Thai Science and Technology Journal Vol. 33 No. 5 September-October 2025 ISSN 3027-6365 (Online)

Thai Science and Technology Journal
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Journal Homepage : http://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj

การแยกส่วนของฟอสฟอรัสในดินที่ได้รับอิทธิพลจากหินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต

Phosphorus Fractions in Soil as an Influence of Rock Phosphate and Phosphate-Solubilizing Microorganisms

ศานิต สวัสดิกาญจน์, สายชล สุขญาณกิจ*

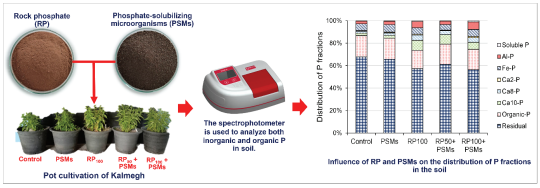
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

Sanit Sawatdikarn, Saychol Sukyankij*

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

Received 9 October 2024; Received in revised 15 May 2025; Accepted 20 May 2025

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

An important problem with acid sulfate soils (ASS) is that plant nutrients are present in unavailable forms, particularly phosphorus (P). This study aimed to investigate the effects of applying rock phosphate (RP) and phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs) on available P and P fractions in ASS. The experiment was conducted using a completely randomized design (CRD) with three replicates and five treatments. The treatments were as follows: T1-no addition of RP and PSM (control), T2-addition of PSMs, T3-addition of RP at 100 g/pot (RP_{100}), T4-addition of RP at 50 g/pot combined with PSMs (RP_{50}+PSMs), and T5-addition of RP at 100 g/pot combined with PSMs (RP_{100}+PSMs). The findings revealed that the application of RP at 50 and 100 g/pot (RP_{100}, RP_{50}+PSMs, RP_{100}+PSMs) resulted in higher inorganic P, organic P, and residual P compared with the control and the treatment with PSMs alone. Regarding Kalmegh yield, there was no significant difference between RP_{50}+PSMs and RP_{100}+PSMs. However, the RP_{100}+PSMs treatment provided the highest values of available P, soluble P, Fe-P, and Al-P. The results indicate that in ASS, the combined application of RP and PSMs is important for increasing soil P content, both in available forms (available P and soluble P) and in reserve forms (Fe-P and Al-P).

คำสำคัญ

รูปของฟอสฟอรัส;
หินฟอสเฟต;
จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต;
ดินกรดกำมะถัน

Keywords

Phosphorus fraction;
Rock phosphate;
Phosphate-solubilizing microorganisms;
Acid sulfate soil

บทคัดย่อ

ปัญหาสำคัญของดินกรดกำมะถันคือธาตุอาหารพืชอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส (P) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้หินฟอสเฟต (RP) และจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (PSMs) ต่อความเป็นประโยชน์และรูปของ P ในดินกรดกำมะถัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) จำนวน 3 ซ้ำ 5 ตำรับทดลอง ดังนี้ T1-ไม่ใส่ RP และ PSMs (ควบคุม) T2-ใส่ PSMs T3-ใส่ RP 100 กรัมต่อกระถาง (RP_{100}) T4-ใส่ RP 50 กรัมต่อกระถางร่วมกับ PSMs (RP_{50}+PSMs) และ T5-ใส่ RP 100 กรัมต่อกระถางร่วมกับ PSMs (RP_{100}+PSMs) ผลการทดลองพบว่า การใช้ RP อัตรา 50 และ 100 กรัมต่อกระถาง (RP_{100}, RP_{50}+PSMs, RP_{100}+PSMs) ให้ปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Inorganic P) ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Organic P) และฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P) สูงกว่าตำรับควบคุมและตำรับ PSMs ขณะที่ผลผลิตฟ้าทะลายโจรพบว่าตำรับ RP_{50}+PSMs และ RP_{100}+PSMs ให้ผลผลิตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมินัมสูงที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในดินกรดกำมะถันการใช้หินฟอสเฟตในอัตราดังกล่าวร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตมีส่วนสำคัญในการเพิ่มระดับของฟอสฟอรัสในดินทั้งในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available P และ Soluble P) และฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสสำรองในดิน (Fe-P และ Al-P)

