



การละลายได้ของหินฟอสเฟตและอิทธิพลของซีโอไลต์ ซิลิกาต่อการละลายได้ของ
หินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน

**Solubility of Phosphate Rocks and the Effect of Zeolite and Silica on Phosphate
Rocks Solubility in Acid Upland Soils**

อัสภรณ์ ขวัญนุ้ย

Apassaporn Khwannui

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Soil Resources Management
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การละลายได้ของหินฟอสเฟตและอิทธิพลของซีโอไลต์ ซิลิโคนต่อ การละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ค่อน
ผู้เขียน	อพัศภรณ์ ขวัญนุ้ย
สาขาวิชา	การจัดการทรัพยากรดิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร จาญพจน์)ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.สุมิตรา ภู่วโรดม)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร จาญพจน์)
กรรมการ (ดร.ขวัญตา ขาวมี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ
ทรัพยากรดิน

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร จาตุพนธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(อพัศกรณ์ ขวัญนุ้ย)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(อพัศกรณ ขวัญนุ้ย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การละลายได้ของหินฟอสเฟตและอิทธิพลของซีโอไลต์ ซิลิโคนต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอง
ผู้เขียน	นางสาว อพัสภรณ์ ขวัญนุ้ย
สาขาวิชา	การจัดการทรัพยากรดิน
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ปุ๋ยหินฟอสเฟต (Phosphate Rock, PR) ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มระดับฟอสฟอรัสในดินให้เพียงพอต่อความต้องการของไม้ผลไม้ยืนต้นที่ปลูกในดินกรดที่ดองที่มีการขาด P อย่างรุนแรงในภาคใต้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของปุ๋ยหินฟอสเฟตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีความผันแปรค่อนข้างมากตามแหล่งที่มา ดังนั้น การศึกษาการละลายได้ (solubility) ของปุ๋ยหินฟอสเฟตที่มีขายในท้องตลาด และศึกษาสภาพการละลายได้เมื่อใส่ลงไปดินกรดที่ดอง เพื่อให้สามารถเลือกใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษา 1) ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟตที่จำหน่ายในท้องตลาด 2) ศึกษาสารสกัดเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตที่มีขายในท้องตลาด 3) ศึกษาสภาพการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอง 4) ศึกษาอิทธิพลของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิมมัลด้วย NH_4^+ และซิลิโคนต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดองที่สำคัญในภาคใต้

การศึกษานี้สกัดตัวชี้วัดความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟต ใช้หินฟอสเฟตจำนวน 8 ตัวอย่าง สกัดด้วยสารสกัด 3 ชนิด ได้แก่ 2% Citric acid (CA), 2% Formic acid (FA) และ Neutral ammonium citrate (NAC) และเปรียบเทียบระดับการละลายได้กับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ส่วนการทดสอบสภาพของหินฟอสเฟต และอิทธิพลของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิมมัลด้วย NH_4^+ และซิลิโคน ที่ใส่ร่วมกับหินฟอสเฟตจำนวน 2 ตัวอย่าง ที่ผ่านเกณฑ์การละลายได้สูงในสารสกัด 2% CA มาบ่มในดินกรดที่ดองที่มีระดับการดูดซับ P แตกต่างกัน 3 ชุดดิน ได้แก่ชุดดิน คอหงส์ (Kh), อ่าวลึก (Ak) และกระบี่ (Kbi) ในสภาพความจุความชื้นสนาม และทำการชะดินด้วยน้ำกลั่นทุกๆ

3, 10 และ 25 วัน เก็บตัวอย่างสารละลาย และตัวอย่างดิน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ P ในสารละลายและปริมาณที่ละลายได้ใน 2% CA ในระยะเวลาการบ่มที่ 36 และ 80 วัน

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหินฟอสเฟตโดยวิธี XRD/XRF พบว่า องค์ประกอบหลักหินฟอสเฟตเป็นแร่ hydroxyapatite มาจากแหล่งมูลค้างคาว (guano deposit) และหินฟอสเฟตจำนวน 2 ใน 4 ตัวอย่างมีปริมาณ P_2O_5 ทั้งหมดต่ำมากไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง และ

พบว่า สาร สารสกัด 2% CA สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดศักยภาพความเป็นประโยชน์ของตัวอย่างหินฟอสเฟตได้ดีกว่าสารสกัด 2% FA และ NAC.

เมื่อบ่มหินฟอสเฟตที่มีการละลายได้สูงใน 2%CA สองตัวอย่าง (PR1 และ PR2) ในดินกรดที่ค่อนข้าง 3 ชุดดิน พบว่า ความเข้มข้นของ P ในสารชะละลายส่วนใหญ่อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (เฉลี่ย $< 5 \text{ mg P kg}^{-1}$) ไม่แตกต่างจากระดับ P ในดินดั้งเดิม ยกเว้น PR1 มีการละลายได้สูงสุด ($> 10 \text{ mg P kg}^{-1}$) ในชุดดิน Kh อย่างไรก็ตาม ระดับ P ในดินที่สกัดด้วย 2%CA สูงกว่าค่ารับควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในช่วงการบ่ม 36 วัน การใส่ซีโอไลต์ร่วมกับหินฟอสเฟต มีผลต่อปริมาณ P ที่ละลายได้ใน 2% CA เพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่หินฟอสเฟตอย่างเดียว แต่การเพิ่มขึ้นแตกต่างกันตามชนิดของหินฟอสเฟต และชนิดของดิน และซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ P ในทุกดิน โดยเฉพาะในดินซึ่งมีความจุในการดูดซับ P สูง (ชุดดิน Ak และ Kbi) ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาค H_2PO_4^- ที่ได้จากปฏิกิริยาการละลายของหินฟอสเฟต ถูกดูดซับโดยดิน และ Ca^{2+} ที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนกับ NH_4^+ ในซีโอไลต์ ทำให้หินฟอสเฟตสามารถละลายได้อย่างต่อเนื่อง ในกรณีของซิลิคอนที่ใส่ร่วมกับหินฟอสเฟต พบว่ามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ P ที่เป็นประโยชน์แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของหินฟอสเฟต และมีปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ในระดับที่ต่ำกว่าการใส่ซีโอไลต์ ผลการศึกษาข้างต้นมีประโยชน์ในการจัดการการใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟตให้มีประสิทธิภาพในดินกรดที่ค่อนข้างในภาคใต้

Thesis Title	Solubility of Phosphate Rocks and the Effect of Zeolite and Silica on Phosphate Rocks Solubility in Acid Upland Soils
Author	Miss Apassaporn Khwannui
Major Program	Soil Resources Management
Academic Year	2013

Abstract

Direct application of Phosphate rock (PR) has long been recommended for rubber and fruit crops in acid upland soils of southern Thailand. However, the PRs that available in the market varied considerably in their agronomic effectiveness. A rapid method of testing the reactivity of PRs, hence, is needed for the effective used of PR. The objectives of the study were to determine 1) Mineral compositions of phosphate rock available in the market. 2) The suitable extractants for PR solubility testing. 3) The effects of zeolite, NH_4^+ -saturated zeolite and silicon on the solubility of PR in acid upland soils with different P buffer capacity.

The composition of 4 PR samples were analyzed using XRD/XRF and the reactivity of 8 PRs were extracted using 3 standard extractants namely, 2% Citric acid (FA), 2% Formic acid (FA) and Neutral ammonium citrate (NAC), the extracted P level were ranged according to the PR potential thresholds. An incubation study was undertaken to determine if zeolite, and NH_4^+ -saturated zeolite or Si in combination with PR could significantly enhance the solubility of 2 PR. The zeolite, NH_4^+ -saturated zeolite with PR mixture (ratio 7:1) or Si/PR mixture (ratio 8:1) were incubated with 3 different P buffer capacity acid upland soils. The increases of soluble P in water leached at 3, 10 and 25 days intervals, and amount of P in 2%CA extract from the soil samples were determined at 36 and 80 days incubation period.

The minerals composition of 4 PR samples from XRD/XRF results, indicated that PR samples mainly consisted of hydroxyapatite of guano deposit, and the total P_2O_5 in 2 out of 4 PR sample were very low and not suitable for direct application. The 2% CA was found to be a suitable extractant for PR reactivity test.

The leached P_2O_5 concentration of the 2 PR samples, with high solubility level as indicated by 2%CA, were relatively low in most of the soils (average $< 5 \text{ mg P kg}^{-1}$), except PR1 has highest P_2O_5 concentration of ($> 10 \text{ mg P kg}^{-1}$) in Kh soil. However, the P_2O_5 concentrations extracted by 2%CA were significant higher than control treatments. The adding of zeolite and NH_4^+ -saturated zeolite enhanced the higher P level of 2%CA extract than PR alone at 36 days incubation. The extent of the increase in P level differed in different types of PR and soils, with the strongest effect found in high phosphorus buffer capacity (Ak and Kbi) soils. This was due to the dissolved P and Ca^{2+} from PR being removed by soil and by zeolite respectively, and as a result, PR was allowed to be continuously dissolved. Increase in P availability was also observed in the PR/Si treatment, but the increase was lower than the effect of PR/zeolite treatment. The results of this study are useful for the management of PR application in acid upland soil of the regions.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(13)
บทที่	1
1. บทนำ	1
บทนำตั้งเรื่อง	3
การตรวจเอกสาร	29
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	30
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	30
อุปกรณ์และเครื่องมือในภาคสนาม	30
ชุดดิน ปุ๋ย และสารปรับปรุงดินที่ใช้ทดลอง	30
วิธีดำเนินการวิจัย	31
3. ผลการทดลอง และวิจารณ์	36
4. สรุปและข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	55
ประวัติผู้เขียน	63

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1	3
2	4
3	5
4	9
5	11
6	11
7	12
8	13
9	13
10	15
11	22
12	23
13	24
14	33
15	34
16	35
17	37
18	38

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
19	ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid, 2% Formic acid และ 1M Neutral ammonium citrate	40

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1 การเปลี่ยนแปลงของฟอสเฟตเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	17
2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหินฟอสเฟตที่ใส่เชื้อ <i>Aspergillus tubingensis</i> และ <i>Aspergillus niger</i> ต่อการละลายฟอสเฟต	18
3 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน	19
4 แสดงการละลายของฟอสฟอรัสในอัตราต่าง ๆ ของซีโอไลต์ต่อหินฟอสเฟต	24
5 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอน	25
6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณซิลิคอนในสารละลายดิน	26
7 การเปรียบเทียบผลของการใช้ฟอสฟอรัสในการปรากฏตัว และการขาดซิลิคอนที่มีต่อผลผลิตข้าว	27
8 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ชะละลายด้วยน้ำกลั่น	41
9 ผลรวมของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 25 วัน	42
10 ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid เป็นเวลา 36 และ 80 วัน	43
11 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นของ PR1	45
12 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นของ PR2	46
13 ผลรวมของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 25 วัน	48
14 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid ที่บ่มในดินเป็นเวลา 36 วัน	49
15 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid ที่บ่มในดินเป็นเวลา 80 วัน	51
16 ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid เป็นเวลา 36 และ 80 วัน	52

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำสั้นเรื่อง

ประเทศไทยมีพื้นที่ดินกรดประมาณ 143 ล้านไร่ คิดเป็น 44 % ของพื้นที่ทั้งประเทศ และภาคใต้มีประมาณ 27 ล้านไร่คิดเป็น 18 % ของพื้นที่ดินกรดทั้งหมด (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2549) และพื้นที่ดินกรดที่ดอน ประมาณ 15 ล้านไร่คิดเป็น 55 % ของพื้นที่ดินกรดในภาคใต้ทั้งหมด (เอิบ, 2533) ดินกรดที่ดอนในภาคใต้พบในอันดับอัลติซอลส์เป็นส่วนใหญ่ เป็นดินที่มีการพungสลายตัวมานาน ดินมีการชะละลายสูง ทำให้ธาตุอาหารแคตไอออนสภาพเบสในดินน้อยมาก ปริมาณแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchange cation) ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรืออะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในรูปต่าง ๆ สะสมอยู่ในดิน ดินเหล่านี้จะพบปัญหาของการขาดธาตุฟอสฟอรัสอย่างรุนแรง การใส่ฟอสฟอรัสในรูปของปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้ง่าย จะทำปฏิกิริยาตกตะกอน และถูกตรึงกับสารประกอบพวก เหล็ก อะลูมิเนียมที่มีอยู่มากในดิน ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์กับพืช

การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปของหินฟอสเฟต (PR) ซึ่งมีแหล่งผลิตภายในประเทศ และราคาถูกกว่าการใส่ฟอสฟอรัสในรูปของปุ๋ยเคมี มีส่วนช่วยลดการตรึงของฟอสฟอรัสในดินได้ โดยการปลดปล่อยออกมาช้า ๆ แต่ในสภาพของดินทั่วไปมักพบว่าการละลายของฟอสฟอรัสจากหินฟอสเฟตมักจะช้าเกินไป ไม่เพียงพอ และทันต่อความต้องการของพืชเศรษฐกิจที่มีอายุสั้น อย่างไรก็ตาม ในสภาพดินกรดที่ดอนในเขตร้อนชื้น พบว่า ประสิทธิภาพของปุ๋ยหินฟอสเฟต (agronomic effectiveness) อาจจะใกล้เคียงกับปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้ง่าย (Hammond *et al.*, 1986) นอกจากนี้ การใส่ปุ๋ยหินฟอสเฟตยังช่วยรักษาระดับ pH ของดินและลดความเป็นพิษของธาตุอะลูมิเนียม (Sikora and Giordano, 1995)

ซีโอไลต์เป็นกลุ่มแร่อะลูมิโนซิลิเกตซึ่งมีค่า CEC สูง ($100-300 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$) (Deer *et al.*, 1973) มีพื้นที่ผิวสูงมาก สามารถดูดซับแคตไอออนต่าง ๆ ได้ดี และเพิ่มการละลายได้ของหินฟอสเฟต โดยทำหน้าที่ในการดูดซับและลดระดับการอิมมัตวของแคลเซียม (Ca^{2+}) ที่ได้จากการละลายของหินฟอสเฟตในสารละลายดิน ชักนำไปทำปฏิกิริยาการละลายของหินฟอสเฟตเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง (Barbarick *et al.*, 1990)

ซิลิคอน (Si) ในรูป H_2SO_4 มีส่วนช่วยเพิ่มผลผลิตเมื่อใส่ให้กับพืชหลายชนิด เช่น ข้าว อ้อย และ หนุ่ย (จรงค์ และคณะ, 2544) ซิลิคอนมักจะมีการนำมาใช้ในรูปเม็ด หรือบดให้ละเอียด เมื่อใส่ซิลิคอนลงไปดิน พบว่า มีส่วนช่วยลดอัตราการตรึงฟอสฟอรัสในดิน เพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และการดูดกินฟอสฟอรัสในพืช (Suchisa *et al.*, 1963) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการแย่งที่กันระหว่างอนุมูลซิลิเกตซึ่งมีประจุลบเช่นเดียวกับอนุมูลฟอสเฟต โดยที่อนุมูลซิลิเกตจะเข้าไปแทนที่อนุมูลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับไว้ (Silva, 1971; Haynes 1984)

ดังนั้น การศึกษาศักยภาพในการใช้หินฟอสเฟตร่วมกับซีโอไลต์ และซิลิคอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดองและการละลายได้ของหินฟอสเฟต น่าจะช่วยแก้ไขปัญหการใช้หินฟอสเฟตหรือความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ลักษณะทั่วไปของดินกรด

ดินกรดที่ค่อนข้างในภาคใต้ส่วนใหญ่จะพบในอันดับอัลทิซอลส์ เป็นดินที่มีการผุพังสลายตัวมานานหรืออายุมาก ชั้นดินมีการชะละลายสูง มีชั้นดินวินิจฉัย Argillic เห็นได้ชัดเจน มีการอึดตัวเคลเซียมและแมกนีเซียม น้อยกว่า 35% ภายในความลึก 1.8 เมตรจากส่วนบนสุดของชั้นซึบง ในชั้นหน้าตัดของดินมักพบชั้น Ap-Bt1- Bt2 - C ในประเทศไทยพบปริมาณการกระจายของดินกลุ่มนี้ถึงร้อยละ 80 ในพื้นที่ค่อนข้างหรือดินไร่ (อิบ, 2548) ปัญหาด้านความอุดมสมบูรณ์ในดินเหล่านี้ ได้แก่ ดินเป็นกรด pH ต่ำมีปริมาณ เหล็ก อะลูมิเนียม และแมกนีเซียมสูงอยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อพืช มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำและขาดธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส (Von Uexkull, 1986) มีปริมาณแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้น้อยมาก แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรืออะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในรูปต่าง ๆ สะสมอยู่ในดิน นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปดินยังถูกตรึงโดยเหล็กและอะลูมิเนียม ทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของฟอสฟอรัสลดลงและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อย ทำให้ผลผลิตที่ปลูกในดินกรดต่ำกว่าดินปกติอื่น ๆ มาก นอกจากนี้ ดินกรดที่ค่อนข้างยังมีข้อจำกัดทั้งทางกายภาพ ทางด้านเคมี และทางชีวภาพ สำหรับการเจริญเติบโตของพืช ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อจำกัดหลักของดินในเขตร้อนชื้น

คุณสมบัติ	ระดับของปัจจัย
ทางกายภาพ	
-ความเสี่ยงต่อการพังทลาย	สูง
-อัตราการแทรกซึม (infiltration rate)	ต่ำ-สูง
-ความจุการอุ้มน้ำของดิน	ต่ำ-ปานกลาง
-ง่ายต่อการอัดแน่น	สูง
ทางเคมี	
-ปฏิกิริยาดิน (pH)	ต่ำ
-AI ที่แลกเปลี่ยนได้	สูงในระดับที่เป็นพิษต่อพืช
-เปอร์เซ็นต์การอึดตัวด้วย AI	สูงในระดับที่เป็นพิษต่อพืช

ที่มา : Humphreys (1991 อ้างโดย วิเชียร, 2549)

ตารางที่ 1 ข้อจำกัดหลักของดินในเขตร้อนชื้น (ต่อ)

คุณสมบัติ	ระดับของปัจจัย
ทางเคมี	
-Mn ที่เป็นประโยชน์	สูงในระดับที่เป็นพิษต่อพืช
-Ca, Mg และ K ที่แลกเปลี่ยนได้	ต่ำ
-ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน	ต่ำ
-การอิมมัตว์ด้วยเบส	ต่ำ
-C, N และ P ทั้งหมด	ต่ำ
-P ที่เป็นประโยชน์	ต่ำ
-ความจุในการตรึง P	สูง
ทางชีวภาพ	
-มวลชีวภาพ (microbial C)	ต่ำ
-Nitrification	-
-การตรึง N จากอากาศ	ควรจะสูง
-Mycorrhizae	ควรจะสูง
-กิจกรรมของไส้เดือน	สูงในพื้นที่ที่ไม่ถูกรบกวน ดินทั่วไปต่ำ

ที่มา : [Humphreys \(1991 อ้างโดย วิเชียร, 2549\)](#)

ความอุดมสมบูรณ์ของชุดดินที่สำคัญต่าง ๆ ในภาคใต้ของประเทศไทย แสดงดังใน
ตารางที่ 2 ([สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2550](#))

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีบางประการของดินกรดที่ตอนในภาคใต้

Soil series	pH 1:1H ₂ O	EC dS m ⁻¹	Avai.P mg kg ⁻¹	Avai.K mg kg ⁻¹	OM g kg ⁻¹	Total N g kg ⁻¹	Exch.Ca cmol _c kg ⁻¹	Exch.Mg cmol _c kg ⁻¹
Ao Luek (Ak)	5.98	0.08	4.35	348.60	46.7	2.3	6.37	1.82
Chumphon (Cp)	5.20	0.20	2.34	76.80	16	0.8	0.87	0.29
Krabi (Kbi)	5.51	0.09	4.91	39.32	22.4	1.1	3.22	2.16

ที่มา : [ดัดแปลงจาก สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน \(2550\)](#)

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีบางประการของดินกรดที่ตอนในภาคใต้ (ต่อ)

Soil series	pH	EC	Avai.P	Avai.K	OM	Total N	Exch.Ca	Exch.Mg
	1:1H ₂ O	dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Kho Hong (Kh)	4.88	0.02	1.75	16.92	15.9	0.8	0.10	0.07
Rueso (Ro)	4.98	0.08	2.28	106.72	45.7	2.8	0.50	0.50
Yala (Ya)	4.94	0.12	8.47	47.32	31.4	1.6	0.35	0.15
Average	5.25	0.10	4.02	105.95	29.68	1.57	1.90	0.83
SD	0.43	0.06	2.52	122.91	14.00	0.83	2.47	0.92

ที่มา : ดัดแปลงจาก สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2550)

ตารางที่ 3 เกณฑ์มาตรฐานความสูงต่ำของค่าวิเคราะห์ทางเคมีของดิน

ลักษณะทางเคมีของดิน	เกณฑ์มาตรฐาน		
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
อินทรีย์วัตถุ (g kg ⁻¹)	5-10	15-25	35-45
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg kg ⁻¹)	3-6	10-15	25-45
โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg kg ⁻¹)	30-60	60-90	90-120
ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cmol _c kg ⁻¹)	3-5	10-15	20-30
เบสที่แลกเปลี่ยนได้ (cmol _c kg ⁻¹)			
- แคลเซียม	2-5	5-10	10-20
- แมกนีเซียม	0.3-1.0	1-3	3-8
- โซเดียม	0.1-0.3	0.3-0.7	0.7-2.0

ที่มา : ดัดแปลงจาก เอิบ (2544)

จากตารางที่ 2 พบว่า ดินกรดที่ตอนส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรที่สำคัญ เช่น pH 5.25±0.43, Avai.P = 4.02±2.52 mg kg⁻¹ และ OM = 29.68±14.00 g kg⁻¹ ซึ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานความสูงต่ำของค่าวิเคราะห์ดิน เอิบ (2544) แสดงให้เห็นว่า ค่าวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ (3-6 mg kg⁻¹) (ตารางที่ 3) จำเป็นต้องมีการใส่ปุ๋ยฟอสเฟต ให้เพียงพอต่อความต้องการของพืช และการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในรูปของหินฟอสเฟตจึงเป็นทางเลือกในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดได้

