การคาดคะเนปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยใช้ Sorption Isotherm ในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

Predicting Phosphorus Fertilizer by Sorption Isotherm of Acid Upland Soil in Southern Thailand

จุฑารัตน์ เทพนวล

Jutarat Tepnuan

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
2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การคาดคะเนปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยใช้ Sorption Isotherm ในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

ผู้เขียน นางสาวจุฑารัตน์ เทพนวล

สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร จาฏุพจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา เพ็งหนู)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุมิตรา ภู่วโรดม)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร จาฏุพจน์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การคาดคะเนปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยใช้ Sorption Isotherm ในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย
ผู้เขียน	นางสาวจุฑารัตน์ เทพนวล
สาขาวิชา	การจัดการทรัพยากรดิน
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

การคาดคะเนปริมาณความต้องการปุ๋ยฟอสฟอรัส (P) แบบเฉพาะเจาะจงตามศักยภาพการดูดซับ P จำเป็นอย่างยิ่งต่อการแนะนำปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพในดินกรดที่ดอนซึ่งมีการขาด P อย่างรุนแรง การศึกษานี้วัตถุประสงค์เพื่อ 1. ศึกษาระดับศักยภาพการดูดซับ P ในดินกรดที่ดอน 17 ชุดดินที่สำคัญในภาคใต้ โดยวิธี P sorption isotherm และ 2. ทดสอบความเป็นไปได้ในการคาดคะเนปริมาณความต้องการปุ๋ย P จาก P sorption isotherm ร่วมกับค่าวิเคราะห์ดิน โดยปลูกข้าวโพดในกระถางใน 3 ชุดดินที่เป็นตัวแทนที่มีศักยภาพการดูดซับ P สูง ปานกลาง และต่ำ ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก (Ak) ชุมพร (Cp) และ คอหงษ์ (Kh) ตามลำดับ แต่ละชุดดินประกอบด้วยปริมาณปุ๋ย P จำนวน 6 อัตราคือ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 เท่าของปริมาณ P ที่ดินดูดซับ ณ ระดับความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินที่ 0.3 mg P L^{-1} (external P requirement) ของชุดดินนั้นๆ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ

ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับ P ของดินทั้ง 17 ชุดดินดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการ Langmuir และสมการ Freundlich (R^2 อยู่ในช่วง 0.85 - 0.98 และ 0.77 - 0.99 ตามลำดับ) ปริมาณการดูดซับ P สูงสุด (x_m) จากสมการ Langmuir พบว่าศักยภาพการดูดซับ P ของดินที่ระดับสูง ปานกลาง และ ต่ำ อยู่ในช่วง 250 – 526, 150 – 222 และ 106 – 140 mg P kg^{-1} ตามลำดับ หรือเท่ากับปริมาณความต้องการปุ๋ย (P external requirement) ที่น้อยกว่า 10, 10 - 40 และมากกว่า 40 kg P rai^{-1} ในดินที่มีศักยภาพการดูดซับสูง ปานกลาง และ ต่ำตามลำดับ นอกจากนั้น ยังพบว่าปริมาณการดูดซับ P มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ปริมาณอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable. Al) และปริมาณอนุภาคดินเหนียว (clay) ของดิน

ในการเปรียบเทียบปริมาณความต้องการปุ๋ยโดยวิธี external P requirement และปริมาณปุ๋ยที่ให้ผลผลิตที่ 80% ของผลผลิตสูงสุดจากการปลูกข้าวโพดในกระถาง พบว่า ในชุดดินที่มีระดับการดูดซับ P สูง และต่ำ (Ak และ Kh ตามลำดับ) จะมีค่าความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินที่ 0.33 และ 0.21 mg P L^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระดับความต้องการปุ๋ยที่ 0.3 mg P L^{-1} ที่กำหนด

ยกเว้นชุดดินชุมพรที่มีระดับการดูดซับ P ปานกลาง แต่มีค่าความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินสูงถึง 4.34 mg P L^{-1} เนื่องจากมีความผันแปรค่อนข้างสูงจากการอัดแน่นของดินในกระถางในระหว่างการปลูกข้าวโพด (C.V. 46%)

ในการบ่มดินด้วยอัตรา P การหาค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณปุ๋ยที่ใส่ในระดับต่างๆ ต่อการเพิ่มขึ้นของค่าวิเคราะห์ Bray II หรือ P buffer coefficient (BC) ในชุดดินตัวแทนที่มีระดับศักยภาพการดูดซับแตกต่างกันดังกล่าว พบว่า ชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ มีค่า buffer coefficient เท่ากับ 1.8, 0.9 และ 0.7 เท่าตามลำดับ ค่า BC ของดินลดลงตามระดับการดูดซับ P ที่ลดลง ซึ่งหมายถึงในดิน Ak ที่มีระดับการดูดซับ P สูง

จะต้องใส่ปุ๋ยเพื่อให้ได้ระดับ Bray II ที่เพียงพอต่อพืชในระดับผลผลิตที่ต้องการสูงกว่าดินที่ระดับมีการดูดซับ P ต่ำ นอกจากนี้ ยังสามารถกำหนดค่าวิกฤติของวิธีสกัด Bray II ให้เฉพาะเจาะจงตามศักยภาพการดูดซับของดิน ซึ่งเท่ากับ 96, 91 และ 27 mg P kg^{-1} ในดินที่มีศักยภาพการดูดซับ P สูง กลาง และต่ำ ตามลำดับ

Thesis Title	Predicting Phosphorus Fertilizer by Sorption Isotherm of Acid Upland Soil in Southern Thailand
Author	Miss. Jutarat Tepnuan
Major Program	Soil Resources Management
Academic Year	2010

ABSTRACT

Estimation of specific P requirement according to P buffer capacity of soils was important for effective fertilizer recommendations for acid upland soils which severely deficient in P. The objective of this study was 1. to describe the P sorption of 17 major acid soil series in southern Thailand using P sorption isotherm, and 2. to verify the prediction of P requirement using combined P sorption isotherm and soil test values in 3 representative soils with high, medium and low sorption capacity, i.e., Ak, Cp and Kh soils, respectively. A pot trial was also set up by planting maize in each soil with 6 different treatments of P fertilizer rates: 0, 0.25, 0.5, 1, 2 and 4 times of maize external P requirement which defined as the amount of P sorbed at the equilibrium soil-solution concentration of 0.2 mg P L^{-1}. Completely randomize design was use with 4 replications.

P sorption characteristics of soils were equally well described by both Langmuir and Freundlich equations (R^2 values range from 0.85 - 0.98 และ 0.77 and 0.99, respectively). Maximmum P sorbed (x_m) in soils from Langmuir equation could be grouped into 3 categories of high, medium and low P sorption capacity which ranged from 250 – 526, 150 – 222 and 106 – 140 mg P kg^{-1}, respectively, or equivalent to external P requirement of less than 10, 10 - 40 and more than 40 kg P rai^{-1} in high, medium and low sorption capacity soils, respectively.

The sorption capacity of soils was closely related to the Fe_2O_3, exchangeable Al and clay content of the soils.

The validity of the combined P sorption isotherm and soil test values in predicting P requirements of soils was tested in pot trial. It was found that the external P requirement of the soils with high and low sorption capacity (Ak and Kh soil) was 0.33 and 0.21 mg P L^{-1} respectively, which reasonably agree with the defined level of 0.3 mg P L^{-1}. However, in the medium sorption capacity soil (Cp), the result was contradicted. The external P requirement was calculated to be 4.34 mg P L^{-1}. This may be due to relatively high variation of yields in this soil pot trial (C.V. 46%).

The 3 soils, representing high, medium and low sorption capacity respectively, were also incubated with increasing rate of P (0, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 and 10.0 mg P L^{-1}) for one week in the laboratory study. The ratio between amount of P added and the Bray II values, or buffer coefficient, were found to be 1.8, 0.9 and 0.7 folds in high, medium and low sorption soils respectively, The BC of the soils decreased with the decreasing sorption capacity, which indicated that high sorption soil required higher P rate to keep the Bray II value at a level for the same optimum yield. This method could also be used to define the specific soil test (Bray II) critical levels for soils of different sorption capacities.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการรูป	(11)
รายการตารางภาคผนวก	(13)
รายการรูปภาคผนวก	(14)
บทที่	
1. บทนำ	
บทนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	29
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	
วัสดุ อุปกรณ์	30
วิธีดำเนินการวิจัย	33
3. ผลและวิจารณ์	39
4. สรุป และข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	82
ประวัติผู้เขียน	96

