

การแยกส่วนฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินทรีย์ และสมบัติดินที่สัมพันธ์กับ
ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนของประเทศไทย
Inorganic and Organic Phosphorus Fractionation and Soil Properties
Related to Availability of Phosphorus in Calcareous Soils of Thailand

วริศ แคนทอง^{1,2} ณัฐพล จิตมาตย์^{1,*} เสาวนุช ทาวรพฤษ¹ และ วรชาติ วิศวาพิพัฒน์¹
Varis Khaengkong^{1,2}, Natthapol Chittamart^{1,*}, Saowanuch Tawornpruek¹ and
Worchart Wisawapit¹

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

² กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

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

² Soil Science Research Group, Agricultural Production Sciences Research and Development Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900

รับเรื่อง: 17 เมษายน 2566 Received: 17 April 2023

ปรับแก้ไข: 13 กรกฎาคม 2566 Revised: 13 July 2023

รับตีพิมพ์: 19 กรกฎาคม 2566 Accepted: 19 July 2023

* Corresponding author: fagrmpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: ฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุหลักที่จำกัดการเติบโตและการให้ผลผลิตพืชที่ปลูกในดินเนื้อปูน การศึกษาการกระจายของ P ช่วยให้การจัดการเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ P ในดินเนื้อปูนมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกส่วนทางเคมีของฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินทรีย์และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติของดินเนื้อปูนของประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย: วิเคราะห์ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ด้วยการสกัดลำดับขั้นและชนิดของฟอสฟอรัสอินทรีย์ด้วยวิธี³¹P นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (³¹P NMR) ในตัวอย่างดินเนื้อปูนในอันดับมอลลิซอลล์และเวอร์ทิวซอลล์ในจังหวัดลพบุรีและจังหวัดนครสวรรค์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปฟอสฟอรัสกับสมบัติดินโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและการจัดกลุ่มตัวแปรเพื่อระบุแหล่งฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพเป็นประโยชน์ต่อพืช

ผลการวิจัย: ดินเนื้อปูนที่ศึกษามีฟอสฟอรัสอนินทรีย์อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ช้าและรูปที่ทนทาน และอยู่ในรูปแร่อะพาไทต์มากที่สุด ชนิดของฟอสฟอรัสอินทรีย์อยู่ในรูป orthophosphate monoester มากที่สุด รองลงมาคือ DNA-P, RNA, lipid-P และ aromatic diester ตามลำดับ นอกจากนี้ ³¹P NMR สามารถตรวจพบฟอสฟอรัสรูปอื่นปริมาณน้อย ได้แก่ pyrophosphate, phosphonate และ orthophosphate ในสารสกัด ผลการวิเคราะห์แบบจัดกลุ่มตัวแปรและองค์ประกอบหลักจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปของ P กับสมบัติดินเนื้อปูนสามารถแบ่งกลุ่มแหล่งฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพความเป็นประโยชน์ ได้ 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1) P รูปที่เป็นประโยชน์ทันที ซึ่งมีสหสัมพันธ์สูงกับ P ในรูปอะพาไทต์ กลุ่มที่ 2) P ที่อยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียว กลุ่มที่ 3) P ที่อยู่ในอินทรีย์วัตถุ และกลุ่มที่ 4) P ที่อยู่ในสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต

สรุป: ฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปอะพาไทต์และฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูป orthophosphate monoester พบมากที่สุดที่ดินเนื้อปูน แร่อะพาไทต์ อนุภาคดินเหนียว อินทรีย์วัตถุ และปูนคาร์บอนเนตเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพ ความเป็นประโยชน์ในดินเนื้อปูน การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนควรส่งเสริมการละลายของฟอสฟอรัสในรูปแร่อะพาไทต์ และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากอินทรีย์วัตถุในดิน

คำสำคัญ: ดินต่าง, รูปทางธรณีเคมี, ฟอสฟอรัสอินทรีย์, อะพาไทต์, ^{31}P NMR

ABSTRACT

Background and Objectives: Phosphorus (P) is a major limiting element for plant growth and crop yield in calcareous soils. The study on the chemical form of P can provide effective P management in calcareous soils. Therefore, this study aimed to fractionate inorganic and organic P forms and to study the correlation of P forms with the properties of Thai calcareous soils.

Methodology: The analysis of inorganic P by sequential extraction and the identification of organic P species by ^{31}P nuclear magnetic resonance (^{31}P NMR) were investigated in six calcareous soil samples of Mollisols and Vertisols in Lop Buri and Nakhon Sawan provinces. The correlation between P forms and soil properties was studied using principal component and cluster analyses to categorize potential plant-available P pools.

Main Results: Most studied calcareous soils had inorganic P primarily distributed in slowly available and residual P fractions, and the dominant form was apatite mineral. Organic P species were dominant in orthophosphate monoester, followed by DNA-P, RNA, lipid-P, and aromatic diester, respectively. In addition, ^{31}P NMR could detect other P forms, such as pyrophosphate, phosphonate, and orthophosphate, in small proportions in soil extracts. The principal component and cluster analyses, based on the correlation coefficient between P forms and soil properties, categorized potential available P pools into four groups: 1) readily available P with a high correlation with apatite, 2) clay-associated P, 3) organic matter-associated P, and 4) CaCO_3 -associated P.

Conclusions: Apatite mineral P is the dominant inorganic P form, while orthophosphate monoester is the dominant organic P form in calcareous soils. Apatite, clay, organic matter, and carbonate were identified as potential available P pools in calcareous soils. Increasing available P in calcareous soils should emphasize promoting the solubility of apatite-P and releasing organic-P from the decomposition of organic matter in the soil.

Keywords: Alkaline soil, geochemical form, organic phosphorus, apatite, ^{31}P NMR

บทนำ

พอสฟอรัส (P) เป็นธาตุอาหารพืชที่จำเป็น และพืชต้องการปริมาณมากเพื่อการเติบโต โดยเฉพาะ การเจริญของราก การออกดอก และการให้ผลผลิตพืช พืชที่ขาดพอสฟอรัสรุนแรงจะมีการผิดปกติคือ ลำต้น เล็กผอมแกร็น ใบเล็กผิดปกติ สีของใบล่างมักมีสีเหลือง อมสีอื่น (เช่น ขาวโพดอมสีม่วง เป็นต้น) ออกดอกช้า ติดผลต่ำกว่าปกติ พอสฟอรัสเป็นหนึ่งในสามธาตุอาหารหลักที่ใส่ลงไปในดินในรูปของปุ๋ย พอสฟอรัสเป็น องค์ประกอบสำคัญใน deoxyribonucleic acid (DNA), ribonucleic acid (RNA), adenosine triphosphate (ATP) และ phospholipids ในสิ่งมีชีวิต พอสฟอรัสมีบทบาทในการถ่ายโอนพลังงาน โดยสารประกอบพอสฟอรัสอินทรีย์เป็นตัวเคลื่อนย้ายพลังงานจากปฏิกิริยาหนึ่งไปสู่อีกปฏิกิริยาหนึ่งใน เซลล์ (Leytem and Mikkelsen, 2005) สมดุลของ พอสฟอรัสในดินทางการเกษตรถูกควบคุมโดยปริมาณ ปุ๋ยเคมีที่ใส่ลงดินและการสูญเสียโดยการกร่อนดิน และ หากเกิดภาวะขาดแคลนปุ๋ยฟอสเฟต จะทำให้ดิน ทางการเกษตรทั่วโลกมีอัตราการสูญเสียพอสฟอรัส 4-19 กิโลกรัมพอสฟอรัสต่อเฮกตาร์ต่อปี โดยสูญเสีย ไปกับการกร่อนดินสูงถึงร้อยละ 50 ของปริมาณ พอสฟอรัสสูญเสียทั้งหมด (Alewell *et al.*, 2020) การ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยจะช่วยเพิ่มความเป็น ประโยชน์และลดการสูญเสียของพอสฟอรัสในดินใน การลดข้อจำกัดในการผลิตพืชอาหารในอนาคต

ดินเนื้อปุ๋ยในประเทศไทยแจกกระจายอยู่ใน แถบเทือกเขาสูงตอนกลางของประเทศและบริเวณ ตอนบนของที่ราบภาคกลาง ซึ่งพัฒนาจากหินปูนหรือ หินเนื้อปุ๋ย ดินบนมีสีคล้ำหรือสีน้ำตาลและพบ แคลเซียมคาร์บอเนตในชั้นดินล่าง โดยปกติมีพีเอช ในช่วง 7.5-8.2 ดินมีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง ถึงสูงและใช้ปลูกพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ฝ้าย อ้อย และถั่วต่าง ๆ เป็นต้น (Kheoruenromne, 1990; Auppathumpanont