2.1.1 ฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปออร์โทฟอสเฟต (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) ฟอสฟอรัสในดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) สารประกอบอินทรีย์ (organic phosphorus) ประกอบด้วย nucleic acid 2%, phospholipid 1% และ inositol phosphate 35% และสารอื่นๆ 68% ของอินทรีย์ฟอสเฟต (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) รูปหลักของอินทรีย์ฟอสเฟตในดินคือ inositol phosphate และ nucleic acids ฟอสเฟตในรูปดังกล่าวต้องผ่านการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดินเป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตจึงจะเป็นประโยชน์ต่อพืช ส่วนที่เป็นประโยชน์ได้ง่าย ได้แก่ phospholipid และ fluvic acid 2) สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic phosphorus) มีทั้งพวกที่เป็นฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินและพวกที่เป็นสารประกอบ หรือแร่ที่เป็นของแข็งของฟอสเฟตในดินต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ ๆ โดยแบ่งตามสารประกอบของฟอสฟอรัสในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ได้แก่ 1) แร่และสารประกอบแคลเซียม พบในดินที่เป็นกลางหรือค่อนข้างเป็นด่าง เช่น แร่ apatite พวก fluorapatite และ hydroxyapatite ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย และพวก chlorapatite ซึ่งจะพบในหินอัคนี 2) สารประกอบฟอสเฟตที่เกิดจากการใส่ปุ๋ยลงไปดินเมื่อมีการใส่ปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ดี เช่น $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ลงไปในดินที่มีแคลเซียม และ แมกนีเซียมสูง จะเกิดฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้น้อย 3) absorbed phosphate ฟอสเฟตไอออนที่ถูกดูดซับอยู่ตามผิวของ hydrous oxide ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแร่ดินเหนียวซิลิเกต ฟอสเฟตเหล่านี้ จะถูกตรึงและยากแก่การปลดปล่อยกลับออกมาในสารละลายดิน

2.1.2 ปริมาณฟอสฟอรัสในดินกรด

ดินกรดโดยทั่วไปมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระดับต่ำมาก ปกติจะน้อยกว่า 200 mg kg^{-1} ดินกรดเขตร้อนชื้นในภาคใต้ที่สำคัญ ๆ จะมีปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินบนสูงกว่าดินล่าง เนื่องจากการสะสมของอินทรีย์ฟอสฟอรัสดินบนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ และดินบนมีการดูดซับของฟอสฟอรัสที่ใส่ในรูปของปุ๋ย (Onthong *et al.*, 1999) ถ้าสารละลายดินเป็นกรดมากขึ้น ทำให้ฟอสเฟตอยู่ในรูป H_2PO_4^- เป็นส่วนใหญ่ เมื่อมีการใส่ปุ๋ย ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากฟอสเฟตส่วนใหญ่จะถูกตรึงทำให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ยาก (Tisdale *et al.*, 1993)

2.1.3 ปฏิกริยาของฟอสฟอรัสในดินกรด

ปฏิกริยาของดิน (pH) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมรูปของอนินทรีย์ฟอสเฟต ส่วนปริมาณของอะลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส และแคลเซียมจะเป็นตัวกำหนด

2) ปริมาณของแคตไอออนและสารประกอบของเหล็ก อะลูมิเนียม แมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียมในดิน ฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินจะทำปฏิกิริยาได้ง่ายและรวดเร็วกับ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Al^{3+} และจะละลายน้ำได้ยาก มีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง

3) ปริมาณของไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม สามารถดูดซับฟอสเฟตไอออนไว้ในปริมาณมาก ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า polar adsorption แต่ hydrous oxide เหล่านี้อาจจะทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต ทำให้เกิดเป็นสารที่ละลายได้ยาก และปริมาณฟอสเฟตที่ถูกตรึงด้วย hydrous oxide ของเหล็กและอะลูมิเนียมจะลดลง เมื่อระดับ pH ของดินเพิ่มสูงขึ้น

4) ปริมาณของแร่ดินเหนียว (clay mineral) ต่าง ๆ แร่ดินเหนียวสามารถตรึงฟอสเฟตได้โดยแร่ทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน โดยกระบวนการ surface reaction โดยฟอสเฟตไอออนจะเข้าไปแทนที่ hydroxyl group ที่อยู่รอบ ๆ ผิวผลึกของแร่ดินเหนียว ประจุของดินส่วนใหญ่เป็นประจุลบ จึงมีโอกาที่อนุกรมฟอสฟอรัสทั้ง PO_4^{-3} และ HPO_4^{-2} ที่ผิวของดินมีการแลกเปลี่ยนประจุน้อยลงอำนาจการดูดตรึงฟอสฟอรัสในดินจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของดินที่ทำหน้าที่ดูดยึดฟอสฟอรัสได้ ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่หลักคือ hydrous oxides ของเหล็กและอะลูมิเนียม

5) อิทธิพลของจุลินทรีย์ดิน จุลินทรีย์ในดินมีบทบาทอย่างมากต่อฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของอินทรีย์ฟอสเฟตเนื่องจากการเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสเฟตให้อยู่ในรูปอนินทรีย์ฟอสเฟตโดยอาศัยกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดิน

6) ความเป็นประโยชน์ของอินทรีย์ฟอสเฟตในดิน สารอินทรีย์ฟอสเฟตที่มีอยู่ในดินจะถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยสลายด้วยกระบวนการ mineralization ให้เป็นฟอสเฟตไอออน

2.2 หินฟอสเฟต

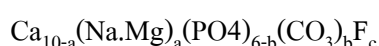
หินฟอสเฟตเมื่อบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบบำรุงดินได้ดี เปอร์เซ็นต์ของฟอสเฟตอาจมีเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์จนถึง >30 % เมื่อใส่ลงดินชั้น บางส่วนจะมีการละลายออกมาได้ และส่วนที่เหลือจะมีการละลายได้ได้อย่างช้า ๆ หินฟอสเฟตแต่ละชนิดจะมีลักษณะและองค์ประกอบแตกต่างกันออกไปตามแหล่งกำเนิด

2.2.1 องค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟต (Mineralogy and Chemistry of PR Sources)

หินฟอสเฟตเป็นแร่ apatite ที่มีแคลเซียมฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบและมีธาตุอาหารอื่นๆ ปนอยู่ด้วยในปริมาณแตกต่างกัน เช่น โปแทสเซียม แคลเซียม เหล็ก และแมงกานีส หินฟอสเฟตส่วนใหญ่อยู่ในแร่อะพาไทต์ โดยจะเกิดอยู่ในลักษณะผลึกเล็ก ๆ หรือไม่

เป็นผลึกก็ได้ และมีสูตรทางเคมี $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4\text{CO}_3)_6 (\text{F, Cl, OH})_2$ (McClellan and Van Kauwenbergh, 2004)

จากการทับถมของมูลค่างควาในยุคอดีตและแหล่งหินฟอสเฟตที่ได้จากหินตะกอน phosphate ions ในแร่ apatite ที่เป็นองค์ประกอบบางส่วนถูกแทนที่โดย carbonate มีโครงสร้างของผลึกซับซ้อน และมีการแทนที่ของ Ca โดย Na และ Mg ประมาณ 10% Ca นอกจากนี้ F บางส่วนอาจถูกแทนที่โดย OH⁻ เช่น หินฟอสเฟต Bayovor deposit (Sechura) องค์ประกอบทางเคมีของแร่ apatite ที่มีการแทนที่ดังกล่าวเขียนได้ดังนี้



เมื่อ a และ c เป็นฟังก์ชันของ b และ $b = 1.5$ เมื่อมีการแทนที่สูงสุด (McClelland and Lehr., 1996) โดยทั่วไปแล้วหากมีการแทนที่ของ CO₃ สูง ขนาดของผลึกจะเล็กลง การละลายน้ำของหินฟอสเฟต (McClelland and Gremillion, 1980) และความเป็นประโยชน์ต่อพืช (reactivity) เพิ่มขึ้น สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง Hammond และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟต 12 ชนิด จาก 4 ภูมิภาค คือ เอเชีย แอฟริกา ละตินอเมริกา และอเมริกา ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สูตรทางเคมีของหินฟอสเฟตจาก 4 แหล่ง

Region	Rock sample	Length of α axis (Å)	Empirical formula
Asia	EI-Hassa, Jordan	9.339	$\text{Ca}_{9.68}\text{Na}_{0.23}\text{Mg}_{0.09}(\text{PO}_4)_{5.12}(\text{CO}_3)_{0.88}\text{F}_{2.35}$
	Mussoorie, India	9.352	$\text{Ca}_{9.80}\text{Na}_{0.14}\text{Mg}_{0.06}(\text{PO}_4)_{5.42}(\text{CO}_3)_{0.58}\text{F}_{2.23}$
	Kaiyang, China	9.372	$\text{Ca}_{9.98}\text{Na}_{0.01}\text{Mg}_{0.01}(\text{PO}_4)_{5.94}(\text{CO}_3)_{0.06}\text{F}_{2.02}$
Africa	Gafsa, Tunisia	9.328	$\text{Ca}_{9.59}\text{Na}_{0.30}\text{Mg}_{0.12}(\text{PO}_4)_{4.90}(\text{CO}_3)_{1.10}\text{F}_{2.44}$
	Hahotoe, Togo	9.351	$\text{Ca}_{9.79}\text{Na}_{0.15}\text{Mg}_{0.06}(\text{PO}_4)_{5.39}(\text{CO}_3)_{0.61}\text{F}_{2.24}$
	ParcW, Niger	9.365	$\text{Ca}_{9.93}\text{Na}_{0.05}\text{Mg}_{0.02}(\text{PO}_4)_{5.78}(\text{CO}_3)_{0.22}\text{F}_{2.09}$
Latin America	Bayovar, Peru	9.337	$\text{Ca}_{9.03}\text{Na}_{0.74}\text{Mg}_{0.13}(\text{PO}_4)_{4.88}(\text{CO}_3)_{1.12}\text{F}_{1.73}(\text{OH})_{0.72}$
	Pesca, Colombia	9.346	$\text{Ca}_{9.96}\text{Na}_{0.18}\text{Mg}_{0.07}(\text{PO}_4)_{5.28}(\text{CO}_3)_{0.72}\text{F}_{2.29}$
	Patos de Minas, Brazil	9.370	$\text{Ca}_{9.96}\text{Na}_{0.03}\text{Mg}_{0.01}(\text{PO}_4)_{5.88}(\text{CO}_3)_{0.12}\text{F}_{2.05}$
United States	North Carolina	9.322	$\text{Ca}_{9.53}\text{Na}_{0.34}\text{Mg}_{0.13}(\text{PO}_4)_{4.77}(\text{CO}_3)_{1.23}\text{F}_{2.49}$
	Central Florida	9.345	$\text{Ca}_{9.74}\text{Na}_{0.19}\text{Mg}_{0.07}(\text{PO}_4)_{5.26}(\text{CO}_3)_{0.74}\text{F}_{2.30}$
	Tennessee	9.357	$\text{Ca}_{9.85}\text{Na}_{0.11}\text{Mg}_{0.04}(\text{PO}_4)_{5.54}(\text{CO}_3)_{0.46}\text{F}_{2.16}$

ที่มา : Hammond และคณะ (1986)

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของหินฟอสเฟต (Physical form of PRs)

ขนาดของอนุภาคของหินฟอสเฟตเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตที่ใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง Khasawneh and Doll (1978) พบว่า ขนาดของหินฟอสเฟตต้องมีขนาดน้อยกว่า 150 μm เพื่อที่จะสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดี เมื่อขนาดยังเล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น สามารถทำปฏิกิริยากับ H^+ ในดินได้เพิ่มขึ้นและปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาได้ดียิ่งขึ้น Cooke (1979) รายงานว่า หินฟอสเฟตที่มีขนาด 100 เมช สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

2.2.3 หินฟอสเฟตที่พบในประเทศไทย

หินฟอสเฟตที่พบในประเทศไทย มี 2 ประเภท คือ 1) หินฟอสเฟตที่เป็นหินตะกอน มีฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P_2O_5) ประมาณ 25-35% และมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Avail P_2O_5) เพียง 2-5% เท่านั้น และประเภทที่ 2) หินฟอสเฟตที่เกิดแบบเคมีชีวภาพหรือแบบกัวโน (Guano) ซึ่งเกิดจากมูลค้างคาว หินฟอสเฟตประเภทนี้มีฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P_2O_5) ประมาณ 20% แต่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Avail P_2O_5) ประมาณ 10-15% ซึ่งสูงกว่าหินฟอสเฟตประเภทที่ 1 มาก แต่ปริมาณผลตกค้างของฟอสฟอรัสสำหรับพืชในฤดูถัดไปนั้นน้อยกว่าหินฟอสเฟตจากหินตะกอน (เทคโน โลยีดิน และปุ๋ย, 2538)

จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีในช่วงที่ผ่านมา พบว่า ปัจจุบันมีแหล่งแร่ฟอสเฟตประเภทกัวโนเป็นแหล่งสะสมเล็ก ๆ อยู่ตามหินปูนและตามถ้ำบริเวณเทือกเขาหินปูนทั่วไปทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ของประเทศไทย แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แหล่งแร่ฟอสเฟต ปริมาณสำรอง และปริมาณความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสที่พบในประเทศไทย

ที่ตั้งแหล่งแร่	ปริมาณสำรอง (ตัน)	Total P ₂ O ₅ (%)
เขาพักม้า อ.เมือง จ.ราชบุรี	4,000	10-40
เขาทะลุ อ.จอมบึง จ.ราชบุรี	100	24-31
เขาคลองวาฬ อ.เมือง จ.ประจวบคีรีขันธ์	100	18
บ้านนากาญจน์ อ.เมือง จ.กาญจนบุรี	100,000	30-40
เขาเป็ง อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี	50,000	25-30
บ้านหนองหลวง อ.วัดสิงห์ จ.ชัยนาท	100	20-25
เขาชะโงก อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	10,000	10-30
บ้านสบเมย อ.แม่ทา จ.ลำพูน	50,000	30-38
บ้านหาดปู่ด้าย อ.เกาะคา จ.ลำปาง	100	30
บ้านโคกสูง อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด	125,000	10-20
บ้านเหล่าขาม อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด	80,000	10-20
เขารักเกียรติ อ.รัตนภูมิ จ.สงขลา	900	15-30

ที่มา : ดัดแปลงจากกรมทรัพยากรธรณี (2553)

แหล่งต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นแหล่งเล็ก ๆ ที่มีปริมาณแร่ตั้งแต่ 100-125,000 ตัน แหล่งที่มีมากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ บ้านโคกสูง อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด และปริมาณธาตุอาหารต่าง ๆ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ที่พบในหินฟอสเฟตจากแหล่งต่าง ๆ ที่พบในประเทศไทยแสดงในตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่พบในหินฟอสเฟตจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งฟอสเฟต	P (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	S (%)
บ้านนากาญจน์	3.2-14.3	23.6-33.0	0.14-1.11	0.04-0.48	0.02-0.15
เขาคันหนอกโมกษธรรม	3.4-11.5	22.3-36.4	0.03-0.15	0.16-0.71	<0.01-0.02
เขาสูง	3.5-7.7	25.2-35.8	<0.01-0.10	0.10-1.47	<0.01-0.10
เขาพริก	0.8-13.6	28.3-34.2	0.38-0.53	0.04-0.22	<0.01-0.09
เขาทะลุ	1.6-11.6	26.4-30.5	0.10-8.80	<0.01-0.11	0.01-0.06

ที่มา : จันทรจิรา (2528)

ตารางที่ 7 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในหินฟอสเฟตจากแหล่งต่าง ๆ กัน

แหล่งฟอสเฟต	Total P ₂ O ₅ (%)	Available P ₂ O ₅ (%)
บ้านนากาญจน์	35.06-43.57	0.89-9.05
เขาคันหมอกโมกษธรรม	10.67-34.00	0.37-5.28
เขาสูง	15.42-23.21	1.00-3.95
เขาพริก	1.11-36.85	0.47-9.47
เขาทะลุ	3.63-35.65	0.54-6.01

ที่มา : จันทร์จิรา (2528)

2.2.4 การวัดประสิทธิภาพของหินฟอสเฟต

ประสิทธิภาพของการละลายได้ของหินฟอสเฟต (reactive) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและแหล่งของหินฟอสเฟต ผลจากการศึกษาสารสกัดต่างๆ ที่ใช้เป็นดัชนีบ่งบอกความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตนั้น ยังสรุปไม่ได้ว่าสารสกัดใดจะให้ผลดีที่สุด ขึ้นอยู่กับสมบัติของหินฟอสเฟต (วิเชียร และระเบียบ, 2534) Chien and Hammond (1978) พบว่า สารสกัด NAC (สกัดครั้งที่ 2) และ 2%FA pH 3 ให้ค่าความสัมพันธ์กับผลผลิตของหญ้ากีนีที่ปลูกในกระถางและถั่วต่าง ๆ ที่ปลูกในแปลงทดลองได้ดีกว่าวิธี NAC (สกัดครั้งเดียว), 2%CA และ absolute citrate solubility นอกจากนี้ วิเชียร และระเบียบ (2534) พบว่า 2%FA โดยการสกัดเพียงครั้งเดียวมีความสัมพันธ์กับการให้ผลผลิตของพืชได้ดีกว่าวิธี 2%CA และ NAC ซึ่งแตกต่างจาก Van Kauwenbergh และคณะ (2004) ที่รายงานว่าการสกัด NAC ซึ่งสกัดในครั้งแรกให้เปอร์เซ็นต์ของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้สูงกว่าการสกัดครั้งที่ 2 สารสกัด 2%CA ให้เปอร์เซ็นต์ของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสสูงมากกว่าสารสกัด NAC ในการสกัดครั้งที่ 1 และ 2 และ 2%FA ให้เปอร์เซ็นต์ของความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้สูงที่สุด (ตารางที่ 8) Diamond (1979) ได้ทำการศึกษาคิววิตต์ของสารสกัดทั้ง 3 ชนิดและจัดทำเกณฑ์มาตรฐานตัวชี้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟตสำหรับใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง (ตารางที่ 9) เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานตัวชี้วัดของหินฟอสเฟตกับข้อมูลการละลายได้ในสารสกัดต่าง ๆ ในตารางที่ 8 พบว่า หินฟอสเฟต North Carolina, Gafsa, Central Florida และ Tennessee ที่สกัดด้วย 2%CA จัดอยู่ในระดับสูงและหินฟอสเฟต Araxa จัดอยู่ในระดับต่ำ หินฟอสเฟต Central Florida, Tennessee ที่สกัดด้วย 2%FA อยู่ในระดับปานกลาง

ตารางที่ 8 ผลของสารสกัดต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของแหล่งหินฟอสเฟตต่าง ๆ

Sample	Type	Total P ₂ O ₅	Apatite ^a CO ₃ subst.	Solubility ^b P ₂ O ₅ (%)			
				Neutral ammonium		2% citric acid	2% formic acid
				citrate			
				1 st extraction (wt. %)	2 nd extraction (wt. %)		
North Carolina	Sedimentary	29.8	6.4	7.1	6.6	15.8	25.7
Gafsa	Sedimentary	29.2	5.8	6.6	6.8	11.9	18.6
Central Florida	Sedimentary	32.5	3.2	3.0	3.2	8.5	8.2
Tennessee	Sedimentary	30.0	1.6	2.5	2.7	8.7	6.9
Araxa	Igneous	37.1	0	1.7	1.7	3.5	3.9

a. Based on statistical models developed at the IFDC.

b. All samples ground to -200 Tyler mesh (-75µm) under similar conditions.