***ผู้รับผิดชอบบทความ:** saychol.agri@gmail.com

DOI: 10.14456/tstj.2025.35

Science33-N5.indd 11 8/11/2568 15:55:12

1. บทนำ

จังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นพื้นที่ที่พบดินกรดกำมะถัน (Acid sulfate soil) ที่สำคัญของประเทศ โดยมีชุดดินสำคัญได้แก่ ชุดดินอยุธยา และชุดดินเสนา [1] ปัญหาสำคัญของดินกรดกำมะถันคือระดับพีเอชที่ต่ำ (pH<4) กว่าดินกรดโดยทั่วไป (pH<5.5) [2, 3] ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลักของพืช ขณะเดียวกันระดับพีเอชที่ต่ำจะมีผลทำให้ธาตุโลหะหรือโลหะหนักบางชนิดละลายออกมามากจนถึงขั้นเป็นพิษต่อพืช [4] ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับธาตุหรือสารประกอบต่าง ๆ ในดิน โดยเฉพาะในดินที่มีพีเอชต่ำเช่นดินกรดกำมะถัน ฟอสฟอรัสมักเข้าจับกับเหล็ก อะลูมินัม หรือแมงกานีสกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยาก ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้ระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีค่าลดลง [5] การใช้วัสดุปูนชนิดต่าง ๆ เช่น ปูนขาว หินปูนบด ปูนมาร์ล ปูนโดโลไมต์ หรือแม้กระทั่งหินฟอสเฟต [6, 7, 8] มีรายงานอย่างแพร่หลายถึงประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพความเป็นกรดของดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินกรดกำมะถัน Sukyankij et al. [5] ศึกษาการใช้วัสดุปูนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินกรดจัดเทียม (Post-active acid sulfate soil) ของประเทศไทยพบว่า การใส่ปูนในอัตรา 0.5-2.0 เท่าของค่าความต้องการปูนของดินในชุดดินอยุธยาและชุดดินเสนาส่งผลให้พีเอชดินเพิ่มขึ้นประมาณ 9-29 และ 17-55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราการใส่ปูนที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น จากรายงานของ Yampracha et al. [8] ซึ่งศึกษาการทำนายการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดกำมะถันของประเทศไทยพบว่า ในดินที่มีสภาพพีเอชต่ำเป็นตัวการสำคัญในการส่งเสริมการละลายได้ของหินฟอสเฟต และปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้หินฟอสเฟต จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าการใช้วัสดุปูนชนิดต่าง ๆ ในดินกรดกำมะถันล้วนแล้วแต่ส่งผลให้ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ยังมีวิธีการอื่นที่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ในดินกรดกำมะถันได้อีก เช่น การใช้ผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารพืชในดินให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ ดังรายงานของ Sukyankij et al. [9] ซึ่งทำการศึกษาการใช้ปุ๋ยชีวภาพชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของฟ้าทะลายโจรและฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ในดินพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาพบว่าการใช้ปุ๋ยชีวภาพชนิดต่าง ๆ ได้แก่ จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต พีจีพีอาร์ และไมคอร์ไรซา ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังปลูกมีค่าแตกต่างกัน โดยการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตส่งผลให้ดินหลังปลูกมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูงที่สุดซึ่งมากกว่าการใช้ปุ๋ยชีวภาพพีจีพีอาร์และไมคอร์ไรซาประมาณหนึ่งเท่าตัว จากข้อมูลที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ามีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินค่อนข้างมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตที่ส่งผลต่อฟอสฟอรัสรูปต่าง ๆ ในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินกรดกำมะถันนั้นพบว่ายังมีข้อมูลค่อนข้างจำกัด โดยสมมุติฐานของงานวิจัยคือการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตในดินกรดกำมะถันส่งผลให้ฟอสฟอรัสรูปต่าง ๆ ในดินมีความแตกต่างกัน จึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการใช้การใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตต่อรูปต่าง ๆ ของฟอสฟอรัสในดิน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร จากแปลงเกษตรกรในพื้นที่อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (14°29’42.94” N, 100°49’94.25” E) ในช่วงเดือนธันวาคม 2566 เพื่อนำมาทดลองปลูก

Science33-N5.indd 12 8/11/2568 15:55:12

ฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata*) โดยทำการวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้นประกอบด้วย พีเอชดินวัดโดยใช้ pH meter [10] ค่าสภาพการนำไฟฟ้าดินโดยสกัดดินขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนำสารละลายไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Electrical conductivity meter [11] อินทรียวัตถุโดยวิธี Wet oxidation [12] ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์โดยสกัดด้วยน้ำยา Bray II แล้ววัดปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง Spectrophotometer [13] โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยสกัดด้วย 1N NH_4OAc (pH 7) แล้ววัดปริมาณโพแทสเซียมด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer [14] และเนื้อดินโดยวิธี Pipet method [15] (Table 1) นำตัวอย่างดินผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ชั่งใส่กระถางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร กระถางละ 8 กิโลกรัม เพื่อเตรียมไว้ใช้สำหรับปลูกฟ้าทะลายโจร ทำการปลูกฟ้าทะลายโจรในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน 2567 โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ประกอบด้วยตำรับทดลองทั้งหมด 5 ตำรับ ทำ 3 ซ้ำ คือ T1 ไม่ใส่จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตและหินฟอสเฟต (ควบคุม) T2 ใส่จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (Phosphate-solubilizing microorganisms, PSMs) อัตรา 5 กรัมต่อกระถาง T3 ใส่หินฟอสเฟตอัตรา 100 กรัมต่อกระถาง (RP_{100}) และ T4 และ T5 ใส่หินฟอสเฟตอัตรา 50 และ 100 กรัมต่อกระถางร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตอัตรา 5 กรัมต่อกระถาง (RP_{50}+PSM_S, RP_{100}+PSMs) ตามลำดับ ทั้งนี้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ผลิตโดยกรมวิชาการเกษตร ซึ่งประกอบด้วยเชื้อรา *Penicillium pinophilum* ปริมาณ $1x10^7$ โคโลนีต่อผลิตภัณฑ์ 1 กรัม ส่วนหินฟอสเฟตที่ใช้มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุแมกนีเซียม รองลงมาคือธาตุแคลเซียม (51.8 และ 13.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสพบว่ามีค่าเท่ากับ 7.60 เปอร์เซ็นต์ (Table 2) โดยทั้งหินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตจะใส่รองก้นหลุมก่อนปลูกที่ความลึกประมาณ 5-6 เซนติเมตร สำหรับการปลูกฟ้าทะลายโจรจะนำต้นกล้าฟ้าทะลายโจรอายุ 30 วัน ลงปลูกในกระถางซึ่งบรรจุดิน 8 กิโลกรัม จากนั้นใส่หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตตามแผนการทดลอง รดน้ำในช่วงเช้าของทุกวัน กำจัดวัชพืชโดยถอนด้วยมือ โดยระหว่างการทดลองไม่มีการฉีดพ่นสารใด ๆ ในการกำจัดโรคและแมลง ทำการเก็บเกี่ยวเมื่อฟ้าทะลายโจรออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์ (81 วันหลังย้ายกล้า) แล้วนำผลผลิตส่วนเหนือดินมาชั่งน้ำหนัก และภายหลังเก็บเกี่ยวฟ้าทะลายโจรแล้วเสร็จ ทำการเก็บตัวอย่างดินจากแต่ละกระถางโดยเก็บให้ลึก 0-10 เซนติเมตรจากผิวดินประมาณกระถางละ 100 กรัม นำมาผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร แล้วเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการต่อไป

Table 1 Physiochemical properties of soil used in the experiment

pH (1:1)	EC_e (dS/m)	OM (g/kg)	Avail. P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)	Soil texture
4.65	0.73	18.5	13.7	172	Clay