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางเคมีบางประการของชุดดินบางชนิดในประเทศไทย	4
2	เกณฑ์มาตรฐานความสูงต่ำของค่าวิเคราะห์ทางเคมีของดิน	5
3	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการดูดซับ P สูงสุด (x_m) จากสมการ Langmuir และค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ (a) ของดินในอันดับ Oxisols และ Ultisols ที่มีสีแดงในประเทศไทยกับค่าที่ได้ตีพิมพ์ของดินต่างๆ	12
4	ช่วงปริมาณการดูดซับ P สูงสุด (x_m) และค่าเฉลี่ยจากสมการ Langmuir และพลังงานในการดูดซับ P ของดิน (k) จากสมการ Freundlich ของดินในประเทศไทย	13
5	ค่าเฉลี่ยสมบัติของดิน Red Ultisols และ Red Oxisols ในประเทศไทย	14
6	ค่าเฉลี่ยสมบัติของดินที่มีการจัดกลุ่มตามระดับศักยภาพการดูดซับ P ของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	14
7	ความสัมพันธ์ระหว่างสารสกัดของการวิเคราะห์ดิน และปัจจัยความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน (Quantity, Intensity และ Buffer capacity)	24
8	ชนิดพืชและการเพาะปลูกที่สัมพันธ์กับปัจจัยความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน	24
9	Internal (critical plant P %) และ External P requirement ของพืชในระดับผลผลิต 80-95% ของผลผลิตสูงสุด	25
10	พารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของดิน	33
11	ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่เฉพาะเจาะจงในแต่ละชุดดิน	36
12	ธาตุอาหารพื้นฐานและอัตราที่ใช้เพื่อปรับความอุดมสมบูรณ์ของดิน	37
13	สมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของชุดดินต่างๆทางภาคใต้ของประเทศไทย	40
14	ค่าตัวแปรจากสมการ Langmuir, และค่า phosphorus buffer capacity (PBC) ของชุดดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย	44
15	ค่าตัวแปรจากสมการ Freundlich ของชุดดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย	46
16	การจัดกลุ่มการดูดซับ P ในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย	47

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ P สูงสุดจากสมการ Langmuir (x_m) และพลังงานในการดูดซับ P ของดินจากสมการ Freundlich (k) ในดินเขตร้อนชื้น	48
18	ค่าสหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างค่าการดูดซับ P ในดินและสมบัติดินต่างๆ	49
19	สมบัติของกลุ่มชุดดินที่มีการดูดซับ P ในระดับต่างๆ	50
20	ความต้องการฟอสฟอรัสของชุดดินต่างๆที่ทำให้สารละลายดินที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 0.3 mg P L^{-1} จากสมการ sorption isotherm	52
21	ปริมาณ external P requirement (mg P kg^{-1}) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลาย และ ค่า Bray II ในแต่ละชุดดิน เปรียบเทียบกับปริมาณปุ๋ยที่ระดับ 80 % ของผลผลิตสูงสุดจากการทดลองในกระถาง	57
22	ปริมาณ external P requirement (mg P kg^{-1}) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น สมดุลของ P ในสารละลาย และ ค่า Bray II ของ 5 ชุดดิน เปรียบเทียบกับปริมาณปุ๋ยที่ 80 % ของผลผลิตสูงสุดจากการทดลองในกระถาง	58
23	อัตราปุ๋ย P ที่ใส่ในการทดลองปลูกข้าวโพดในกระถาง	59
24	ผลของปุ๋ย P ต่อน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของข้าวโพดหลังจากปลูก 25 วัน	60
25	ความเข้มข้นของ P เฉลี่ยในข้าวโพด (% P) ที่ปลูกในชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์	62

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1	ฟอสฟอรัสทั้ง 3 ส่วนในดินที่เป็นธาตุอาหารพืช	7
2	P sorption isotherm ของชุดดินโชคชัย	9
3	กราฟเส้นตรงจากสมการ Langmuir ของชุดดินลพบุรี	10
4	กราฟเส้นตรงของสมการ Freundlich ของชุดดินลพบุรี	11
5	ลักษณะการดูดซับ P ที่ผิวของแร่ออกไซด์	15
6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ P ในดินและผลผลิตพืช	19
7	ความสัมพันธ์ระหว่าง PRI กับปริมาณการดูดซับ P ในดินออสเตรเลีย	21
8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH (NaF) กับปริมาณการดูดซับ P ในดิน	22
9	P sorption isotherm และ external P requirement ของชุดดินโชคชัย	26
10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล	27
11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดิน	28
12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน	28
13	ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินอ่าวลึก	42
14	การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในตัวอย่างที่ดูดซับ P ในระดับต่ำ (Kh) ปานกลาง (Hy) และสูง (Ak) ตามลำดับ	43
15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล	54
16	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray ll)	54
17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดิน	54
18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในชุดดินชุมพร	55
19	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในชุดดินชุมพร	56

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ของชุดดินคอหงษ์	56
21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในชุดดินคอหงษ์	56
22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดินกรดที่ดอนที่มีระดับการดูดซับ P ต่างๆ	58
23	การตอบสนองของต้นข้าวโพดต่อปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c) (linear-linear modal)	61
24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ในข้าวโพดและผลผลิตสัมพันธ์ของข้าวโพดในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)	63
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) และผลผลิตสัมพันธ์ของข้าวโพดในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)	64
26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่และค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) ของชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)	65

รายการตารางภาคผนวก

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุลของชุดดิน 17 ชุดดิน ที่ระดับ P ในอัตราต่างๆ	83
2	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ, ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล และค่าวิเคราะห์ P ที่สกัดด้วย Bray ll ในการบ่มดินด้วย P ในอัตราต่างๆ	95

รายการรูปภาคผนวก

รูปผนวกที่		หน้า
1	ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน)	87
2	การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน)	90

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

ฟอสฟอรัส (phosphorus; P) เป็นธาตุอาหารหลักธาตุหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งส่วนที่อยู่เหนือดินและใต้ดิน ตลอดจนการออกดอกออกผลของพืช พืชโดยทั่วไปต้องการ P ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง (ยงยุทธ, 2546) ดินที่ทำการเพาะปลูกโดยทั่วไป มักจะมีระดับของ P ไม่เพียงพอต่อการความต้องการของพืช โดยเฉพาะในดินกรดที่ดอน (acid upland soil) ซึ่งเป็นดินที่ใช้ในการเพาะปลูกส่วนใหญ่ของประเทศไทย ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 96 ล้านไร่ (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2549) ส่วนในภาคใต้ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 15 ล้านไร่ (เอิบ, 2533) ดินกรดที่ดอนในประเทศไทยพบในอันดับ Ultisols เป็นส่วนใหญ่ เป็นดินที่มีการสลายตัวมานานหรืออายุมาก มีชั้นดินล่างวินิจฉัยอาร์จิลลิก (argillic horizon) เห็นได้ชัดเจน มีการอิ่มตัวด้วยด่างน้อยกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ (%) ภายในความลึก 1.8 เมตรจากส่วนบนสุดของชั้นชี้บ่ง ดินส่วนใหญ่มีเนื้อดินร่วน (loamy paleudults) และดินเหนียว (clayey paleudults) ปฏิกิริยาดินเป็นกรด (pH) ต่ำกว่า 5 มีปริมาณของเหล็ก (Fe) อะลูมินัม (Al) และแมงกานีส (Mn) สูงในระดับที่เป็นพิษต่อพืช มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ และขาดธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะธาตุ P นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของปุ๋ย P ที่ใช้เฉลี่ยอยู่เพียง 15 ถึง 20 % เท่านั้น (von Uexkull, 1986)

ความเป็นประโยชน์ของ P ในดินจะเกี่ยวข้องกับ ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ 1) Quantity หรือปริมาณ P ที่มีศักยภาพเป็นประโยชน์ต่อพืช ได้แก่ ปริมาณ P ทั้งหมดและส่วนที่เป็นประโยชน์ได้ค่อนข้างง่าย (labile P) 2) Intensity หรือ Activity ของ P ในสารละลาย ในสภาพสารละลายที่เจือจาง ค่า Activity จะใกล้เคียงกับความเข้มข้นของอนินทรีย์ P ในสารละลาย และ 3) Capacity หรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสมดุลของดิน เมื่อมีการใส่ปุ๋ย P ในดินหรือการดูดกินของพืช

การประเมินระดับความเป็นประโยชน์ของ P ในดินและการแนะนำปุ๋ยที่ใช้กันทั่วไปในประเทศไทย ได้แก่ การประเมินจากค่าวิเคราะห์ P ในดิน เช่น Bray I, Bray II หรือ

Mehlich ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมิน P ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available P) (วรรณา และคณะ, 2548) อย่างไรก็ตาม ในการแปลความหมายค่าวิเคราะห์ดินเพื่อการแนะนำปุ๋ยนั้น จำเป็นต้องมีข้อมูล 1) ระดับของ P ที่เป็นประโยชน์ที่มีอยู่ในดิน 2) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของปุ๋ย P ที่ใส่ เพื่อให้ได้ระดับค่าวิเคราะห์ที่กำหนด (critical level) ในดินนั้นๆ และ 3) ปริมาณของปุ๋ย P ที่เพียงพอเพื่อให้ได้รับผลผลิตสูงที่กำหนด (Fox and Kamprath, 1970) ข้อมูลในข้อ 1 และ 2 สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์ดิน และการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ ส่วนข้อ 3 จำเป็นต้องมีการทดสอบปลูกพืช เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ดิน และระดับการตอบสนองหรือผลผลิตพืช (calibration curve) ของดินและพืชที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งในปัจจุบันข้อมูลดังกล่าวสำหรับดินเพาะปลูกพืชที่สำคัญๆ ยังค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินกรดที่ดอนชุดสำคัญๆ ในภาคใต้