ที่มา : [Van Kauwenbergh และคณะ \(2004\)](#)

ตารางที่ 9 เกณฑ์มาตรฐานตัวชี้วัดของหินฟอสเฟตสำหรับการใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง

Rock Potential	Solubility P ₂ O ₅ (%)		
	2% Citric acid (2%CA)	2% Formic acid (2%FA)	Neutral ammonium citrate (NAC)
High	>9.4	>13.0	>5.4
Medium	6.7-8.4	7.0-10.8	3.2-4.5
Low	<6.0	<5.8	<2.7

ที่มา : [Diamond \(1979\)](#)

อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหินฟอสเฟตและสารสกัดที่ใช้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟต พบว่า พื้นที่ผิวของหินฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาด 100 เมชหรือน้อยกว่าจะไม่มีความสัมพันธ์กับการละลายได้ของฟอสฟอรัสในสารละลาย 2%

FA หรือ NAC ซึ่งนิยมใช้ในการวัดการละลายได้ของหินฟอสเฟต ทั้งนั้นชนิด และลักษณะการละลายได้ของหินฟอสเฟตที่แตกต่างกันน่าจะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดศักยภาพของหินฟอสเฟต (Syers *et al.*, 1986)

แต่สำหรับหินฟอสเฟตที่วางจำหน่ายในประเทศไทย กรมวิชาการเกษตร ประกาศเมื่อ พ.ศ. 2550 ว่า หินฟอสเฟตต้องมีปริมาณธาตุอาหารรองรับตั้งแต่ 3% ของน้ำหนักสุทธิของปุ๋ยเคมี มีปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดไม่น้อยกว่า 20% ของน้ำหนักสุทธิ และต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนักสุทธิของปุ๋ยเคมี

2.2.5 การใช้ประโยชน์จากหินฟอสเฟตในประเทศไทย

การศึกษาประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตในประเทศไทยได้รับความสนใจในพื้นที่นาข้าว พื้นที่ดินเปรี้ยว และใช้เป็นวัสดุรองพื้นก่อนปลูกไม้ผล ไม้ยืนต้นเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาต่าง ๆ เหล่านี้ ไม่สามารถสรุปประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตได้ชัดเจน เนื่องจากไม่มีการระบุชนิดแหล่งของหินฟอสเฟตที่ชัดเจน ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยเป็นตัวกำหนด reactivity ของหินฟอสเฟตที่ประกอบกับดินมักจะมีข้อจำกัดอื่นๆ มากทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มักจะไม่มีความผันแปรค่อนข้างมาก (Attanandana and Vacharotayan, 1984; ทศนีย์ และคณะ, 2524; สุกมาศ, 2514)

รสมาลิน และคณะ (2542) ได้ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยหินฟอสเฟต ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และอัตราส่วนต่าง ๆ ระหว่างปุ๋ยฟอสเฟตทั้งสอง ที่มีต่อระบบการปลูกข้าวในชุดดินรังสิตที่เป็นดินกรดจัด พบว่า เมื่อมีการใช้ปุ๋ยมาร์ลปรับความเป็นกรดของดิน แหล่งของปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าปุ๋ยหินฟอสเฟต แต่ในกรณีไม่มีการใส่ปุ๋ยมาร์ล ปุ๋ยหินฟอสเฟตทำให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟตและปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ ร่วมกับการใส่และไม่ใส่ปูนมาร์ล ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความสูง (ซม.) การแตกกอ น้ำหนักแห้งตอซัง (กก./ไร่) น้ำหนักเมล็ด (กก./ไร่) และเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบของข้าว

ตัวรับการทดลอง	ปุ๋ย	RP 100	RP 25 TSP 25	RP 50 TSP 50	RP 25 TSP 75	TSP 100	เฉลี่ย
ความสูง (ซม.)	ไม่ใส่	55.1a*	54.4 a	52.2 ab	52.0 ab	47.5 b*	52.2
	ใส่	46.6b	50.3 ab	52.5 a	53.0 a	53.3 a	51.1
จำนวนต้น/กอ	ไม่ใส่	21.5a*	17.3 ab	14.3 b	18.0 ab	13.0 b	16.8
	ใส่	11.0b	16.0 ab	16.4 ab	17.7 a	18.1 a	15.8
น้ำหนักแห้งตอซัง (กก./ไร่)	ไม่ใส่	611.7a*	511.0 ab	481.6 b*	541.1 ab	448.6 b*	518.9
	ใส่	464.0b	493.0 b	614.6 a	566.0 ab	673.0 a	562.1
น้ำหนักเมล็ด (กก./ไร่)	ไม่ใส่	391.4 a*	275.9 b	251.9 b	218.2 bc	178.1 c*	263.1
	ใส่	147.5b	288.5 a	282.5 a	273.3 a	277.9 a	254.0
เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบ	ไม่ใส่	10.2 a*	11.8 a	10.9 a	9.5 a	16.1 a*	11.7
	ใส่	22.6b	10.8 b	8.8 b	11.2 b	7.8 b	12.2

หมายเหตุ : PR : หินฟอสเฟต TSP : ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต

ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* แสดงว่าตัวเลขในแนวตั้ง (ใส่ปูนและไม่ใส่ปูน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ที่มา : ดัดแปลงจาก รสมาลิน และคณะ (2542)

ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยหินฟอสเฟตในแหล่งท้องถิ่นภาคใต้ (Ban Pru Rock Phosphate) Nilnond และคณะ (1996) ได้ทำการทดลองปลูกข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทราย (Paleustults) พบว่า ในตัวรับการทดลองที่มีการใส่หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวในอัตรา 200-800 kgPha⁻¹ จะทำให้ข้าวโพดให้น้ำหนักแห้งสูงขึ้นแตกต่างจากตัวควบคุมอย่างชัดเจน และเพิ่มขึ้นตามอัตราของหินฟอสเฟตที่เพิ่มสูงขึ้น ตัวรับการทดลองที่มีการใส่ปูนขาวร่วมด้วยทำให้ประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตลดลง แตกต่างจากแหล่งของฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ง่าย

การใส่ปุ๋ยนขาวผสมกับโมโนแคลเซียมฟอสเฟต จะทำให้ข้าวโพดเจริญเติบโตดีกว่าดำรับการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยนขาวร่วมกับหินฟอสเฟต

ในภาคใต้ของประเทศไทยได้มีการแนะนำการใช้หินฟอสเฟตในการรองก้นหลุมในสวนยางพาราและสวนปาล์มน้ำมันกันอย่างแพร่หลายมานาน โดยจะใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟตในสวนยางพาราอัตรา 170-200 กรัม/หลุม (สถาบันวิจัยยางพารา, 2555) และใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟตในสวนปาล์มน้ำมันอัตรา 250-500 กรัม/หลุม (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2557)

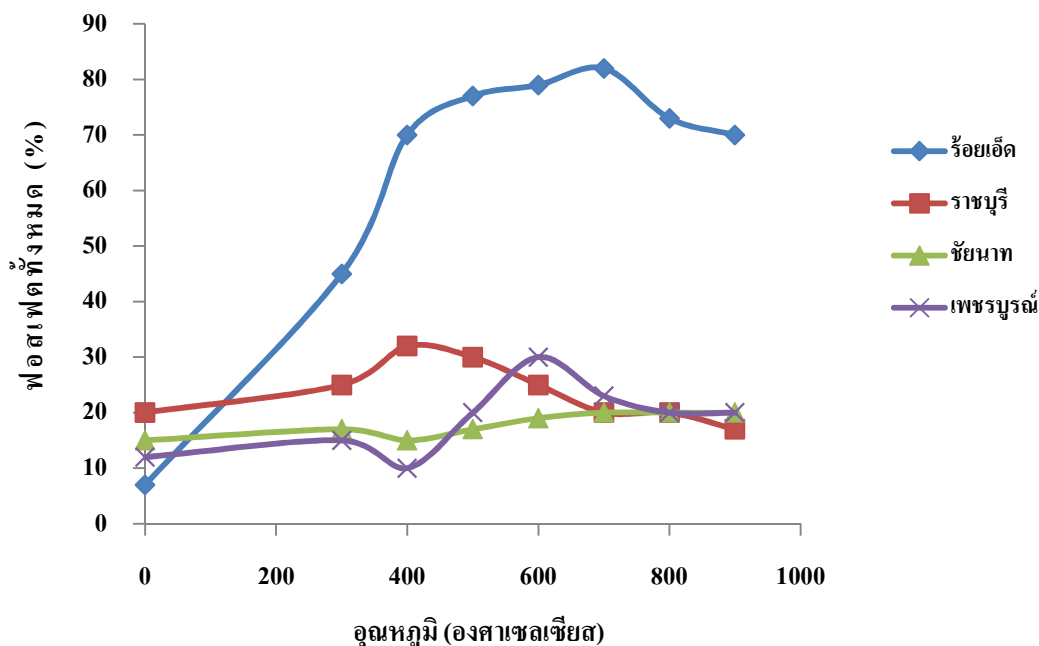
2.2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟต

การเพิ่มประสิทธิภาพการละลายและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของหินฟอสเฟตให้เพียงพอต่อความต้องการของพืช มีหลายวิธี เช่น การนำหินฟอสเฟตไปเผาที่อุณหภูมิสูง (ลัดดาวัลย์ และคณะ, 2529) การนำหินฟอสเฟตใส่ร่วมกับกรด (Menon *et al.*, 1989) การนำเอาเชื้อจุลินทรีย์ดินมาใช้ร่วมกับหินฟอสเฟต (Reddy *et al.*, 2002) การนำหินฟอสเฟตมาใช้ร่วมกับซีโอไลต์ (Harry *et al.*, 2002) และการนำหินฟอสเฟตมาใช้ร่วมกับซิลิโคน (Animesh., 1969) เป็นต้น

2.2.6.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตทางกายภาพ

เป็นการแปรสภาพหินฟอสเฟตเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในทางกายภาพ มี 2 วิธี ดังนี้ 1) การบดหินฟอสเฟตให้มีขนาดอนุภาค 100 เมช ประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตทุกชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อมีความละเอียดมากขึ้น เพราะอนุภาคมีขนาดเล็กจะมีที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนในดินได้เพิ่มขึ้น (ธงชัย, 2546) 2) การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส (ลัดดาวัลย์ และคณะ, 2529)

ลัดดาวัลย์ และคณะ (2529) ได้ทำการทดลองโดยการเผาหินฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูง โดยเก็บตัวอย่างหินฟอสเฟตจากแหล่งต่างๆ ของประเทศ บดผ่านตะแกรงร่อน 100 เมช และเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 จนถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง พบว่า หินฟอสเฟตจากแหล่ง จ.ราชบุรี จ.ชัยนาท และ จ.ลำพูน ที่มีเปอร์เซ็นต์ฟอสเฟตทั้งหมดสูง หลังจากถูกเผาด้วยความร้อนแล้ว เปอร์เซ็นต์ฟอสเฟตทั้งหมด จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่หินฟอสเฟต จากแหล่ง จ.ร้อยเอ็ด ที่มีปริมาณฟอสเฟตทั้งหมดต่ำกว่าแหล่งอื่น ๆ หลังจากถูกเผาด้วยความร้อนแล้ว จะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด และมีการเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่ออุณหภูมิสูง จากเดิมที่ไม่เผา 7% เป็น 82% เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และค่อย ๆ ลดลงมาเป็น 73% และ 70% เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของฟอสเฟตเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

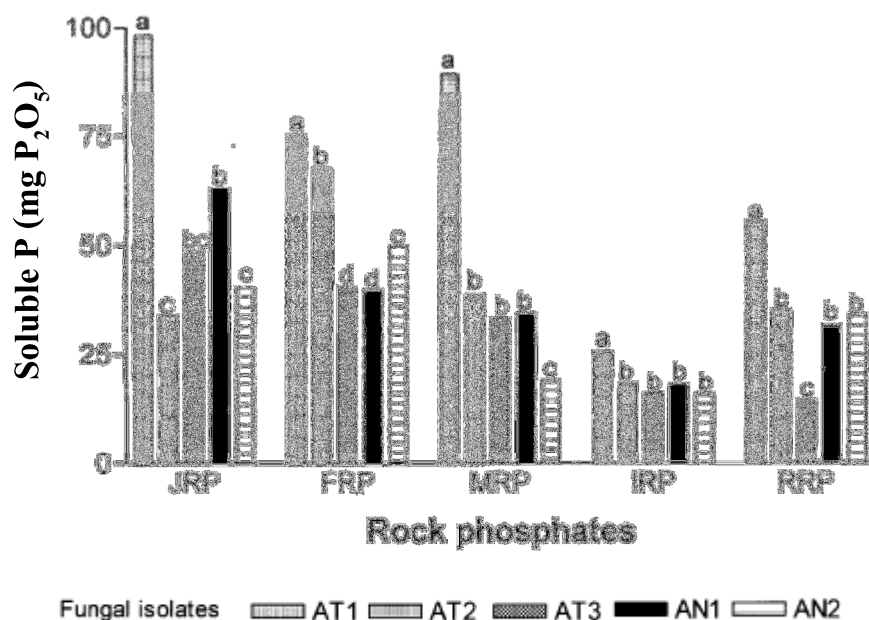
ที่มา : คัดแปลงจาก ลัดดาวัลย์ และคณะ (2529)

2.2.6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตทางชีวภาพ

ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ หรือกรดอ่อน ๆ นั้น ไม่สามารถที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืช การเปลี่ยนฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นประโยชน์นั้นสามารถทำได้โดยการใส่หินฟอสเฟตร่วมกับจุลินทรีย์ดิน เนื่องจากจุลินทรีย์ดินสามารถผลิตกรดบางชนิดขึ้นมา เช่น กรดฟอร์มิค อะซิติก แลคติก และกรดอินทรีย์ เช่น กรดไนตริก และซัลฟิวริก กรดพวกนี้สามารถละลายหินฟอสเฟตให้อยู่ในรูปแบบที่ละลายได้ง่ายและยังช่วยละลายในส่วนที่ถูกตรึงให้ละลายออกมาและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้

จากรายงานของ Reddy และคณะ (2002) ได้ทำการทดลองความสามารถของเชื้อ *Aspergillus tubingensis* และ *Aspergillus niger* ต่อการละลายหินฟอสเฟต โดยนำเชื้อทั้ง 2 ชนิดมา ใส่ร่วมกับหินฟอสเฟตที่มาจาก 5 แหล่งที่แตกต่างกัน คือ 1) Forkar : FRP 40 mgP₂O₅ 2) Jordan : JRP 33 mg P₂O₅ 3) Israel : IRP 32.9 mg P₂O₅ 4) Morocco : MRP 33.2 mg P₂O₅ 5) Rajasthan : RRP 34.1 mg P₂O₅ ประมาณ 2% และใส่เชื้อ *Aspergillus tubingensis* (AT1, AT2 และ AT3) และ *Aspergillus niger* (AN1 และ AN2) ที่ได้แยกไว้แล้ว พบว่า เชื้อ *Aspergillus*

tubingensis สามารถละลายฟอสเฟตได้ดีกว่าเชื้อ *Aspergillus niger* และเชื้อ AT1 สามารถละลายฟอสเฟตได้เพิ่มสูงสุดจาก 33.2 mg P₂O₅ เป็น 98 mg P₂O₅ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหินฟอสเฟตที่ใส่เชื้อ *Aspergillus tubingensis* และ *Aspergillus niger* ต่อการละลายฟอสเฟต

ที่มา : Reddy และคณะ (2002)

2.2.6.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตทางเคมี

การใช้หินฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับกรดในปริมาณที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่า Partially Acidulated Phosphate Rock (PAPR) จะใช้กรดในปริมาณน้อย หรือความเข้มข้นที่น้อยกว่าปริมาณที่ต้องการเปลี่ยนหินฟอสเฟตทั้งหมดให้เป็นปุ๋ยซุเปอร์ฟอสเฟต กรดที่นิยมใช้คือ ซัลฟิวริก ฟอสฟอริก พบว่า PAPR มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้หินฟอสเฟตโดยตรง เพราะใน PAPR จะประกอบด้วยฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ทันทีอยู่ส่วนหนึ่งแล้ว ส่วนหินฟอสเฟตที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับกรดก็จะปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาอย่างช้าๆ ให้พืชใช้ประโยชน์ได้ภายหลัง

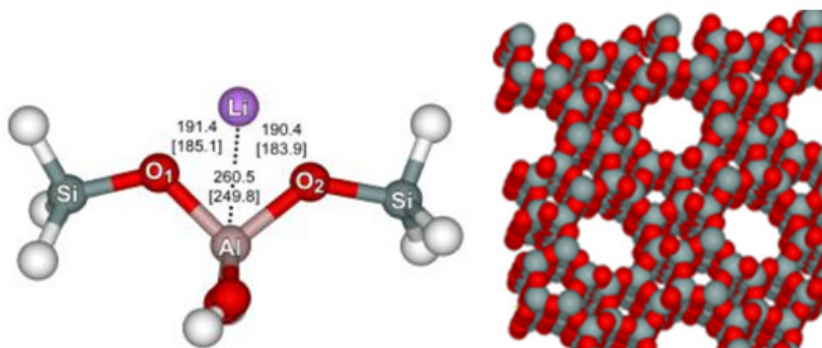
Sadik และคณะ (1978 อ้างโดย ชงชัย, 2546) รายงานว่า การเติมกรด จะช่วยให้ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เช่น กรดฮิวมิก กรดฟอสฟอริก และการใส่กำมะถันลงไปดินที่มี pH 6.7 ทำให้ฟอสเฟตละลายได้มากขึ้น **กรรชิต และสุวพันธ์ (2526)** ได้ศึกษาหินฟอสเฟตร่วมกับกรดกำมะถัน (โพลีฟอสเฟต) ในพืชไร่ที่ปลูกในดินกรดของประเทศไทย พบว่า ปุ๋ยที่ได้จากหินฟอสเฟตที่ทำปฏิกิริยากับกรด ซึ่งมีฟอสฟอรัสที่ละลายได้ 12% P₂O₅ และ

ฟอสฟอรัสทั้งหมด 25% P_2O_5 สามารถใช้ได้ผลดีทัดเทียมกับปุ๋ยดับเบิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต หรือ ตรีปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต และจะให้ผลดีกว่าในดินที่เป็นกรดจัดจนถึงปานกลาง และมีผลตกค้างยาวนานทำให้ผลผลิตของพืชที่ปลูกตามหลังอยู่ในระดับสูงขึ้น

Hammond และคณะ (1986) รายงานว่า การดูลใช้ฟอสฟอรัสของข้าวโพดจากปุ๋ย PAPR เพิ่มขึ้นจาก 3% เป็น 33, 47 และ 52% เมื่อใส่ปุ๋ย PAPR ที่ใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณ 20, 30 และ 40% ของกรดที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต ตามลำดับ และพบว่าการใช้ PAPR ที่ผลิตจากการใช้กรดฟอสฟอริกในปริมาณ 20% ของกรดที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยตรีปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต ยังมีผลตกค้างในการปลูกข้าวโพดต่อมาอีก 3 ฤดูกาลซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 79-90%

2.3 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกตในรูปสารประกอบไฮดรอกซิล อะลูมิโนซิลิเกต (hydrus aluminosilicate) ที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนใต้ท้องทะเล หรือการที่ลาวาและหินแก้วภูเขาไฟไหลลงไปทับถมในทะเล ทะเลสาบหรือลงสู่ระบบน้ำใต้ดินที่มีความเป็นด่างสูงและมีความอบอุ่น แล้วลาวาจะเปลี่ยนเป็นกลุ่มแร่ซีโอไลต์ แร่ซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติมีอยู่ประมาณ 40 ชนิด แต่ที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งปริมาณที่สามารถเป็นการค้ามีอยู่เพียง 4-5 ชนิด เท่านั้น คือ มอร์เดนไนต์ (mordenite) คลินออปติไลต์ (clinoptilonite) ซาบาไซต์ (chabazite) อีริโอไนต์ (erionite) และฟิลลิปไซต์ (phillipsite) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีโพรงหรือช่องว่างขนาดตั้งแต่ 2-10 แองสตรอม (angstrom) หรือระหว่าง 0.002-0.01 มิลลิเมตร ติดต่อกันภายในโครงผลึก โดยมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของแร่ซีโอไลต์ โครงสร้างพื้นฐานของแร่ซีโอไลต์เป็นแบบเตตราฮีดรอน (tetrahedron) ของหมู่ AlO_4^- และหมู่ SiO_4^{4-} เชื่อมกับอะตอมของออกซิเจน (ปิยะ, 2553) (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ลักษณะ โครงสร้างของซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

ที่มา : ดัดแปลงจาก [Computational Materials Science Center \(2553\)](#)

2.3.1 สมบัติของซีโอไลต์

2.3.1.1 สมบัติทางเคมี

แร่ซีโอไลต์มีค่า CEC อยู่ระหว่าง $100-300 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ ตัวแร่มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงสามารถดูดซับธาตุต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และ แบเรียม รวมถึงโลหะหนักและสารกัมมันตรังสีต่างๆ เช่น ไททาเนียม รูบิเดียม ตะกั่ว และซีเซียม เป็นต้น อีกทั้งสามารถแลกเปลี่ยนธาตุที่เป็นแคตไอออนนั้นได้อีกด้วย และอีกประการที่สำคัญคือ สามารถดูดซับเอาโมเลกุลสารอินทรีย์ – อนินทรีย์ได้หลายชนิดมีความจุในการดูดก๊าซแอมโมเนีย ประมาณ 7 mmol g^{-1} และมีฤทธิ์เป็นกรด (ปิยะ, 2553)

2.3.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ซีโอไลต์เป็นแร่โปร่งจึงมีค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) เฉลี่ยประมาณ $2-2.3 \text{ g cm}^{-3}$ (Deer *et al.*, 1963) ยกเว้นชนิดที่มีแบเรียมอยู่มาก จะยิ่งโปร่งมากขึ้นไปอีกคือ $2.5-2.8 \text{ g cm}^{-3}$ นอกจากนี้ ซีโอไลต์มีโพรงภายในค่อนข้างมาก จึงมีพื้นที่ผิวสูงตามไปด้วย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $750-880 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Ward, 1970 อ้างใน ปรีดา และคณะ, 2535) ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์เป็นหลัก ปกติน้ำในโมเลกุลของซีโอไลต์จะระเหยออกไปเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถึงแม้จะสูญเสียน้ำไป แต่โครงสร้างของซีโอไลต์จะมีรูปร่างเหมือนเดิม และสามารถดูดซับน้ำ หรือสารอินทรีย์-อนินทรีย์ ตลอดจนธาตุต่างๆ เข้ามาแทนที่โมเลกุลของน้ำในผลึกได้

2.3.2 ประโยชน์ของแร่ซีโอไลต์

ลักษณะสำคัญที่ทำให้ซีโอไลต์มีประโยชน์ คือ โครงสร้างที่มีรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงของซีโอไลต์ก็จะสามารถผ่านไปได้ การใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์จะถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่สามด้านหลัก ๆ ด้วยกัน ได้แก่ เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นตัวดูดซับ (adsorption) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis)

2.3.2.1 เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลาย จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ โดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียม ที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอก ใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของแอมโมเนียกับโลหะ

โซเดียมที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์ รวมทั้งสามารถใช้กำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน ขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีของซีเซียม และสตรอนเชียมจากกากนิวเคลียร์ได้อีกด้วย (นิสากร, 2546)

2.3.2.2 เป็นตัวดูดซับ (Adsorption)

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น ใช้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) โดยซีโอไลต์สามารถเลือกการดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ คือ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น ก๊าซไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน นอกจากนี้ ยังใช้ในการแยกก๊าซ ซึ่งโมเลกุลของก๊าซต่างชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโลหะ ในทางกลับกัน ซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น (นิสากร, 2546)

2.3.2.3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

ซีโอไลต์จะอยู่ในรูปของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้คงทนกว่าและนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นมิตรกับธรรมชาติ (นิสากร, 2546) ซีโอไลต์ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนแปลงเมทานอล (methanol) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน เช่น สารโอเลฟิน (olefin) ฯลฯ และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) (ปิยะ, 2553)

2.4. การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินโดยใช้หินฟอสเฟตร่วมกับซีโอไลต์