et al., 2018) แต่มีข้อจำกัดของดินคือความเป็น ประโยชน์และความสมดุลของพอสฟอรัสในดินต่ำ (Osotsapar, 1999) ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อการ ปลูกพืชที่ไม่ทนต่อสภาพดินต่างได้ นอกจากนี้ ดินเนื้อ ปูนของประเทศไทยส่วนใหญ่มีการสะสมสาร ประกอบคาร์บอเนตอิสระสะสมอยู่ในหน้าตัดดิน (Auppathumpanont *et al.*, 2018) เนื่องจากบริเวณ ดังกล่าวมีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าเขตอื่น ซึ่งไม่สามารถ ชะละลายคาร์บอเนตลงไปสู่ชั้นที่ลึกกลงไปได้ กอรกับ ดินมีวัตถุต้นกำเนิดดินที่เป็นต่างสูง มีชั้นคาร์บอเนตที่ อยู่ใกล้ผิวดินจึงทำให้พืชแสดงอาการขาดพอสฟอรัส อย่างเด่นชัด ทั้งนี้ในสภาพดินที่เป็นต่างนั้น ทำให้ธาตุ พอสฟอรัสละลายได้น้อยและตกตะกอนอยู่ในรูปที่ไม่ เป็นประโยชน์ทันทีต่อพืช โดยที่พอสฟอรัสถูกตรึงไว้กับ อนุภาคดินและอินทรีย์วัตถุ และแจกกระจายอยู่ในรูป ต่าง ๆ ทางธรณีเคมี ประกอบด้วย อยู่ในสารละลายดิน และส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (Soil solution and exchangeable phase) อยู่ในรูปอินทรีย์ (Organic phase) และรูปอนินทรีย์ (Inorganic phase) ที่มีพันธะ กับแคลเซียม (Ca-bound phase) และส่วนที่มีพันธะ กับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Fe-Al oxides-bound phases) (Hedley *et al.*, 1982; Tiessen *et al.*, 1984; Pardo *et al.*, 2003) ซึ่งรูปต่าง ๆ เหล่านี้จะ ขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของดิน ชนิดของดินทาง ธรณีเคมี (Tiessen *et al.*, 1984) สภาพภูมิอากาศ และการจัดการดิน (Motavalli and Miles, 2002) ซึ่ง ในสภาพดินที่เป็นต่างจัดหรือดินเนื้อปุ๋ยในเขตแห้งแล้ง และกึ่งแห้งแล้งพืชมักจะแสดงอาการขาดพอสฟอรัส เนื่องจากพอสฟอรัสตกตะกอนและถูกดูดซับที่ผิวของ แร่ในดินโดยเฉพาะแคลไซต์ (Von Wandruszka, 2006) และการจัดการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ พอสฟอรัสในดินเนื้อปุ๋ยแนะนำให้ใส่อินทรีย์วัตถุ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และสารฮิวมิค เป็นต้น เพื่อเพิ่มการ ปลดปล่อยพอสฟอรัสในดินเนื้อปุ๋ย

ในปัจจุบันสารประกอบพอสฟอรัสรูปอนินทรีย์ ได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากเป็นแหล่งปลดปล่อย

ฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และในสภาวะที่ฟอสฟอรัสรูปอนินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดินมีน้อย ฟอสฟอรัสรูปอนินทรีย์จะเป็นแหล่งสำคัญที่จะปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้เป็นประโยชน์กับพืชโดยผ่านขบวนการมิเนอรัไลเซชัน (Mineralization) (Tiessen *et al.*, 1984; Nash *et al.*, 2014) เทคนิค ^{31}P Nuclear Magnetic Resonance (^{31}P NMR) เป็นวิธีการวิเคราะห์ขั้นสูงที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินและวัสดุตกค้างต่าง ๆ (Zhang *et al.*, 1999; Turner and Leytem, 2008) ขณะเดียวกันเทคนิคการแยกส่วน (Fractionation technique) ก็นิยมใช้ในการแยกรูปทางเคมีต่าง ๆ ของฟอสฟอรัสในดินทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ ดินที่มีสัดส่วนของฟอสฟอรัสในรูปที่เคลื่อนที่ง่าย (Labile pool) บ่งชี้ว่าดินมีศักยภาพเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่อพืชสูง นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปนี้ยังมีโอกาสสูญเสียไปจากดินโดยการถูกชะละลายหรือน้ำไหลพา ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับหรือตกตะกอนร่วมกับแคลเซียม เหล็ก-อะลูมิเนียม เป็นรูปที่เสถียร แต่อาจเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมไปจากเดิม (Castillo and Wright, 2008) ฉะนั้นรูปของฟอสฟอรัสกลุ่มสร้างพันธะกับแคลเซียม (Ca-bound) สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Fe-Al oxides-bound) และสร้างพันธะกับอินทรีย์วัตถุ (OM-bound) เป็นรูปที่ค่อนข้างแอดทีฟ และสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญในการทำนายความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส ความยากง่ายต่อการถูกชะละลาย และการเปลี่ยนรูปทางเคมีของฟอสฟอรัสในดินที่ใช้ในการเกษตรและดินที่มีการปนเปื้อนได้ (Hedley *et al.*, 1982; Sui *et al.*, 1999)

Wang *et al.* (2010) ได้ศึกษาการแยกส่วนของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนที่ได้รับปุ๋ยฟอสเฟตต่อเนื่อง 21 ปี และพบว่า ฟอสฟอรัสในดินอยู่ในรูป hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) > octacalcium

phosphate ($\text{Ca}_8\text{-P}$) > iron phosphorus (Fe-P) > aluminum phosphorus (Al-P) > occluded P > dicalcium phosphate ($\text{Ca}_2\text{-P}$) ตามลำดับ และการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตทำให้ฟอสฟอรัสในรูป $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P และ $\text{Ca}_2\text{-P}$ เพิ่มสูงขึ้น และมีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง กับฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Olsen ซึ่งจำเพาะกับฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์และการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (Desorption) ออกมาให้เป็นประโยชน์ต่อพืช (Shen *et al.*, 2019) ปัจจุบันข้อมูลทางวิชาการด้านรูปทางเคมีและความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนยังมีอย่างจำกัด ดังนั้น การศึกษาวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแยกส่วนทางเคมีของฟอสฟอรัสในดินและความสัมพันธ์ของรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติและองค์ประกอบของดิน ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาทำให้ทราบถึงแหล่งของฟอสฟอรัสที่สำคัญในดินเนื้อปูน เพื่อเสนอแนะแนวทางการจัดการดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้ และต้องมีความรู้ด้านปัจจัยทางดินที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน ซึ่งจำเป็นต่อการวางแผนการใช้ทรัพยากรดินเนื้อปูนรวมทั้งดินที่เป็นต่างจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

การคัดเลือกพื้นที่และการเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินเนื้อปูน โดยเก็บชั้นดินบน (Ap) และชั้นดินล่าง (B) ภายในความลึก 100 เซนติเมตร จำนวน 6 บริเวณ ซึ่งจัดอยู่ 3 ชุดดิน ประกอบด้วย ชุดดินลำนารายณ์ (Ln1, Ln2) ชุดดินลพบุรี (Lb1, Lb2) และชุดดินตาคลี (Tk1, Tk2) ในพื้นที่จังหวัดลพบุรี และนครสวรรค์ ตามแผนที่ดินรายจังหวัดลพบุรีมาตราส่วน 1:100,000 (Soil Survey Division, 1975) แผนที่ดินรายจังหวัดนครสวรรค์มาตราส่วน 1:100,000 (Soil Survey Division, 1981) และแผนที่สภาพภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร จำแนกดินที่ศึกษาตามอนุกรมวิธาน

ดิน ได้แก่เป็น Calcic Agriustoll (Ln1, Ln2), Typic Haplustert (Lb1), Calcic Haplustert (Lb2) และ Vertic Haplustoll (Tk1, Tk2) ตามลำดับ ข้อมูลสมรรถนะความอุดมสมบูรณ์ของดินเนื้อปูนได้เผยแพร่ในการศึกษาของ Auppathumpanont *et al.* (2018) ดินที่ศึกษามีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม มีวัตถุต้นกำเนิดดินที่เกี่ยวข้องกับวัสดุตกค้างที่สลายตัวมาจากหินแอนดีไซต์ เศษหินเชิงเขาที่มีการสลายตัวมาจากหินบะซอลต์ ตะกอนน้ำพาที่ถล่มที่สลายตัวมาจากหินปูน และวัสดุตกค้างที่มาจากการสลายตัวของหินปูน และขณะที่เก็บตัวอย่างดิน มีการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการปลูกพืชไร่ เศรษฐกิจ เช่น อ้อย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง แคนตาลูป และไม้ผล เป็นต้น

การวิเคราะห์สมบัติของดิน

วิเคราะห์การแจกกระจายขนาดอนุภาคดิน (Particle size distribution: sand, silt, clay) โดยวิธี pipette (Gee and Bauder, 1986) และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีประกอบด้วย พีเอช ดินต่อน้ำ 1:1 (pH 1:1) ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ดินต่อน้ำ 1:5 (ECe 1:5) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon, OC) โดยวิธี Walkley and Black และคำนวณเป็นปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM) โดย $OC \times 1.724$ ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total nitrogen, TN) โดยวิธี Kjeldahl distillation แคลเซียมที่สกัดได้ (Exchangeable Ca) โดยวิธีสกัดด้วย 1 M NH_4OAc แล้ววัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity, CEC) โดยวิธี 1 M NH_4OAc pH 7.0 วิเคราะห์ปริมาณค่าสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate equivalent, CCE) ด้วยวิธีการ HCl dissolution and black titration วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในรูปอิสระ (DCB-Fe) โดย dithionitecitrate-bicarbonate ในรูปออสันฐาน (Ox-Fe) โดย ammonium oxalate และในรูปสารอินทรีย์ (Pyro-Fe) โดย sodium

pyrophosphate (National Soil Survey Center, 1996) และวิเคราะห์ปริมาณทั้งหมดของฟอสฟอรัสเหล็ก อะลูมินัมแคลเซียม และแมกนีเซียม ด้วย Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry (WD-XRF) (Enzweiler and Vendemiatto, 2004) และวิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพจุลินทรีย์คาร์บอน (Microbial biomass carbon, MBC) และมวลชีวภาพจุลินทรีย์ไนโตรเจน (Microbial biomass nitrogen, MBN) ด้วยเทคนิคการรวมด้วยคลอโรฟอร์มและสกัด (Amato and Ladd, 1988)

