H₂O, pH KCl, EC, CEC, TOC, EA, exchangeable Ca, exchangeable Mg, exchangeable Na, exchangeable K, total P, และ available P ซึ่งมีความสัมพันธ์กับดินที่ได้รับการใส่วัสดุอินทรีย์ (Figure 3) ผลวิเคราะห์สหสัมพันธ์พบว่า available P มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ total P ในดิน ($R = 0.64$) ($P < 0.05$) และ TOC ในดิน ($R = 0.24$) ($P < 0.05$) (Table 2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น จากข้อมูลใน Figure 3 แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีความสัมพันธ์กับดินที่ใส่ฟางข้าว เนื่องจากดินที่ใส่ฟางข้าวมีปริมาณ Al-ox ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้การดูดซับฟอสฟอรัสโดยแร่อะลูมิเนียมในดินลดลง (Abdala et al., 2015) นอกจากนี้ Sukitprapanon และคณะ (2021) พบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์ช่วยลดปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่กับแร่อะลูมิเนียมออกไซด์ในดิน

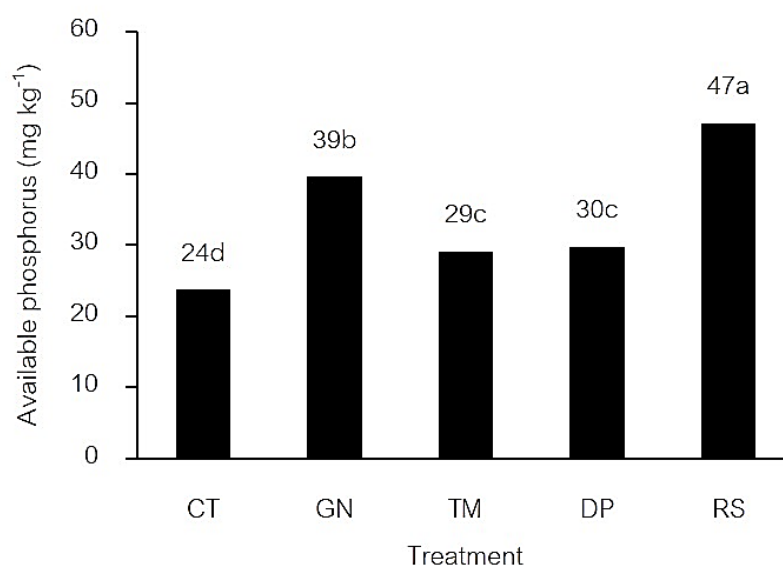


Figure 2 Concentrations of available phosphorus (P) in a tropical sandy soil after incorporation of organic residues of different chemical properties

CT = control soil, GN = groundnut stover-treated soil, TM = tamarind leaf litter-treated soil,

DP = dipterocarp leaf litter-treated soil, and RS = rice straw-treated soil

Significant differences within each P form among treatments are indicated by different letters (a, b, c, d) at $P < 0.05$.

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินทรายเขตร้อนที่ได้รับการใส่วัสดุอินทรีย์ต่างคุณภาพและความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และสมบัติทางเคมีของดิน การใส่วัสดุอินทรีย์ส่งผลให้ค่า pH, EC, CEC, TOC, exchangeable Ca, exchangeable Mg, และ total P ในดินเพิ่มขึ้น และช่วยลดปริมาณแร่อะลูมิเนียมออกไซด์พื้นฐาน ดินที่ใส่ใบมะขามร่วงซึ่งมีปริมาณความเป็นด่าง ลิกนิน และโพลีฟีนอลสูง ส่งผลให้ค่า pH, EC, CEC, TOC และ ปริมาณ exchangeable Ca, exchangeable Mg, และ exchangeable Na ในดินเพิ่มขึ้นสูงสุด ในขณะที่ดินที่ใส่ซากต้นถั่วลิสงซึ่งมีไนโตรเจนสูงส่งผลให้ค่า pH ลดลงเนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ การใส่วัสดุอินทรีย์ โดยเฉพาะวัสดุอินทรีย์ที่มี ลิกนิน (L) และโพลีฟีนอล (Pp) ต่ำ เช่น ฟางข้าว (L = 3.6%, Pp = 1.5%) และ ซากต้นถั่วลิสง (L = 9.9%, Pp = 1.6%) สามารถเพิ่มปริมาณ available P ในดินทรายให้อยู่ในระดับสูงได้ ผลการศึกษาพบว่า available P มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ TOC และ total P ในดิน แต่ available P มีความสัมพันธ์เชิงลบกับแร่อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์พื้นฐาน