การใช้หินฟอสเฟตเพื่อเพิ่มธาตุฟอสฟอรัสในดินกรดนั้นมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง (Dwairi, 1997) โดยผลจากการศึกษาส่วนมาก พบว่า ประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตที่ใช้โดยทั่วไปในสภาพของดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดจะให้ผลที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกลาง และยังมีสมบัติในการปรับสภาพความเป็นกรดของดินทำให้ pH ดินนั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการละลายของหินฟอสเฟตจะต้องอาศัย H^+ ในการละลาย ทำให้ H^+ ในสารละลายดินลดลง pH ของดินจึงสูงขึ้น เป็นผลให้ปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมที่อยู่ในดินเป็นพิษต่อพืชลดลง (Sikora and Giordano, 1995) นอกจากนี้ หินฟอสเฟตยังมีราคาถูก หากใช้ในระบบดินและพืชที่เหมาะสม ทำให้ ประสิทธิภาพยังใกล้เคียงกับปุ๋ยฟอสเฟต หรือฟอสเฟตชนิดที่ละลายง่าย และมีผลตกค้างยาวนานกว่า และให้ธาตุอาหารพืชอื่นๆ เช่น แคลเซียมด้วย อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยหินฟอสเฟตมักจะไม่สามารถตอบสนองต่อ

ความต้องการธาตุอาหารของ พืชเศรษฐกิจหรือพืชไร่ ซึ่งมีการเจริญเติบโตเร็วในช่วงระยะเวลาที่จำกัด Harry และคณะ (2002) จึงได้มีการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายได้ให้มากขึ้นโดยใช้ซีโอไลต์

การใช้ซีโอไลต์ร่วมกับหินฟอสเฟต พบว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟต เนื่องจากซีโอไลต์ทำหน้าที่ในการดูดซับ Ca^{2+} ที่ได้จากการละลายของหินฟอสเฟต ซึ่งจะส่งเสริมให้มีการสลายของหินฟอสเฟตได้อย่างต่อเนื่อง (ปรีดา และคณะ, 2535) ดังสมการที่ 2



2.4.1 ปัจจัยการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตร่วมกับซีโอไลต์

2.4.1.1 ชนิดของแคตไอออน

ชนิดของประจุบวกที่ดูดซับ หรืออิมตัวในแร่ซีโอไลต์ มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการละลายของหินฟอสเฟตต่างกัน Dwairi (1997) รายงานว่า เมื่อใช้ซีโอไลต์ที่อิมตัวด้วย NH_4^+ และ Na^+ ร่วมกับหินฟอสเฟต จะทำให้ฟอสฟอรัสละลายออกมาได้สูงกว่าการใช้ซีโอไลต์อย่างเดียว หรือการใช้หินฟอสเฟตอย่างเดียว (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 ฟอสฟอรัสที่ละลายจากหินฟอสเฟตเมื่อใช้ร่วมกับซีโอไลต์ที่อิมตัวด้วยแคตไอออน

Form of phillipsite tuff used	Phosphorus released (mgL ⁻¹)	Solution pH
natural phillipsite tuff	2.18	7.4
NH_4^+ exchanged phillipsite tuff	7.78	8.2
sodium exchanged phillipsite tuff	9.78	8.1
phosphate rock only	0.43	7.3

ที่มา : Dwairi (1997)

Harry และคณะ (2002) พบว่า NH_4^+ -Zeolite/RP ทำให้การดูดกินฟอสฟอรัสของต้นทานตะวันที่ปลูกในกระถาง สูงกว่า Ca^{2+} หรือ K^+ -Zeolite/RP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ พบว่า ในตำรับที่ซีโอไลต์อิมตัวด้วย NH_4^+ จะมีการแพร่กระจายของรากได้ดีกว่า และการที่ K^+ -Zeolite ไม่แตกต่างจาก Ca^{2+} -Zeolite/RP ซึ่งใช้เป็นตำรับเปรียบเทียบ เนื่องจากดินอาจจะมีระดับของ K ที่เพียงพออยู่แล้ว การใช้หินฟอสเฟตเพียงอย่างเดียว จึงไม่ได้ผลโดยการดูดกินฟอสฟอรัสของต้นทานตะวัน ไม่แตกต่างจากตำรับที่ไม่มีการใส่ฟอสฟอรัสและผลของ

ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่าง Zeolite กับ RP ยังขึ้นกับ reactivity ของหินฟอสเฟต ด้วย โดยการดูดกิน P ของต้นทานตะวันจะสูงกว่าใน Reactive RP (Sechura) ดีกว่า Non reactive RP (Duchess) (ตารางที่ 12)

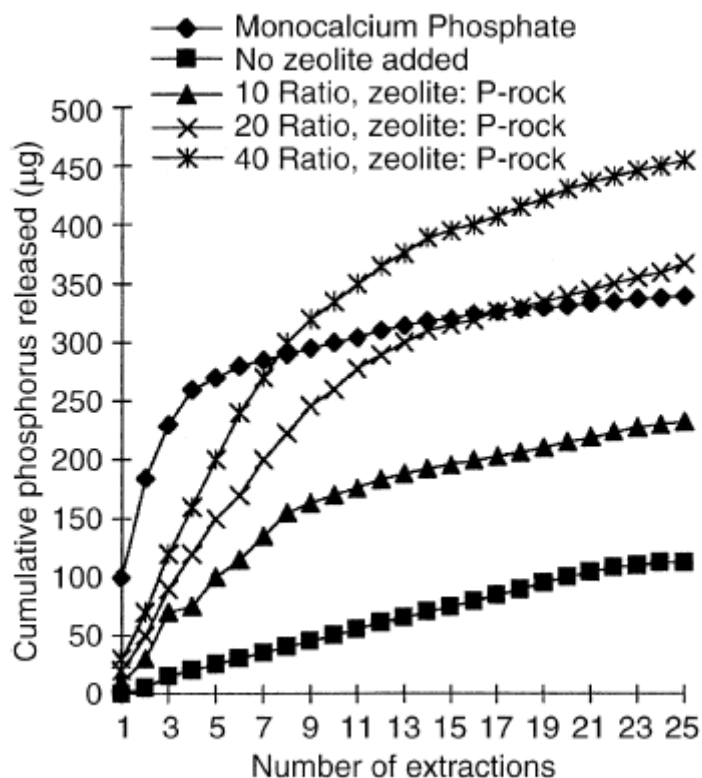
ตารางที่ 12 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นทานตะวันที่ปลูก 45 วัน จากการใช้ซีโอไลต์ที่อิ่มตัว ด้วย NH_4^+ , K^+ และ Ca^{2+} ร่วมกับหินฟอสเฟต ใน 2 อัตรา

Ratio Z:RP	Sunflower shoot P concentration (mg g^{-1}) at 45 day			
	Reactive RP (Sechura)		Non-reactive RP (Duchess)	
	3.5	7.0	3.5	7.0
NH_4^+ -Zeolite	2.62 ^b	3.25 ^a	1.74	2.12
K^+ - Zeolite	0.67	0.74e	-	-
Ca^{2+} - Zeolite	0.78e	0.76e	-	-
Urea+RP	1.25 ^c	0.95d	-	-
RP only	0.82		0.77	
No P added	0.82			
LSD (5%)	0.35			

ที่มา : Harry และคณะ (2002)

2.4.1.2 อัตราระหว่างซีโอไลต์กับหินฟอสเฟต

การละลายได้ของหินฟอสเฟตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราระหว่าง ซีโอไลต์กับหินฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น และจากการทดลองของ Dwairi (1997) พบว่า ในดำรับการทดลองที่มีอัตราของ Zeolite: P-rock ที่ 40 : 1 จะมีการละลายของฟอสฟอรัสได้สูงกว่าอัตรา 10 : 1, 20 : 1 และไม่ได้ซีโอไลต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4) สอดคล้องกับการทดลองของ Harry และคณะ (2002) พบว่า NH_4^+ -Zeolite/Reaction RP ที่อัตราส่วน 3.5 และ 7.0 ทำให้ต้นทานตะวันที่ปลูกในกระถาง มีน้ำหนักแห้งสูงกว่า Ca^{2+} , K^+ -Zeolite/ Reaction RP, Urea+RP หรือ RP only ที่อัตราต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 13



รูปที่ 4 การละลายของฟอสฟอรัสในอัตราต่าง ๆ ของซีโอไลต์ต่อหินฟอสเฟต
ที่มา : Dwairi (1997)

ตารางที่ 13 น้ำหนักแห้งของต้นทานตะวันที่ปลูก 45 วัน จากการใช้ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ , K^+ และ Ca^{2+} ร่วมกับหินฟอสเฟต ใน 2 อัตรา

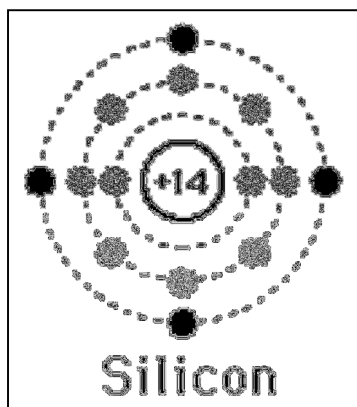
Ratio Z:RP	Sunflower shoot dry weight (g per plant) at 45 day			
	Reactive RP (Sechura)		Non-reactive RP (Duchess)	
	3.5	7.0	3.5	7.0
NH_4^+ -Zeolite	9.33(1) ^b	10.9(4)	3.96(7)	2.48(8)
K^+ - Zeolite	1.60(2)	1.93(5)	-	-
Ca^{2+} - Zeolite	1.18(3) ^c	1.22(6)	-	-
Urea+RP	0.57(9)	0.36(10)	-	-
RPonly	1.49(12)		1.60(13)	
No P added	-		1.10(14)	

ที่มา : Harry และคณะ (2002)

2.5 ซิลิคอน (Silicon)

ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสองในเปลือกโลกรองจากธาตุอะลูมิเนียม โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 23-35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณที่ละลายได้และอยู่ในสารละลายดินมีเพียงเล็กน้อย ซิลิคอนในดินอยู่ในรูปของซิลิกา (SiO_2) ซึ่งอาจเป็นรูปผลึกหรือ amorphous และอยู่ในรูปของแร่ silicate รูปที่ถูกดูดซับ หรือตกตะกอนกับ hydrous oxide ของ Al^{+3} , Fe^{+3} และ Mn^{+2} และอยู่ในรูปสารละลายในดินซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อย โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนเป็นการจับตัวกันระหว่าง ซิลิคอน 1 ตัวกับออกซิเจน 2 ตัว ดังรูปที่ 5

ในเขตร้อนชื้นหินซิลิเกตได้รับการผุร่อนอย่างรวดเร็วส่งผลให้สภาพอากาศเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของซิลิคอน เหล็ก อะลูมิเนียม ฯลฯ จากในดิน เหล็กและ อะลูมิเนียมจะมีความเสถียรภาพในดิน ออกไซด์จะเป็นอิสระในขณะที่ซิลิคอนจะถูกกำจัดออกจากดินหากมีการระบายน้ำ ภายใต้อุณหภูมิเหล่านี้ ดินที่ผ่านการผุพังสลายตัวสูงมาก ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสที่มีผลในการละลายและความความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสจึงต่ำ



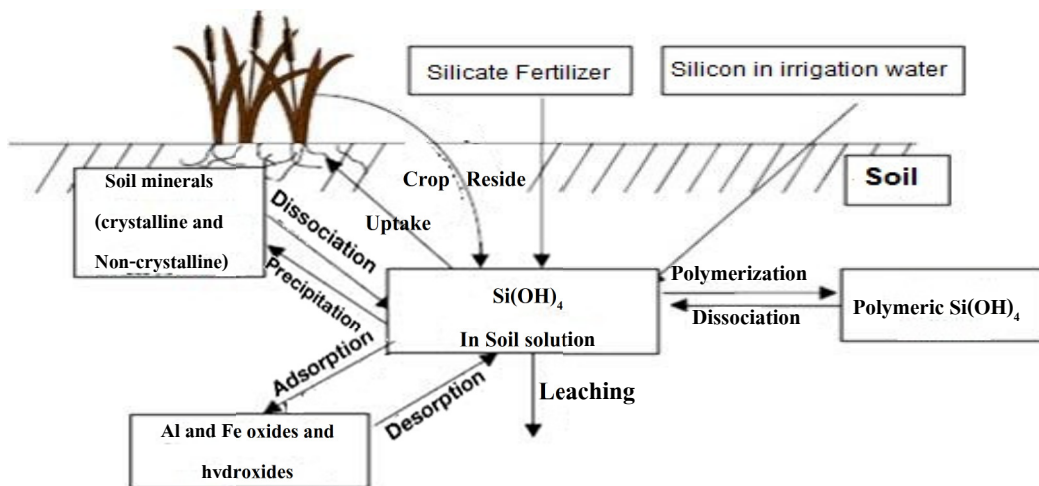
รูปที่ 5 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอน

ที่มา : [Chemical Structures \(2557\)](#)

รูปของซิลิคอนในสารละลายดิน คือ กรดโมโนซิลิซิก (monosilicic acid, Si(OH)_4) สภาพละลายได้ของกรดดังกล่าวในน้ำประมาณ 2 mM หรือ 56 mg SiL^{-1} ความเข้มข้นของกรดซิลิซิกในสารละลายดินอาจลดลงเนื่องจาก

- 1) เมื่อระดับ pH ของดินสูงกว่า 7 ทำให้ความเข้มข้นของซิลิคอนลดลงด้วย
- 2) เมื่อมีเศษควิออกไซด์ (sesquioxides) ในดินมากเป็นเหตุให้เกิดการดูดซับแอนไอออนสูง ซึ่งพบมากในดินเขตร้อน (ขงยุทธ, 2546) ปัจจัยที่ควบคุมความเข้มข้นของกรดโมโน

ซิลิซิกในสารละลายดินคือปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณระดับความชื้นในดิน ค่า redox potential (Eh) ปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมในดิน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณซิลิคอนในสารละลายดิน

ที่มา: Tisdale และคณะ (1985)

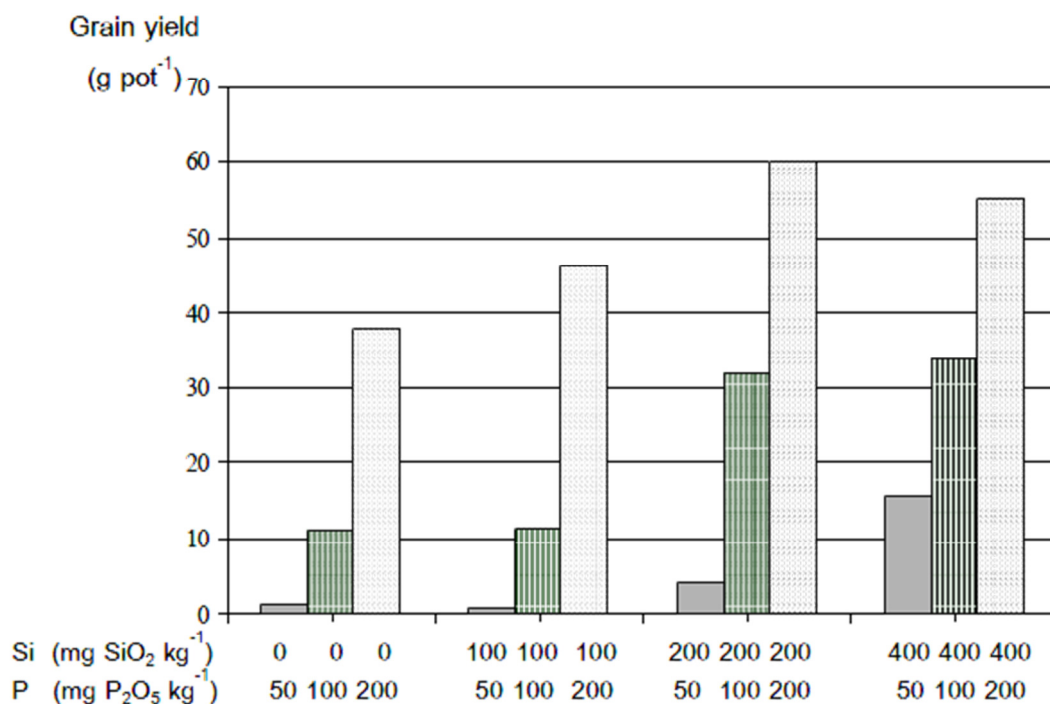
เมื่อพืชดูดซิลิคอนจากดิน ซิลิคอนเคลื่อนย้ายจากรากพืชสู่ส่วนเหนือดินทางไซเลมและสะสมในผนังของไซเลมช่วยให้ไซเลมแข็งแรง และไม่ยุบตัวขณะพืชมีอัตราการคายน้ำสูง ส่วนปริมาณการสะสมซิลิคอนในแต่ละส่วนขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำของส่วนนั้นๆ และจะมีมากขึ้นตามอายุของพืช ซิลิคอนที่สะสมในพืชอยู่ในรูป amorphous silica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) จัดเรียงเป็นชั้นในผนังเซลล์ มีประโยชน์ต่อพืชคือ ลดการคายน้ำผ่านผิวเคลือบคิวทินและขัดขวางการเข้าทำลายของเชื้อโรคเข้าไปในเซลล์ (Balasta *et al.*, 1989)

2.5.1 อิทธิพลของซิลิคอนต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่อพืช

การใส่ซิลิคอนลงไปในดินซึ่งมักจะใช้ในรูปแคลเซียมซิลิเกตโซเดียมซิลิเกตและเบสิกสแลก (basic slag) จะช่วยลดอัตราการตรึงฟอสฟอรัสของดินและเพิ่มอัตราการดูดฟอสฟอรัสในพืช Suchisa และคณะ (1963) รายงานว่า ผลผลิตของหญ้าชูดานจะเพิ่มขึ้นจาก 2 ton ha^{-1} เป็น 7.6 ton ha^{-1} และอัตราการดูดฟอสฟอรัสจะเพิ่มจาก 4 kgP ha^{-1} เป็น 15 kgP ha^{-1} เมื่อใส่ซิลิคอนลงไปในดินอันดับอัลทิซอลส์ (Ultisols) ในอัตรา 1 kg ha^{-1}

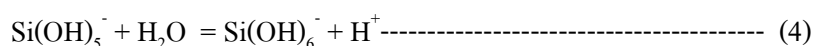
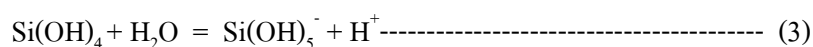
จรงค์ษ์ และคณะ (2544) ได้ศึกษาผลการใช้ซิลิคอนร่วมกับฟอสฟอรัสต่อผลผลิตของข้าวในชุดดินรังสิต พบว่า การใส่ฟอสฟอรัสร่วมกับซิลิคอนมีผลในการเพิ่มผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิตกรดจัด เมื่ออัตราการใส่ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นผลผลิตข้าวจะเพิ่มขึ้น

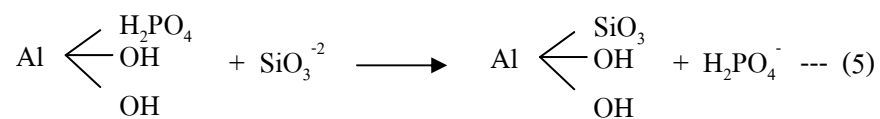
และการใส่ซิลิคอนร่วมกับฟอสฟอรัสจะส่งเสริมให้จำนวนเมล็ดทั้งหมดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้นกว่าการใส่ฟอสฟอรัสแต่เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบผลของการใช้ฟอสฟอรัสรวมกับการใส่ซิลิคอนที่มีต่อผลผลิตข้าว
ที่มา : จงรักษ์ และคณะ (2544)

นอกจากนี้ ซิลิคอนยังมีผลในด้านอื่น ๆ เช่น ช่วยลดการตรึงฟอสเฟตในดินทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากการใส่ซิลิคอนจะเกิดการแย่งที่กันระหว่างอนุภาคซิลิเกตซึ่งมีประจุลบเช่นเดียวกันกับอนุภาคฟอสเฟต โดยที่อนุภาคซิลิเกตจะเข้าไปแทนที่อนุภาคฟอสเฟตที่ถูกยึดไว้ ทำให้อนุภาคฟอสเฟตที่เดิมถูกตรึงไว้นั้นหลุดออกมาอยู่ในสารละลายดินและเป็นประโยชน์กับพืชได้ ดังสมการที่ 5 นอกจากนี้ซิลิคอนในรูปแคลเซียมซิลิเกตหรือ โซเดียมซิลิเกต เมื่อมีการละลายในสภาพดินที่เป็นกรดจะอยู่ในรูปของโมโนซิลิซิก (Si(OH)₄) สามารถแตกตัว (ionization) ให้ H⁺ ดังสมการที่ 3 และ 4 (Silva, 1971; Haynes, 1984)





การละลายและประสิทธิภาพของซิลิคอนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น pH ของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ระดับความชื้นในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของเซสควิออกไซด์ (sesquioxides) ซึ่งมีอยู่มากในดินกรดที่ดอง ทำให้มีการดูดซับแอนไอออนซิลิเกต และมีการปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาได้มากขึ้น (ยงยุทธ, 2546)

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟตที่จำหน่ายในท้องตลาด
- 3.2 ศึกษาสารสกัดเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟตที่มีขายในท้องตลาด
- 3.3 ศึกษาสัณฐานภาพการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน
- 3.4 ศึกษาสัณฐานภาพของหินฟอสเฟตร่วมกับซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ และซิลิโคนต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ และสถานที่ทำการวิจัย

1 วัสดุ/อุปกรณ์การทำวิจัย

1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในภาคสนาม

1. pH test kit
2. อุปกรณ์ในการขุดดิน เช่น จอบ พลั่วตักดิน พลั่วสนาม

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

1. เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่าง
2. กระจกป้องกันพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง
3. ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร
4. ตะแกรงร่อนดินขนาด 0.5 มิลลิเมตร
5. กระดาษกรองเบอร์ 5
6. สารเคมี Citric acid, Formic acid, Ammonium hydroxide
7. ขวดสำหรับเก็บตัวอย่างสารละลายขนาด 30 50 และ 5,000 มิลลิลิตร
8. เครื่องเขย่า (Table rotary shaker)
9. เครื่องเขย่า (End over end shaker)
10. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
11. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
12. เครื่องวัดสีเบสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Visible spectrophotometer)
13. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง
14. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
15. ขวดพลาสติกขนาด 600 มิลลิลิตร