ดังนั้นการศึกษาแนวทางการประเมินความต้องการ P ของพืชที่ปลูกในดินกรดที่ดอนภาคใต้ของประเทศไทย และปัจจัยด้านการดูดซับ P ของดิน หรือ phosphorus sorption isotherm ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปริมาณการดูดซับ และระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายดิน เมื่อมีการใส่ปุ๋ยลงไปในดิน (Beckwith, 1965; Fox and Kamprath, 1970; Ahmed, 1982) จึงมีส่วนช่วยในการคาดคะเนปริมาณปุ๋ย P ที่จะใส่ในแต่ละชุดดินได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายกับเกษตรกรในยามที่ปุ๋ยมีราคาที่สูงมากในสถานการณ์ปัจจุบันได้

2. การตรวจเอกสาร

2.1 ลักษณะทั่วไปของดินกรด

ดินกรดที่ดอนในภาคใต้พบในอันดับ Ultisols เป็นส่วนใหญ่ เป็นดินที่มีการสลายตัวมานาน หรืออายุมาก มีชั้นดินล่างวินิจฉัย argillic horizon เห็นได้ชัดเจน มีการอิ่มตัวด้วยด่างน้อยกว่า 35 % ภายในความลึก 1.8 เมตรจากส่วนบนสุดของชั้นชี้บ่ง มีอะลูมินัมและแมงกานีสสูง ในชั้นหน้าตัดของดินมักพบชั้น Ap-Bt1-Bt2-C ในประเทศไทยพบปริมาณการแจกกระจายของดินกลุ่มนี้ถึง 80% ในพื้นที่ดอนหรือดินไร่ (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2549) ในดินเหล่านี้ มีปัญหาด้านความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างมาก ได้แก่ ดินเป็นกรดมี pH ต่ำ มีปริมาณเหล็กอะลูมินัมและแมงกานีสสูงในระดับที่เป็นพิษต่อพืช ขาดธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะธาตุ P ธาตุอาหารประจุบวกที่เป็นด่างเหลืออยู่น้อย ปริมาณแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรืออะลูมินัมไอออน (Al^{3+}) ในรูปต่างๆ สะสมอยู่ในดิน ดินกรดส่วนใหญ่มีเนื้อดินค่อนข้างหยาบ ผลผลิตพืชที่ปลูกในดินดังกล่าวมักจะต่ำกว่าดินปกติอื่นๆ เนื่องจากมีข้อจำกัดทั้งทางด้านความอุดมสมบูรณ์ เคมี กายภาพและชีวภาพ (von Uexkull, 1986)

สมบัติดินบางประการของดินกรดที่ดอนที่สำคัญๆ ทางภาคใต้ของประเทศไทย แสดงใน (ตารางที่ 1) พบว่าดินกรดที่ดอนส่วนใหญ่มีช่วงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมบัติต่างๆ ดังนี้ pH 4.99±0.45, P ที่เป็นประโยชน์ 3.53±2.06 mg P kg^{-1} ปริมาณ K ที่เป็นประโยชน์ 75.89±79.99 mg kg^{-1} และอินทรียวัตถุ 25.58±12.18 g kg^{-1} แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 0.98±1.56 และ 0.50±0.60 $cmol_c\ kg^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานความสูงต่ำของค่าวิเคราะห์ดิน เอิบ (2544) จะเห็นว่า ปริมาณอินทรียวัตถุและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลาง ในขณะที่ปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับต่ำ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีบางประการของชุดดินบางชนิดในประเทศไทย

Soil series	pH ($1:1H_2O$)	EC ($dS\ m^{-1}$)	Avai.P ($mg\ P\ kg^{-1}$)	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	46.70	2.30	6.37	1.82
Chumphon (Cp)	5.20	0.20	2.34	76.80	16.00	0.80	0.87	0.29
Fang Daeng (Fd)	5.44	0.18	2.74	51.08	16.20	0.80	0.28	0.21
Hat Yai (Hy)	4.88	0.00	5.72	58.60	28.80	1.40	0.44	0.49
Krabi (Kbi)	5.51	0.09	4.91	39.32	22.40	1.10	3.22	2.16
Kho Hong (Kh)	4.88	0.02	1.75	16.92	15.90	0.80	0.10	0.07
Khao Khat (Kkt)	5.15	0.11	1.44	69.44	25.20	1.30	1.07	0.52
Khlong Teng (Klt)	5.58	0.03	2.08	94.48	31.40	1.60	0.18	0.20
Khlong Thom(Km)	4.70	0.07	1.10	16.72	13.30	0.30	0.35	0.25
Khlong Nok krathung (Knk)	4.25	0.34	3.68	61.64	20.20	1.00	0.43	0.17
Lamphu La (Ll)	4.86	0.12	3.34	169.12	40.20	2.50	0.95	0.81
Na Tham (Ntm)	4.93	0.04	2.30	38.12	42.40	2.60	0.65	0.41
Phuket (Pk)	4.45	0.01	4.03	17.44	15.70	0.80	0.32	0.11
Rueso (Ro)	4.98	0.08	2.28	106.72	45.70	2.80	0.50	0.50
Tha sae (Te)	4.75	0.01	2.30	30.28	12.20	0.70	0.37	0.27
Thung Wa (Tg)	4.42	0.02	7.22	47.48	11.20	0.60	0.19	0.04
Yala (Ya)	4.94	0.12	8.47	47.32	31.40	1.60	0.35	0.15
Average	4.99	0.09	3.53	75.89	25.58	1.35	0.98	0.50
S.D.	0.45	0.09	2.06	79.99	12.18	0.77	1.56	0.60

ที่มา : ดัดแปลงจาก สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2550)

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานความสูงต่ำของค่าวิเคราะห์ทางเคมีของดิน

ลักษณะทางเคมีของดิน	เกณฑ์มาตรฐาน		
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
อินทรียวัตถุ ($g\ kg^{-1}$)	5-10	15-25	35-45
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($mg\ P\ kg^{-1}$)	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)

2.2 ฟอสฟอรัสในดินกรดที่ดอน (phosphorus status in acid upland soils)

2.2.1 ปริมาณฟอสฟอรัสในดินกรด

ดินกรดโดยทั่วไปมีปริมาณ P ทั้งหมดในระดับต่ำมาก ปกติน้อยกว่า 200 $mg\ kg^{-1}$ ดินกรดเขตร้อนชื้นในภาคใต้ที่สำคัญๆ จะมีปริมาณของ P ทั้งหมดในดินบนสูงกว่าดินล่าง เนื่องจากการสะสมของอินทรีย์ P ในดินบนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์และดินบนมีการดูดซับของ P ที่ใส่ในรูปของปุ๋ย (Onthong *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตามปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะมีสัดส่วนที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ P ทั้งหมดในดิน จึงไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ทั้งหมดในดิน และระดับ P ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช สารประกอบของ P ในดินละลายน้ำได้น้อยมาก (solubility < 0.01 $mg\ P\ L^{-1}$) ระดับความเข้มข้นของ P เฉลี่ยในสารละลายดินมีเพียง 0.03 $mg\ P\ L^{-1}$ ซึ่งอาจต้องมีการละลายของสารประกอบ P เหล่านี้ออกมาในสารละลายประมาณ 250 ถึง 500 ครั้ง เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของพืช นอกจากนี้ การใส่ P ในรูปของปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ในดินกรดก็ยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในดินและทำให้การละลายได้น้อยลง โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของปุ๋ยที่ใส่จะมีเพียง 15-20 % เท่านั้น ฉะนั้น P จึงเป็นธาตุที่มีข้อจำกัดในการผลิตพืชที่แพร่หลายรองจากธาตุไนโตรเจน (วิเชียร, 2549)

2.2.2 รูปทางเคมีของฟอสฟอรัสในดินกรดที่ดอน

P ในดินแบ่งออกได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ อินทรีย์ P (organic phosphorus) และอนินทรีย์ P (inorganic phosphorus) ดินโดยทั่วไปจะมี P ทั้งสองส่วนนี้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน จากการศึกษาของ Onthong และคณะ (1999) พบว่า P ในดินบนของดินกรดที่ดอนส่วนใหญ่ ประกอบด้วยอินทรีย์ P ประมาณ 48-71 % ของ P ทั้งหมดในดิน ซึ่งปริมาณของอินทรีย์ P เหล่านี้จะลดลงตามความลึกของดิน ส่วนในดินที่ใช้ในเขตกรรมทั่วไปมีอินทรีย์ P มากกว่า 90 % ของ P ทั้งหมดในดิน และส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ ออร์โทฟอสเฟต หรือ พวกที่แปลงมาจากกรดออร์โทฟอสฟอริค (H_3PO_4) เกือบทั้งสิ้น ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-}) ในดินกรดพืชดูดกิน P ในรูป monobasic orthophosphate ($H_2PO_4^-$) เป็นส่วนใหญ่ และส่วนน้อยในรูป dibasic orthophosphate (HPO_4^{2-}) เนื่องจากมีอยู่ในสารละลายดินน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ $H_2PO_4^-$ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) รูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ในสารละลายจะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับ pH ในสารละลายดิน (Havlin *et al*., 2005) โดยทั่วไปดินที่มี pH 4-8 ฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} โดยรูปทั้งสองจะมีปริมาณเท่ากันเมื่อดินมี pH 7.2 (ไพบูลย์, 2546) ในสารละลายดินที่มีสภาพเป็นกรดแนวโน้มของฟอสเฟตส่วนใหญ่จะเป็น $H_2PO_4^-$ แต่ถ้าสารละลายดินค่อนข้างเป็นด่างฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป HPO_4^{2-}