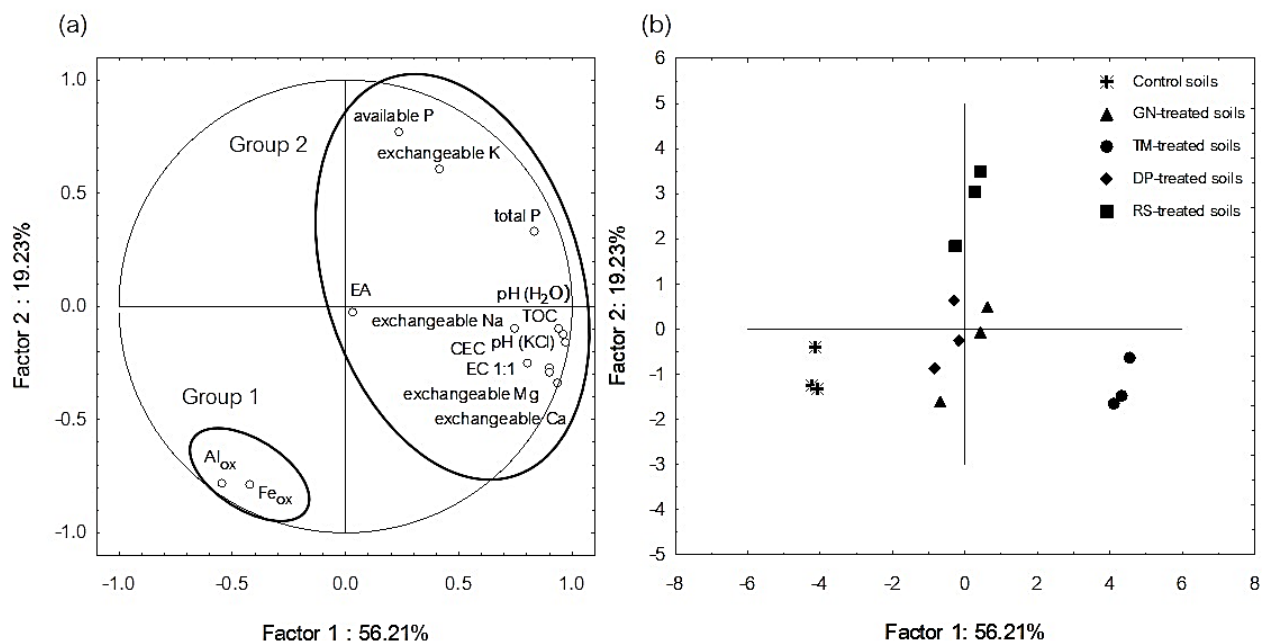


Figure 3 Principal component analysis based on available phosphorus and chemical properties of a tropical sandy soil with incorporation of GN, TM, DP, and RS. (a) distribution of variables and (b) distribution of cases. GN = groundnut stover; TM = tamarind leaf litter; DP = dipterocarp leaf litter; and RS = rice straw

Table 2 Pearson correlation coefficients between available phosphorus and soil properties of a tropical sandy soil in Northeast Thailand

Element	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	EC	CEC	TOC	EA	Ca
Available P	0.03	0.06	0.11	0.07	0.24*	0.08	-0.03
Element	Mg	K	Na	Total P	Al-ox	Fe-ox	
Available P	-0.05	0.38	-0.05	0.64*	-0.59*	-0.58*	

EC = electrical conductivity; CEC = cation exchange capacity; TOC = total organic carbon; EA = exchangeable acidity; Ca = exchangeable calcium; Mg = exchangeable magnesium; Na = exchangeable sodium; K = exchangeable potassium; Total P = total phosphorus; Al-ox = oxalate-extractable aluminum; Fe-ox = oxalate-extractable iron. *Significant differences at $P < 0.05$.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ภายใต้สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) และมหาวิทยาลัยขอนแก่น รหัสโครงการ MRG6180149 และขอขอบคุณกลุ่มวิจัยการจัดการอินทรีย์วัตถุของดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับเงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย นอกจากนี้ผู้แต่งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์ศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกษตรกรรมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2558. สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ชุมชน สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.
- Abdala, D.B., da Silva, S.I.R., Vergütz, L. and Spark, D.L. 2015. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. *Chemosphere* 119: 504–514.
- APHA. 1988. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation
- Cleemput, O.V. and Boeckx, P. 2006. Nitrogen and its transformation. *Encyclopedia of Soil Science*, 2nd. Florida: CRC Press, Boca Raton.
- Grand, S. and Lavkulich, L.M. 2011. Depth Distribution and Predictors of Soil Organic Carbon in Podzols of a Forested Watershed in Southwestern Canada. *Soil Science* 176: 164-174.