2. ชุคดินและปุ๋ยที่ใช้ทำการทดลอง

ชุคดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกจากพื้นที่ที่เป็นดินกรดที่ดอน จำนวน 3 ชุคดิน

1. ชุคดินกระบี่ (Kbi : Fine, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandudults) บริเวณสวนยางพาราบ้านหยงสตาร์ ตำบลท่าข้าม อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

2. ชุดดินคอหงส์ (Kh : Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandudults)
บริเวณสวนยางพารา บ้านไร่ ตำบลบ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

3. ชุดดินอ่าวลึก (Ak : Very-fine, kaolinitic, isohyperthermic, Rhodic Kandiodoxs)
บริเวณสวนยางพารา โรงเรียนบ้านช่องหาร ตำบลช่องหาร อำเภอวังวิเศษ จังหวัดตรัง

2.1 หินฟอสเฟตที่ใช้ทำการทดลอง

1. หินฟอสเฟต ตราหัวสิงโต สูตรปุ๋ย 0-3-0
2. หินฟอสเฟต ตราหัวสิงค์ สูตรปุ๋ย 0-3-0
3. หินฟอสเฟต ตราค้างคาวลูกโลก สูตรปุ๋ย 0-3-0
4. หินฟอสเฟต ตราสามดอกจิก สูตรปุ๋ย 0-3-0
5. หินฟอสเฟต ตรากวาง สูตรปุ๋ย 0-3-0
6. หินฟอสเฟต ตราแอปเปิ้ล สูตรปุ๋ย 0-3-0
7. หินฟอสเฟต ตราภูเขาไฟ สูตรปุ๋ย 0-3-0
8. หินฟอสเฟต ตราแผนที่ดินยาง สูตรปุ๋ย 0-3-0

2.2 ปุ๋ยและสารปรับปรุงดินที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดซิลิกอน (H_4SiO_4) ดี.ดี.ตราม้าเงา บริษัท ฟู้กเทียนกรุ๊ป จำกัด ชนิดเม็ด ขนาด 3-5 มิลลิเมตร น้ำหนัก 50 kg

2. ซีโอไลต์ ตรา Natural Zeolite ผลิตโดย บริษัท Nitto Funka Tokyo K. K. ประเทศญี่ปุ่น ชนิดผงขนาด <0.002 มิลลิเมตร น้ำหนัก 20 kg เป็นซีโอไลต์ประเภท Mordenite มีค่า CEC 160 $cmol_kg^{-1}$ มีค่า pH 6.4, SiO_2 68.9 %, Al_2O_3 12.4 %, Fe_2O_3 1.4 %, MgO 0.2 %, CaO 2.6 %, Na_2O 1.6 %, K_2O 2.2 % และ P_2O_5 0.1 %

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ค่อนข้างดอง ประกอบด้วย 4 การทดลอง ดังนี้ 1) ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ ปริมาณธาตุ และสารประกอบในตัวอย่างหินฟอสเฟต 2) ศึกษาสารสกัดตัวชี้วัดการละลายของหินฟอสเฟต 3) ศึกษาการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ค่อนข้างดอง 4) ศึกษาอิทธิพลของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อ้อมตัวด้วยแอมโมเนียม และการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ค่อนข้างดอง

3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟต

การศึกษาโดยใช้หินฟอสเฟต 4 ยี่ห้อ คือ 1) หินฟอสเฟต ตราหัวสิงโต (PR1) 2) หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ 3) หินฟอสเฟตตราค้างคาวลูกโลก (PR3) และ 4) หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก

โดยวิธี X-ray Diffractometer (XRD) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบโดยการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการหักเหของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง (Jackson, 1965)

3.2 ศึกษาองค์ประกอบและปริมาณธาตุของหินฟอสเฟต

วิเคราะห์หินฟอสเฟต 4 ยี่ห้อ เช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.1 โดยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) หลักการที่รังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบตัวอย่างทำให้เกิดการปล่อยโปรตอนออกมา โปรตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดกันจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้น ๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโปรตอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ (Norrish and Chappell, 1977)

3.3 ศึกษาสารสกัดตัวชี้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟต

สารสกัดที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการละลายได้ของหินฟอสเฟต 3 ชนิด ได้แก่ 2% Citric acid (2%CA), 2% Formic acid (2%FA) และ 1M Neutral ammonium citrate (NAC) โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

1) 2% CA โดยชั่ง citric acid (99%) 40 g และปรับปริมาตรด้วยน้ำ deionized (DI) เป็น 2,000 mL

2) 2% FA คูดสารละลาย formic acid (85%) 47mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI เป็น 2,000 mL

3) NAC โดยชั่ง citric acid 370 g ละลายด้วยน้ำ DI และเติม ammonium hydroxide (28-29%) ปริมาตร 345 mL ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับ pH ที่ 7 โดยใช้ citric acid หรือ NH_4OH แล้วปรับปริมาตรเป็น 2,000 mL ด้วยน้ำ DI

การศึกษาใช้ตัวอย่างหินฟอสเฟต 8 ยี่ห้อ คือ 1) หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต (PR1) 2) หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ (PR2) 3) หินฟอสเฟตตราค่างควากโลก (PR3) 4) หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก (PR4) 5) หินฟอสเฟตตราควาง (PR5) 6) หินฟอสเฟตตราแอปเปิ้ล (PR6) 7) หินฟอสเฟตตราภูเขาไฟ (PR7) และ 8) หินฟอสเฟตตราแผนที่ต้นยาง (PR8)

วิธีการสกัด โดยชั่งตัวอย่าง 0.4 g ใส่หลอดเหวี่ยงขนาด 50 mL เติมสารสกัดต่างๆ ในอัตราส่วน 1 : 100 โดยปริมาตร ทำการเขย่าแบบ end-over-end ที่ความเร็วประมาณ 15-30 rpm ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2500 rpm กรอง

สารละลายส่วนในสผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 แต่ละตัวอย่าง ทำการสกัด 3 ครั้ง (sequential extract) ติดต่อกัน โดยเติมสารสกัดครั้งที่ 2 และ 3 ในหลอดตัวอย่างเดิม เขย่าและกรอง ในทำนองเดียวกันกับการสกัดครั้งแรก (Chien and Hammond, 1978) สารละลายที่ได้ทั้ง 3 ครั้งนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ P ด้วยวิธี Vanadomolybdate โดยเครื่อง visible spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 420 nm

ตารางที่ 14 พารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของหินฟอสเฟต

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
Total P ₂ O ₅	Vanadomolybdate Method (AOAC, 1995)
Avail P ₂ O ₅	สกัดด้วยสารละลาย 1M NAC, 2%FA และ 2%CA หา P ด้วยวิธี Vanadomolybdate (Chien and Hammond, 1978)

3.4 ศึกษาการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน

เลือกตัวอย่างของหินฟอสเฟตที่มีการละลายได้สูง จากสารสกัด 2% CA จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ PR1 หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต และ PR2 หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ นำมาทดสอบการละลายร่วมกับดินกรดที่ดอน ที่มีศักยภาพการดูดซับของฟอสฟอรัส (phosphorus buffer capacity, PBC, Ozanne and Shaw, 1967) ที่แตกต่างกันจำนวน 3 ชุดดิน คือ ชุดดินคองหงส์ (Kh, PBC 7 mgP kg⁻¹) ชุดดินอ่าวลึก (Ak, PBC 16 mgP kg⁻¹) และ ชุดดินกระบี่ (Kbi, PBC 62 mgP kg⁻¹) (จุฑารัตน์ และวิเชียร, 2554)

การบ่มดินร่วมกับหินฟอสเฟต โดยนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm แต่ละชุดดิน จำนวน 500 g มาผสมกับหินฟอสเฟตในอัตรา 0 และ 800 mgP kg⁻¹ soil (น้ำหนักของหินฟอสเฟตคำนวณจาก Total P₂O₅ ของหินฟอสเฟตของแต่ละยี่ห้อ) และบรรจุในภาชนะทรงกระบอกที่มีความสูง 20 cm ความกว้างของปากกระบอก 6 cm จากนั้นเติมน้ำตามความจุความชื้นสนามของแต่ละชุดดิน แล้วปิดฝาเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ทำการชะละลายด้วยน้ำกลั่นในวันที่ 3 10 และ 25 ของการบ่มให้ได้ปริมาตร 20 mL และนำน้ำไปวัดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายด้วยเครื่อง ICP-OES หลังจากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินเมื่อครบ 36 และ 80 วัน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการละลายของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% CA ประกอบด้วย 9 ตำรับการทดลอง 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 15 วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomize Design (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan multiple Rang Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม R 2.12.0.

ตารางที่ 15 ศึกษาการละลายของหินฟอสเฟตกับดินกรดที่ดอน

ชุดดิน	ตำรับการทดลอง	รายละเอียด
Kh	T1	ดิน 500 g (Control)
	T2	ดิน 500 g + PR1 800 mgP kg ⁻¹
	T3	ดิน 500 g + PR2 800 mgP kg ⁻¹
AK	T4	ดิน 500 g (Control)
	T5	ดิน 500 g + PR1 800 mgP kg ⁻¹
	T6	ดิน 500 g + PR2 800 mgP kg ⁻¹
Kbi	T7	ดิน 500 g (Control)
	T8	ดิน 500 g + PR1 800 mgP kg ⁻¹
	T9	ดิน 500 g + PR2 800 mgP kg ⁻¹

หมายเหตุ : PR1= หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต PR2=หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์

3.5 ศึกษาอิทธิพลของซีโอไลท์ธรรมชาติ ซีโอไลท์ที่ผ่านการอิมตัวด้วย NH₄⁺ และซิลิกอน ต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน

เลือกตัวอย่างของหินฟอสเฟตที่มีการละลายได้สูง จากการสกัด 2% CA จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ PR1 (หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต) และ PR2 (หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์) นำมาทดสอบการละลายร่วมกับดินกรดที่ดอนที่มีศักยภาพการดูดซับต่างกันจำนวน 3 ชุดดิน คือ ชุดดินคองหงส์ (Kh) ชุดดินอ่าวลึก (Ak) และ ชุดดินกระบี่ (Kbi) โดยใช้ดิน 500 g ที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร มาผสมกับหินฟอสเฟตในอัตรา 0 และ 800 mgP kg⁻¹ soil กับซีโอไลท์ธรรมชาติ และซีโอไลท์ที่อิมตัวด้วย NH₄⁺ ในอัตราส่วน 1:7 (หินฟอสเฟต : ซีโอไลท์) (Harry *et al.*, 2002) ส่วน Si ใช้ในอัตรา 1:8 โดยน้ำหนัก (ชอบ และจินตนา, 2557) การบ่มตัวอย่างดินในภาชนะทรงกระบอกที่มีความสูง 20 cm ความกว้างของปากกระบอก 6 cm และทำการเติมน้ำตามความจุความชื้นสนามของแต่ละชุดดิน แล้วปิดฝาเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น

ทำการชะละลายด้วยน้ำกลั่นในวันที่ 3, 10 และ 25 ของการบ่มให้ได้ปริมาณน้ำ 20 มิลลิลิตร และนำน้ำไปวัดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายด้วยเครื่อง ICP-OES หลังจากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินเมื่อครบ 36 และ 80 วัน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการละลายของหินฟอสเฟตด้วย 2% CA ดังตารางที่ 16 และทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ completely randomize design (CRD) ทั้งหมด 9 ตำรับการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ (ทั้งหมด 27 ตำรับใน 3 ชุดดิน) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan multiple Rang Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม R 2.12.0

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างซีโอไลต์ให้อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (Zeolite Saturate) และ Si

นำซีโอไลต์ ที่มีขนาด < 0.002 mm มาเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1 M (NH_4^+) เขย่า 3 ครั้ง ครั้งละ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาล้างคลอไรด์ออก (Mercer and Ames, 1978) จากนั้นจึงลวกให้แห้ง ส่วนซิลิคอน (Si) นำซิลิคอนที่มีขนาด 3-5 mm มาบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด < 0.5 mm ซิลิคอนที่ใช้อยู่ในรูป H_2SO_4 (กรดซิลิคอน)

ตารางที่ 16 คำรับการทดลองที่ศึกษาการละลายได้ของหินฟอสเฟตร่วมกับซีโอไลต์

ชุดดิน	คำรับการทดลอง	รายละเอียด
	T1	ดิน 500 g (Control)
	T2	ดิน 500g + PR1 800 mgP kg ⁻¹
	T3	ดิน 500g + PR2 800 mgP kg ⁻¹
	T4	ดิน 500 g + PR1 800 mgP kg ⁻¹ : Zeolite 1: 7
Kh, Ak และ Kbi	T5	ดิน 500 g + PR2 800 mgP kg ⁻¹ : Zeolite 1: 7
	T6	ดิน 500 g + PR1 800 mgP kg ⁻¹ : NH_4^+ - Zeolite (1:7)
	T7	ดิน 500 g + PR2 800 mgP kg ⁻¹ : NH_4^+ - Zeolite (1:7)
	T8	ดิน 500g + PR1 800 mgP kg ⁻¹ +Si 1000 kg ha ⁻¹
	T9	ดิน 500g + PR2 800 mgP kg ⁻¹ +Si 1000 kg ha ⁻¹

หมายเหตุ : PR1= หินฟอสเฟตหัวสิงโต, PR2=หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟต

1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่

ผลการวิเคราะห์โดยการหักเหของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) พบว่า หินฟอสเฟตทั้ง 4 ยี่ห้อ คือ 1) หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต (PR1) 2) หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ (PR2) 3) หินฟอสเฟตตราค่างดาวลูกโลก (PR3) และ 4) หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก (PR4) ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแร่ hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10.1}(\text{PO}_4)_{5.6}(\text{OH})_{3.3}$), และ crandallite ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และ montgomerite ($\text{Ca}_4\text{MgAl}_4(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) นอกจากนี้ยังพบแร่อื่นๆ เช่น Calcite ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) และ quartz (SiO_2) (ตารางที่ 17) ตัวอย่างหินฟอสเฟตที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ยี่ห้อ จะอยู่ในรูปของ ออกไซด์ของธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งแตกต่างกับหินฟอสเฟตในต่างประเทศ (Hammond *et al.*, 1986) ที่เป็นแร่อะพาไทต์ในหินตะกอน (sedimentary apatite) มีคาร์บอเนต-ฟลูอออะพาไทต์ (carbonate-Fluor apatite) ชนิด francolite ($(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Sr}, \text{Na})_{10}(\text{PO}_4, \text{SO}_4, \text{CO}_3)_6\text{F}_{2-3}$) เป็นองค์ประกอบหลัก

หินฟอสเฟตต่างประเทศที่นำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดของหินตะกอน แร่ apatite บางส่วนถูกแทนที่โดย carbonate มีโครงสร้างของผลึกซับซ้อน และมีการแทนที่ของ Ca โดย Na และ Mg ประมาณ 10% Ca นอกจากนี้ F บางส่วนอาจถูกแทนที่โดย OH^- เช่น หินฟอสเฟต Bayovor deposit (sechura) องค์ประกอบทางเคมีของแร่ apatite ที่มีการแทนที่ดังกล่าว ดังนี้ $\text{Ca}_{10-a}(\text{Na}, \text{Mg})_a(\text{PO}_4)_{6-b}(\text{CO}_3)_b\text{F}_c$ หรือสูตรทั่วไปของหินฟอสเฟต คือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4\text{CO}_3)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$ (Zapata and Roy 2004) โดยทั่วไปหินฟอสเฟตจากแหล่งต่าง ๆ จะมีองค์ประกอบไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เกิด (วิศิษฐ์ และมนูเวทย์, 2521) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางแร่ของหินฟอสเฟต มีความสัมพันธ์กับศักยภาพการละลายได้ และความเป็นประโยชน์เมื่อใส่ลงไปในดิน

ตารางที่ 17 องค์ประกอบแร่ธาตุและสูตรทางเคมีของหินฟอสเฟต

PR	Minerals composition	Chemical formular
PR1	hydroxylapatite	$\text{Ca}_{10.132}(\text{PO}_4)_{5.958}(\text{OH})_{3.258}$
	crandallite	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	montgomeryite	$\text{Ca}_4\text{MgAl}_4(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
	quartz	SiO_2
PR2	hydroxylapatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
	crandallite	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$
	calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
	quartz	SiO_2
PR3	hydroxylapatite	$\text{Ca}_{10.132}(\text{PO}_4)_{5.958}(\text{OH})_{3.258}$
	calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
	quartz	SiO_2
PR4	hydroxylapatite	$\text{Ca}_{9.74}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_{2.08}$
	crandallite	$\text{CaAl}_3(\text{OH})_6(\text{PO}_3(\text{O}_{0.5}(\text{OH})_{0.5}))_2$
	calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
	dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	quartz	SiO_2

หมายเหตุ : PR1=หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต PR2=หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ PR3=หินฟอสเฟตตราข้างดาวลูกโลก
และ PR4=หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก

1.2 ศึกษาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบและสารประกอบในหินฟอสเฟต

จากการศึกษาหินฟอสเฟตจำนวน 4 ยี่ห้อส่วนใหญ่จะมีระดับของฟอสฟอรัสทั้งหมดค่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 19) มีเพียง PR2 ตัวเดียวเท่านั้นที่มีฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับช่วงค่าเฉลี่ยของหินฟอสเฟต โดยทั่วไป มีปริมาณ 22.57 %P₂O₅ (ตารางที่ 19) ซึ่งในขณะที่หินฟอสเฟตในต่างประเทศมีค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสเท่ากับ 31.72 %P₂O₅ (Van Kanuwenbergh and McClellan, 2004) และอื่น ๆ ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 18 องค์ประกอบของหินฟอสเฟต

Phosphate rocks	Contents of the major components (%)							
	P	Ca	Mg	K	Si	Al	CaO	CO ₂
PR1	7.11	38.28	Trace	Trace	0.69	0.95	28.40	11.07
PR2	11.15	25.79	1.24	0.69	9.85	2.54	36.08	18.51
PR3	0.76	20.30	0.60	0.75	13.32	3.25	53.57	37.85
PR4	2.87	31.08	Trace	Trace	7.46	1.14	43.49	2.47

หมายเหตุ : PR1=หินฟอสเฟตราหัวสิงโต PR2=หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ PR3=หินฟอสเฟตตราค้างคาวลูกโลก
และ PR4=หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก

ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ในหินฟอสเฟตทั้ง 4 ยี่ห้อที่มีขายตามท้องตลาด ประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ ได้แก่ P ที่พบ 0.76-11.15 % Ca ที่พบ 20.30-38.28 % Mg ที่พบ < 0.60-1.24 % K ที่พบ < 0.69-0.75 % Si ที่พบ 0.69-13.32 % และ Al ที่พบ 0.95-3.25 %

นอกจากนี้ยังพบธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบ เช่น ไททาเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) สตรอนเชียม (Sr) โครเมียม (Cr) คอปเปอร์ (Cu) ตะกั่ว (Pb) ซัลเฟอร์ (S) และนิกเกิล (Ni) ในปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจากหินฟอสเฟตที่มีการผุพังสลายตัวจะมีปริมาณฟอสฟอรัสจะลดลงเนื่องจากถูกชะล้าง หรือเคลื่อนย้ายออกไปได้ง่ายกว่า ส่วนซิลิคอนมักเป็นองค์ประกอบของแร่ควอตซ์ซึ่งทนทานต่อการสลายตัว และเป็นครรชนที่ดีที่บอกถึงลักษณะแร่ฟอสเฟตทุติยภูมิ

หินฟอสเฟตของประเทศไทยส่วนใหญ่มีฟอสเฟตทั้งหมด 20-40 % และมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 4 หรือ 5 % ขึ้นไป (จันทร์จิรา, 2528) ตัวอย่างหินฟอสเฟตที่วางขายอยู่ในท้องตลาด ส่วนใหญ่มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ก่อนล้างต่ำ เฉลี่ย 5.47 % แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารในหินฟอสเฟตจากแหล่งในประเทศไทยในอดีต พบว่า มีปริมาณ P₂O₅ ทั้งหมด และ Ca 18.20-38.19 และ 22.6-36.4 % ตามลำดับ และ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 0.8-11.6 % ซึ่งแตกต่างกันกับปริมาณของ Mg K และ S พบ < 0.01-8.8, < 0.01-1.47 และ < 0.01-0.15 % ตามลำดับ (จันทร์จิรา, 2528)

McClellan, (1978), Deer และคณะ (1965), Altschuler, (1973) และ Axelrod, (1978) แบ่งแร่ออกเป็น 2 จำพวก คือ fluor-apatite และ carbonate-fluor-apatite พบว่า แร่จำพวกคือ fluor-apatite มี P₂O₅ อยู่ระหว่าง 40.67-41.87 % สูงกว่าแร่ carbonate-fluor-apatite ที่มี P₂O₅ อยู่ระหว่าง 34.7-37.1 % Ca ที่พบ มีปริมาณใกล้เคียงกันกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 52.8-55.5%

จะพบ Mg ในแร่ carbonate-fluor-apatite เพียงอย่างเดียวอยู่ระหว่าง 0.36-0.60% มี Na อยู่ระหว่าง 0.09-1.50 % นั้นหมายถึง หินฟอสเฟตของการทดลองนี้ เกิดจากอิทธิพลของน้ำทะเล

อย่างไรก็ตาม การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะปริมาณฟอสเฟตไม่ว่าจะโดยวิธีทางเคมี หรือโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ ก็จะทำให้ผลที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ เช่น แหล่งของหินฟอสเฟตจากบ้านนากาญจน์ มีค่า Total P_2O_5 จากการศึกษาทางเคมี 38.19 % และมีค่า Total P_2O_5 จากการศึกษาโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ 24 % และแหล่งของหินฟอสเฟตจากบ้านเขาคันหมอกโมกษธรรม มีค่า Total P_2O_5 จากการศึกษาทางเคมี 18.20% และมีค่า Total P_2O_5 จากการศึกษาโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ 13.14% แต่เราสามารถเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในการศึกษาได้ แต่ผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางเคมีจะได้ปริมาณฟอสเฟตมากกว่าการวิเคราะห์โดยใช้การเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (จันทร์จิรา, 2528)