การวิเคราะห์รูปทางเคมีของธาตุฟอสฟอรัส

การศึกษาสัดส่วนทางเคมีของธาตุฟอสฟอรัสศึกษาในตัวอย่างดินบนและดินล่างของดินเนื้อปูน โดยใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำมาสกัดลำดับขั้นตามวิธีของ Tiessen *et al.* (1984) ซึ่งดัดแปลงจาก Hedley *et al.* (1982) โดยจะแยกสัดส่วนของธาตุฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนออกเป็น 3 ส่วน คือ ฟอสฟอรัสที่สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชทันที (Labile P) ฟอสฟอรัสที่สามารถเป็นประโยชน์ช้า (Moderate labile P) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ช้ามาก (Non-labile P) ซึ่งฟอสฟอรัสในรูป labile P นั้น ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำ (Water-P) และฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย $NaHCO_3$ (Bicarbonate-P) ส่วน moderate labile P ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย NaOH (Hydroxide-P) หรือฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวของแร่หรือดินเหนียว และฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย NaOH โดยการ sonication (Sonicated-P) ซึ่งเป็นถือเป็นฟอสฟอรัสที่ถูกหุ้มไว้ (Occluded-P) ส่วน non-labile P นั้น ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยกรด 1 M HCl (Acid-P) และฟอสฟอรัสที่ย่อยด้วยกรด H_2SO_4 (Residual P) การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus) โดยวิธี Bray II (Bray and Kurtz, 1945) และวิธี Olsen (Olsen and Sommer, 1992) ซึ่งน้ำยาสกัด Bray II

มีส่วนผสมของกรด HCl และ NH_4F สามารถสกัดฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่ละลายง่ายในกรด เช่น Ca-P นอกจากนี้ยังสามารถสกัดฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป Al-P และ Fe-P ได้อีกด้วย (Bray and Kurtz, 1945) ส่วนน้ำยาสกัด Olsen ประกอบด้วย 0.5 M NaHCO_3 โดย HCO_3^- มีประสิทธิภาพในการแทนที่ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับได้ ขณะที่โซเดียม (Na) สามารถลดบทบาทของแคลเซียม (Ca) ในสารละลายดิน และ OH^- ในสารละลายสามารถสกัด Al-P และ Fe-P ได้ดีเนื่องจากเกิด hydrolysis ของ Fe และ Al (Olsen and Sommers, 1992) การแยกตัวของฟอสฟอรัสตามวิธีของ Pardo *et al.* (2003) โดยใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร 0.2 กรัม สกัดดินด้วย 1 M HCl 20 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จะได้ฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์ (Pi) ภาคตะกอนที่เหลือนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วนำมาสกัดด้วย 1 M HCl 20 มิลลิลิตร เขย่า 16 ชั่วโมง จะได้ฟอสฟอรัสรูปอนินทรีย์ (P_o) ส่วนการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในองค์ประกอบเชิงแร่ ใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร 0.2 กรัม สกัดด้วย 1 M NaOH 20 มิลลิลิตร เขย่า 16 ชั่วโมง แล้วดูดสารละลายที่ได้ 10 มิลลิลิตร มาเติม 3.5 M HCl 4 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จะได้ฟอสฟอรัสที่ไม่อยู่ในรูปอะพาไทต์ (Non-apatite-P) ส่วนภาคตะกอนที่ได้ นำมาสกัดด้วย 1 M HCl 20 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จะได้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอะพาไทต์ (Apatite-P) โดยทุกขั้นตอนนำสารละลายส่วนใสไปหาปริมาณฟอสฟอรัสตามวิธีการสร้างสีด้วย ascorbic acid (Murphy and Riley, 1962)

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์ในดินเนื้อปูนด้วยเทคนิค ^{31}P NMR spectroscopy

ชั่งตัวอย่างดินที่บดละเอียดด้วย agate ขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร 5.0 กรัม ใส่หลอด centrifuge เติมสารละลายผสมระหว่าง 0.25 M NaOH และ 0.05 M Na_2EDTA อัตราส่วน 1:1 จำนวน 30 มิลลิลิตร เขย่า

16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (Cade-Menun and Preston, 1996; Liu *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2012) นำไป centrifuge ที่ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดูดสารละลายใสจำนวน 0.5 มิลลิลิตร ไปย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ และ H_2SO_4 (Rowland and Haygarth, 1997) ส่วนสารละลายใสที่เหลือนำไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส และทำให้แห้งด้วยเครื่อง freeze dryer แล้วบดตัวอย่างให้เป็นผงละเอียด ชั่งตัวอย่างจำนวน 400 มิลลิกรัม ใส่หลอด centrifuge เติม D_2O 0.5 มิลลิลิตร และ 10 M NaOH 0.1 มิลลิลิตร ผสมตัวอย่างให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer) เป็นเวลา 2 นาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไป centrifuge ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที แล้วดูดสารละลายใสใส่หลอด NMR ให้ได้ความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง NMR spectrometer (Advance III HD 500 MHz, Bruker) ตั้งค่าที่ความถี่ 202.465 MHz 5.2-ms pulse (45°) delay time ที่ 2.0 วินาที acquisition time ที่ 0.549 วินาที ตามวิธีของ Dong *et al.* (2012) แล้วแปลผลจากพื้นที่ใต้กราฟที่ความเข้มข้นต่างกัน (Chemical shift) เช่น orthophosphate (Ortho-P) ที่ 6.4 ถึง 6.9 ppm, orthophosphate monoester (Mono-P) ที่ 4 ถึง 6 ppm, aromatic diester ที่ 7.19 ถึง 7.58 ppm, DNA-P ที่ -1 ถึง 0 ppm, pyrophosphate (Pyro-P) ที่ -4 ถึง -3 ppm, RNA และ lipid-P ที่ 0.5 ถึง 2.0 ppm และ phosphonate ที่ 12 ถึง 23 ppm

การวิเคราะห์ข้อมูล

รายงานผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินบนและดินล่างด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าต่ำสุด (Minimum) ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) จากสมบัติดินและรูปร่างทางเคมีของ

ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูน และการจัดกลุ่มตัวแปร (Cluster analysis) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติดิน เพื่อระบุแหล่งศักยภาพความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (Potential available P pools) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป XLSTAT

ผลการทดลองและวิจารณ์

ลักษณะและสมบัติดินทางเคมี-ฟิสิกส์ของดินเนื้อปูนที่ศึกษา

จากสมบัติของดินเนื้อปูนที่แสดงใน Table 1 พบว่า ดินเนื้อปูนทั้งชั้นดินบนและชั้นดินล่างที่ศึกษามีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวในพิสัย 442–841 กรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าอนุภาคขนาดทรายแป้ง (149–494 กรัมต่อกิโลกรัม) และอนุภาคขนาดทราย (11–121 กรัมต่อกิโลกรัม) และจัดอยู่ในกลุ่มดินที่มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว และร่วนเหนียว

ส่วนสมบัติด้านการแลกเปลี่ยนไอออนของดินเนื้อปูน (Exchange properties) พบว่า ดินบนมีพีเอชดิน (pH) (1:1) เป็นด่างเล็กน้อยถึงด่างปานกลาง (7.50–8.00) และเป็นกลางถึงด่างปานกลาง (7.20–8.40) ในชั้นดินล่าง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.72 และ 7.82 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีสารประกอบพวกคาร์บอเนตในหน้าตัดดินเมื่อเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสทำให้ดินมีพีเอชสูงและเป็นด่าง (Bloom, 2000) สภาพการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัว (ECe) ทั้งดินชั้นบนและชั้นล่างมีค่าพิสัย 0.30–1.64 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่า 2 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร จึงจัดว่าไม่เป็นดินเค็ม ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช (Brady and Weil, 2008) ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) สูงในชั้นดินบน (21–44 กรัมต่อกิโลกรัม) และต่ำในชั้นดินล่าง (7–38 กรัมต่อกิโลกรัม) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 และ 18 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการผุพังสลาย

ตัวของเศษซากอินทรีย์หรือเศษพืชที่สะสมในดินบน และมีการสะสมและสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในดินชั้นล่างมีน้อยกว่าชั้นบน ปริมาณที่พบอาจเกิดจากการชะละลายของอินทรีย์วัตถุที่ละลายได้หรือเคลื่อนย้ายจากชั้นดินบนตามร่องแตกกระแหว่งลงไปสะสมในชั้นที่ลึกลงไป ดินบนมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) สูงมาก (45–61 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงถึงสูงมากในดินล่าง (25–66 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51 และ 42 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า CEC ของดินมีค่าสูงเนื่องจากดินมีปริมาณดินเหนียวสูง และมีแร่สเมกไทต์ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบซึ่งสามารถดูดซับและแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้สูง (Chittamart *et al.*, 2010) นอกจากนี้ ดินมีสมมูลแคลเซียมคาร์บอเนต (CCE) ในพิสัย 15–98 กรัมต่อกิโลกรัม โดยดินชั้นบนมีปริมาณ CCE เฉลี่ย 66 กรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ ดินชั้นล่างมีปริมาณ CCE เฉลี่ย 71 กรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งบ่งชี้ปริมาณสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตสะสมในปริมาณสูงในดินชั้นล่างมากกว่าดินชั้นบน (Auppathumpanont *et al.*, 2018)