- Khawmee, K., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I. and Singh, B. 2013. Surface charge properties of kaolinite from Thai soils. *Geoderma* 192: 120-131.
- Lemming, C., Astrid, O., Jakob, M., Sander, B., Charlotte, S., Emmanuel, F. and Lars, J.S. 2019. Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 270-271: 65-75.
- Lin, Y., Ye, G., Kuzyakov, Y., Liu, D., Fan, J. and Ding, W. 2019. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry* 134: 187-196.
- Maranguit, D., Guillaume, T. and Kuzyakov, Y. 2017. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena* 149: 385-393.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 15: 1409-1416.
- Mendes, W. da D., Júnior, J.A., da Cunha, P.C.R., da Silva, A.R., Evangelista, A.W.P. and Casaroli, D. 2016. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20: 972-977.
- Meteorological Department. 2019. Climate of Thailand. Bangkok: Meteorological Department, Ministry of Information and Communication Technology.
- Mylavarapu, R., Obreza, T., Morgan, K., Hochmuth, G., Nair, V. and Wright, A. 2017. Extraction of Soil Nutrients Using Mehlich-3 Reagent for Acid-mineral Soils of Florida. Florida: IFAS Extension, University of Florida.
- Noble, D.A., Zenneck, I. and Randall, P.J. 1996. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. *Plant and Soil* 179: 293-302.
- Noble, D.A., Suzuki, S., Soda, W., Ruaysoongnern, S. and Berthelsen, S. 2008. Soil acidification and carbon storage in fertilized pastures of northeast Thailand. *Geoderma* 144: 248-255.
- Oorts, K., Vanlauwe, B. and Merckx, R. 2003. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100: 161-171.
- Palm, C.A., Gachengo, N.C., Robert, J.D., Cadisch, G. and Ken, E.G. 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 27-42.
- Parvez, S.S., Parvez, M.M., Nishihara, E., Gemma, H. and Fujii, Y. 2003. *Tamarindus indica* L. leaf is a source of allelopathic substance. *Plant Growth Regulation* 40: 107-115.
- Penn, C.J. and Camberato, J.J. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* 9: 120.
- Puttaso, A., Vityakon, P., Rasche, F., Saenjan, P., Trelo-ges, V. and Cadisch, G. 2013. Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil?. *Soil Science Society of America Journal* 77: 1001-1011.
- Rayment, G.E. and Lyons, D.J. 2011. *Soil Chemical Methods - Australasia*. Australia: CSIRO Publishing.
- Schmieder, F., Bergström, L., Riddle, M., Gustafsson, J.P., Klysubun, W., Zehetner, F., Condon, L. and Kirchmann, H. 2018. Phosphorus speciation in a long-term manure-amended soil profile—Evidence from wet chemical extraction, ³¹P-NMR and P K-edge XANES spectroscopy. *Geoderma* 322: 19-27.
- Soares, M.B., Freddi, O. da S., Matos, E. da S., Tavanti, R.F.R., Wruck, F.J., de Lima, J.P., Marchioro, V. and Franchini, J.C. 2020. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. *Catena*. Amsterdam: Elsevier. doi: 10.1016/j.catena.2019.104279.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Washington, D.C: Natural Resources Conservation Service, USDA.
- Sukitprapanon, T., Jantamenchai, M., Tulaphitak, D. and Vityakon, P. 2020. Nutrient composition of diverse organic residues and their long-term effects on available nutrients in a tropical sandy soil. *Heliyon* 6: e05601.
- Sukitprapanon, T., Jantamenchai, M., Tulaphitak, D., Prakongkep, N., Gilkes, R.J. and Vityakon, P. 2021. Influence of Application of Organic Residues of Different Biochemical Quality on Phosphorus Fractions in a Tropical Sandy Soil. *Agronomy*. 11(248). doi: org/10.3390/agronomy11020248
- Jantamenchai, M., Sukitprapanon, T., Tulaphitak, D., Mekboonsonglarp, W. and Vityakon, P. 2022. Organic phosphorus forms in a tropical sandy soil after application of organic residues of different quality. *Geoderma* 405: 115462.
- Vincent, G.A., Turner, L.B. and Tanner, E.V.J. 2010. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science* 61: 48-57.
- Vityakon, P., Meepech, S., Cadisch, G. and Toomsan, B. 2000. Soil organic matter and nitrogen transformation mediated by plant residues of different qualities in sandy acid upland and paddy soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 48: 75-90.
- Vorob'eva, L.A. and Avdon'kin, A.A. 2006. Potential Soil Acidity: Notions and Parameters. *Eurasian Soil Science* 39: 377-386.
- Walkley, A. and Black, I.A. 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: 29-38.
- Yan, X., Wei, Z., Hong, Q., Lu, Z. and Wu, J. 2017. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. *Geoderma* 295: 80-85.