2. ศึกษาสารสกัดตัวชี้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟต

จากการศึกษาโดยใช้สารสกัดเป็นตัวชี้วัดการละลายได้ของหินฟอสเฟต พบว่า ตัวอย่างของหินฟอสเฟต ทั้ง 8 ยี่ห้อ ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด 2%CA, 2%FA และ NAC พบว่า หินฟอสเฟต PR1 และ PR2 ที่สกัดด้วย 2% CA มีการละลายได้ของหินฟอสเฟตสูงที่สุด (ตารางที่ 19) เมื่อเทียบกับ เกณฑ์มาตรฐานตัวชี้วัดของหินฟอสเฟตสำหรับการใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงดังกล่าว (ตารางที่ 9) พบว่า หินฟอสเฟตส่วนใหญ่มีระดับศักยภาพต่ำ ยกเว้น PR1 และ PR2 ที่สกัดด้วย 2% CA มีปริมาณ P_2O_5 13.27 % และ 13.07 % ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอยู่ในเกณฑ์สูงสุดเพียง 2 ยี่ห้อเท่านั้น ส่วน PR1 และ PR2 ที่สกัดด้วย NAC อยู่ในระดับกลาง มีปริมาณ P_2O_5 4.98% และ 4.54 %

จากการศึกษาของ Van Kauwenbergh และ McClellan (2004) ได้ศึกษาการละลายได้ของหินฟอสเฟตที่นำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงด้วยตัวชี้วัดสารสกัดทั้ง 3 ชนิดพบว่าหินฟอสเฟตทั้ง 5 ชนิด คือ North Carolina (USA), Gafsa (Tunisia), Central Florida (USA), Tennessee (USA) และ Araxa (Brazil) พบว่า ศักยภาพการละลายได้ด้วยสารสกัดทั้ง 3 สารสกัดสูงเกือบทั้งหมด โดย North Carolina (USA) มีปริมาณ P_2O_5 ด้วยสารสกัด 2% CA เท่ากับ 15.8 %, 2% FA เท่ากับ 25.7% และ NAC เท่ากับ 7.1% เมื่อเปรียบเทียบกับหินฟอสเฟตที่ขายในท้องตลาดส่วนใหญ่จะมีศักยภาพการละลายในสารสกัดเหล่านี้ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าหินฟอสเฟตที่ขายในท้องตลาดส่วนใหญ่ไม่มีการควบคุมมาตรฐานการผลิตที่น่าเชื่อถือ และไม่ระบุแหล่งที่มาของตัวอย่างที่ชัดเจน

ตารางที่ 19 ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% CA, 2% FA และ 1M NAC

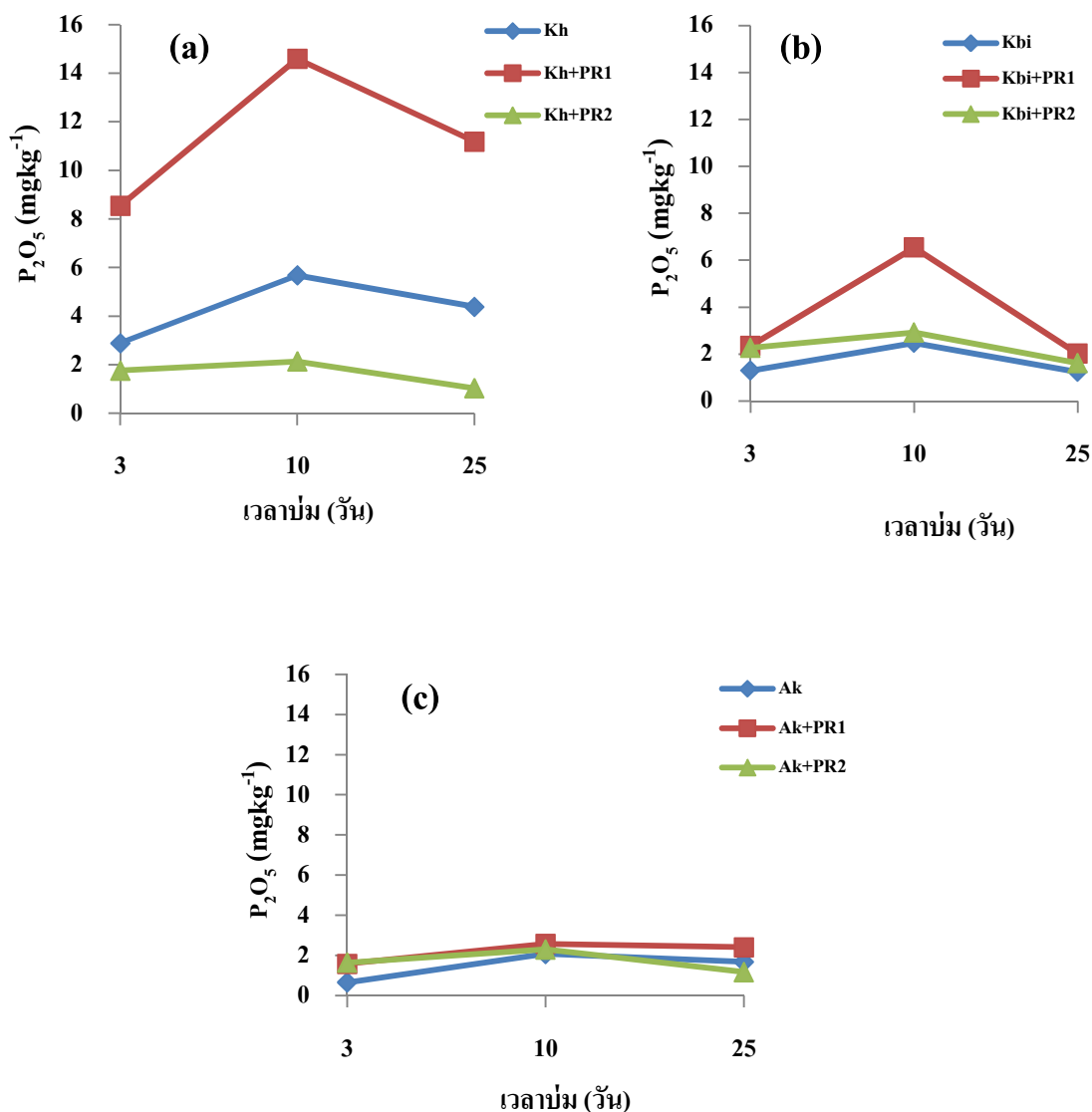
PR	Solubility expressed as P ₂ O ₅ (%)		
	2% Citric acid (2% CA)	2% Formic acid (2% FA)	1M Neutral ammonium citrate (NAC)
PR1	13.27	2.35	4.98
PR2	13.07	2.36	4.54
PR3	1.77	1.57	0.32
PR4	2.22	2.05	0.42
PR5	0.91	1.66	0.37
PR6	2.32	2.05	0.44
PR7	2.14	2.09	0.26
PR8	0.97	1.14	0.39

หมายเหตุ : PR1=หินฟอสเฟตตราหัวสิงโต PR2=หินฟอสเฟตตราหัวสิงค์ PR3=หินฟอสเฟตตราข้างควาถูโลก
PR4=หินฟอสเฟตตราสามดอกจิก PR5=หินฟอสเฟตตรา กวาง PR6= หินฟอสเฟตตราแอบเปิ้ล
PR7=หินฟอสเฟตตราภูเขาไฟ PR8=หินฟอสเฟตตราแผนที่ดินยาง

3. ศึกษาการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ดอน

3.1 การละลายได้ของหินฟอสเฟตโดยการชะละลายด้วยน้ำกลั่น

จากการศึกษาการชะละลายของหินฟอสเฟตในชุดดินต่าง ๆ ด้วยน้ำกลั่นทุก 3 10 และ 25 วัน ให้ได้สารละลายปริมาตร 20 ml พบว่า ในชุดดิน Kh การละลายของ PR1 สูงที่สุดเท่ากับ 14.59 mgkg⁻¹ และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาของการบ่มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 8 a) ในชุดดิน Kbi การละลายของหินฟอสเฟตมีรูปแบบคล้ายกับในดิน Kh แต่มีระดับการละลายได้ต่ำกว่ามากโดย PR1 มีระดับการละลายเพียง 6.54 mgkg⁻¹ ส่วน PR2 มีการละลายได้ของฟอสฟอรัสต่ำมาก ไม่แตกต่างทางสถิติกับชุดดิน Ak ระดับการละลายของหินฟอสเฟตอยู่ในระดับต่ำมากที่สุดทั้ง 2 PR เมื่อเทียบกับชุดดิน Kh และชุดดิน Kbi (รูปที่ 8c)

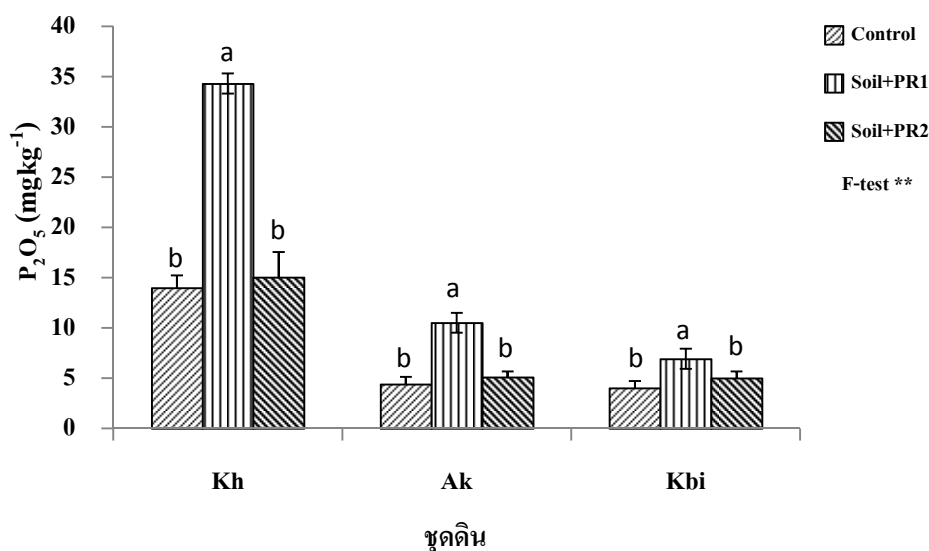


รูปที่ 8 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่น ชุดดิน Kh (a) ชุดดิน Ak (b) และ ชุดดิน Kbi (c)

จากการศึกษาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสหลังจากการชะละลายของชุดดินต่าง ๆ เป็นเวลา 25 วัน พบว่า หินฟอสเฟต PR1 ให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสได้สูงที่สุดในทุกชุดดิน แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับหินฟอสเฟต PR2 และตำรับควบคุม ซึ่งชุดดินที่พบ มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงสุด คือ ชุดดิน Kh (34.32 mg kg^{-1}) รองลงมา คือ ชุดดิน Ak (10.52 mg kg^{-1}) และ Kbi (6.93 mg kg^{-1}) ตามลำดับ (รูปที่ 9) เนื่องจาก แต่ละชุดดินมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสแตกต่างกัน โดยชุดดิน Ak มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงถึง

62 mgP kg⁻¹ รองลงมา คือชุดดิน Kbi 16 mgP kg⁻¹ และ ชุดดิน Kh มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเพียงแค่ 7 mgP kg⁻¹ (จุฑารัตน์ และวิเชียร, 2554) จึงทำให้ชุดดิน Kh มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงที่สุด

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นทั้งหมด 25 วัน พบว่า หินฟอสเฟต PR1 ที่บ่มร่วมกับชุดดิน Kh มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงที่สุด (34.32 mg kg⁻¹) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่ารับควบคุม หินฟอสเฟต PR1 ที่บ่มร่วมกับชุดดิน Ak และ Kbi มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงที่สุดในดำรับการทดลองในแต่ละชุดดิน (รูปที่ 9)



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ DMRT NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

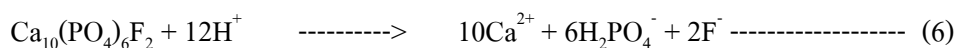
รูปที่ 9 ผลรวมของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 25 วัน

3.2 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% CA

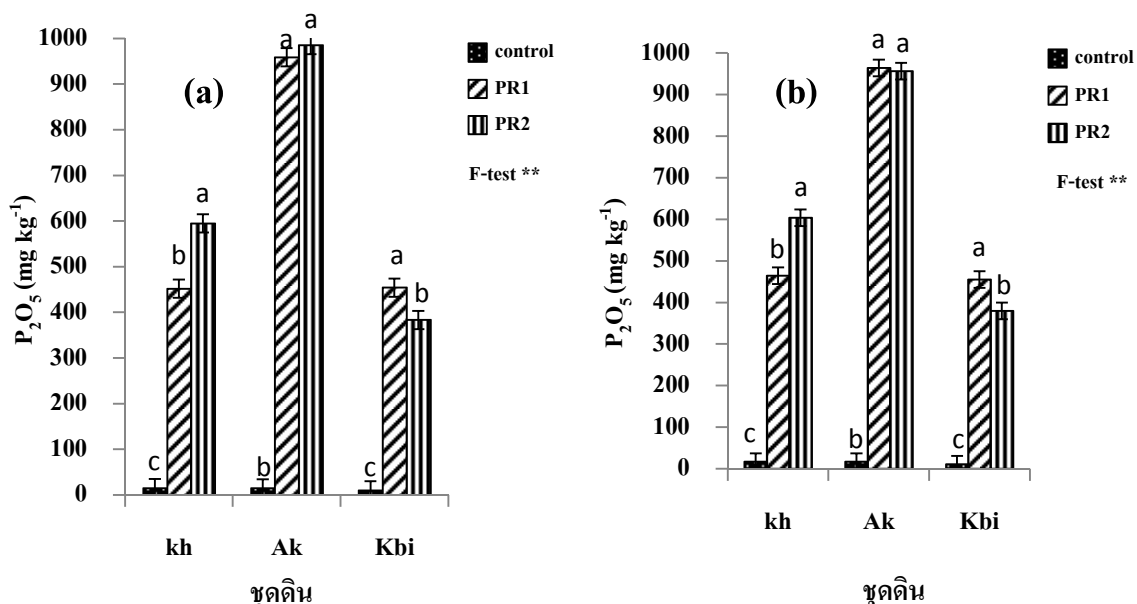
การละลายได้ของหินฟอสเฟตที่บ่มในดินกรดที่ดอน 3 ชุดดิน เป็นเวลา 36 วัน พบว่า หินฟอสเฟตทั้งสอง (PR1, PR2) มีปริมาณการละลายได้ใน 2% CA สูงกว่าในชุดดินควบคุม ทั้ง 3 ชุดดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยระดับ P₂O₅ ที่ละลายได้ของ PR2 สูงกว่า PR1 ในชุดดิน Kh และชุดดิน Kbi อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 10a) และ ระดับการละลายของหินฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในวันที่ 80 (รูปที่ 10b) ระดับการละลายได้ ของหินฟอสเฟตจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดิน โดยการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดิน Ak สูงกว่าการละลายได้ในดิน Kh และ Kbi

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้ง 36 และ 80 วัน (รูปที่ 10a, 10b) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากศักยภาพการดูดซับ P ที่แตกต่างกันของดิน โดยชุดดิน Ak มีศักยภาพการดูดซับ ฟอสฟอรัส (PBC) สูงถึง 62 mgP kg⁻¹ ทำให้มีการละลายของหินฟอสเฟตได้ดีกว่าดิน Kh และ Kbi ที่มี PBC ต่ำที่ระดับ 7 และ 16 mgP kg⁻¹ ตามลำดับ ดินที่มีศักยภาพการดูดซับสูงสามารถดูดซับ และลดระดับการอิ่มตัวของ H₂PO₄⁻ ที่ได้จากปฏิกิริยาการละลายได้ของหินฟอสเฟต ทำให้หินฟอสเฟตมีการละลายได้อย่างต่อเนื่อง ดังสมการที่ 6 (Hammond *et. al.*, 1986) และระดับ pH ของดิน

การละลายและการปลดปล่อย P ของหินฟอสเฟตดีกว่า ดินที่มีระดับ pH ต่ำ ซึ่งมีระดับ H⁺ สูง (Kamprath, 1977 อ้างโดย Smyth และ Sanchez, 1982)



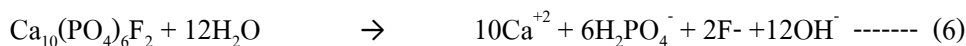
Wilson และ Ellis (1984) ได้ศึกษาการละลายของหินฟอสเฟตหลายชนิดในดินกรดที่มีอะลูมินัมมาก 4 ชุดดิน พบว่า ปัจจัยปริมาณ Ca ในสารละลายดิน ความเข้มข้นหรือกิจกรรม (activity) ของ Ca²⁺ ในสารละลายดิน มีอิทธิพลต่อการละลายของหินฟอสเฟต เมื่อกิจกรรมของ Ca²⁺ ในสารละลายดินเพิ่มขึ้น การละลายของหินฟอสเฟตจะลดลง



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ DMRT

รูปที่ 10 ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% CA เป็นเวลา 36 (a) และ 80 วัน (b)

การเพิ่มขึ้นของการละลายของฟอสฟอรัส มีผลมาจากการสลายตัวของหินฟอสเฟตในดิน ที่เป็นกรดดังสมการที่ 6 (Rajan *et al.*, 1996)

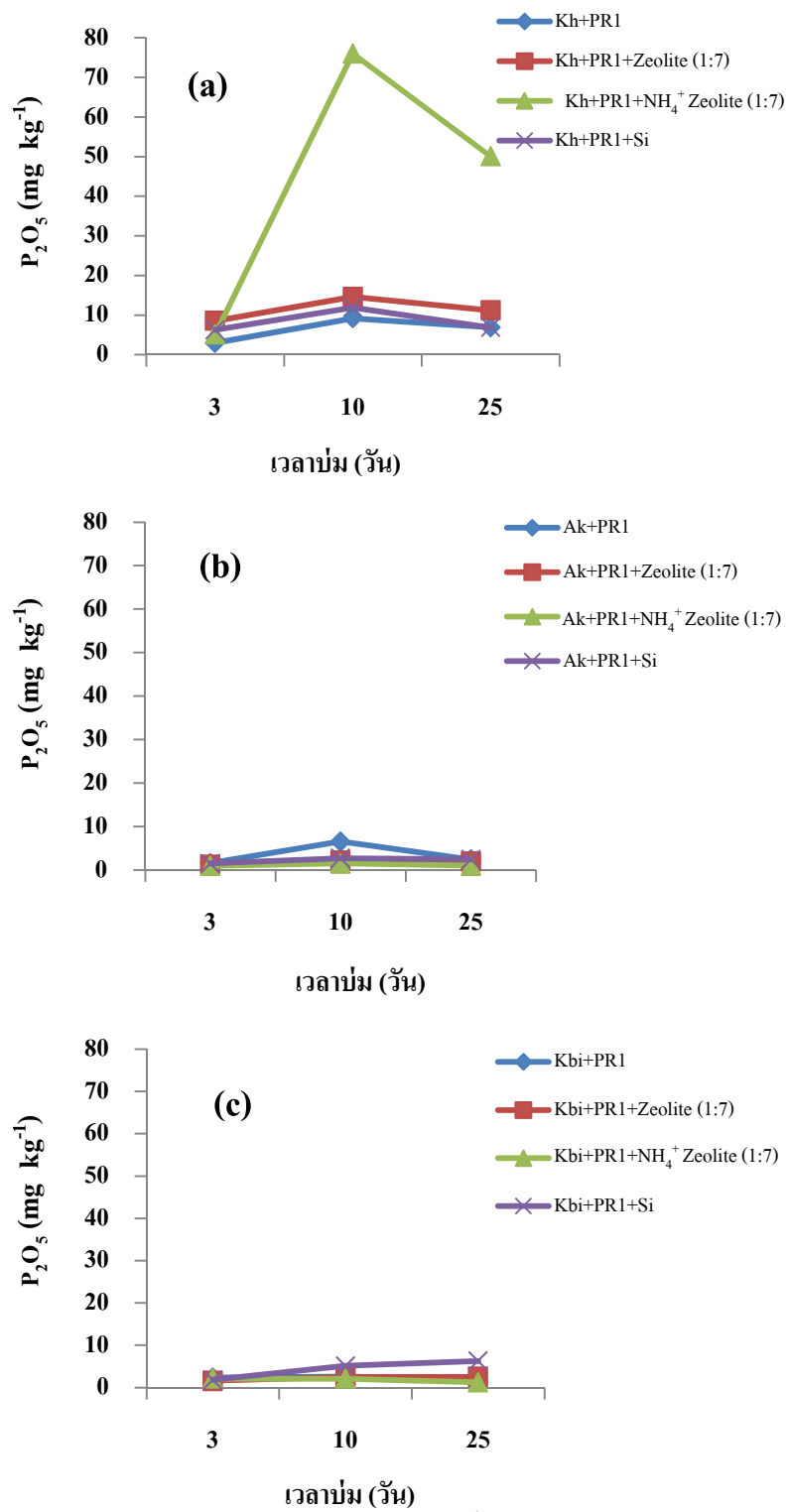


เมื่อหินฟอสเฟตถูกละลายจะทำปฏิกิริยากับ Fe และ Al ไอออนในดินกรดเป็น สารประกอบ Fe และ Al ฟอสเฟตที่ซับซ้อน