Table 2 Properties of rock phosphate used in the experiment

pH (1:1)	$EC_{1:10}$ (dS/m)	Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)	Total Ca (%)	Total Mg (%)
8.10	0.12	0.03	7.60	0.10	13.2	51.8

Science33-N5.indd 13 8/11/2568 15:55:12

2.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

การวิเคราะห์รูปของฟอสฟอรัสประกอบด้วย 2 รูป คือฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Pi) และฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Po) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Pi)

ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (Soluble P) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมินัม (Fe-P และ Al-P) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียม (Ca-P) ซึ่งประกอบด้วยไดแคลเซียมฟอสเฟต (Ca_2-P) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต (Ca_8-P) และอะพาไทต์ (Ca_{10}-P) และฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Res-P) ซึ่งใช้วิธีสกัดแบบแยกส่วนโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Chulo et al. [16] และ Nourgholipour et al. [17] โดยชั่งตัวอย่างดิน 0.5 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยาสกัดชนิดต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้ 1 M NH_4Cl (Step 1), 0.25 M $NaHCO_3$ (pH 7.5) (Step 2), 1 M NH_4OAc (pH 4.2) (Step 3), 0.5 M NH_4F (pH 8.2) (Step 4), 0.1 M NaOH (Step 5) และ 0.25 M H_2SO_4 (Step 6) จำนวน 25 มิลลิลิตร เขย่านาน 0.5, 1, 4, 1, 17 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที ซึ่งจะได้สารละลายฟอสฟอรัสในรูปของ Soluble P, Ca_2-P, Ca_8-P, Al-P, Fe-P และ Ca_{10}-P ตามลำดับ สารละลายใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธีเทียบสี (Ascorbic acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer [18] ทั้งนี้ภายหลังการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนดินออกจากสารละลายใน Step 2 จะล้างตะกอนดินโดยใช้ Ethyl alcohol 95 เปอร์เซ็นต์ และใน Step 3, 4 และ 5 ล้างโดยใช้สารละลายอิ่มตัวของ NaCl หลังจากสกัดฟอสฟอรัสใน Step 6 แล้วเสร็จจะนำตัวอย่างดินไปอบจนแห้ง บดให้ละเอียด จากนั้นชั่งตัวอย่างดิน 0.25 กรัมใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดยวิธี Perchloric acid digestion แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธีเทียบสี (Vanado-molybdo-phosphoric acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer [18] ซึ่งฟอสฟอรัสที่สกัดได้ส่วนนี้ถือเป็นฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดิน (Res-P)

2.2.2 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Po)

ใช้วิธี Basic EDTA extraction method ตามวิธีการของ Bowman and moir [19] ชั่งตัวอย่างดิน 0.5 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยาสกัด NaOH-EDTA (0.5 M NaOH+0.1 M Na_2EDTA) จำนวน 25 มิลลิลิตร เขย่านาน 16 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที สารละลายที่ได้นำไปวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูป P_i-extract และ P_t-digest ดังนี้

1) การวิเคราะห์ P_i-extract โดยปิเปตสารละลายข้างต้นจำนวน 3.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 0.9 M H_2SO_4 จำนวน 0.5 มิลลิลิตร นำไปแช่เย็นนาน 30 นาที เมื่อครบกำหนดนำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที สารละลายใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธีเทียบสี (Ascorbic acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer [18]

2) การวิเคราะห์ P_t-digest โดยปิเปตสารละลายจำนวน 3.5 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 100 มิลลิลิตร เติม $(NH_4)_2S_2O_8$ จำนวน 0.5 กรัม และสารละลาย 0.9 M H_2SO_4 จำนวน 10 มิลลิลิตร ปิดปากขวดด้วยกระดาษฟอยล์แล้วนำไปใส่ใน Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 เมกะปาสกาล เป็นเวลา 90 นาที เมื่อครบกำหนดนำสารละลายที่ได้มาเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธีเทียบสี (Ascorbic acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer [18]

Science33-N5.indd 14 8/11/2568 15:55:12

3) การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Po) โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ P_t-digest ลบด้วย P_i-extract

2.2.3 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัส

ในส่วนของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ทำการชั่งตัวอย่างดิน 3 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวส์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยาสกัด Bray II (0.03 M NH_4F + 0.1 M HCl) จำนวน 30 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 1 นาที [13] จากนั้นนำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที นาน 10 นาที แล้วแยกเอาสารละลายใสที่ได้ไปวิเคราะห์ฟอสฟอรัสโดยวิธีเทียบสี (Ascorbic acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer [18] ส่วนการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสพิจารณาจากค่า Phosphorus activation coefficient (PAC) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสจากรูปฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินไปเป็นฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จากสัดส่วนระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (Available P) ส่วนด้วยปริมาณฟอสฟอรัสจากการสะสมทั้งหมดในดิน (Cumulative P) ทั้งนี้ปริมาณฟอสฟอรัสจากการสะสมทั้งหมดในดินหรือ Cumulative P นั้นได้จากผลรวมของปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Inorganic P) ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Organic P) และฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดิน (Residual P) [5, 20]

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS version 22 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละตำรับทดลองโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลผลิตฟ้าทะลายโจร