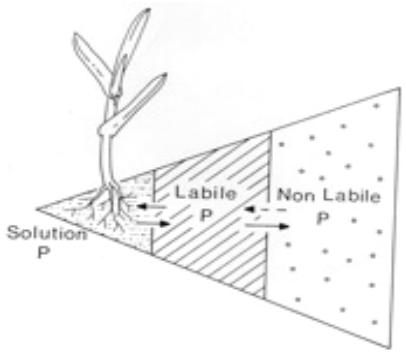
2.2.3 ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรดที่ดอน

ในระบบนิเวศธรรมชาติ ความเป็นประโยชน์ของ P ถูกควบคุมโดยกระบวนการดูดซับ-ปลดปล่อย (sorption-desorption) และการตกตะกอน (precipitation) ของ P ที่ได้จากการสลายตัวและการละลายของสารประกอบ หรือแร่ที่มี P เป็นองค์ประกอบ ปริมาณ P ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวในดิน โดยทั่วไปมักจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ฉะนั้นการใส่ปุ๋ย P เพื่อสร้างสมและรักษาระดับ P ที่เป็นประโยชน์ในดินให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งจำเป็นในระบบการผลิตด้านการเกษตร

ดินที่มีศักยภาพการให้ผลผลิตสูง P ที่พืชดูดกินจะได้จากอนินทรีย์ P เป็นส่วนใหญ่ และการศึกษาส่วนใหญ่ก็เน้นหนักที่ความเป็นประโยชน์ของอนินทรีย์ P จากการใส่ปุ๋ยเคมีมากกว่าบทบาทความเป็นประโยชน์จากแหล่งอินทรีย์ P อย่างไรก็ตามในสภาพดินกรดเขตร้อนชื้นอินทรียวัตถุมีบทบาทเป็นแหล่งของ P ในดินที่สำคัญสำหรับระบบการปลูกพืชของเกษตรกรรายย่อยที่มีการใช้ปุ๋ยน้อย โดยทั่วไปอินทรียวัตถุมี P ประมาณ 1-3 % อินทรีย์ P สามารถถูกย่อยสลายปลดปล่อยฟอสเฟตให้อยู่ในรูปอนินทรีย์ P ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและอนินทรีย์ P ในสารละลายอาจถูกจุลินทรีย์ดินนำไปใช้เปลี่ยนเป็นอินทรีย์ P ถ้ามีสัดส่วนของ C:P มากกว่า 300 (Tisdale *et al*., 1993)

ความเป็นประโยชน์ของ P ในดินแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที (soil solution P) เช่น $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} 2) ส่วนที่เป็นประโยชน์ได้ค่อนข้างง่าย (labile) เช่น P ที่ถูกดูดซับหรือตกตะกอนใหม่ๆ และ 3) ส่วนที่เป็นประโยชน์ได้ยาก (non-labile)

เช่น P ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยหรือช้ามาก อย่างไรก็ตามฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้หรือปุ๋ยที่ใส่ในดินจะถูกเปลี่ยนอย่างรวดเร็วเป็นรูปที่ละลายได้ช้าลง ในรูปอินทรีย์ P และอนินทรีย์ P และจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ได้ช้ามาก ซึ่งเป็นส่วนใหญ่ของ P ในดิน (80-90 %) ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ช้ามาก และไม่เกิน 1 % จะอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ง่าย (Menzies, 2009) (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ฟอสฟอรัสทั้ง 3 ส่วนในดินที่เป็นธาตุอาหารพืช
ที่มา : Menzies (2009)

2.2.4 ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินกรด

ปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน ได้แก่

1) ปฏิกิริยาดิน

ปฏิกิริยาดิน (pH) เป็นสมบัติที่สำคัญในการควบคุมรูปของอนินทรียฟอสเฟต ส่วนปริมาณของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส จะเป็นตัวกำหนดปริมาณของสารประกอบต่างๆ ปฏิกิริยาดินในดินกรด ฟอสเฟตไอออนจะทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส ดังสมการต่อไปนี้

$$Al^{3+} + H_2PO_4^- + 2H_2O \rightleftharpoons 2H^+ + Al(OH)_2H_2PO_4$$

(ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์) (ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก)

สภาพดินที่เป็นกรดจะส่งเสริมให้สารประกอบของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส ละลายออกมาได้มากขึ้น และทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตในรูปที่เป็นประโยชน์ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยาก โดยปกติแล้วปฏิกิริยานี้มักจะมีแนวโน้มเกิดขึ้นไปทางขวามากกว่า ทำให้ฟอสเฟตเปลี่ยนจากรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชไปอยู่ในรูปที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้หรือใช้ได้ยากขึ้น

2) ปริมาณเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์

การตรึงฟอสเฟตโดยออกไซด์ในสภาพที่เป็นกรด (P fixation under acid conditions) ฟอสเฟตไอออนในสารละลายจะแลกเปลี่ยนกับกลุ่มไฮดรอกซี (OH group) ของไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม ดินกรดในเขตร้อนชื้น ประจุสุทธิของดินมีโอกาสเป็นบวกและสามารถดูดซับฟอสเฟตในลักษณะดังกล่าวมากขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$Al(OH)_3 + H_2PO_4^- \rightleftharpoons Al(OH)_2H_2PO_4 + OH^-$$

(ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์) (ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก)

P ส่วนนี้จัดเป็นแหล่งสำรองที่พืชจะสามารถดูดใช้ได้ (labile pool) แต่เมื่อเกิดพันธะแข็งแรงทำให้ละลายน้ำได้ยาก พืชก็จะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (non labile pool)

3) ชนิดของแร่ดินเหนียว

การดูดซับฟอสเฟตโดยแร่ดินเหนียว ฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินมีการแลกเปลี่ยนกับกลุ่มไฮดรอกซี (OH^-) บริเวณขอบที่แตกหัก (brocken edge) ของอนุภาคแร่ดินเหนียวประเภท 1:1 เช่น kaolinite เป็นส่วนใหญ่ในสภาพดินที่เป็นกรด ในสภาพดินด่างฟอสเฟตไอออนในสารละลายดิน จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ที่ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว (clay-Ca phosphate linkage) เกิดในแร่ดินเหนียวพวก 2:1 โดยเฉพาะพวก montmorillonite นอกจากนี้ฟอสเฟตไอออนในสารละลายดินจะทำปฏิกิริยากับอะตอมที่มีประจุเป็นบวกเช่นอะตอมของเหล็กหรืออะลูมินัมที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ไอออนฟอสเฟตจึงกลายเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวไป ดังสมการต่อไปนี้

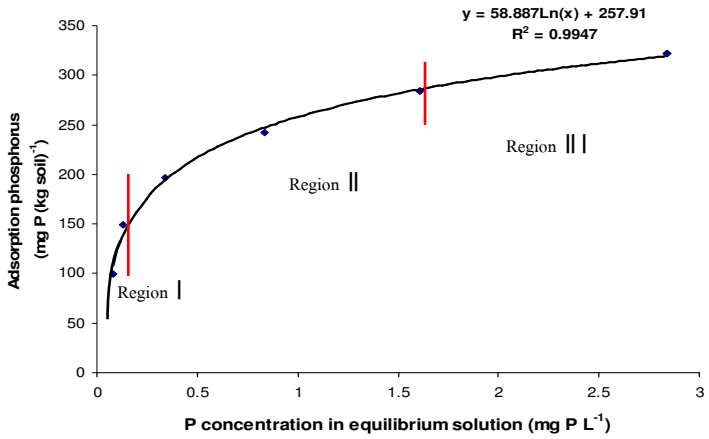
$$[\ Al\ ] + H_2PO_4^- + 2H_2O \rightleftharpoons 2H^+ + Al(OH)_2H_2PO_4$$

(ในผลึก silicate) (ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก)

2.3 Phosphorus Sorption Isotherm

การดูดซับ P (P sorption) หมายถึงกระบวนการใดๆ ที่ P หรืออนุมูลฟอสเฟตในสารละลายทำปฏิกิริยากับอะตอมบนพื้นผิวอนุภาคดิน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับ P ของดินจึงเป็นสมบัติของดินที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน (เพิ่มพูน และคณะ, 2546) กระบวนการดูดซับ P นี้จะเกิดขึ้นทันทีที่มีการใส่ปุ๋ย P ที่ละลายน้ำได้ง่ายลงไปในดิน การหาศักยภาพในการดูดซับ P ของดินมักจะใช้ P sorption isotherm ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ

การดูดซับของ P บนผิวของอนุภาคดินกับความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่อยู่ในสภาพสมดุลกัน ณ อุณหภูมิคงที่ (ทวีทรัพย์, 2548) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 P sorption isotherm ของชุดดินโชคชัย
ที่มา : ทวีทรัพย์ (2548)

ลักษณะการดูดซับ P ในดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ เมื่อมีการใส่ P ที่ละลายน้ำได้ลงไปในดิน ปฏิกิริยาการดูดซับ P ของดินในช่วงแรก(initial phase, region I) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นปฏิกิริยาการดูดซับจะค่อยๆช้าลง (region II) และค่อนข้างคงที่ (region III) (Agbenin and Tiessen, 1995) Ayodele และคณะ (1984) พบว่า การดูดซับ P เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 6 ชั่วโมงแรก หลังจากนี้ การดูดซับเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยใน 6 ชั่วโมงแรก ดินสามารถดูดซับ P ได้ 53 - 88 % ของ P ที่เติมลงไป สมการที่นิยมใช้ในการบรรยายปริมาณการดูดซับ P ในดินในรูปตัวเลขและทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นได้แก่

1) สมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

สมการแลงเมียร์อธิบายลักษณะการดูดซับ P ที่พื้นผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือในกรณีที่มีความเข้มข้นของ P ในสารละลายต่ำ (ปัทมา, 2533)

$$y = ax_mC/(1 + aC) \qquad (1)$$

เมื่อ y = ปริมาณ P ที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน

x_m = ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับได้ในระดับสูงสุด (1/slope)

C = ความเข้มข้นของฟอสเฟตไอออนในสารละลายที่อยู่ในสภาวะสมดุล

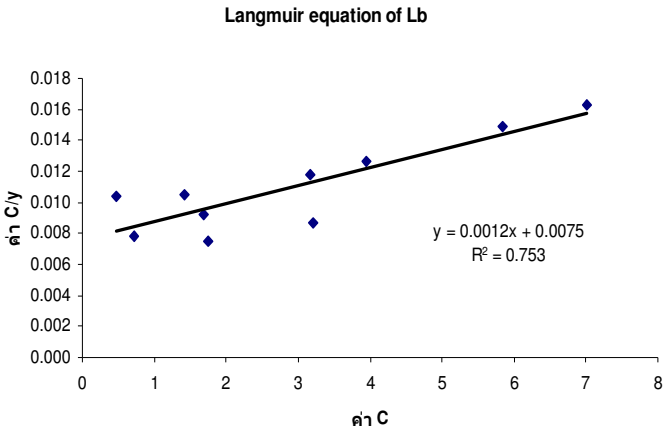
a = ค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับกับฟอสเฟตไอออน

เมื่อทำเป็นสมการเส้นตรง จะได้

$$C/y = 1/a\ x_m + C/x_m \qquad (2)$$

โดย slope = $1/x_m$

Intercept = $1/ax_m$



รูปที่ 3 กราฟเส้นตรงจากสมการ Langmuir ของชุดดินลพบุรี
ที่มา : อมรา (2545)

2) สมการฟรุนด์ลิช (Freundlich equation)

สมการฟรุนด์ลิชอธิบายลักษณะของการดูดซับ P โดยถือว่าแรงการดูดซับลดลงแบบยกกำลัง (decreases exponentially) เมื่อปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับทั้งหมด (mg P kg^{-1} soil) กับความเข้มข้นของ P ในสารละลาย C (mg L^{-1}) ดังนี้

$$y = kC^b \qquad (3)$$

เมื่อ y = ปริมาณ P ที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน

C = ความเข้มข้นของฟอสเฟตไอออนในสารละลายที่อยู่ในสภาวะสมดุล

k = พลังงานในการดูดซับ P ของดิน

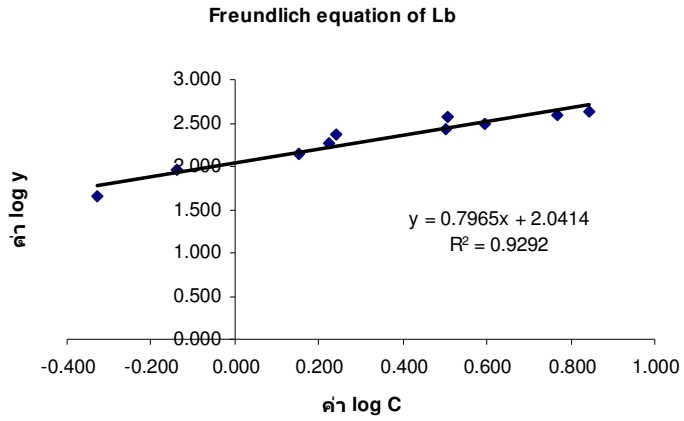
b = ค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับกับฟอสเฟตไอออน

เมื่อทำเป็นสมการเส้นตรง จะได้

$$\log y = \log k + b \log C \qquad (4)$$

โดย slope = *b*

Intercept = log k



รูปที่ 4 กราฟเส้นตรงของสมการ Freundlich ของชุดดินลพบุรี
ที่มา : อมรา (2545)

ได้มีการศึกษาความสามารถในอธิบายการดูดซับ P จากสารละลายดินโดยใช้สมการ Langmuir และสมการ Freundlich กันอย่างกว้างขวาง ผลการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าทั้งสมการ Langmuir และสมการ Freundlich สามารถอธิบายการดูดซับ P ในดินได้ดีใกล้เคียงกัน (Boschetti *et al*., 1998; Javaid, 1999; Aslam *et al*., 2000; Cox *et al*., 2000; Siradz, 2000; Hussain *et al*., 2003; Hussein *et al*., 2004; Trakoonyingcharoen *et al*., 2005; Siradz, 2009 และ อมรา, 2550) อย่างไรก็ตาม ยังมีผลการศึกษาที่พบว่า สมการ Langmuir isotherm สามารถอธิบายการดูดซับ P ในดินได้ดีกว่าสมการของ Freundlich (Olsen and Watanabe, 1965; Wijesundara *et al*., 1997; จุฑารัตน์, 2550 และ ศิริพรรณ, 2552) ในทางกลับกัน มีผลการศึกษาที่พบว่า สมการ Freundlich isotherm สามารถอธิบายการดูดซับ P ของดินได้ดีกว่าสมการ Langmuir (Gunary, 1970; Bache and Williams, 1971 และ Ghanbari *et al*., 1998)

ดินกรดที่ดอนโดยทั่วไปจะมีศักยภาพในการดูดซับ P ที่สูงมาก จากการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสูงสุด (x_m) ของสมการ Langmuir และ ค่าคงที่ของพลังงานการดูดซับ (a) พบว่า ศักยภาพในการดูดซับ P ของดินแตกต่างกันค่อนข้างมาก (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการดูดซับ P สูงสุด (x_m) จากสมการ Langmuir และค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ (a) ของดินในอันดับ Oxisols และ Ultisols ที่มีสีแดงในประเทศไทยกับค่าที่ได้ตีพิมพ์ของดินต่างๆ

Soil type	Mean x_m (mg P kg^{-1})	Mean a (mL ug^{-1})	Location and references
Rhodoxealf	706	0.69	Greece, (Tsadilas *et al*., 1996)
Red soils on volcanic tuff	1,700	0.93	Indonesia, (Siradz, 2000)
Xerochrept	410	0.30	Spain, (Pradas *et al*., 1992)
Oxisols	1,078	4.04	Brazil, (Afif *et al*., 1995)
Red Ultisols (n = 10)	76	1.47	Thailand
Red Oxisols (n = 18)	547	0.80	Thailand
Red soil (n = 28)	378	1.04	Thailand

ที่มา : Trakoonyingcharoen และคณะ (2005)

จากตารางที่ 3 พบว่า ดินในเขตร้อนชื้น มีศักยภาพในการดูดซับ P ที่แตกต่างกันมาก โดยค่าการดูดซับสูงสุด (x_m) ของดินภูเขาไฟในอินโดนีเซียมีค่า 1,700 mg P kg^{-1} รองมาได้แก่ ดินในอันดับ Oxisoils ในบราซิลมีค่า 1,078 mg P kg^{-1} และดิน Ultisols, Oxisols และ red soil ในประเทศไทยมีค่า 76, 547 และ 378 mg P kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนชุดดินที่มีสีแดงของเมือง Lampung อินโดนีเซีย พบว่าอยู่ในช่วง 719 ถึง 2,747 mg P kg^{-1} (Siradz, 2009) Cox และคณะ (2000) รายงานว่า ดิน Davison และ Tatum ในประเทศออสเตรเลีย มีค่า x_m เท่ากับ 4,007 และ 2,179 mg P kg^{-1} ตามลำดับ โดยที่ ดิน Davison มีปริมาณดินเหนียว เหล็กและอะลูมินัมออกไซด์ในดินสูงกว่าดิน Tatum คือ 40 กับ 30 %, 16.7 กับ 6.2 % และ 1.5 กับ 0.8 % ตามลำดับ ในขณะที่ Derici และ Agca (1999) รายงานว่า ดินในประเทศตุรกี มีค่า x_m อยู่ในช่วง 58.1 ถึง 133.3 mg P kg^{-1} ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินเนื้อหยาบและปริมาณดินเหนียวน้อย ทำให้ดินดูดซับ P ได้น้อย

การศึกษาการดูดซับ P ในดินเขตร้อนชื้น โดยเฉพาะในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม ได้เริ่มมีความสนใจศึกษากันมากขึ้นในปัจจุบัน เพิ่มพูน และคณะ (2546) ทำการศึกษาระดับการดูดซับปริมาณ P ที่ถูกดูดซับสูงสุดของดินจากสมการ Langmuir ของชุดดินในอันดับ Ultisols และ Alfisols จำนวน 31 ตัวอย่างทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่า ศักยภาพการดูดซับ P ของดิน แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ดินที่มีการดูดซับสูง มีค่า x_m อยู่