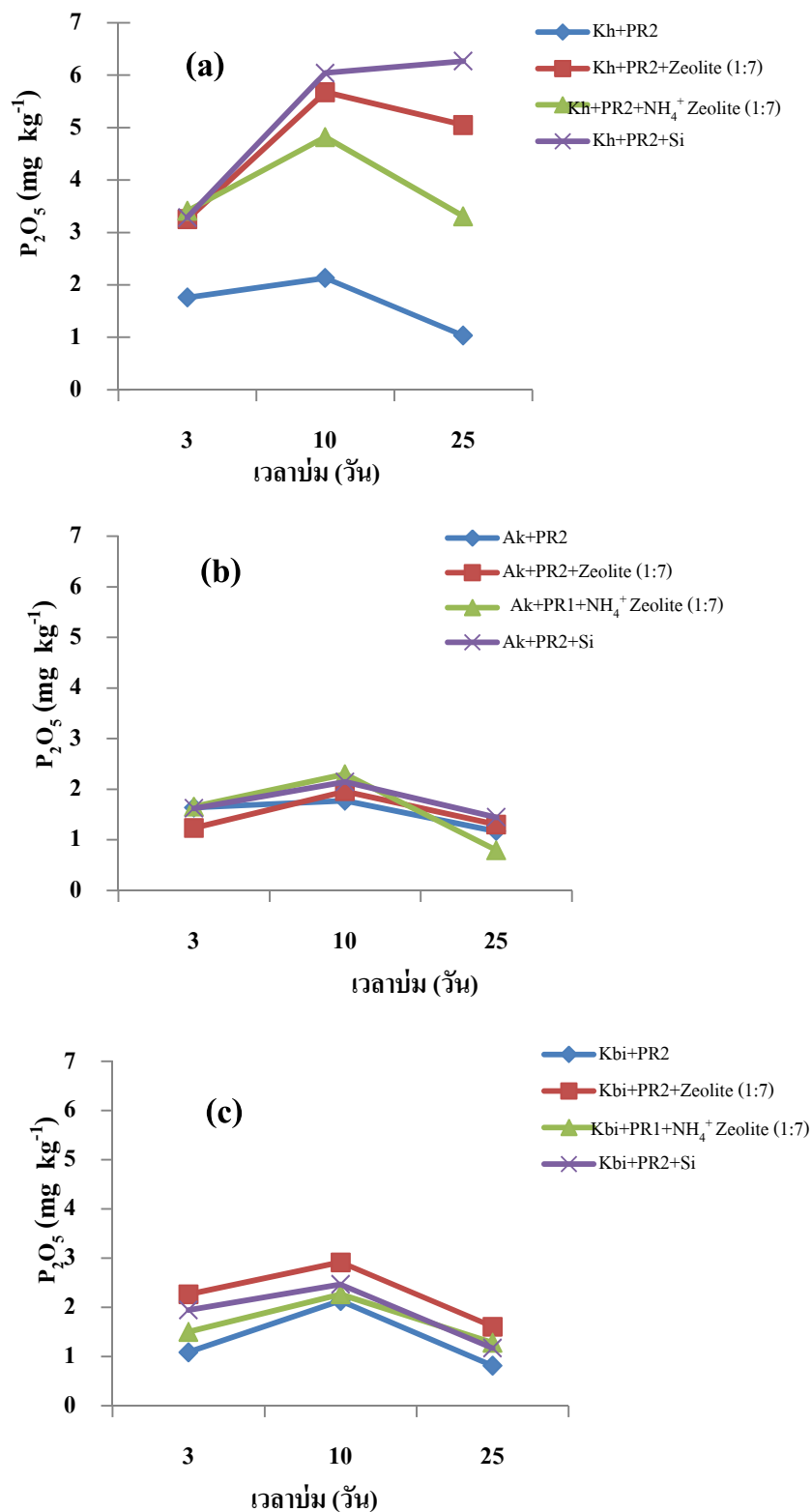
4. อิทธิพลของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ และ Si ต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟต

4.1 การละลายได้ของหินฟอสเฟตโดยการชะละลายด้วยน้ำกลั่น

จากการศึกษาการชะละลาย พบว่า ในชุดดิน Kh ในตำรับการทดลองที่ใช้ PR1 ร่วมกับ ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) มีการละลายของหินฟอสเฟตสูงที่สุดเท่ากับ 76.02 mg kg^{-1} รองลงมาเป็นตำรับการทดลองที่ใช้ PR1 ร่วมกับซิลิกอนมีการละลายของหินฟอสเฟตเท่ากับ 14.18 mg kg^{-1} (รูปที่ 11a) ในตำรับการทดลองที่ใช้ PR2 ร่วมกับซิลิกอนมีการละลายของหินฟอสเฟตเท่ากับ 6.27 mg kg^{-1} รองลงมาเป็นตำรับการทดลองที่ใช้ PR2 ร่วมกับซีโอไลต์มีการละลายของหินฟอสเฟตเท่ากับ 5.68 mg kg^{-1} (รูปที่ 12a) ในชุดดิน Ak ตำรับการทดลองที่ใช้ PR1 ร่วมกับปัจจัยต่างๆ มีการละลายของหินฟอสเฟตต่ำมาก ตำรับการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์ (2.71 mg kg^{-1}) ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) (1.49 mg kg^{-1}) และซิลิกอน (2.22 mg kg^{-1}) (รูปที่ 10b) ซึ่งแตกต่างกับตำรับการทดลองที่ใช้ PR2 ร่วมกับปัจจัยต่าง ๆ มีการละลายของหินฟอสเฟตสูงกว่า PR1 ($1.77, 2.14$ และ 1.96 mg kg^{-1} ตามลำดับ) (รูปที่ 12b) ในชุดดิน Kbi ในตำรับการทดลองที่ใช้ PR1 ร่วมกับปัจจัยต่างๆ มีการละลายของหินฟอสเฟตต่ำ ยกเว้นในตำรับการทดลองที่ใช้ซิลิกอนมีการละลายของหินฟอสเฟตเท่ากับ 5.15 mg kg^{-1} และจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเท่ากับ (6.30 mg kg^{-1}) (รูปที่ 11c) ในตำรับการทดลองที่ใช้ PR2 ร่วมกับซีโอไลต์ จะมีการละลายของหินฟอสเฟตสูงที่สุดเท่ากับ 2.93 mg kg^{-1} รองลงมาเป็นตำรับการทดลองที่ใช้ PR2 ร่วมกับซิลิกอนมีการละลายของหินฟอสเฟตเท่ากับ 2.47 mg kg^{-1} (รูปที่ 12c)



รูปที่ 11 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นของ PR1 ชุดดิน Kh (a) ชุดดิน Ak (b) และ ชุดดิน Kbi (c)

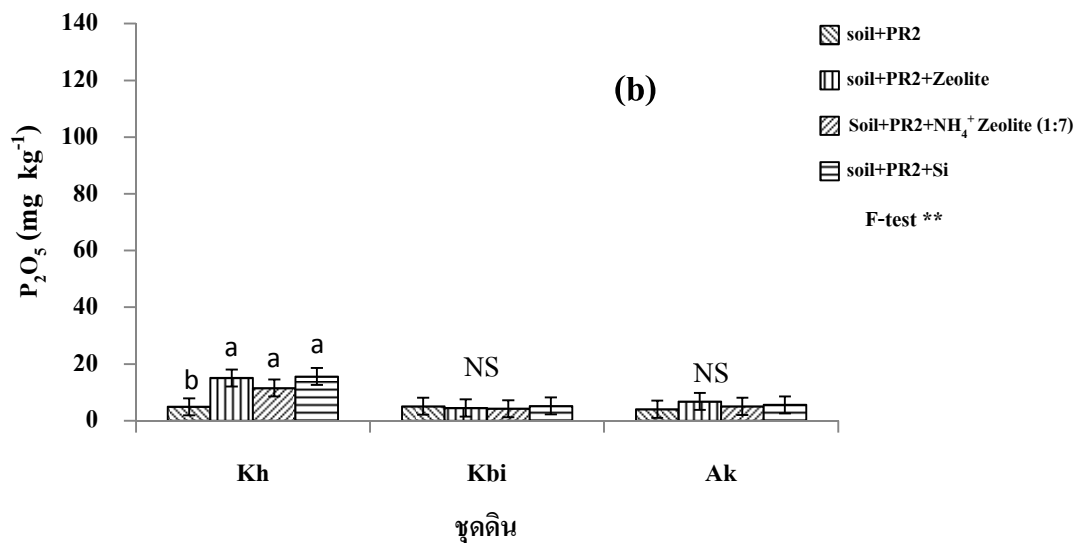
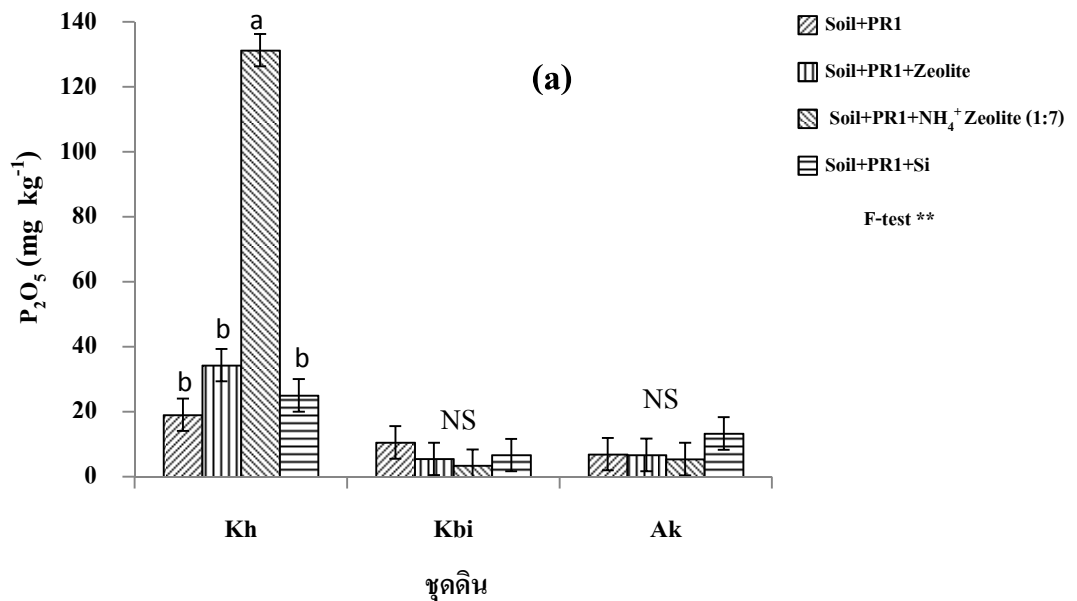


รูปที่ 12 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นของ PR2 ชุดดิน Kh (a) ชุดดิน Ak (b) และ ชุดดิน Kbi (c)

การละลายของหินฟอสเฟตที่ได้จากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 25 วัน พบว่า หินฟอสเฟต PR1 บ่มร่วมกับซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) ในชุดดิน Kh มีค่าการละลายของ ฟอสฟอรัสสูงที่สุด ($131.23 \text{ mg kg}^{-1}$) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับควบคุม(รูปที่ 13a) หินฟอสเฟต PR1 ที่บ่มร่วมกับซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) และซิลิคอนในชุดดิน Ak มีการละลายของหินฟอสเฟตต่ำกว่าตำรับควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหินฟอสเฟต PR1 บ่มร่วมกับซิลิคอนในชุดดิน Kbi มีค่าการละลายได้ของฟอสฟอรัส (13.29 mg kg^{-1}) สูงกว่าการบ่ม ร่วมกับซีโอไลต์ (6.72 mg kg^{-1}) และซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) (5.43 mg kg^{-1}) (รูปที่ 13a)

เนื่องจาก ศักยภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของแต่ละชุดดิน และการละลายของหินฟอสเฟต ที่เพิ่มขึ้น โดยซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วยประจุบวก เช่น NH_4^+ เกิดจากกลไกการชักนำการละลายจากการ แลกเปลี่ยนประจุบวก (exchange-induced dissolution) ทำให้ Ca^{2+} ที่ได้จากปฏิกิริยาการละลายของ หินฟอสเฟตลดลงจากการแลกเปลี่ยนกับ NH_4^+ มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการละลายได้ต่อเนื่อง และ NH_4^+ ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมายังเป็นปุ๋ยให้แก่พืชได้ด้วย (Allen *et al.*, 1993)

หินฟอสเฟต PR2 ที่บ่มร่วมกับซิลิคอน ในชุดดิน Kh มีค่าการละลายของฟอสฟอรัสสูง ที่สุด (15.59 mg kg^{-1}) รองลงมาเป็นตำรับการทดลองที่บ่มร่วมกับซีโอไลต์ (15.05 mg kg^{-1}) ในชุด ดิน Kbi มีระดับการละลายได้ต่ำทุกตำรับการทดลอง ในชุดดิน Ak ตำรับการทดลองที่ใช้หิน ฟอสเฟต PR2 ร่วมกับซีโอไลต์มีระดับการละลายได้สูง (6.79 mg kg^{-1}) กว่าการบ่มกับซีโอไลต์ที่ อิ่มตัวด้วย NH_4^+ (1:7) (4.21 mg kg^{-1}) และซิลิคอน (5.58 mg kg^{-1}) (รูปที่ 13b)



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ DMRT NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

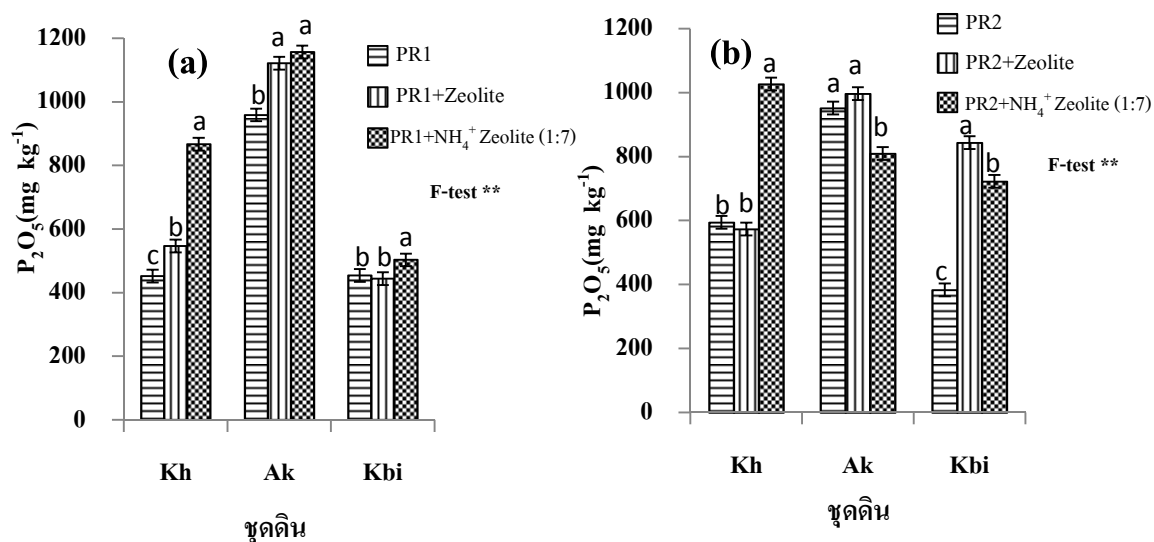
รูปที่ 13 ผลรวมของความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจากการชะละลายด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 25 วันของ PR1 (a) และ PR2 (b)

4.2 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2%CA

การละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ใส่ร่วมกับซีโอไลต์, ซีโอไลต์ที่อิมมัลชันด้วย NH_4^+ และ Si ในดินกรดที่คอน 3 ชุดดิน เป็นเวลา 36 และ 80 วัน ในวันที่ 36 พบว่าอิทธิพลของซีโอไลต์มีผลทำให้การละลายได้ของหินฟอสเฟตทั้งสองยี่ห้อ (PR1 และ PR2) ในสารสกัด 2%CA

เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) ในทุกดินยกเว้นในดิน Kbi สำหรับ PR1 (รูปที่ 14a) และ ในดิน Kh สำหรับ PR2 (รูปที่ 14b) ซีโอไลต์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสที่ละลายได้แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของดิน โดยใน PR1 พบการละลายของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเด่นชัดในดิน Ak มากกว่าดิน Kh

ส่วนในหินฟอสเฟต PR2 พบว่า ซีโอไลต์มีผลต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นมากในดิน Kbi เมื่อเทียบกับชุดดิน Ak ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์มีองค์ประกอบของแร่พวกอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มี CEC สูง สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุโดย Ca^{2+} ที่ได้จากปฏิกิริยาการละลายของหินฟอสเฟตจะถูกดูดซับและลดการสะสมของอนุมูล ทำให้หินฟอสเฟตละลายได้อย่างต่อเนื่อง (Harry *et al.*, 2002; Mackown and Tucker, 1985)



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ DMRT

รูปที่ 14 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid ที่บ่มในดินเป็นเวลา 36 วัน

PR1 (a) และ PR2 (b)

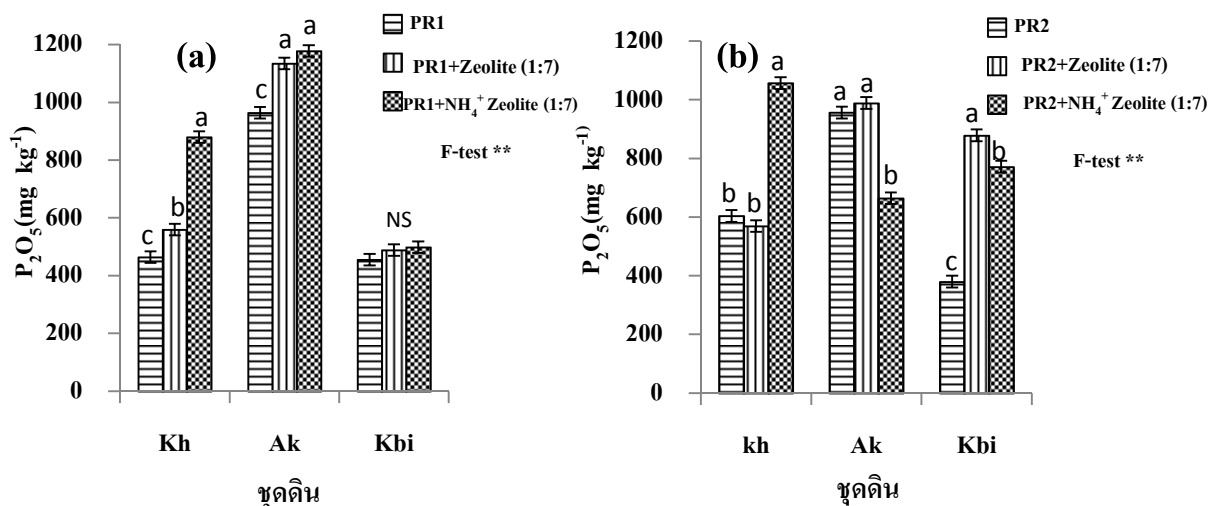
เมื่อพิจารณาการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์ที่อิ่มตัวด้วย NH_4^+ พบว่า PR1 มีการละลายได้ของหินฟอสเฟตมากกว่าที่รับที่ใส่ซีโอไลต์ ($P \leq 0.01$) ในทุกชุดดิน (รูปที่ 14a) และใน PR2 มีการละลายของหินฟอสเฟตมากกว่าที่รับที่ใส่ซีโอไลต์ร่วมด้วยในชุดดิน Kh แต่ในชุดดิน Ak และ Kbi ระดับการละลายของหินฟอสเฟตจะน้อยกว่าที่รับที่ใส่ซีโอไลต์ (รูปที่ 14b)

ส่วน PR2 การละลายของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเฉพาะในดิน Kh (รูปที่ 14b) ซึ่งเป็นดินที่มีศักยภาพการดูดซับ P ต่ำ แต่ไม่มีผลต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินที่มีการดูดซับ P ปานกลางและสูง สอดคล้องกับผลของ Dwairi (1997) พบว่า เมื่อใส่ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ ร่วมกับหินฟอสเฟตจะทำให้ฟอสฟอรัสละลายออกมาได้สูงกว่าการใช้ซีโอไลต์อย่างเดียว หรือการใช้หินฟอสเฟตอย่างเดียว การละลายของหินฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นโดยซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วยประจุบวก เช่น NH_4^+ เกิดจากกลไกการชักนำการละลายจากการแลกเปลี่ยนประจุบวก (exchange-induced dissolution) ทำให้ Ca^{2+} ที่ได้จากปฏิกิริยาการละลายของหินฟอสเฟตลดลงจากการแลกเปลี่ยนกับ NH_4^+ มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการละลายได้ต่อเนื่อง และ NH_4^+ ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมายังเป็นปุ๋ยให้แก่พืชได้ด้วย (Allen *et al.*, 1993)

เมื่อบ่มเป็นเวลา 80 วัน การละลายได้ของหินฟอสเฟตในดินกรดที่ใส่ร่วมกับซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ มีผลทำให้การละลายได้ของหินฟอสเฟตทั้ง 2 ยี่ห้อในสารสกัด 2%CA เพิ่มขึ้นในทุกชุดดิน ยกเว้นในชุดดิน Kbi ที่ใช้ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ สำหรับ PR2 (รูปที่ 15b)

ส่วนหินฟอสเฟต PR1 ซีโอไลต์มีผลต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นมากที่สุดในชุดดิน Ak เมื่อเทียบกับดิน Kh และ Kbi (รูปที่ 15a) และดำรับการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ พบว่า PR1 มีการละลายได้ของหินฟอสเฟตในชุดดิน Kh สูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดดิน Kbi และ Ak (รูปที่ 15a)