ผลผลิตฟ้าทะลายโจรพิจารณาจากน้ำหนักสดส่วนเหนือดินของฟ้าทะลายโจรพบว่า ตำรับทดลอง RP_{50}+PSMs ให้ผลผลิตน้ำหนักสดฟ้าทะลายโจรสูงที่สุด (38.0±6.55 กรัมต่อต้น) ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากตำรับทดลอง RP_{100}+PSMs (30.3±3.21 กรัมต่อต้น) ขณะที่ตำรับควบคุมซึ่งไม่มีการใส่หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตให้ปริมาณผลผลิตต่ำที่สุด (10.7±4.72 กรัมต่อต้น) (Figure 1) จากรายงานของ Basak and Gajbhiye [21] ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยฟอสฟอรัสจากแหล่งต่าง ๆ ต่อผลผลิตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืชสมุนไพร เช่น มะขามแขก พบว่า การใช้หินฟอสเฟตช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตมะขามแขกได้ประมาณ 6.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตำรับควบคุม และผลผลิตจะเพิ่มขึ้นถึง 48.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งนี้ในดินที่มีพีเอชต่ำเช่น ดินกรดกำมะถันจะมีผลอย่างมากในการจำกัดการละลายได้ของธาตุอาหารแต่สภาวะดังกล่าวกลับมีผลให้การละลายได้ของหินฟอสเฟตเกิดได้ดียิ่งขึ้น [22] และเมื่อมีการใช้ร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตก็ช่วยส่งผลเชิงบวกเนื่องจากจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตจะมีส่วนสำคัญในการช่วยละลายฟอสฟอรัสในหินฟอสเฟตออกมา [23] ซึ่งอาจเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ตำรับทดลองที่มีการใส่หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (RP_{50}+PSMs และ RP_{100}+PSMs) ให้ผลผลิตฟ้าทะลายโจรสูงกว่าตำรับที่มีการใส่หินฟอสเฟตหรือจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว

Science33-N5.indd 15 8/11/2568 15:55:12

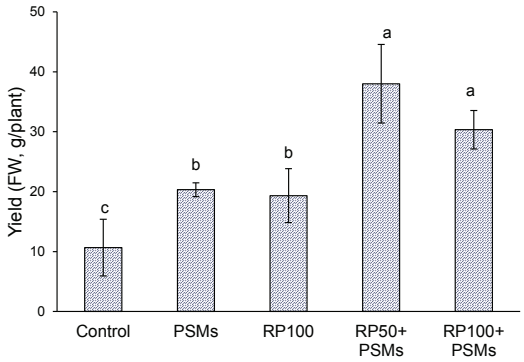


Figure 1 Influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms on yields of Kalmegh.

3.2 รูปของฟอสฟอรัส

รูปของฟอสฟอรัสในดินอาจพิจารณาหลัก ๆ ได้เป็นฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ ฟอสฟอรัสอินทรีย์ และฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดินซึ่งอาจเป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในโครงสร้างของหินหรือแร่ดังแสดงใน Table 3 โดยพบว่าการใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตมีผลให้ฟอสฟอรัสในรูปที่ได้กล่าวมาข้างต้นและผลรวมของฟอสฟอรัสทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตำรับทดลองที่มีการใส่หินฟอสเฟตส่งผลให้ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในตำรับทดลอง RP_{100} ให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสฟอรัสอนินทรีย์สูงที่สุด (357±17.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับตำรับ RP_{100}+PSMs (351±22.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้ตำรับที่มีการใส่หินฟอสเฟต (RP_{100}, RP_{50}+PSMs และ RP_{100}+PSMs) ให้ค่าฟอสฟอรัสอินทรีย์ระหว่าง 221±10.7 ถึง 248±54.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าตำรับที่ไม่มีการใส่หินฟอสเฟต (Control และ PSMs) ซึ่งให้ค่าฟอสฟอรัสอินทรีย์ประมาณ 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเท่านั้น และเมื่อพิจารณาปริมาณผลรวมของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินพบว่าตำรับทดลอง RP_{100} และ RP_{100}+PSMs ให้ปริมาณผลรวมฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินสูงสุดใกล้เคียงกัน (1353±49.1 และ 1377±33.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) ทั้งนี้ผลการทดลองชี้ให้เห็นชัดเจนว่าการใช้หินฟอสเฟตส่งผลให้ฟอสฟอรัสในรูปต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตซึ่งส่วนหนึ่งอาจมีผลมาจากสมบัติของดินที่ใช้ทดลองซึ่งอยู่ในกลุ่มของดินกรดกำมะถัน ระดับพีเอชของดินเป็นดินกรดจัดรุนแรงมาก (pH 4.65, Table 1) [24] ลักษณะเช่นนี้จะส่งเสริมให้หินฟอสเฟตที่ใส่ลงไปมีการละลายได้เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Yampracha et al. [8] กล่าวว่าในดินกรดกำมะถันการละลายได้ของหินฟอสเฟตจะมีค่าสูงกว่าดินทั่วไป เนื่องจากหินฟอสเฟตละลายได้ดีในดินที่มีสภาพเป็นกรด ภายหลังการละลายของหินฟอสเฟตจะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสไอออนออกมา ซึ่งฟอสฟอรัสบางส่วนจะถูกตรึงเนื่องจากดินกรดกำมะถันมีเหล็กและอะลูมินัมที่ละลายได้ในสารละลายดินมาก [5] ฟอสฟอรัสจะจับกับเหล็กและอะลูมินัมในดินเกิดเป็น Fe-P และ Al-P ส่งผลให้ฟอสฟอรัสในสารละลายดินมีค่าลดลง ดังนั้นฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจึงมีค่าลดลงด้วย ขณะที่การใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตก็มีส่วนช่วยเพิ่มฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ได้เช่นกันเมื่อเทียบกับตำรับควบคุมแต่ยังมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้หินฟอสเฟต ส่วนหนึ่งอาจเพราะพีเอชของดินที่เป็นดินกรดจัดรุนแรงมากซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการจำกัดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [25] จึงทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสฟอรัสอนินทรีย์มีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าตำรับที่ใส่หินฟอสเฟต

Science33-N5.indd 16 8/11/2568 15:55:13

Table 3 Phosphorus fractions as an influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms

Treatments	Soil P fractions (mg/kg)			
	Inorganic P[1/]	Organic P[1/]	Residual P[1/]	Cumulative P[1/]
Control	127±9.2[d]	180±26.4[b]	644±47.8[b]	951±77.9[c]
PSMs	150±8.6[c]	180±13.3[b]	633±39.7[b]	963±31.1[c]
RP_{100}	357±17.4[a]	221±10.7[a]	775±28.2[a]	1,353±49.1[ab]
RP_{50} + PSMs	269±15.7[b]	232±17.0[a]	787±4.6[a]	1,287±35.6[b]
RP_{100} + PSMs	351±22.8[a]	248±54.2[a]	777±71.6[a]	1,377±33.2[a]
P-value	<0.001	0.037	<0.001	<0.001
CV (%)	6.6	12.2	6.9	3.9

[1/] Means within the same column followed by the same letters indicate no significant difference among treatments using DMRT at $p<0.05$.