ส่วนสมบัติด้านความอุดมสมบูรณ์ของดินพิจารณาปริมาณธาตุอาหารในดิน (Nutrient contents) ดังแสดงใน Table 1 พบว่า ดินมีปริมาณไนโตรเจนรวมในชั้นดินบนต่ำมากถึงปานกลาง (0.80–3.10 กรัมต่อกิโลกรัม) และมีค่าต่ำมากถึงต่ำในชั้นดินล่าง (0.30–1.40 กรัมต่อกิโลกรัม) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดชั้นดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.83–1.71 กรัมต่อกิโลกรัม และอยู่ในพิสัย 0.27–0.73 กรัมต่อกิโลกรัม ในชั้นดินล่าง ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินบนมีค่าสูงกว่าดินล่าง ซึ่งธาตุทั้งสองเป็นองค์ประกอบอยู่กับอินทรีย์วัตถุในดิน (Brady and Weil, 2008) ปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้มีค่าอยู่ในระดับสูงมากทุกชั้นดินในพิสัย 45–77 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ในดินชั้นบน และพิสัย 28–94 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ในดินชั้นล่าง ซึ่งปริมาณแคลเซียมจะผันแปรตามปริมาณคาร์บอเนตที่สะสมในชั้นดิน บ่งชี้ได้โดยชั้นดินมีค่า CCE สูง

Table 1 Physiochemical property of soil used in the experiment

Soil properties	Topsoils ⁿ				Subsoils ⁿ			
	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
Physical properties								
Sand (g kg ⁻¹)	11	101	61	39	15	121	72	40
Silt (g kg ⁻¹)	149	468	292	106	38	494	236	149
Clay (g kg ⁻¹)	442	750	647	106	446	841	692	132
Exchange properties								
pH (1:1)	7.50	8.00	7.72	0.17	7.20	8.40	7.82	0.42
E _c e (dS m ⁻¹)	0.30	1.57	0.70	0.50	0.28	1.64	0.68	0.53
OM (g kg ⁻¹)	21	44	31	10	7	38	18	12
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	45	61	51	5	25	56	42	12
CCE (g kg ⁻¹)	37	97	66	20	15	98	71	42
Nutrient contents								
Total N (g kg ⁻¹)	0.80	3.10	1.82	0.77	0.30	1.40	0.58	0.43
Total P (g kg ⁻¹)	0.83	1.71	1.38	0.36	0.27	0.73	0.45	0.17
Extr. Ca (cmol _c kg ⁻¹)	45	77	60	13	28	94	58	22
DTPA-Fe (mg kg ⁻¹)	6	19	12	6	7	13	10	3
Bray II-P (mg kg ⁻¹)	2.84	124.60	38.10	45.70	0.34	5.58	1.75	1.92
Olsen-P (mg kg ⁻¹)	1.13	121.50	23.30	48.20	0.86	1.66	1.12	0.28
Oxides (Total)								
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	43	103	70	21	43	71	58	12
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	117	208	172	32	108	194	141	38
CaO (g kg ⁻¹)	49	219	110	59	24	317	184	128
MgO (g kg ⁻¹)	11	26	16	6	9	52	18	17
Fe-Forms								
Fe-DCB (g kg ⁻¹)	2.43	26.45	10.81	8.45	1.22	17.85	9.12	6.14
Fe-Ox (g kg ⁻¹)	1.96	7.47	4.67	1.90	0.51	6.80	3.34	2.40
Fe-Pyro (g kg ⁻¹)	0.06	8.01	1.44	3.22	0.05	6.34	1.15	2.54
Biological properties								
MBC (mg C kg ⁻¹)	57	139	102	28	31	60	39	10
MBN (mg N kg ⁻¹)	10	38	24	9	5	21	9	5

n = 6, Min = minimum, Max = maximum, SD = standard deviation of all soil samples, E_ce = electrical conductivity, OM = organic matter, CEC = cation exchange capacity, CCE = calcium carbonate equivalent, Total N = total nitrogen, Total P = total phosphorus, Extr. Ca = extractable calcium, DCB = dithionite citrate bicarbonate extraction, Ox = oxalate pH 3.0 extraction, Pyro = pyrophosphate extraction, MBC = microbial biomass carbon, MBN = microbial biomass nitrogen.

ดินเนื้อปูนมีปริมาณ Fe Al Ca และ Mg ทั้งหมดในรูปออกไซด์ (Oxides) ซึ่งบ่งชี้ถึงองค์ประกอบสำคัญในดินได้แก่ เหล็กออกไซด์ แคลเซียม และ แมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยในชั้นดินบนมีปริมาณ Fe Al Ca Mg ในรูปออกไซด์ เฉลี่ยเท่ากับ 70, 172, 110 และ 16 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีปริมาณเฉลี่ยในชั้นดินล่างเท่ากับ 58, 141, 184 และ 18 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ ดินเนื้อปูนมีปริมาณเหล็กในรูปของเหล็กออกไซด์ที่มีผลึก (Fe-DCB) รูปอสัณฐานของเหล็ก (Fe-Ox) และรูปอินทรีย์เชิงซ้อนของเหล็ก (Fe-Pyro) ในชั้นดินบนเฉลี่ยเท่ากับ 10.81, 4.67 และ 1.44 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีปริมาณเฉลี่ยในชั้นดินล่างเท่ากับ 9.12, 3.34 และ 1.15 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ส่วนสมบัติด้านชีววิทยาของดินพิจารณาจากคาร์บอนชีวมวลและไนโตรเจนชีวมวลของจุลินทรีย์พบว่า ดินเนื้อปูนมีปริมาณคาร์บอนชีวมวล (MBC) และไนโตรเจนชีวมวล (MBN) ในชั้นดินบนเฉลี่ย 102 และ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในชั้นดินล่างเฉลี่ย 39 และ 9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่า กิจกรรมของจุลินทรีย์ในชั้นดินบนมีสูงกว่าชั้นดินล่าง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณสูงในชั้นดินบน ซึ่งเป็นแหล่งของคาร์บอนและไนโตรเจนในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ในดิน (Brady and Weil, 2008)

รูปที่เป็นประโยชน์และรูปอินทรีย์ของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูน

รูปที่เป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนโดยการสกัดด้วยวิธี Bray II ในตัวอย่างชั้นดินบน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 38.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อยู่ในพิสัยต่ำมากถึงสูงมาก 2.84–124.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าการสกัดด้วยน้ำยาสกัด Olsen ที่พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 23.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อยู่ในพิสัย 1.13–121.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก (Table 1) จากวิธีวิเคราะห์ทั้งสองวิธีการสกัด แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสหลายพื้นที่เป็นข้อจำกัด

ในดินเนื้อปูนที่ศึกษา และอาจเป็นสาเหตุให้พืชที่ปลูกในดินดังกล่าวขาดธาตุฟอสฟอรัสได้ง่าย โดยปัจจัยด้านองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณ และชนิดของแร่ดินเหนียว แคลเซียมคาร์บอเนต เหล็กออกไซด์ อัตราการใส่ฟอสฟอรัส และระยะเวลา มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน โดยเฉพาะปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสัมพันธ์เชิงลบกับฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ ซึ่งดินเนื้อปูนที่ศึกษามีการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตจึงส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเนื้อปูนอยู่ในระดับต่ำมาก (Afif *et al.*, 1993)

เมื่อศึกษาการแจกกระจายของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของดิน โดยการสกัดลำดับส่วนของธาตุฟอสฟอรัส (Figure 1; Table 2) พบว่า ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนแจกกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นประโยชน์ช้ามาก (Very slowly available P) คือ ส่วน residual รูปฟอสเฟสอินทรีย์ที่ถูกหุ้มด้วยออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม (Mattingly, 1975) เป็นแร่ที่ละลายช้าไม่สามารถสกัดออกมาได้ นอกจากนี้ ยังสัมพันธ์กับฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดฮิวมิก กรดพลูวิก sesquioxide-stabilized inositols (Crews, 1996) และ acid dissolved (Ca-P) ตามลำดับ รองลงมา คือ ส่วนที่เป็นประโยชน์ช้า (Slowly available P) ซึ่งประกอบด้วยฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และส่วนที่สกัดด้วยไฮดรอกไซด์และเขย่าด้วยเครื่อง sonicator (Fe-P, Al-P) และแจกกระจายอยู่ในส่วนที่เคลื่อนย้ายได้หรือรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Labile P) น้อยที่สุด ยกเว้น ดินบนของ Lb1 ที่มีส่วนของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง อาจเนื่องมาจากปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหลือตกค้างในดินหลังจากฤดูเพาะปลูก และในแต่ละส่วนของฟอสฟอรัสในดินบนมีค่าสูงกว่าชั้นดินล่าง ทั้งนี้ เป็นผลจากในชั้นดินล่างซึ่งมีปริมาณปูนแคลเซียมคาร์บอเนตสูงกว่าในชั้นดินบน ฟอสฟอรัสจะถูกตรึงไว้ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต (Afif *et al.*, 1993) ซึ่งสอดคล้องกับฟอสฟอรัสที่สกัดได้ส่วนใหญ่อยู่ในสัดส่วนที่ทนต่อการย่อยสลาย