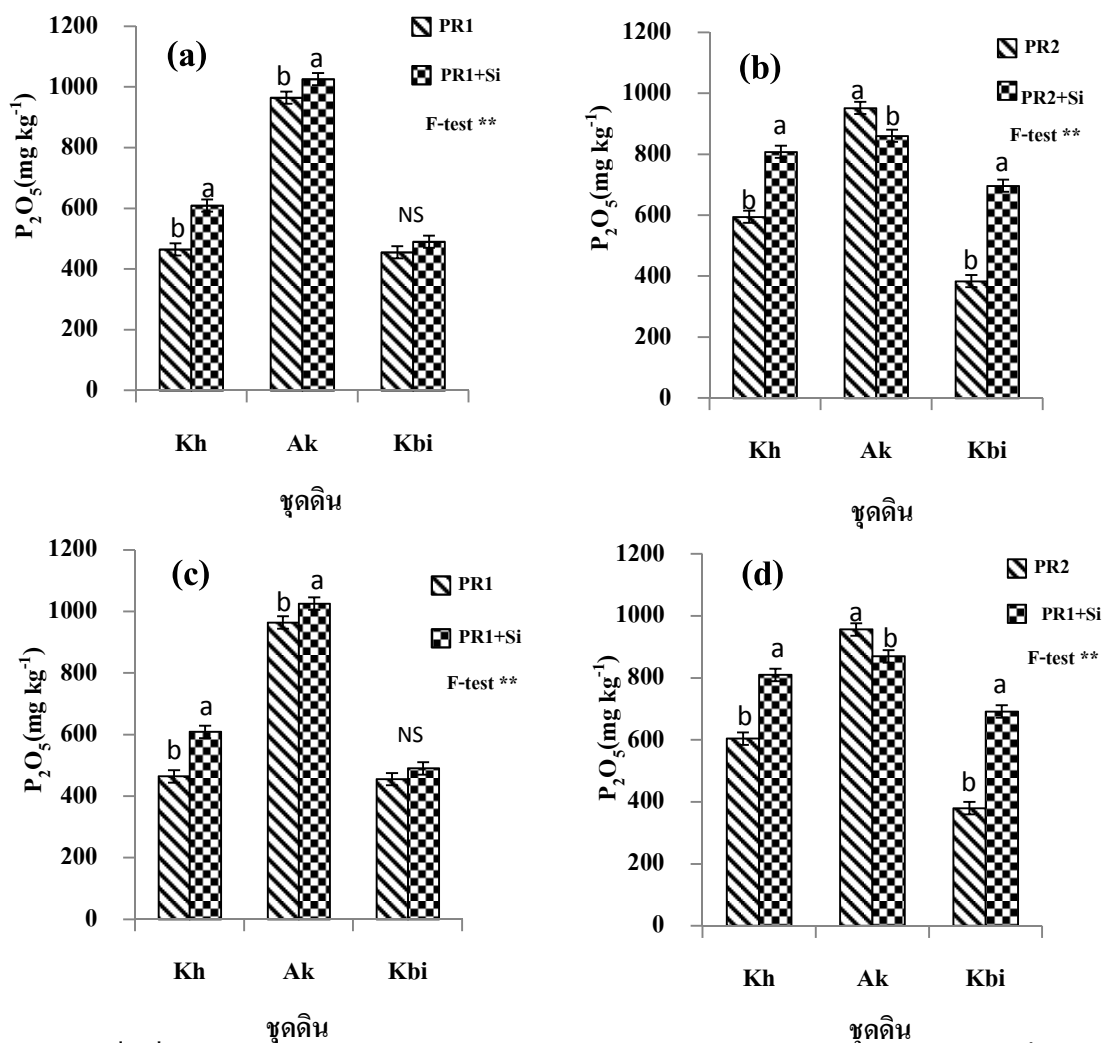
หินฟอสเฟต PR2 ซีโอไลต์มีผลต่อการละลายได้ของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นมากที่สุดในชุดดิน Kbi เมื่อเทียบกับชุดดิน Ak และดำรับการทดลองที่ใช้ซีโอไลต์ที่อิมมัวด้วย NH_4^+ พบว่า PR2 มีการละลายได้ของหินฟอสเฟตสูงในชุดดิน Kh อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) เมื่อเทียบกับชุดดินอื่น (รูปที่ 15b)



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ DMRT NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

รูปที่ 15 การละลายได้ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% Citric acid ที่บ่มในดินเป็นเวลา 80 วัน PR1 (a) และ PR2 (b)

การใส่ Si ร่วมกับหินฟอสเฟตทั้ง 2 ชนิด มีผลทำให้การละลายของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ($P \leq 0.01$) ในดินส่วนใหญ่ ยกเว้นในดิน Kbi สำหรับ PR1 และดิน Ak สำหรับ PR2 (รูปที่ 16a, 16b) ระดับการละลายที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของหินฟอสเฟต โดย PR2 มีการละลายเด่นชัดกว่า PR1 เมื่อดินดูดซับซิลิโคนจะช่วยให้มีการปลดปล่อย P ที่ถูกดูดซับออกมาในสารละลายได้ง่ายขึ้น จากการแย่งที่กันระหว่างอนุภาคซิลิเกตซึ่งมีประจุลบเช่นเดียวกับอนุภาคฟอสเฟต โดยอนุภาคซิลิเกตจะเข้าไปแทนที่อนุภาคฟอสเฟตที่ถูกยึดไว้จากผลของกระบวนการตรึงฟอสฟอรัสของดิน (Silva, 1971; Haynes, 1984) นอกจากนี้ ซิลิโคนในรูปแคลเซียมซิลิเกต หรือ โซเดียมซิลิเกตเมื่อมีการละลายในสภาพดินที่เป็นกรดจะอยู่ในรูปของโมโนซิลิซิก ($Si(OH)_4$) สามารถแตกตัว (ionization) ให้ H^+ (Tisdale *et al.*, 1985) และสภาพความเป็นกรด H^+ ที่ได้มีส่วนทำให้เกิดการละลายของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้น



ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบด้วย DMRT NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

รูปที่ 16 ความเป็นประโยชน์ของหินฟอสเฟตด้วยสารสกัด 2% CA เป็นเวลา 36 (a,b)

และ 80 วัน(c,d)

ในทำนองเดียวกัน การใส่หินฟอสเฟตร่วมกับ Si ในดินกรดเป็นเวลา 80 วัน พบว่าการละลายได้ของหินฟอสเฟต PR1 และ PR2 จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยใกล้เคียงกับการบ่มที่ 36 วัน

การละลายและประสิทธิภาพของซิลิคอนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น pH ของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับความชื้นในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของเซสควิออกไซด์ (sesquioxides) ซึ่งมีอยู่มากในดินกรดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้มีการดูดซับแอนไอออนซิลิเกต และมีการปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาได้มากขึ้น (ยงยุทธ, 2546)

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุป

หินฟอสเฟตเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเพื่อเป็นแหล่ง P สำหรับไม้ผลและ ไม้ยืนต้นในดินกรดที่ค่อนข้างต่ำในเขตร้อยชื้น อย่างไรก็ตาม หินฟอสเฟตที่มีขายในท้องตลาด มีสมบัติ ปริมาณ P ทั้งหมด และ ศักยภาพความเป็นประโยชน์ผันแปร แตกต่างกันอย่างกว้างขวาง การใช้หินฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง (direct application) จำเป็นต้องมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อสามารถเลือกใช้ให้คุ้มค่ากับการลงทุน การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของหินฟอสเฟตที่มีขายในท้องตลาดและแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการละลาย ของหินฟอสเฟต สรุปได้ดังนี้

- ตัวอย่างหินฟอสเฟตต่างๆ ที่ศึกษา เป็นแหล่ง Guano deposit และมีแร่ hydroxyapatite เป็นส่วน ใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากหินฟอสเฟตในต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแหล่งหินตะกอน แร่ apatite ที่มีการ สลายตัวผุพัง และการแทนที่ของคาร์บอนเนตในโครงสร้าง

- ตัวอย่างหินฟอสเฟตส่วนใหญ่มีปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดของหินฟอสเฟตค่อนข้างต่ำ หลาย ตัวอย่างค่า available P ต่ำกว่าที่กำหนดในพระราชบัญญัติปุ๋ยเคมี พ.ศ. 2518

- สารสกัดตัวชี้วัดที่สามารถใช้ในการประเมินระดับการละลายได้ของหินฟอสเฟตที่เหมาะสมได้แก่ 2% CA ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการละลายได้ของหินฟอสเฟตที่บ่มในดินกรดที่ค่อนข้างต่ำ

- ผลการทดสอบตัวอย่างหินฟอสเฟต 2 ชนิด ที่มีระดับการละลายได้สูงใน 2% CA ในดินกรดที่ ค่อนข้างต่ำ พบว่า การละลายของหินฟอสเฟตทั้งสองมีระดับการละลายที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันใน แต่ละชนิด โดยการละลายได้ในดิน Ak สูงกว่าการละลายได้ในดิน Kh และ Kbi อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

- ผลการเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตที่ใส่ร่วมกับ ซีโอไลต์ และซีโอไลต์ที่อ้อมตัวด้วย NH_4^+ พบว่า ซีโอไลต์สามารถเพิ่มการละลายได้ของหินฟอสเฟตทั้งสองตัวอย่างในดินกรดส่วน ใหญ่ ส่วนการบ่ม ร่วมกับซีโอไลต์ที่อ้อมตัวด้วย NH_4^+ ช่วยในการเพิ่มการละลายได้ของหินฟอสเฟตทั้งสอง และเพิ่มขึ้นอย่าง เด่นชัดในดินชุด Kh ที่มีเนื้อดินค่อนข้างหยาบ และมีความจุในการดูดซับ P ต่ำ

- การใช้ซีลิตคอนบ่มร่วมกับหินฟอสเฟต พบว่า มีส่วนช่วยในการละลายได้ของหินฟอสเฟต แต่จะมี ระดับการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการใช้ซีโอไลต์ที่ผ่านการอ้อมตัวด้วย NH_4^+

1.1 ข้อเสนอแนะ

หินฟอสเฟตในท้องตลาด ตัวอย่างส่วนใหญ่มักจะมีปริมาณ P ทั้งหมด และที่เป็นประโยชน์ค่อนข้างต่ำ แสดงว่าหน่วยงานที่เกี่ยวข้องยังขาดการควบคุมดูแลในกระบวนการผลิต การระบุแหล่งของหินฟอสเฟตที่ชัดเจน เพื่อปกป้องผลประโยชน์ของเกษตรกร ผลจากการศึกษานี้ สามารถเป็นแนวทางในการคัดเลือกเบื้องต้นในการประเมินประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตในดิน กรดที่ดองในภาคใต้ อย่างไรก็ตาม ควรต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตที่ใช้ในระบบการปลูกพืชในสภาพไร่นาให้ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2553. ฟอสเฟต.[Online]. Available from <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=phosphate> (Accessed October 22, 2010)
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จรรย์ชัย จันทรเจริญสุข, รัตนาชาติ ช่วยบุคคา, พงษ์นัย มอญเจริญ และ เอ็จ สโรบล. 2544. การศึกษาผลการใส่ ซิลิกอน และฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิต กรดจัด การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 5-7 กุมภาพันธ์ 2544 หน้า 61-68.
- จันทรจิรา สุจร. 2528. การสำรวจทางเคมี แร่วิทยา และศักยภาพการใช้ประโยชน์ของหินฟอสเฟตจากแหล่ง หิน ฟอสเฟต บางแห่ง ใน ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- จุฑารัตน์ เทพนวล และวิเชียร จาภูพาน. 2554. การประเมินความต้องการฟอสฟอรัสของดินกรดที่ค่อนใน ภาคใต้โดยวิธี sorption isotherm และค่าวิเคราะห์ดิน. ว. เกษตรพระจอมเกล้า 29(3) : 76-85.
- ชอบ คณะฤกษ์ และ จินตนา หัสวายุกุล. 2550. ผลการวิจัยการใช้ซิลิกอนในการเกษตร. ว. เกษตรการเกษตร. 31 (11) : 190-197.
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์, สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน, วิทยา ชนานุสนดี และสมชาย กริ่งทาทิรมย์. 2524. การใช้หิน ฟอสเฟตในดินเปรี้ยวจัด. ว. ดินและปุ๋ย 3 : 78-89.
- เทคโนโลยีดินและปุ๋ย. 2538. การใช้หินฟอสเฟตในการเพาะปลูก. ว. เกษตรการเกษตร 19 : 61-63.
- ธงชัย มาลา. 2546. จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตและเชื้อราไมคอร์ไรซา. ใน ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ :

- เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์, หน้า 123-190. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิสากร ปานประสงค์. 2546. ซีโอดีเคมีที่ไม่ธรรมดา ว. วิทยาศาสตร์ 192 : 83-85.
- ปรีดา พากเพียร, สุทธิธี อรรถจารุสิทธิ, ไพโรจน์ โสมนัสและ พิชิต พงษ์สกุล. 2535. แนวทางการใช้สารซีโอดีเพื่อลดปัญหาหมอกพิษและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร. ว. ดินและปุ๋ย 14 : 337-341.
- ปัทมา วิดยากร. 2547. ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. กรุงเทพฯ : คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปิยะ ดวงพัตรา. 2553. สารปรับปรุงดินในรูปหินและแร่. ใน สารปรับปรุงดิน, หน้า 43-114. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยงยุทธ โอสธสภา. 2546. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รสมาลิน ณ ระนอง, ทศนีย์ อัดตะนันท์, จุมพล ยูวะนิยม และเจริญ จำรัสชีพ. 2542. อิทธิพลของปุ๋ยหินฟอสเฟตและปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตที่มีต่อระบบการปลูกข้าว-ถั่วเขียวในชุดดินรังสิตประเภทที่เป็นกรดจัด. รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 37 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน 3-5 เมษายน 2537 หน้า 172-179.
- ลัดดาวัลย์ มีสุข, เพ็ญศรี ชูรวเวช, युพิน สรวีสูกร, จันทิรา อริยรัช, เรวดี ดีมาก และ ภวานาฏ เสมรสุต. 2529. การเพิ่มประสิทธิภาพของหินฟอสเฟตโดยเผาที่อุณหภูมิสูง. ว. วิชาการเกษตร 4 : 17-24.
- วิเชียร จาญพจน์. 2549. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วิเชียร จาญพจน์ และ ระเบียบ หลิมสกุล. 2534. การประเมินความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสโดยใช้สารสกัดทางเคมี. รายงานโครงการนักศึกษา ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วิศิษฐ์ โชลิตกุล และ มนุเวท. ศรีเสน. 2521. ปุ๋ยฟอสเฟตและโปแทสเซียม. รายงานสัมมนาอุตสาหกรรมปุ๋ยกับการเกษตร. สมาคสวิทยาศาสตร์การเกษตรแห่งประเทศไทย และสมาคมธรณีศาสตร์แห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี [Online]. Available from: <http://www.doa.go.th/palm/link Technical/management.html> (Access March 3, 2014)

สถาบันวิจัยยางพารา. 2555. ข้อมูลวิชาการยางพารา. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2550. บัญชีธาตุอาหารในดินตามชุดดินประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักสำรวจและวางแผนการใช้ที่ดิน . 2549. กรมพัฒนาที่ดิน: ดินมีปัญหา. [Online]. Available from <http://www.ldd.go.th/Thai-html/woek1/htm> (Accessed October 15, 2010)

เอิบ เขียวรัตน์. 2533. ดินของประเทศไทย. กรุงเทพฯ : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอิบ เขียวรัตน์. 2544. การสำรวจดิน. กรุงเทพฯ : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอิบ เขียวรัตน์. 2548. การสำรวจดิน. กรุงเทพฯ : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

A.O.A.C. 1995. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis, 16th Ed.

AOAC International, Washington, D. C., USA.

Allen, E., L. Hossner, D. Ming and D. Henninger. 1993. Solubility and cation exchange in phosphate rock and saturated clinoptilolite mixtures. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 1368-1374.

- Aitschuler, Z. S. 1979. The weathering of phosphate deposits: geochemical and environmental aspects. *In* Environmental Phosphorus Handbook. pp. 33-96. Inc., New York.
- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1984. Rock phosphate utilization on acid sulphate soil of Thailand. *In* Ecology and management of problem soils in Asia. Vol.27, pp. 280-292.
- Axelrod, S. 1978. Phosphate for direct application – phosphorite characterization and field survey of the fields on the Negev, Israel. *In* phosphate rock for direct application, pp. 82-96. IFDC, USA.
- Balasta, M. L. F. C., C. M. Perez., B. O. Juliano., C. P. Villareal., J. A. Lott and D. B. Roxas. 1989. Effect of silica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. *Can J Bot* 67 : 2356–2363
- Barbarick, K., T. Lai and D. Eberl. 1990. Exchange fertilizer (phosphate rock plus ammonium – zeolite) effect on sorghum – sudangrass. *Soil Sci. Am. J.* 54 : 911-916.
- Chien, S. H. and L. L. Hammond. 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42 : 935-939.
- Cooke, G. W. 1979. Experimental work in the United Kingdom on the agricultural value of rock phosphate. *In* Phosphate Rock for Direct Application. pp. 349-366. IFDC, USA.
- Deer, W. A., R. A. Howie and J. Zussman. 1962. *Rock-forming minerals*, Vols. 3 and 5. Longmans.
- Deer, W.A., R. A. Howie and J. Zussman. 1973. Rock forming mineral. Vol.4. Framework silicates. Green & Co. London, Longmans.
- Dwairi, I. M. 1997. Renewable, controlled and environmentally safe phosphorus release in soils from mixtures of NH_4^+ -phillipsite tuff and phosphate rocks. *J. Envi. Geo.* 34 : 293-296.

- George Mason University. 2553. SAMP: Structure-Adaptive Materials Prediction. [Online]. Available from <http://cmasc.gmmu.edu/samproject.html> (Accessed October 22, 2010)
- Georgia State University. 2557. Hyperphysics.phy [Online] Available from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/solids/sili.html> (Accessed March 17, 2014)
- Hammond, L.L., S. H. Chien and A. U. Mokwunye. 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics *In* *Advances in Agronomy*. Vol 40, pp. 89-137. London : Academic Press.
- Harry, W. P., W.M. Neal and N. H. Malcolm. 2002. Zeolite/rock phosphate—a novel slow release phosphorus fertilizer for potted plant production. *J. Sci. Hortic-Amsterdam*. 94 : 333–343
- Haynes, R.T. 1984. Effect of lime, silicate, and phosphate applications on the concentrations of extractable Aluminum and phosphate in a spodosols. *Soil Sci*. 138 : 8-14.
- Jackson, M. L. 1965. Soil Chemical Analysis. Advanced course. Dept. of Soils, University of Wisconsin, Wisconsin. pp 894.
- Khasawneh, F. E. and E. C. Doll. 1978. The Use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv.Agron*. 30 : 159-206
- MacKown, C. T. and T. C. Tucker. 1985. Ammonium nitrogen movement in a coarse-textured soil amended with zeolite. *J. Soil Sci. Soc. Am*. 49 : 235-238.
- McClellan, G. H. 1978. Mineralogy and reactivity of phosphate rock. *In* phosphate rock for direct application pp. 57-58. IFDC, USA.
- McClellan, G. H. and L. R. Gremillion. 1980. Evaluation of phosphatic raw material. *In* The role of phosphorus in agriculture. (ed. F. E. Khasawenh) pp. 43-80. Madison : ASA-SSSA.

- McClellan, G.H. and S. J. Van Kauwenbergh. 2004. World Phosphate Deposits. *In Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture*. pp. 11-15. Rome : FAO.
- Menon, R. G., S. H. Chien and L. L. Hammond. 1989. Comparison of Bray I and Pi tests for evaluating plant-available phosphorus from soils treated with different partially acidulated phosphate rocks. *J. Plant Soil* 114 : 211-216.
- Mercer, B. W. and L. L. Ames. 1978. Zeolite ion exchange in radioactive and municipal wastewater treatment. *In Natural zeolites: Occurrences, Properties and Use* pp. 451-465 . New York : Pergamon Press.
- Nilnond, C., R. L. Aitken, W. Pantanahiran and C. Nualsri. 1996. An evaluation of a local rock phosphate on a tropical acid soil in southern Thailand. *J. soil and Fertilizer*. 18 : 40-49.
- Norrish, K. and B.W. Chappell. 1977. X-ray fluorescence spectrometry, pp.201-272. *In* (ed. J. Zussman). *Physical Methods in Determinative Mineralogy*. Academic Press Inc., London.
- Onthong, J., M. Osaki , C. Nilnond and T. Tadono. 1999. Phosphorus status of some highly weathered soils in peninsular Thailand and availability in relation to citrate and oxalate application. *Soil Sci. Plant Nutr*. 45 : 627-637.
- Ozanne, P. G. and T.C. Shaw. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of phosphate requirement for pasture growth. *Aust. J. Agric. Res*. 18 : 601-612.
- Rajan, SSS., Watkinson, J. H. & Sinclgir, AG. 1996. Phosphate rock for direct application to Soil. *Ad. Agron*. 57: 78-159.

- Reddy, M. S., S. Kumar and K. Batita. 2002. Biosolubilization *Aspergillus tubingensis* and *Aspergillus niger*. J. Bioresource Technol. 84 : 187-189.
- Sikora, F. J. and P. M. Giordano. 1995. Future directions for agricultural phosphorus research. J. Fert. Res. 41 : 167-178.
- Silva, J. A. 1971. Possible mechanism for crop response to silicate applications, *In* Proceeding of the international symposium for soil fertility evaluation. vol. 1, pp. 805-820. New Delhi, India.
- Smyth, T. J. and P. A. Sanchez. 1982. Phosphate rock and superphosphate combination for soybeans in a cerrado Oxisol. J. Agron 74 : 730-735.
- Suchisa, R. H., O. R. Young and G. D. Sherman. 1963. Effect of silicates on phosphorus availability to Sudan grass grown on Hawaiian soils. Agric. Exp. Sta. Tech. Bull 51.
- Syers, J. K., A. D. Mackay., M. W. Brown. and L. D. Currie. 1986. Chemical and Physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. J. Food Agric Sci 37 : 1057-1064.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson and J.D. Beaton. 1985. Soil Fertility and Fertilizers. 4th ed. New York : Macmillan.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson, J. R. Beaton and J. L. Havlin. 1993. Soilfertility and Fertilizer. 5th ed. New York: MacMillan.
- Van Kauwenbergh, S. J. and G. H. McClellan. 2004. Characterization of Phosphate Rocks *In* Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture. pp.17-24. Rome : FAO.
- Von Uexkull, H. R. 1986. Efficient fertilizer use in acid upland soils of the humid tropics. J. Fert. Plant Nutr 10 : 53-59.

Wilson, M. A. and B. G. Ellis. 1984. Influence of calcium solution activity and surface area on the solubility of selected rock phosphate. *J. Soil Sci* 138 : 354-359.

Zapata, F. and R.N. Roy. 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Rome : FAO.