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในดินภายใต้การใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 2) โดยสามารถจำแนกฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในรูปต่าง ๆ ได้เป็นฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (Soluble P) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะอยู่กับอะลูมินัม (Al-P) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็ก (Fe-P) และฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมในดิน (Ca-P) โดยในภาพรวมของผลการทดลองพบว่า ตำรับทดลอง RP_{100}+PSMs ให้ค่าฟอสฟอรัสในสารละลายดินและฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับอะลูมินัมสูงที่สุด (16.3±6.67 และ 91.4±3.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) (Figure 2A และ 2B) นอกจากนี้ยังพบว่าตำรับทดลองดังกล่าวให้ค่าฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กสูงที่สุดเช่นกัน (84.7±7.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับตำรับ RP_{100} (77.7±0.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Figure 2C) ในส่วนของฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมพบว่า ตำรับ RP_{100} ให้ค่าสูงที่สุด (194±14.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ทั้งนี้ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากตำรับ RP_{100}+PSMs (159±11.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Figure 2D) จากรายงานของ Chulo et al. [16] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลำดับส่วนของฟอสฟอรัสในดินที่ได้รับอิทธิพลจากการใส่ปูนในพื้นที่ทางตอนใต้ของประเทศเอธิโอเปียพบว่า การใส่ปูนมีผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียม และฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในครั้งนี้ โดยตำรับที่มีการใส่หินฟอสเฟตอัตราสูงสุด (100 กรัมต่อกระถาง) ให้ค่าฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ (Figure 1A) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียม (Figure 1D) และฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดิน (Table 1) สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าตำรับทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มให้ค่าฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมินัม (Fe-P และ Al-P) มีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเพราะการใส่หินฟอสเฟตในดินกรดกำมะถันมีผลให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสไอออนออกมามาก ขณะเดียวกันในดินดังกล่าวมักมีรายงานถึงการละลายได้ของเหล็กและอะลูมินัมในปริมาณมากกว่าดินทั่วไป ดังนั้นฟอสฟอรัสไอออนจึงมีโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กและอะลูมินัมได้มาก [4, 5] ส่งผลให้ตรวจพบฟอสฟอรัสใน

Science33-N5.indd 17 8/11/2568 15:55:13

รูปที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมินัมสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้ฟอสฟอรัสบางส่วนที่ละลายออกมาถูกตรึงไว้ในรูปของ Fe-P และ Al-P ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ ทั้งนี้หากสภาพแวดล้อมทางดินเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น พีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้น ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปดังกล่าวก็มีโอกาสถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูป Soluble P ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับพืชต่อไป

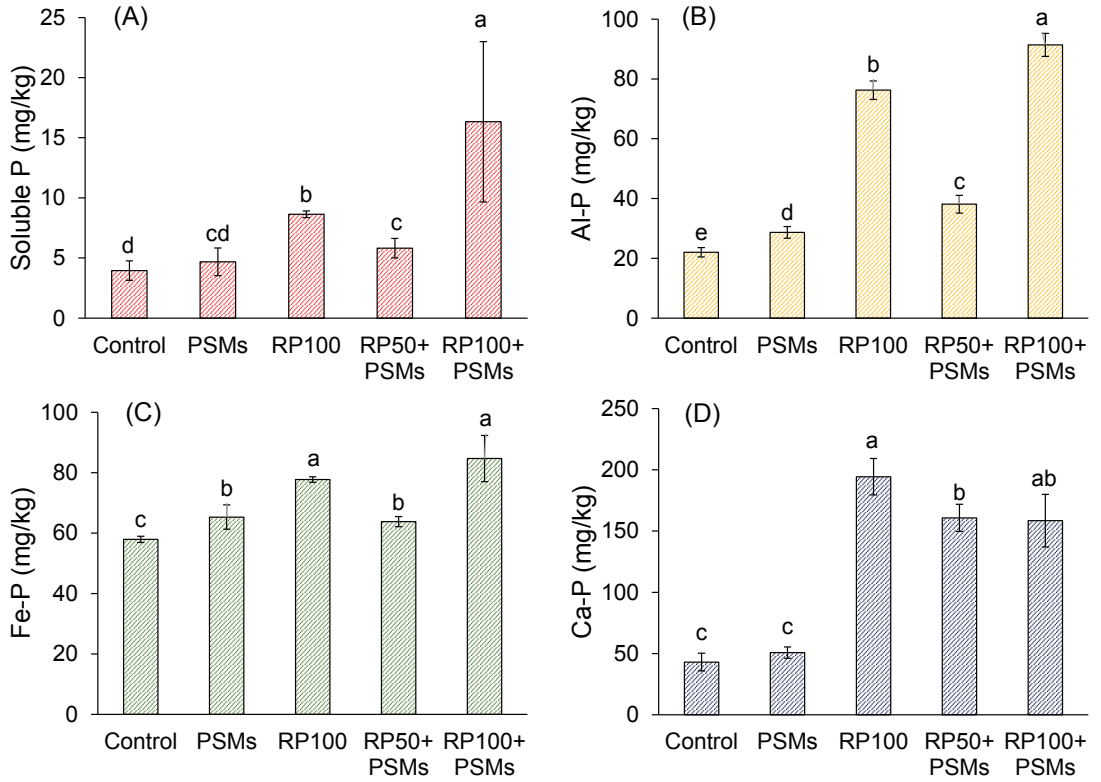


Figure 2 Influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms on phosphorus in various forms in the soil; A) soluble P, B) aluminum P, C) iron P, and D) calcium P.