ในช่วง 111 – 208 mg P kg^{-1} (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 129.10 และค่ามัธยฐานปานกลางที่ 119.20) ดินที่มีการดูดซับปานกลาง มีค่า x_m อยู่ในช่วง 30 – 83 mg P kg^{-1} (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.52 และค่ามัธยฐานปานกลางที่ 47.60) ส่วนดินที่มีการดูดซับต่ำ มีค่า x_m อยู่ในช่วง 7 – 30 mg P kg^{-1} (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.43 และค่ามัธยฐานปานกลางที่ 14.50)

ดินในอันดับ Ultisols และ Oxisols ที่มีสีแดงมีค่า x_m มากกว่าดินในอันดับ Ultisols และ Alfisols ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีค่า x_m สำหรับดินชั้นบนอยู่ในช่วง 7 ถึง 129 mg P kg^{-1} และดินชั้นล่างอยู่ในช่วง 7 ถึง 208 mg P kg^{-1} (เพิ่มพูน และคณะ, 2546) และมากกว่าค่า x_m ของดินเค็ม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 40 – 180 mg P kg^{-1} (กาญจนารัตน์, 2550) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาศักยภาพการดูดซับ P ของชุดดินในอันดับ Ultisols และ Oxisols ที่มีสีแดง จำนวน 28 ตัวอย่าง โดย Trakoonyingcharoen และคณะ (2005) พบว่า ปริมาณ x_m จากสมการ Langmuir isotherm อยู่ในช่วง 18 ถึง 1,111 mg P kg^{-1} (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ช่วงปริมาณการดูดซับ P สูงสุด (x_m) และค่าเฉลี่ยจากสมการ Langmuir และ พลังงานในการดูดซับ P ของดิน (*k*) จากสมการ Freundlich ของดินในประเทศไทย

Reference	Sampling Area	x_m (mg P kg^{-1}) Mean	*k* Mean
Trakoonyingcharoen และคณะ (2005)	red Oxisols and red Ultisols	18 - 1,111 378	9 – 652 -
เพิ่มพูน และคณะ (2546)	Ultisols and Alfisols, North Eastern	7 – 129 56	7 – 14,125 629
อมรา (2545)	Ultisols, North Eastesrn	4 – 833 285	-
กาญจนารัตน์ (2550)	Saline soil	40 - 180 93	-

ส่วนค่า k จากสมการ Freundlich ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความจุในการดูดซับ (sorption capacity, mg P kg^{-1}) ก็แสดงแนวโน้มในทำนองเดียวกัน โดยดินที่มีสีแดงของเมือง Lampung มีค่า k อยู่ในช่วง 388 ถึง 1,569 mg P kg^{-1} (Siradz, 2009) ซึ่งสูงกว่าค่า k ของชุดดินในอันดับ Ultisols และ Oxisols ที่มีสีแดง ซึ่งอยู่ในช่วง 9 ถึง 652 mg P kg^{-1} (Trakoonyingcharoen *et al*., 2005) และดินในประเทศตุรกี มีค่า k อยู่ในช่วง 9.2 ถึง 153.5 mg P kg^{-1} (Derici and Agca, 1999) อย่างไรก็ตาม ค่า k ของดินในอันดับ Ultisols และ Alfisols ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีช่วงที่สูงมาก คือ 7.2 ถึง 14,125 mg P kg^{-1} สำหรับดินชั้นบน และ 128 ถึง 16,595 mg P kg^{-1} สำหรับดินชั้นล่าง (เพิ่มพูน และคณะ, 2546) (ตารางที่ 4)

ดินในอันดับ Oxisols ที่มีสีแดงในประเทศไทยมีศักยภาพในการดูดซับ P ที่ค่อนข้างสูงมากกว่าดินอันดับ Ultisols ที่มีสีแดง ซึ่งมีการดูดซับ P ในระดับปานกลาง ค่าเฉลี่ย x_m = 547 และ 76 mg P kg^{-1} ตามลำดับ (Trakoonyingcharoen และคณะ, 2005) และสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของดินในอันดับ Ultisols และ Alfisols ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีค่าเฉลี่ย x_m = 56 mg P kg^{-1} ทั้งนี้เนื่องจากค่าเฉลี่ยของปริมาณแร่ดินเหนียว และ DCB Fe_2O_3 ของดินทั้งสองอันดับ (Oxisols และ Ultisols ที่มีสีแดง) (ตารางที่ 5) ค่อนข้างสูงกว่าดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ตารางที่ 6) นอกจากนี้ Trakoonyingcharoen และคณะ (2005) สรุปว่า ดินตะกอนมีปริมาณเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์ต่ำ ส่งผลให้ดินสามารถดูดซับ P ได้น้อย ส่วนดินที่สลายตัวจากหินบะซอลต์ (Basalt) มีปริมาณเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์ในรูปอสัณฐานสูง ทำให้ดินสามารถในการดูดซับ P สูง

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยสมบัติของดิน Red Ultisols และ Red Oxisols ในประเทศไทย

สมบัติดิน	Red Ultisols		Red Oxisols	
	mean	range	mean	range
Clay (%)	15.2	7.6 - 24.4	66.5	26.0 – 92.0
DCB Fe_2O_3 (%)	0.7	0.05-2.4	8.0	3.94-12.1
C.E.C ($cmol_e\ kg^{-1}$)	3.1	0.90 – 4.9	11.0	5.1 – 18.0
OM (%)	0.86	1.6 – 21	0.9	0.43 – 4.5

ที่มา : ดัดแปลงจาก Trakoonyingcharoen และคณะ (2005)

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยสมบัติของดินที่มีการจัดกลุ่มตามระดับศักยภาพการดูดซับ P ของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

ศักยภาพการดูดซับ P ของดิน	x_m (mg P kg^{-1})	Clay (%)	DCB Fe_2O_3 (%)	C.E.C ($cmol_e\ kg^{-1}$)	OM (%)
สูง	129.10	35.70	4.15	19.58	2.26
ปานกลาง	50.52	14.83	0.38	4.33	0.54
ต่ำ	15.43	3.74	0.24	1.18	0.37
เฉลี่ย	65.01	18.09	1.59	8.36	1.05

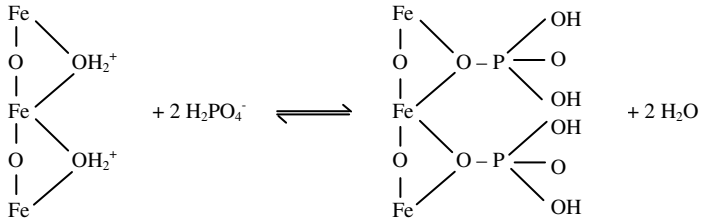
ที่มา : ดัดแปลงจาก เพิ่มพูน และคณะ (2546)

2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ P ของดิน

การดูดซับ P ของดิน มีผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของ P ต่อพืชและประสิทธิภาพของปุ๋ยที่ใช้ ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ P ของดินได้แก่

1) ปริมาณออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม

เป็นปัจจัยที่สำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินกรดเขตร้อน ที่มีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมสูงจะสามารถดูดซับ P ไว้ได้สูง การดูดซับ P โดยออกไซด์จะเกิดขึ้นเป็นโครงสร้างแบบวงแหวน (Havlin *et al*., 2005) (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ลักษณะการดูดซับ P ที่ผิวของแร่ออกไซด์
ที่มา : Havlin และคณะ (2005)

Singh และ Singpuri (1986) พบว่า ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ (R^2 = 0.405) และพบความสัมพันธ์เชิงบวก (R^2 = 0.372) ระหว่างค่าคงที่ของพลังงานที่ดูดซับ P กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมอิสระ แสดงว่า กลไกการดูดซับ P โดยส่วนใหญ่จะดูดซับบนพื้นผิวของคลอลอยด์ และอะลูมินัมในดิน ดินที่มีสารประกอบของเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์ และมีค่า P sorption maxima สูง จากการเกิดสารประกอบโลหะฟอสเฟต (Maida, 1980) สาเหตุที่เหล็กมีบทบาทมากที่สุดในการดูดซับ P เนื่องจากเหล็กมีอนุภาคมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และพบว่า มีสหสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน รวมทั้งความสามารถในการดูดซับไอออนต่างๆ (Goldberg *et al*., 2001)

2) ชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียว

ปริมาณแร่ดินเหนียวในดินมีส่วนสำคัญต่อศักยภาพการดูดซับ P ของดิน (Walthall and Nolfe, 1998) ดินจะมีการดูดซับ P เพิ่มขึ้นตามปริมาณของแร่ดินเหนียว และจะไม่ถูกกระทบจากปริมาณความเข้มข้นของอินทรียคาร์บอนในดิน (Boschetti *et al*., 1998) ธรรมชาติและกลไกการดูดซับ P บนแร่ดินเหนียว เป็นปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนแบบ legend กับกลุ่ม

ไฮดรอกซี (OH groups) บนขอบของผลึกของแร่ดินเหนียว ซึ่งจะคล้ายกับกลไกการดูดซับของโลหะบนแร่ kaolinite (Kafkafi *et al*., 1967) P บางส่วนอาจถูกดูดซับที่ขอบของผลึกแร่ซิลิเกตที่แตกหัก โดยการแลกเปลี่ยนกับอะลูมินัมแบบ legend exchange (White, 1980). Kafkafi และคณะ (1967) รายงานว่า ฟอสเฟตไอออนดูดซับที่ขอบของแร่ kaolinite คล้ายกับการดูดซับของออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมซึ่งไม่สามารถถูกชะล้างได้ ที่ pH คงที่

ดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 1:1 (kaolinite) สูงจะสามารถดูดซับ P ได้สูง เนื่องจากมีปริมาณของสารประกอบของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีสไฮดรอกไซด์อยู่มาก ซึ่งมีการดูดซับ P มากกว่าส่วนของอนุภาคของทรายแป้ง (silt fraction) (Jones *et al*., 1979) ส่วนในดินที่มีแร่ดินเหนียวพวกซิลิเกต การดูดซับ P จะเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซี และ ionic strength ของแคตไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น (Sample *et al*., 1980; Velayutham, 1980) ในดินที่เป็นกรดอ่อนถึงกรดปานกลางที่มีปริมาณของอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ พบว่า สมบัติของดิน เช่น C.E.C และแร่ดินเหนียวพวกซิลิเกตไม่ว่าจะเป็นประเภท 2:1 หรือ ประเภท 1:1 ถ้ามีพื้นที่ผิวเท่ากันจะสามารถดูดซับ P ได้เท่ากัน (ปัทมา, 2533)

3) ปฏิกิริยาดิน

อิทธิพลของปฏิกิริยาดิน (pH) มีผลต่อการดูดซับ P ที่บริเวณพื้นผิวที่มีประจุผันแปรกับ pH ของดิน (veriable charge) เมื่อ pH เพิ่มขึ้นพื้นผิวที่มีประจุผันแปรจะมีประจุลบ ทำให้มีการดูดซับแอนไอออนลดลง (Stumm *et al*., 1976 อ้างโดย Spark *et al*., 1995) การดูดซับ P เกิดบริเวณผิวของคอลลอยด์ดินที่มีกลุ่มไฮดรอกซิล(OH^-)โดยเฉพาะส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุประเภทไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม และแร่อะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมี OH^- อยู่ที่ผิวมาก ดินกรดหรือดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดการดูดซับ P ได้ง่าย เนื่องจากดินกรด จะมีไอออนของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส ละลายอยู่ในสารละลายดินมาก เมื่อ P เข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ตกตะกอนหรือละลายน้ำยาก

4) อินทรียวัตถุ

อินทรียวัตถุที่ย่อยสลายสมบูรณ์แล้วหรือฮิวมัสจะมีประจุสุทธิเป็นลบ และมีการดูดซับแคตไอออนพวกเหล็กและอะลูมินัม หรือเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (chelate) ซึ่งแคตไอออนเหล่านี้จะดูดซับ P ที่ใส่ลงไปในดินและต่อมาจะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของเหล็กฟอสเฟต (Fe-P) หรืออะลูมินัมฟอสเฟต (Al-P) (Easterwood and Sartain, 1990; Ehsan, 2003). Robert (1969) รายงานว่า P จะดูดยึดกับตำแหน่งของแอนไอออนของอินทรียวัตถุและจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบของเหล็กและอะลูมินัมฟอสเฟตที่ละลายได้น้อยลง การใส่อินทรียวัตถุในดินจะช่วยลดการดูดซับ P ของแร่ดินเหนียวพวก Kaolinite และพวก Gibbsite ได้ ทั้งนี้เพราะกรด

อินทรีย์จะเข้าไปแย่งจุดดูดซับของ P ในดิน (สุมาลี, 2536) อินทรียวัตถุและปูน สามารถเพิ่ม pH และ P ที่สกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความเป็นกรดของดินเพิ่มขึ้น โดยอินทรียวัตถุและปูน จะทำให้ศักยภาพการดูดซับ P และพลังงานในการดูดซับของอนุภาคดินลดลง (Lucresio and Duque, 1999)

Guilherme และคณะ (2000) รายงานว่า Maximum buffering capacity ของดินจะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอินทรียวัตถุ, potential acidity และเชิงลบกับ base saturation อิทธิพลของอินทรียวัตถุต่อศักยภาพการดูดซับ และความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน โดย 2 กลไกที่สำคัญ ได้แก่ 1) เกิดจากประจุลบของอินทรียวัตถุดูดซับ หรือเกิด complexes cations เช่น เหล็กและอะลูมินัมในดินกรด (Barrow, 1973) มีผลทำให้การละลายได้ลดลง และลดบทบาทต่อการดูดซับและการตกตะกอน และ 2) กลไกการแข่งขันในตำแหน่งการดูดซับที่พื้นผิวระหว่างอินทรีย์แอนไอออน และ ฟอสเฟตไอออน โดยเห็นได้จากการลดลงของปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ (P sorption capacity) (Weir, 1972) หรือทำให้มีแรงของการดูดซับ (affinity) สูงขึ้น (Weir and Soper, 1962)

ในทางตรงข้าม มักพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณอินทรียวัตถุและปริมาณการดูดซับ P ในดิน (Moreo *et al*., 1960) แสดงว่า อินทรีย์แอนไอออน และฟอสเฟตไอออน จะถูกดูดซับที่ตำแหน่งประเภทเดียวกันบนพื้นผิวคอลลอยด์ หรือ ดูดซับบน complexes ของ Al และ Fe บนพื้นผิวของอินทรียสาร ถ้าอินทรียวัตถุทำให้ความสามารถในการดูดซับของ P ลดลง จะทำให้สามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ P โดยไม่ต้องมีการใช้ปุ๋ย โดยการใส่อินทรียสาร หรือปุ๋ยพืชสดจะมีผลต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว จากการทดสอบสมมุติฐานดังกล่าว พบว่า ในขณะที่อินทรียวัตถุเพิ่มขึ้น ไม่ทำให้ศักยภาพการดูดซับ P ลดลง แต่จะเป็นการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของ P ดั่งเดิมในดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกลาง (Weir and Soper, 1963) และจากปุ๋ยที่ใส่ในดินที่มีความเป็นกรดมาก (Le Mare *et al*., 1987) Weir (1972) พบว่า การใส่สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ในดินที่มีการดูดซับ P สูง พืชจะมีการดูดกิน P จากดินและปุ๋ยเพิ่มขึ้น และทำให้การดูดซับ P ลดลงอย่างมาก แสดงว่าการดูดซับ P ลดลงจากผลของอินทรียวัตถุจะทำให้ลดแรงของการดูดซับ มากกว่าเป็นผลของความสามารถของ P ในดิน (Le Mare *et al.,* 1987)

5) อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิดินสูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการดูดซับและปลดปล่อย P ของดิน จากกระบวนการ mineralization ของ P จากอินทรียวัตถุและเศษซากพืช โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้ P ปลดปล่อยออกมาในสารละลายดินมากขึ้น และในสภาพภูมิอากาศที่ร้อนขึ้นในดินจะมีปริมาณของเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เป็นผลให้ดินในสภาพภูมิอากาศที่ร้อนชื้น

มีการดูดซับ P ของดินสูงกว่าดินที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศอบอุ่นทั่วไป (Singh and Gilkes, 1991; Cho-ruk, 2003)

6) ความชื้นในดิน

ดินภายใต้สภาพน้ำท่วมขังหรือหลังจากผ่านน้ำท่วม P ที่เป็นประโยชน์จะเพิ่มขึ้น โดยที่ Fe^{3+}-phosphate จะเปลี่ยนรูปเป็น Fe^{2+}-phosphate ซึ่งผลนี้ได้จากปฏิกิริยา reduction ทำให้ P ละลายออกมาได้มาก ในสภาพดินแห้งการดูดซับ P ในดินจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากไอออนของ P จะถูกดูดซับได้ง่ายในพื้นที่บริเวณพื้นผิวของแร่ เพราะเหล็กจะเปลี่ยนมาอยู่ในรูป Fe^{3+} (Cho-ruk, 2003) กล่าวคือ Fe^{2+} เมื่อเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ Fe^{3+} จะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับ P ได้มากขึ้น (Quang and Dufey, 1995)

7) ผลของความเค็มในดิน

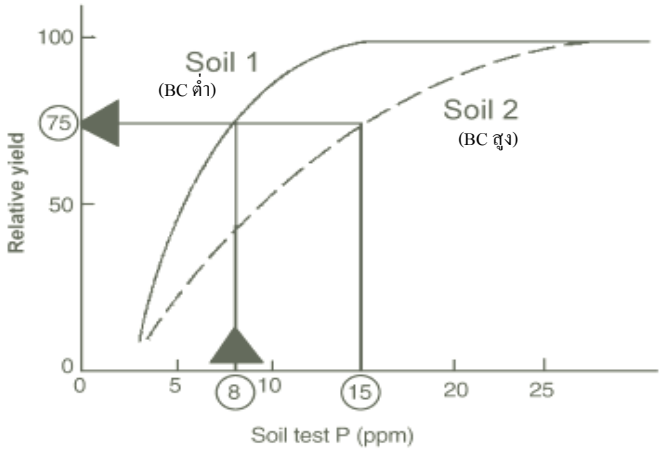
โดยทั่วไปการดูดซับ P จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปริมาณเกลือในดินเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ กาญจนารัตน์ (2550) ได้ทำการศึกษาการดูดซับ P ในดิน พบว่าดินที่มีระดับความเค็มสูงสามารถทำให้ความสามารถในการดูดซับ P ในดินเพิ่มสูงขึ้น โดยผลที่ได้จากการทดลองคือ ตัวอย่างดินที่มีค่าการดูดซับ P สูงสุดพบในดินที่มีระดับความเค็มสูงสุดเท่ากับ 17.6 dS m^{-1} ในขณะเดียวกัน ดินที่มีค่าการดูดซับ P ต่ำสุดเป็นดินที่มีค่าระดับความเค็มต่ำสุดคือ 0.83 dS m^{-1}