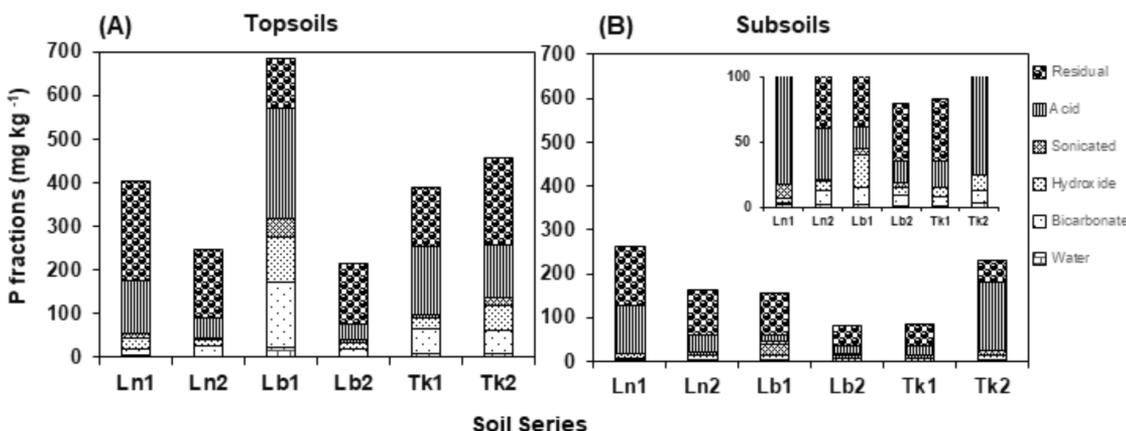


Figure 1 Absolute concentration of P fractions in topsoil (A) and subsoil (B) samples of Thai calcareous soils. A small figure in (B) magnified the P fractions lower than 100 ppm. Ln = Lam Narai series, Lb = Lop Buri series, Tk = Takhli series.

เมื่อพิจารณารูปของฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์ (Po) และรูปอนินทรีย์ (Pi) (Figures 2A–2B) และรูปของแร่อะพาไทต์ (Apatite-P) และแร่ที่ไม่ใช่อะพาไทต์ (Non-apatite-P) (Figure 2C–2D) พบว่า ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปอะพาไทต์มากกว่ารูปที่ไม่ใช่แร่อะพาไทต์ ทั้งในดินบนและดินล่าง ปริมาณฟอสฟอรัสของแร่อะพาไทต์ในดินบนและดินล่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 143 และ 35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าที่สกัดด้วย 1 M HCl จากวิธีการสกัดลำดับขั้นโดยวิธี Hedley ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28 และ 32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ ยังพบว่าธาตุฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนพบทั้งรูปอินทรีย์และอนินทรีย์ และมีความผันแปรระหว่างดินเนื้อปูนที่ศึกษา ทั้งนี้ ดินเหล่านี้มีปริมาณของอินทรีย์วัตถุและปริมาณปูนคาร์บอเนตที่สะสมในดินที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั้นดินบนกับชั้นดินล่าง พบว่า ฟอสฟอรัสอนินทรีย์มีค่าสูงในชั้นดินล่างเนื่องจากเป็นชั้นที่มีการสะสมปูนแคลเซียมคาร์บอเนต ยกเว้น ดิน Lb1 ที่มีค่าสูงในชั้นดินบน ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสะสมในดินน้อยกว่าดินอื่น ๆ ส่วนฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์นั้นส่วนใหญ่มีค่าสูงในชั้นดินบน เนื่องจากเป็นองค์

ประกอบในอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณสูงในดินบน ความผันแปรของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินบนทำให้สัดส่วนของฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์มีความแตกต่างกันระหว่างชุดดิน ซึ่งอินทรีย์วัตถุมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดิน เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (Stevenson, 1986) นอกจากนี้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุและฟอสฟอรัสอินทรีย์มีผลต่อการละลายของอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในแร่ปฐมภูมิ ซึ่งเป็นผลจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (Cole and Heil, 1981)

จากผลการศึกษารูปของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเนื้อปูนอยู่ในระดับต่ำมาก เนื่องจากฟอสฟอรัสส่วนใหญ่แจกกระจายอยู่ในส่วนที่ทนทานต่อการย่อยสลาย (Residual form) และมีอยู่ในส่วนที่ละลายน้ำและรูปที่สกัดด้วยไบคาร์บอเนตน้อย (Soluble and exchangeable P) ซึ่งรูปที่สกัดได้ถือเป็นส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที ส่งผลให้พืชแสดงอาการขาดฟอสฟอรัส และเมื่อพิจารณารูปที่สัมพันธ์กับแร่ในดินพบว่า ฟอสฟอรัสแจกกระจายอยู่ในรูปอะพาไทต์หรือแร่แคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นรูปอนินทรีย์ที่ละลายได้

น้อยในสภาพที่ดินเป็นต่างจัด อย่างไรก็ตาม ดินเนื้อปูนมีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์อยู่ปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชโดยการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสู่ดินเมื่ออินทรีย์วัตถุย่อยสลาย และเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยฟอสเฟต (Mohanty *et al.*, 2006) การใช้มูลสัตว์ซึ่งเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสรูปอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยฟอสเฟตสามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้ (Garg and Bahl, 2008) การใส่วัสดุ

อินทรีย์ที่มีส่วนผสมของกรดฮิวมิกและฟุลวิกช่วยลดการตกตะกอนของฟอสฟอรัสกับแคลเซียมในดินได้ ส่งผลให้มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น (Delgado *et al.*, 2002) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jantamenchai *et al.* (2022) ที่พบว่า การใส่วัสดุอินทรีย์จะส่งผลให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ในรูปออร์โทฟอสเฟต (Orthophosphate) และฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Phosphate monoester) เป็นหลัก

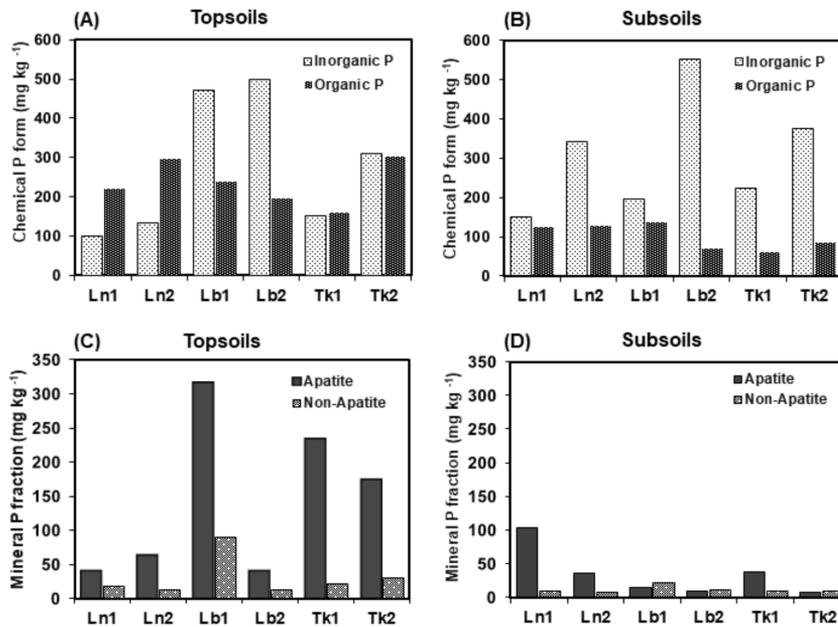


Figure 2 Phosphorus contents in inorganic and organic P forms in topsoil (A) and subsoil (B) and apatite and non-apatite P in topsoil (C) and subsoil (D) of Thai calcareous soils. Ln = Lam Narai series, Lb = Lop Buri series, Tk = Takhli series.

ปริมาณและชนิดของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินเนื้อปูน โดยเทคนิค ³¹P NMR spectroscopy

ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปทั้งหมดที่ได้จากการสกัดด้วย NaOH-EDTA มีค่าอยู่ระหว่าง 48-80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Table 2; Figure 3) เมื่อจำแนกชนิดของสารประกอบ P ด้วย NMR spectra พบว่า ใน

ดินเนื้อปูนจะพบ orthophosphate monoester ในทุกชุดดินและมีสัดส่วนมากที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 65.92 รองลงมาคือ DNA-P RNA และ lipid-P และ aromatic diester เท่ากับร้อยละ 14.09, 8.25 และ 7.52 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบสารประกอบ P สัดส่วนเล็กน้อยที่อยู่ในรูปของฟอสฟอรัสอินทรีย์ คือ pyro-P

phosphonates และ ortho-P จากการศึกษารูปของ ฟอสฟอรัสในพื้นที่ดินต่างที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินแตกต่างกันของ Martin-Sanz *et al.* (2022) พบว่า ฟอสฟอรัสรูป orthophosphate มีปริมาณสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 62 ในพื้นที่ทำการเกษตร ขณะที่ พื้นที่ป่าสนและป่าไผ่พบเพียงร้อยละ 20 ส่วน mono-P ในพื้นที่ทำการเกษตร ป่าสน และป่าไผ่ มีค่าเท่ากับร้อยละ 32, 68 และ 64 ตามลำดับ ส่วน Turner *et al.* (2003) ที่ศึกษารูปของฟอสฟอรัสในดินบริเวณทุ่งหญ้า (Temperate pasture soils) จำนวน 29 ชุดดิน (pH 4.4–6.8) พบว่า mono-P มีปริมาณสูงที่สุด (ร้อยละ 29–60) รองลงมาคือ ortho-P (ร้อยละ 21–55), orthophosphate diester (ร้อยละ 2–10), pyro-P (ร้อยละ 1–7), phosphonates (ร้อยละ 0–3) และ polyphosphate เพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับ Dong *et al.* (2012) พบว่า mono-P และ DNA-P มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสรูปอนินทรีย์