ในส่วนของฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมในดินภายใต้อิทธิพลของการใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 2) โดยสามารถจำแนกฟอสฟอรัสในรูปดังกล่าวได้เป็นสามรูปประกอบด้วย ไดแคลเซียมฟอสเฟต (Ca_2-P) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต (Ca_8-P) และอะพาไทต์ (Ca_{10}-P) จากผลการทดลองพบว่า ตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตสูงที่สุด (17.4±0.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) รองลงมาคือตำรับ RP_{100} (10.5±0.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Figure 3A) ด้านฟอสฟอรัสในรูปออกตะแคลเซียมฟอสเฟตและอะพาไทต์ (Figure 3B และ 3C) พบว่าตำรับ RP100 ให้ค่าสูงที่สุด (63.6±3.56 และ 120±12.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) ขณะที่ตำรับควบคุมซึ่งไม่มีการใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตให้ค่าฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมทั้งสามรูปต่ำที่สุด (6.16±1.39, 15.3±2.35 และ 21.6±6.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) จากรายงานของ Nourgholipour et al. [17] กล่าวว่า Ca_2-P เป็นหนึ่งในรูปของฟอสฟอรัสที่ละลายได้ในดินและมีโอกาสถูกพืชดูดใช้ได้ง่าย และจาก

Science33-N5.indd 18 8/11/2568 15:55:13

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้หินฟอสเฟตในอัตราสูงสุดของการทดลองร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตมีส่วนสำคัญในการเพิ่มฟอสฟอรัสในรูป Ca_2-P (รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช) ขณะที่การใช้หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว (RP_{100}) ให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูป Ca_{10}-P สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากไม่มีการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ฟอสฟอรัสที่ละลายออกมาจากหินฟอสเฟตจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของอะพาไทต์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นรูปที่พืชไม่สามารถดูดไปใช้ได้ [26] ขณะที่ออกตะแคลเซียมฟอสเฟตถูกระบุว่าเป็นแหล่งสำรองฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่สำคัญในดิน ทั้งนี้การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ เช่น $Ca(H_2PO_4)_2$ หรือ KH_2PO_4 เมื่อใส่ปุ๋ยเหล่านี้ลงสู่ดิน ฟอสฟอรัสบางส่วนในปุ๋ยจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปออกตะแคลเซียมฟอสเฟตเนื่องจากเกิดการสูญเสีย $H_2PO_4^-$ และ H_2O ออกไป และสารชนิดนี้ถือเป็นสารตั้งต้นในการเปลี่ยนฟอสฟอรัสไปสู่รูปของแร่อะพาไทต์ในดิน [27]

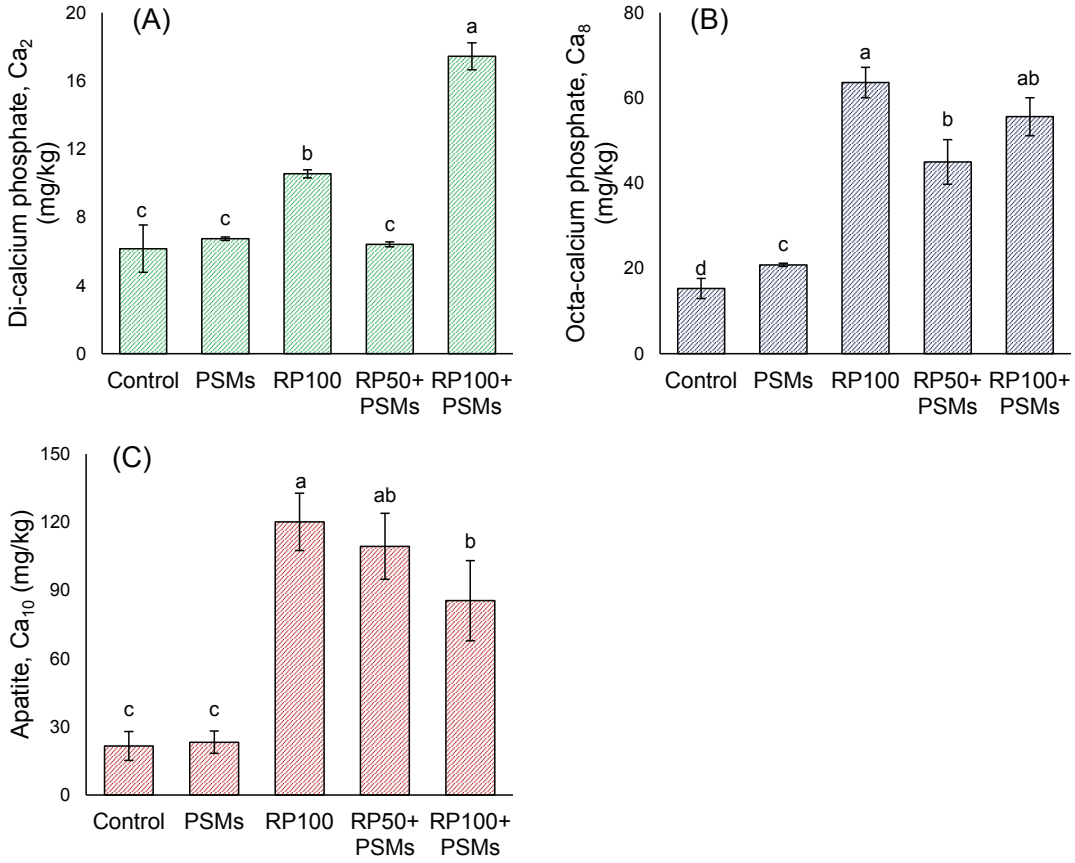


Figure 3 Influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms on various forms of calcium phosphate in the soil; A) di-calcium phosphate (Ca_2), B) octa- calcium phosphate (Ca_8), and C) apatite (Ca_{10}).

Science33-N5.indd 19 8/11/2568 15:55:13

และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การกระจายของฟอสฟอรัสในรูปต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา (Figure 4) พบว่าประมาณ 56-67 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน โดยตำรับควบคุมให้ค่าดังกล่าวสูงที่สุด ตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าฟอสฟอรัสในรูปที่อยู่ในสารละลายดินสูงที่สุด (1.19 เปอร์เซ็นต์) ขณะที่ตำรับทดลองอื่น ๆ ให้ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.42-0.64 เปอร์เซ็นต์ การใช้หินฟอสเฟตส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับอะลูมินัม เหล็กและแคลเซียม โดยตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 6.64, 6.15 และ 11.5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตำรับ RP_{100} ให้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 5.64, 5.64 และ 14.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีรายงานหลายฉบับระบุว่าฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน [28, 29] และจากผลการทดลองชี้ให้เห็นชัดเจนว่าการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตสามารถลดเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสในรูปที่ตกค้างในดินลงเมื่อเทียบกับตำรับควบคุม นอกจากนี้ยังส่งผลให้ฟอสฟอรัสในรูป Soluble P และ Ca_2-P ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีค่าเพิ่มขึ้น (ประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์) โดยผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับรายงานของ Kiflu et al. [28] ซึ่งศึกษารูปและความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสภายใต้การใส่ปูนในอัตราที่แตกต่างกันในดินประเทศเอธิโอเปียพบว่า ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ของดินที่ศึกษามีค่าระหว่าง 1.2-4.5 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน

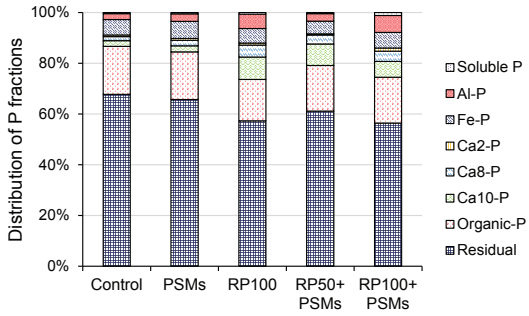


Figure 4 Influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms on the distribution of phosphorus fractions in the soil

3.2 ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส

ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสพิจารณาจากฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available P) และความสามารถในการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดินจากรูปฟอสฟอรัสทั้งหมดมาเป็นฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (PAC) (Table 4) จากผลการทดลองพบว่าการใช้หินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าดังกล่าวสูงที่สุด (74.3±0.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติจากตำรับ RP_{100} (71.0±0.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Table 4 Available phosphorus and phosphorus activation coefficient (PAC) under the influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms

Treatments	Available P (mg/kg)[1/]	PAC (%)[1/]
Control	19.7±1.01[d]	2.06±0.07[d]
PSMs	30.4±0.70[c]	2.19±0.06[d]
RP_{100}	71.0±0.67[a]	5.46±0.12[b]
RP_{50} + PSMs	50.4±4.23[b]	3.22±0.08[c]

Science33-N5.indd 20 8/11/2568 15:55:13

Table 4 Available phosphorus and phosphorus activation coefficient (PAC) under the influence of rock phosphate and phosphate-solubilizing microorganisms (Continue)

Treatments	Available P (mg/kg)[1/]	PAC (%)[1/]
RP_{100} + PSMs	74.3±0.51[a]	7.67±0.23[a]
P-value	<0.001	<0.001
CV (%)	4.1	3.4

[1/] Means within the same column followed by the same letters indicate no significant difference among treatments using DMRT at p<0.05.

ในส่วนของค่า PAC พบว่าตำรับที่มีการใช้หินฟอสเฟตให้ค่า PAC สูงกว่าตำรับควบคุมและตำรับที่ใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว (PSMs) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตำรับ RP_{100}+PSMs ให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 7.67±0.23 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือตำรับ RP_{100}, RP_{50}+PSMs, PSMs และตำรับควบคุม ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Utomo [30] ศึกษาการใช้หินฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดและปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ในดินประเทศอินโดนีเซียพบว่า การใช้หินฟอสเฟตอัตรา 50-200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่งผลให้ดินหลังปลูกข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้เพิ่มขึ้นประมาณ 3-11 เท่า เช่นเดียวกันกับรายงานของ Kiflu et al. [28] ที่ระบุว่าการใส่ปูนในอัตราเพิ่มขึ้น (ประมาณ 3-10 ตันต่อเฮกตาร์) ส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นประมาณ 0.5-4 เท่าเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ใส่ปูน และยังมีผลให้ค่า PAC เพิ่มขึ้นประมาณ 1.6-4.3 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีรายงานบางฉบับที่ระบุว่าการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และค่า PAC ในดินได้ เช่น รายงานของ Sukyankij et al. [9] ที่พบว่าการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตในดินกรดจัดเทียมของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และค่า PAC เพิ่มขึ้นประมาณ 142 และ 141 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. สรุป

จากผลการทดลองการสกัดเพื่อแยกรูปของฟอสฟอรัสในดินที่ได้รับอิทธิพลจากหินฟอสเฟตและจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตสรุปได้ว่า ในดินกรดกำมะถัน การใช้หินฟอสเฟตส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตำรับควบคุมและตำรับที่ใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว โดยการใส่หินฟอสเฟตอัตรา 100 กรัมต่อกระถางร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตส่งผลให้ฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมินัม รวมทั้งฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้กรรมวิธีดังกล่าวยังส่งผลให้ฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งเป็นรูปหนึ่งของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณสูงที่สุดด้วย ด้านผลผลิตฟ้าทะลายโจร การใส่หินฟอสเฟตอัตรา 50 และ 100 กรัมต่อกระถางร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตให้ผลผลิตน้ำหนักสดของฟ้าทะลายโจรสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ ทั้งนี้การใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวในดินที่มีค่าพีเอชต่ำมาก ๆ เช่นดินกรดกำมะถันที่ทำการศึกษาในครั้งนี้อาจไม่เหมาะสมมากนัก เนื่องจากสภาพพีเอชดินที่ต่ำจะเป็นปัจจัยสำคัญในการขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ขณะที่การใช้หินฟอสเฟตซึ่งจัดเป็นวัสดุปูนชนิดหนึ่งจะมีส่วนสำคัญในการช่วยปรับสภาพพีเอชดินให้เข้าใกล้ความเป็นกลาง ซึ่ง

Science33-N5.indd 21 8/11/2568 15:55:13

ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตเป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีการตรึงฟอสฟอรัสสูงเช่นดินกรดกำมะถัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental fund ของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประจำปีงบประมาณ 2567 เลขที่สัญญารับทุน FF2567/4

6. References

[1] Division of Soil Survey and Soil Resource Research., Soil Map of Phranakhon Si Ayutthaya Province, Available Source: http://oss101.ldd.go.th/web_thaisoilinf/central/Ayutthaya/ay_map/ay_series/ay_series58.html, July 17, 2019. (in Thai)

[2] Sukitprapanon, T., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Anusontpornperm, S. and Gilkes, R.J., 2015, Forms of acidity in potential, active and post-active acid sulfate soils in Thailand, Thai J. Agric. Sci. 48(3): 133-146.