และรูปที่เป็นประโยชน์ซ้ำ ซึ่งพบมากในดินเนื้อปูนที่ศึกษาครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ซ้ำ หากมีการจัดการที่เหมาะสมอาจทำให้ละลายออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ เช่น การเพิ่มอินทรีย์วัตถุได้แก่ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก หรือสารชีวมีก นอกจากนี้ mono-P สัมพันธ์กับขนาดอนุภาคของตะกอนดินและทนต่อการย่อยสลาย เนื่องจาก mono-P เป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่ยากต่อการเคลื่อนย้ายและถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก เนื่องจากอินทรีย์เหล่านี้จะถูกดูดซับบนแร่ดินเหนียวหรือแร่เหล็ก อะลูมิเนียมออกไซด์ ส่วน DNA-P เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตและจุลินทรีย์ดินที่ติดยึดกับอนุภาคดินได้น้อยและสามารถทนทานต่อการย่อยสลายได้มากกว่า 20 ปี (Ahlgren *et al.*, 2005; Reitzel *et al.*, 2007) แต่ DNA-P ยังสัมพันธ์เชิงบวกกับฟอสฟอรัสอินทรีย์รูปที่เป็นประโยชน์ง่ายต่อพืช (Dong *et al.*, 2012)

Table 2 Phosphorus species determined by ³¹P NMR spectroscopy and molybdate colorimetry in NaOH–EDTA extracts in the topsoil of Thai calcareous soils

Soil series	NaOH-EDTA-extracted P (mg kg ⁻¹) ^a	Proportion of organic P by ³¹ P NMR spectroscopy result (%)						
		Ortho-P	Mono-P	RNA, Lipid-P	DNA-P	Aromatic diester	Pyro-P	Phosphonates
Ln1	78 ± 5	0.57	65.07	7.27	16.84	9.57	nd	0.67
Ln2	63 ± 5	2.40	66.28	10.27	9.94	5.58	3.52	2.01
Lb1	69 ± 3	nd	63.36	7.21	17.22	10.01	2.20	nd
Lb2	80 ± 8	0.85	71.63	7.19	13.14	6.54	nd	0.65
Tk1	48 ± 5	2.36	68.17	7.23	12.16	6.95	1.18	1.95
Tk2	80 ± 3	1.04	61.00	10.32	15.25	6.49	3.05	2.86
Mean	70	1.20	65.92	8.25	14.09	7.52	1.66	1.36

^a Mean ± standard deviation (n = 2). Ln = Lam Narai series, Lb = Lop Buri series, Tk = Takhli series, Ortho-P = orthophosphate, Mono-P = orthophosphate monoester, Pyro-P = pyrophosphate, nd = not detected.

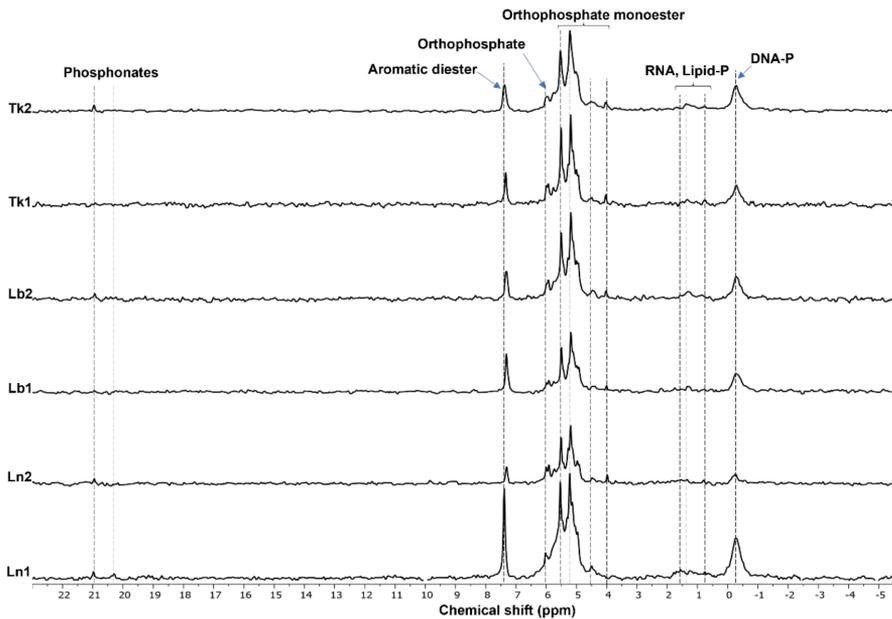


Figure 3 ^{31}P NMR spectra of NaOH-EDTA extracts of Thai calcareous soils. Ln = Lam Narai series, Lb = Lop Buri series, Tk = Takhli series. Dash lines identify chemical shift peak.

ความสัมพันธ์ระหว่างรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติของดินเนื้อปูนดิน

ฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ถือว่าเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืช และถูกควบคุมโดยองค์ประกอบและสมบัติของดิน การศึกษาความสัมพันธ์ของรูปฟอสฟอรัสกับสมบัติและองค์ประกอบของดินจะบ่งชี้แนวทางในการจัดการสมบัติดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ให้แก่พืชได้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจากสมบัติดินและรูปทางเคมีของฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูน พบว่า สมบัติดินมีการกระจายตัวของสมบัติดินซึ่งไม่สามารถจัดกลุ่มความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลักได้ชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ได้โดยผลรวมของ factor score (F1 และ F2) มีค่าเท่ากับร้อยละ 61.72 (Figure 4A) แต่สามารถจัดกลุ่มตัวอย่างดินออกเป็นกลุ่มได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ Ln1-top, Ln2-top และ Tk2-top กลุ่มที่ 2 ได้แก่ Lb2-top และ Tk1-top และกลุ่มที่ 3 ได้แก่ Lb1-top

(Figure 4B) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมบัติดินทั้งหมดกับฟอสฟอรัสรูปต่าง ๆ ในดิน โดยการวิเคราะห์แบบจัดกลุ่มตัวแปร (Cluster analysis) ที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติดิน (Figure 4C) พบว่า สามารถจัดกลุ่มตัวแปรกับรูปของฟอสฟอรัส ได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1) ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ทันที (Readily available P) ซึ่งมีสหสัมพันธ์สูงกับฟอสฟอรัสในรูปอะพาไทต์ (Apatite) ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัดต่าง ๆ (Hydroxide, sonicated, Olsen, Bray II, acid, bicarbonate, apatite) โดยน้ำยาสกัดเหล่านี้สามารถสกัดและละลายฟอสฟอรัสในรูปอะพาไทต์ได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การสกัดดินเนื้อปูนด้วยน้ำยาสกัดแบบต่าง ๆ ในสภาพกรดหรือด่างนั้นจะสกัดฟอสฟอรัสในรูปของแร่อะพาไทต์ ซึ่งเป็นแหล่งที่สามารถปลดปล่อยหรือบ่งชี้ระดับความเป็นประโยชน์ทันทีในดินเนื้อปูน โดย Ruban *et al.* (1999)

รายงานพบว่า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในรูปอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไว้ในบริเวณที่แลกเปลี่ยนได้ ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปเปลี่ยนแปลงและถูกแทนที่หรือละลายได้ด้วยอนุมูลจากน้ำยากัดทั้งในสภาพเป็นกรดและเป็นด่าง จากรูปที่ตกตะกอนร่วมกับ Al, Fe และ Mn oxyhydroxides และหรือ Ca-bound compounds เช่น apatite-P หรือจับอยู่กับธาตุแคลเซียม (Ca-bound) สอดคล้องกับ Wang *et al.* (2010) ได้ศึกษาการแยกส่วนของฟอสฟอรัสในดินเนือปนที่ได้รับปุ๋ยฟอสเฟตต่อเนื่อง 21 ปี และพบว่าฟอสฟอรัสในดินอยู่ในรูป hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) > octacalcium phosphate ($\text{Ca}_8\text{-P}$) > iron phosphorus (Fe-P) > aluminum phosphorus (Al-P) > occluded P > dicalcium phosphate ($\text{Ca}_2\text{-P}$) ตามลำดับ และการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตทำให้ฟอสฟอรัสในรูป $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P และ $\text{Ca}_2\text{-P}$ เพิ่มสูงขึ้นและมีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำยากัด Olsen ซึ่งจำเพาะกับฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์และการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (Desorption) ออกมาให้เป็นประโยชน์ต่อพืช (Shen *et al.*, 2019)

กลุ่มที่ 2) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียว (Clay associated P) เป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์กลุ่ม aromatic diester, DNA-P และ residual P ที่สัมพันธ์กับชนิดของแร่ขนาดดินเหนียว กลุ่มเหล็กออกไซด์ (DTPA-Fe, Fe-ox, Total Fe, Total Al, Total Mg, pH, Fe-DCB) ฟอสฟอรัสในกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กับชนิดของแร่ในดินในอนุภาคขนาดดินเหนียวและความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) โดยแร่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและ CEC สูง โดยเฉพาะแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวหลักที่พบในกลุ่มดินเนื้อปนของประเทศไทย (Auppathumpanont *et al.*, 2018) ซึ่งจะส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Zhang *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสสร้างพันธะกับอินทรีย์วัตถุ เหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัส

ขึ้นกับประจุที่ผิวของแร่ ความเข้มข้นของไอออน และพีเอช (Yan *et al.*, 2016)

กลุ่มที่ 3) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในอินทรีย์วัตถุ (Organic matter associated P) เป็นฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ (OM, MBN) และสมบัติด้านการแลกเปลี่ยน (CEC) ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอินทรีย์ (P_o) (Phosphonate, pyrophosphate, RNA and lipid-P) โดยฟอสฟอรัสกลุ่มนี้มีสหสัมพันธ์สูงกับฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน (Total P) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในเนื้อเยื่อพืชและสิ่งมีชีวิตในดิน ซึ่งจะคล้ายกับฟอสฟอรัสอินทรีย์ในกลุ่มที่ 2 ที่อยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียว (Zhang *et al.*, 2019)

กลุ่มที่ 4) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 associated P) ซึ่งแบ่งออกเป็นฟอสฟอรัสที่ตกตะกอนร่วมกับคาร์บอเนต ได้แก่ orthophosphate (Ortho-P) โดยมีสหสัมพันธ์กับกลุ่มอนุภาคทราย (Sand) อนุภาคขนาดทรายแป้ง (Silt) ซึ่งมีสหสัมพันธ์สูงกับค่าสมมูลคาร์บอเนต (CCE) และปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในดิน (Total Ca) ซึ่งจัดว่าเป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Pi) ที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Ca bound P หรือในรูปแร่อะพาไทต์ (Wang *et al.*, 2010) ได้แก่ $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$ และ $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ และบางส่วนเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่ตกตะกอนร่วมกับสารประกอบคาร์บอเนต (Shen *et al.*, 2019) ได้แก่ Al-P, Fe-P และ occluded P นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่า ฟอสฟอรัสที่อยู่สารประกอบคาร์บอเนต คือ mono-P มีสหสัมพันธ์สูงกับคาร์บอนชีวมวล (MBC) และเหล็กที่สร้างพันธะกับสารอินทรีย์ (Fe-pyro) ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่เกิดจากเศษซากจุลินทรีย์ในดินที่ย่อยสลายง่าย เช่น α -glycerophosphate, β -glycerophosphate, choline phosphate และ glucose6-phosphate (Xin *et al.*, 2019) หรือเป็นองค์ประกอบของชีวมวลจุลินทรีย์ (Microbial biomass) (Bünemann *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2022)

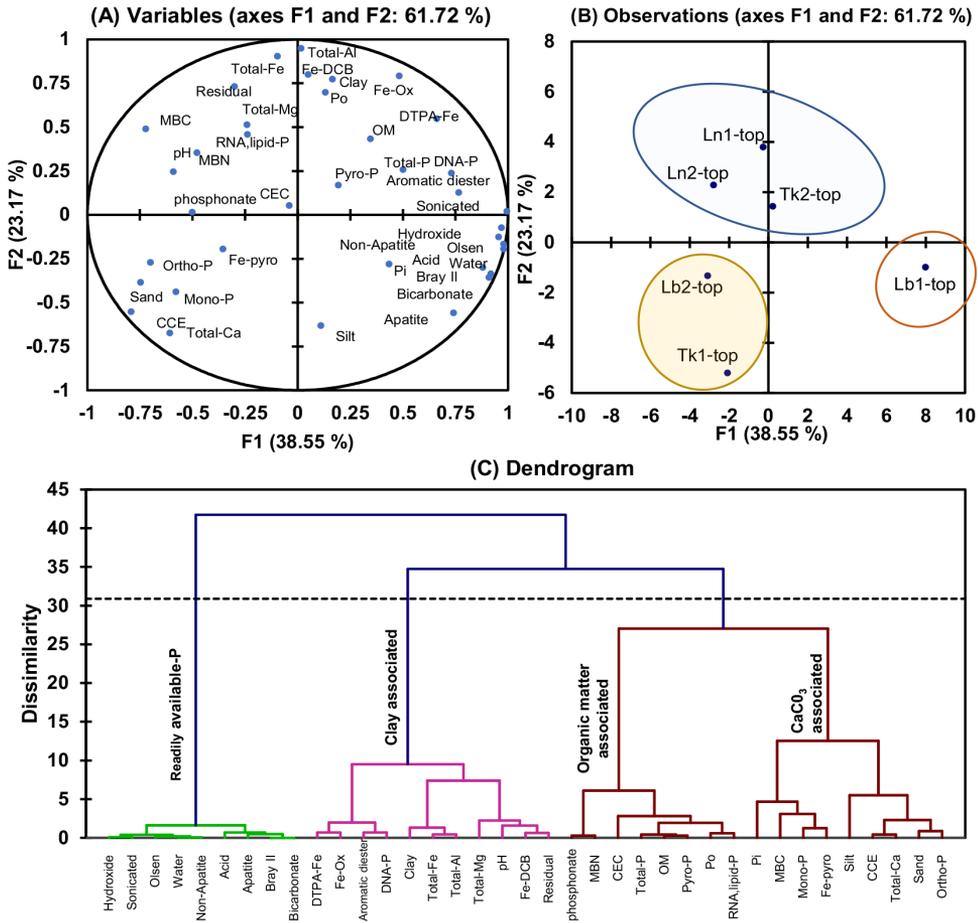


Figure 4 Principal component and cluster analysis of P fractions and properties of Thai calcareous soils. Ln = Lam Narai series, Lb = Lop Buri series, Tk = Takhli series.

สรุป

การศึกษาการแยกส่วนของฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ในดินเนื้อปูนจำนวน 6 บริเวณ ได้แก่ ชุดดินลำนารายณ์ (Ln1, Ln2) ชุดดินลพบุรี (Lb1, Lb2) และชุดดินตาลี (Tk1, Tk2) ซึ่งจัดจำแนกอยู่ในอันดับมอลลิซอลล์ (Ln, Tk) และเวอร์ทิวซอลล์ (Lb) พบว่า ดินเนื้อปูนทั้ง 6 บริเวณ มีปฏิกริยาเป็นต่าง มีฟอสฟอรัสอินทรีย์ส่วนใหญ่แจกกระจายอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์เข้าและรูปที่ทนทาน และปริมาณฟอสฟอสรูปที่เป็น

ประโยชน์มาจากฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปแร่อะพาไทต์มากที่สุด ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ^{31}P NMR พบว่า ฟอสฟอรัสอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูป phosphate monoester รองลงมาคือ DNA-P, RNA Lipid-P และ aromatic diester ตามลำดับ และพบฟอสฟอรัสอินทรีย์ปริมาณน้อยในรูปของ pyrophosphate, phosphonate และ orthophosphate ในสารสกัด NaOH-EDTA ความสัมพันธ์ระหว่างรูปของฟอสฟอรัสกับสมบัติดินเนื้อปูนสามารถแบ่งแหล่งฟอสฟอรัสได้ 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1) ฟอสฟอสรูปที่เป็นประโยชน์

พื้นที่ พบในชุดดินลำนารายณ์ (Ln1, Ln2) และชุดดิน
 ตาคลี (Tk2-sub) ซึ่งมีสหสัมพันธ์สูงกับฟอสฟอรัสใน
 รูปอะพาไทต์ กลุ่มที่ 2) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในอนุภาคขนาด
 ดินเหนียว พบในชุดดินลพบุรี (Lb2) และชุดดินตาคลี
 (Tk1) กลุ่มที่ 3) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในอินทรีย์วัตถุ พบใน
 ดินบนของชุดดินตาคลี (Tk2-top) ซึ่งมีปริมาณอินทรีย์
 วัตถุสูง และกลุ่มที่ 4) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารประกอบ
 แคลเซียมคาร์บอเนต พบในชุดดินลพบุรี (Lb1) ผลการ
 ศึกษาแสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนส่วนใหญ่
 ละลายได้ต่ำและอยู่ในรูปที่ทนต่อการย่อยสลาย ดังนั้น
 การจัดการดินเนื้อปูนควรเน้นการเพิ่มการละลาย
 ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอะพาไทต์ และการย่อยสลาย
 รูปอินทรีย์ เช่น การรักษาความชื้นในดินให้เหมาะสม
 การเพิ่มอินทรีย์วัตถุในรูปของปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก หรือ
 สารชีวมีก การใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต การปรับลด
 พีเอชดินโดยการใส่ปุ๋ยด่างสภาพกรด และการใช้ปุ๋ย
 ฟิซซิด เป็นต้น เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ

ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูน อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษา
 วิธีการจัดการดินที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการละลายได้ของ
 ฟอสฟอรัสในดินเนื้อปูนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจาก
 สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัย
 เกษตรศาสตร์ (สวพ. มก.) ปีงบประมาณ 2558
 โครงการวิจัยเรื่อง “ธรณีเคมีของฟอสฟอรัสและจุล
 ชาติบางชนิดในดินเนื้อปูนภายใต้ภูมิอากาศแบบกึ่ง
 แห้งแล้งของประเทศไทย” (รหัสโครงการ ก-ช(ด)
 22.58) และได้รับทุนสนับสนุนแลกเปลี่ยนต่าง
 ประเทศเพื่อส่งเสริมและพัฒนาด้านงานวิจัยของนิสิต
 ผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2559 จาก
 ศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- Afif, E., A. Matar and J. Torrent. 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soils of west Asia and North Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(3): 756–760. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700030022x>.
- Ahlgren, J., L. Tranvik, A. Gogoll, M. Waldebäck, K. Markides and E. Rydin. 2005. Sediment depth attenuation of biogenic phosphorus compounds measured by ³¹P NMR. *Environ. Sci. Technol.* 39(3): 867–872. <https://doi.org/10.1021/es049590h>.
- Alewell, C., B. Ringeval, C. Ballabio, D.A. Robinson, P. Panagos and P. Borrelli. 2020. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nat. Commun.* 11: 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
- Amato, M. and J.N. Ladd. 1988. Assay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soil. *Soil Biol. Biochem.* 20(1): 107–114. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90134-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90134-4).
- Auppathumpanont, P., N. Chittamart and T. Darunsontaya. 2018. Fertility capability of calcareous soils in Thailand. *Journal of Agriculture.* 34(3): 411–423. (in Thai)