[3] FAO., FAO Soils Portal: Acid Soils, Available Source: https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/acid-soils/en/, March 17, 2025.

[4] Sukyankij, S., Sukyankij, S. and Panich-pat, T., 2023, Effect of co-fertilizer application and dolomite amendments on yield and grain quality of rice grown on post-active acid sulfate soil, Agrivita J. Agric. Sci. 45(2): 311-321.

[5] Sukyankij, S., Sukyankij, S., Khongsud, C. and Panich-pat, T., 2024, Effect of lime application on phosphorus adsorption and desorption in post-active acid sulfate soil, Thailand, J. Degraded Min. Lands Manag. 11(2): 5279-5286.

[6] Duangpatra, P., 2013, Soil Conditioners, 2nd Ed., Kasetsart University Press, Bangkok, 256 p. (in Thai)

[7] Sukyankij, S., Sawatdikarn, S., Samithiarporn, S. and Panich-pat, T., 2021, Effects of lime material and waterlogging period on availability of phosphorus and yield of Hom Pathum rice in soils of Phranakhon Si Ayutthaya province, Khon Kaen Agric. J. 49(4): 842-855. (in Thai)

[8] Yampracha, S., Attanandana, T., Sidibe-Diarra, A. and Yost, R.S., 2005, Predicting the dissolution of rock phosphates in flooded acid sulfate soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 69(6): 2000-2011.

[9] Sukyankij, S., Phun-iam, M. and Panich-pat, T., 2024, Response of green chiretta to different bio-fertilizers and their effect on phosphorus availability in the soil, J. Degraded Min. Lands Manag. 11(3): 5865-5873.

Science33-N5.indd 22 8/11/2568 15:55:13

[10] Thomas, G.W., 1996, Soil pH and Soil Acidity, pp. 475-490, In Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

[11] Rhoades, J.D., 1996, Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids, pp. 471-435, In Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

[12] Walkley, A. and Black, I.A., 1934, An examination of degtjareff methods for determining soil organic matter, and a proposed for modification of the chromic acid titration method, Soil Sci. 37: 29-38.

[13] Bray, R.H. and Kurtz, L.T., 1945, Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils, Soil Sci. 59: 39-46.

[14] Thomas, G.W., 1982, Exchangeable Cations, pp. 159-165, In Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin.

[15] Gee, G.W. and Bauder, J.W., 1986, Particle-size Analysis, pp. 383-411, In Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

[16] Chulo, F., Laekemariam, F. and Kiflu, A., 2021, Changes in soil phosphorus pools and chemical properties under liming in Nitisols of Farawocha, South Ethiopia, Appl. Environ. Soil Sci. Article. 2021(1): 1-11.

[17] Nourgholipour, F., Hosseini, H.M., Tehrani, M.M., Motesharezadeh, B., Moshiri, F. and Mousavi, S.M., 2022, Phosphorus fractionation affected by root induced changes of two canola cultivars, Eurasian Soil Sci. 55(6): 819-829.

[18] Kuo, S., 1996, Phosphorus, pp. 869-919, In Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

[19] Bowman, R.A. and Moir, J.O., 1993, Basic EDTA as an extraction for soil organic phosphorus, Soil Sci. Soc. Am. J. 57(6): 1516-1518.

[20] Yang, X., Chen, X. and Yang, X., 2019, Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China, Soil Tillage Res. 187: 85-91.

Science33-N5.indd 23 8/11/2568 15:55:13

[21] Basak, B.B. and Gajbhiye, N.A., 2018, Phosphorus enriched organic fertilizer, an effective P source for improving yield and bioactive principle of Senna (Cassia angustifolia Vhal.), Ind. Crops Prod. 115: 208-213.

[22] Mala, T., 2007, Organic Fertilizer and Biofertilizer: Production Techniques and Uses, 2nd Ed., Kasetsart University Press, Bangkok, 300 p. (in Thai)

[23] Asuming-Brempong, S. and Anipa, B., 2014, The use of rock phosphate and phosphate solubilising fungi (Aspergillus niger) to improve the growth and the yield of upland rice on typic Kandiudalf, West African J. Appl. Ecology 22(1): 27-39.

[24] FAO Project Staff and Land Classification Division, 1973, Soil Interpretation Handbook for Thailand, Land Classification Division, Department of Land Development, Bangkok, 169 p.

[25] Suwannarit, A., 2010, Fertilizer, Agriculture and Environment, 3 th Ed., Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)

[26] Bai, S., Ran, J., Zhang, Z., Wei, M., Zhang, H. and Jiang, X., 2023, Phosphorus speciation and colloidal phosphorus responses to short-term cessation of fertilization in a lime concretion black soil, Pedosphere. 33(6): 948-959.

[27] Idini, A. and Frau, F., 2025, The precursor of apatite: Octacalcium phosphate (OCP) in the earth and environmental sciences - A review, Earth-Sci. Rev. 261: 105044.

[28] Kiflu, A., Beyene, S. and Jeff, S., 2017, Fractionation and availability of phosphorus in acid soils of Hagereselam, Southern Ethiopia under different rates of lime, Chem. Biol. Technol. Agric. 4: 21.

[29] Kashem, M.A., Akinremi, O.O. and Racz, G.J., 2003, Phosphorus fractions in soil amended with organic and inorganic phosphorus sources, Can. J. Soil Sci. 84(1): 83-90.

[30] Utomo, M., 1995, Effect of rock phosphate on soil properties and apparent phosphorus recovery in acid soil of Sumatra, Plant Soil. 171: 199-202.

Science33-N5.indd 24 8/11/2568 15:55:13