- Bloom, P.R. 2000. Soil pH and pH buffering, pp. 333–352. *In* M.E. Summer, ed. Handbook of Soil science. CRC Press, Florida, USA.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2008. The Nature and Properties of Soils. 14th edition. Practice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39–45. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>.
- Bünemann, E.K., P. Marschner, R.J. Smernik, M. Conyers and A.M. McNeill. 2008. Soil organic phosphorus and microbial community composition as affected by 26 years of different management strategies. *Biol. Fertil. Soils.* 44: 717–726. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0254-2>.
- Cade-Menun, B.J. and C.M. Preston. 1996. A comparison of soil extraction procedures for ³¹P NMR spectroscopy. *Soil Sci.* 161(11): 770–785. <http://doi.org/10.1097/00010694-199611000-00006>.
- Castillo, M.S. and A.L. Wright. 2008. Microbial activity and phosphorus availability in a subtropical soil under different land uses. *World J. Agric. Sci.* 4(3): 314–320.
- Chittamart, N., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2010. Layer-charge characteristics of smectite in Thai Vertisols. *Clays Clay Miner.* 58(2): 247–262. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2010.0580209>.
- Cole, C.V. and R.D. Heil. 1981. Phosphorus effects on terrestrial nitrogen cycling. *Ecol. Bull.* (Stockholm). 33: 363–374.
- Crews, T.E. 1996. The supply of phosphorus from native, inorganic phosphorus pools in continuously cultivated Mexican agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 57(2–3): 197–208. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)01013-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)01013-0).
- Delgado, A., A. Madrid, S. Kassem, L. Andreu and M.C. Campillo. 2002. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. *Plant Soil.* 245: 277–286. <https://doi.org/10.1023/A:1020445710584>.
- Dong, L., Z. Yang, X. Liu and G. Liu. 2012. Investigation into organic phosphorus species in sediments of Baiyangdian Lake in China measured by fractionation and ³¹P NMR. *Environ. Monit. Assess.* 184: 5829–5839. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2550-z>.
- Enzweiler, J. and M.A. Vendemiatto. 2004. Analysis of sediments and soils by X-ray fluorescence spectrometry using matrix corrections based on fundamental parameters. *Geostand. Geoanal. Res.* 28(1): 103–112. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01046.x>.

- Garg, S. and G.S. Bahl. 2008. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils. *Bioresour. Technol.* 99(13): 5773–5777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.063>.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, pp. 383–411. *In* A. Klute, ed. *Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Wisconsin, USA.
- Hedley, M.J., J.W.B. Stewart and B.S. Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(5): 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>.
- Jantamenchai, M., T. Sukitprapanon, D. Tulaphitak, W. Mekboonsonglarp and P. Vityakon. 2022. Organic phosphorus forms in a tropical sandy soil after application of organic residues of different quality. *Geoderma*. 405: 115462. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115462>.
- Kheoruenromne, I. 1990. *Soil of Thailand: Characteristics, Distribution and Usage*. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Leytem, A.B. and R.L. Mikkelsen 2005. The nature of phosphorus in calcareous soils. *Better Crops*. 89(2): 11–13.
- Li, H., T. Zhang, S.M. Shaheen, H. Abdelrahman, E.F. Ali, N.S. Bolan, G. Li and J. Rinklebe. 2022. Microbial inoculants and struvite improved organic matter humification and stabilized phosphorus during swine manure composting: multivariate and multiscale investigations. *Bioresour. Technol.* 351: 126976. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126976>.
- Liu, J., H. Wang, H. Yang, Y. Ma and O. Cai. 2009. Detection of phosphorus species in sediments of artificial landscape lakes in China by fractionation and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Environ. Pollut.* 157: 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.031>.
- Martín-Sanz, R.C., F. Lafuente and M.B. Turrión. 2022. Characterization of soil phosphorus in different land use over calcareous soils by chemical extraction methods and ³¹P-NMR spectroscopy. *Rev. Cienc. Agrar.* 45(4): 397–401. <https://doi.org/10.19084/rca.28502>.
- Mattingly, G.E.G. 1975. Labile phosphate in soils. *Soil Sci.* 119(5): 369–375. <https://doi.org/10.1097/00010694-197505000-00007>.
- Mohanty, S., N.K. Paikaray and A.R. Rajan. 2006. Availability and uptake of phosphorus from organic manures in groundnut (*Arachis hypogea* L.)–corn (*Zea mays* L.) sequence using radio tracer technique. *Geoderma*. 133(3–4): 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.009>.

- Motavalli, P. and R. Miles. 2002. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. *Biol. Fertil. Soils*. 36: 35–42. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0500-6>.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*. 27: 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
- Nash, D.M., P.M. Haygarth, B.L. Turner, L.M. Condron, R.W. McDowell, A.E. Richardson, M. Watkins and M.W. Heaven. 2014. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: a perspective. *Geoderma*. 221–222: 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.004>.
- National Soil Survey Center. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation Report No. 42. Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus, pp. 403–430. *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.
- Osotsapar, Y. 1999. Micronutrients in crop production in Thailand. *In* Proc. the International Workshop on Micronutrient in Crop Production, November 8–13, 1999.
- Pardo, P., J.F. Lopez-Sanchez and G. Rauret. 2003. Relationships between phosphorus fractionation and major components in sediments using the SMT harmonised extraction procedure. *Anal. Bioanal. Chem.* 376(2): 248–254. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-1897-y>.
- Reitzel, K., J. Ahlgren, H. DeBrabandere, M. Waldebäck, A. Gogoll, L. Tranvik and E. Rydin. 2007. Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment. *Biogeochemistry*. 82(1): 15–28. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9049-z>.
- Rowland, A.P. and P.M. Haygarth. 1997. Determination of total dissolved phosphorus in soil solutions. *J. Environ. Qual.* 26(2): 410–415. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600020011x>.
- Ruban, V., J.F. López-Sánchez, P. Pardo, G. Rauret, H. Muntau and Ph. Quevauviller. 1999. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment. *J. Environ. Monit.* 1: 51–56. <https://doi.org/10.1039/A807778I>.

- Shen, Y., Y. Duan, N. McLaughlin, S. Huang, D. Guo and M. Xu. 2019. Phosphorus desorption from calcareous soils with different initial Olsen-P levels and relation to phosphate fractions. *J. Soils Sediments*. 19: 2997–3007. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02292-9>.
- Soil Survey Division. 1975. Detailed Reconnaissance Soil Map of Lop Buri in Thailand (Scale 1:100,000). Land Development Department, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Soil Survey Division. 1981. Detailed Reconnaissance Soil Map of Nakhon Sawan in Thailand (Scale 1:100,000). Land Development Department, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Sui, Y., M.L. Thompson and C.W. Mize. 1999. Redistribution of biosolid-derived total phosphorus applied to a Mollisol. *J. Environ. Qual.* 28(4): 1068–1074. <https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800040002x>.
- Tiessen, H., J.W.B. Stewart and C.V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(4): 853–858. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800040031x>.
- Turner, B.L. and A.B. Leytem. 2009. Phosphorus speciation in soils and manures by solution ^{31}P NMR spectroscopy, pp. 95–101. *In* J.L. Kovar and G.M. Pierzynski, eds. *Methods for Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals and Waters*. 2nd edition. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408. North Carolina State University, North Carolina, USA.
- Turner, B.L., N. Mahieu and L.M. Condron. 2003. The phosphorus composition of temperate pasture soils determined by NaOH–EDTA extraction and solution ^{31}P NMR spectroscopy. *Org. Geochem.* 34(8): 1199–1210. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(03\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00061-5).
- Von Wandruszka, R. 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochem. Trans.* 7: 6. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-7-6>.
- Wang, J., W.Z. Liu, H.F. Mu and T.H. Dang. 2010. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate. *Pedosphere*. 20(3): 304–310. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60018-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60018-5).
- Xin, X., X. Zhang, W. Chu, J. Mao, W. Yang, A. Zhu, J. Zhang and X. Zhong. 2019. Characterization of fluvo-aquic soil phosphorus affected by long-term fertilization using solution ^{31}P NMR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* 692: 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.221>.

- Yan, J., T. Jiang, Y. Yao, S. Lu, Q. Wang and S. Wei. 2016. Preliminary investigation of phosphorus adsorption onto two types of iron oxide-organic matter complexes. *J. Environ. Sci.* 42: 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.08.008>.
- Zhang, T.Q., A.F. Mackenzie and F. Sauriol. 1999. Nature of soil organic phosphorus as affected by long-term fertilization under continuous corn (*Zea mays* L.): a ³¹P NMR study. *Soil Sci.* 164(9): 662–670.
- Zhang, Z., L. Yan, H. Yu, T. Yan and X. Li. 2019. Adsorption of phosphate from aqueous solution by vegetable biochar/layered double oxides: fast removal and mechanistic studies. *Bioresour. Technol.* 284: 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.113>.