โดยทั่วไป ดินจะมีตำแหน่งประจุที่จะมีการดูดซับ H^+ และ OH^- ในปริมาณมาก ดังนั้นจะแสดงพฤติกรรมคล้ายกับ hydrous oxide แต่จะมีปริมาณการดูดซับ และ pH ที่ได้รับอิทธิพลของอินทรียวัตถุ และแร่อื่นๆ (other mineral) (Singh *et al*., 1990) อย่างไรก็ตาม พืชสามารถปรับเปลี่ยนสภาพทางเคมีในบริเวณรอบๆ รากพืช (rhizosphere) เช่น สามารถปลดปล่อย H^+ และ OH^- หรือ organic anions (Bertrand *et al*., 1999) Huang (1998) พบว่า P sorption maxima, พลังงานการดูดซับ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ pH, ปริมาณอินทรียวัตถุ P ที่เป็นประโยชน์ และ P ทั้งหมดในดิน และเสนอว่า P sorption maxima จากสมการ Langmuir สามารถใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินปริมาณปุ๋ยที่ต้องการได้

2.3.2 การศึกษาดัชนีการดูดซับ P ของดิน

ศักยภาพในการดูดซับ P (P sorption capacity) ของดิน มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของ P ในสารละลายดิน โดยดินจะมีการดูดซับ-ปลดปล่อย (sorb-desorb) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายจากการดูดกินของพืช หรือเมื่อมีการใส่ปุ๋ยลงไปในดิน ดังนั้น ความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน จะสัมพันธ์กับส่วนกลับของ P buffer capacity (PBC) ของดิน กล่าวคือ ในดินที่มี PBC สูง ต้องมีการใส่ปุ๋ยเพื่อยกระดับของ P ในสารละลายดินในปริมาณ

มากกว่าในดินที่มี PBC ต่ำ เพื่อให้ได้ P ที่เป็นประโยชน์แก่พืชที่เท่ากัน หรือ ให้ได้ระดับผลผลิตสัมพันธ์ที่เท่ากัน ผลกระทบดังกล่าวจะเห็นได้จากระดับค่าวิกฤติของ P ของค่าวิเคราะห์ดิน โดยดินที่มี BC สูงกว่าต้องการค่าวิกฤติที่สูงกว่าดินที่มี BC ต่ำ เพื่อให้ได้ระดับผลผลิตที่เท่ากัน (รูปที่ 6) ดังนั้น ในดินที่มี PBC สูงตัวอย่างเช่นดินในอับดับ Oxisols จะมีการดูดซับ P สูงกว่าดินที่มี PBC ต่ำ ตัวอย่างเช่น ดินในอันดับ Spodosols



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ P ในดินและผลผลิตพืช
ที่มา : Bolland และคณะ (2003)

นอกจากนี้ ความเป็นประโยชน์ของ P ในดินและประสิทธิภาพของปุ๋ยที่ใส่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความเข้มข้นของ P ในสารละลายดิน (intensity) ปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ (quantity) และ PBC ของดิน ซึ่งควบคุมการปลดปล่อยและประสิทธิภาพของปุ๋ย P ที่ใส่ให้แก่พืช (Bolland *et al*., 1994) และลักษณะการตอบสนองของพืชชนิดเดียวกันจะแตกต่างกันตามชนิดของดิน ซึ่งมีพฤติกรรมการดูดซับ P แตกต่างกัน (Ozanne and Shaw, 1967; Olsen and Khasawneh, 1980)

ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายเพื่อประเมินศักยภาพในการดูดซับ P ของดินและความสัมพันธ์กับความต้องการปุ๋ย P ให้กับพืช เนื่องจาก slope ของเส้น isotherm เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของสารละลาย Ozanne และ Shaw (1967) ได้กำหนดค่า PBC ของดิน จาก slope ของ sorption isotherm ที่ระดับความเข้มข้นสมดุลของสารละลาย (equilibrium solution P concentration) เท่ากับ 0.25 – 0.35 mg P L^{-1}. Moody และ Bolland (1999) พบว่า ค่า PBC ของดินมีประโยชน์ในการปรับค่าความเข้มข้นวิกฤติของ soil test ในดินต่างๆ ตัวอย่างเช่น ค่าวิกฤติของสารสกัด Colwell extractable P และความสัมพันธ์ของผลผลิตพืชที่ระดับ 90% จะสูงขึ้นเมื่อ PBC ของ

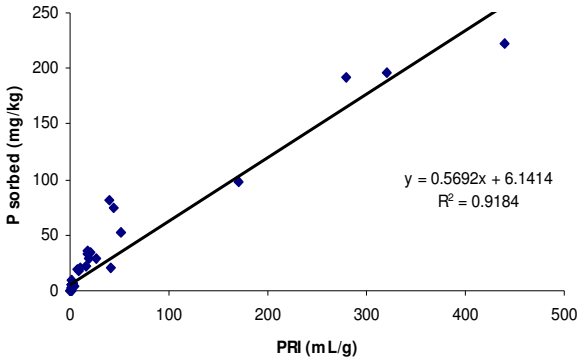
ดินเพิ่มขึ้น (Helyar and Spencer, 1977 ; Holford and Cullis, 1985; Barrow, 2000) และสรุปว่าการใช้ค่า PBC จะไม่เพิ่มความแม่นยำของการแนะนำปุ๋ย แต่อาจจะช่วยป้องกันการใส่ปุ๋ย P ในอัตราที่สูงเกินไปซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพืชได้

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วิธีการหาค่า PBC และ phosphorus sorption isotherm ค่อนข้างจะใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ได้มีความพยายามในการหาตัวชี้วัด ที่ใช้เป็นตัวแทนของศักยภาพในการดูดซับ P ของดิน เช่น การใช้ระดับความเข้มข้นของ P แบบ single points หรือ two points (Dear *et al*., 1992; Burkitt *et al*., 2002) และหาความสัมพันธ์ระหว่าง simpler, single-point P sorption indices กับ PBC (Holford and Cullis, 1985; Moody *et al*., 1988; Bolland *et al*., 1996; Allen *et al*., 2001) หรือ การคาดคะเนจากสมบัติของดิน เช่น เนื้อดิน (Cox, 1994) oxalate-extractable ของ Fe และ Al และปริมาณดินเหนียว (Toreu *et al*., 1988) ตัวอย่างของตัวชี้วัดดังกล่าว ได้แก่

- Phosphorus Retention Index (PRI)

phosphorus retention index (PRI, mL/g soil) (Allen and Jeffery, 1990) พัฒนาโดย Bolland และคณะ (1994) จากการใส่ P เพียงระดับเดียว (single-point) ในตัวอย่างดิน โดยชั่งดิน 2.5 กรัม เติม P ที่ความเข้มข้น 10 mg P L^{-1} และเติมสารละลาย KCl 0.02 M จำนวน 50 มิลลิลิตร คำนวณปริมาณการดูดซับ P ในดินโดยหาได้จากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ P ที่เติมลงไปและความเข้มข้นของ P ที่วัดได้ในสารละลาย

Bolland และคณะ (1996) รายงานว่า ค่า PRI ในดินมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับศักยภาพการดูดซับ P ของดินประเทศออสเตรเลียจำนวน 47 ตัวอย่าง (R^2 = 0.92) (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง PRI กับปริมาณการดูดซับ P ในดินออสเตรเลีย
ที่มา : ดัดแปลงจาก Bolland และคณะ (1996)

- Phosphorus Sorption Index (PSI)

Phosphorus sorption index (PSI) ตามวิธีการของ Bache และ Williams (1971) ปรับปรุงโดย Rayment และ Higginson (1992) โดยเติม P ที่ความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ และสารละลาย KCl 0.02 M จำนวน 60 มิลลิลิตรในดิน 2.5 กรัม เขย่า 17 ชั่วโมง คำนวณปริมาณการดูดซับ P ในดินโดยหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Phosphorus sorption index} = \frac{X\ (\text{mg P sorbed kg}^{-1}\ \text{soil})}{\log_{10} C\ (\text{mg P L}^{-1})} \qquad (5)$$

นอกจากนี้ยังมีการประเมินดัชนีตัวชี้วัดด้านศักยภาพการดูดซับ P ของดินอื่นๆ ร่วมกับค่าวิเคราะห์ดินเพื่อคาดคะเนศักยภาพการดูดซับ เช่น PBI (Phosphorus buffering index, Burkitt *et al*., 2002) และ FI (Freundlich index, Barrow, 2000)

$$\text{PBI} = (P_s + \theta\ \text{Colwell P})/c^b \qquad (6)$$

$$\text{FI} = (P_s + \theta\ \text{Colwell P})*(0.35^b - 0.25^b)/c^b \qquad (7)$$

เมื่อ P_s = ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ หาได้จาก single-point P ที่ความเข้มข้นของ P 1000 mg P/kg

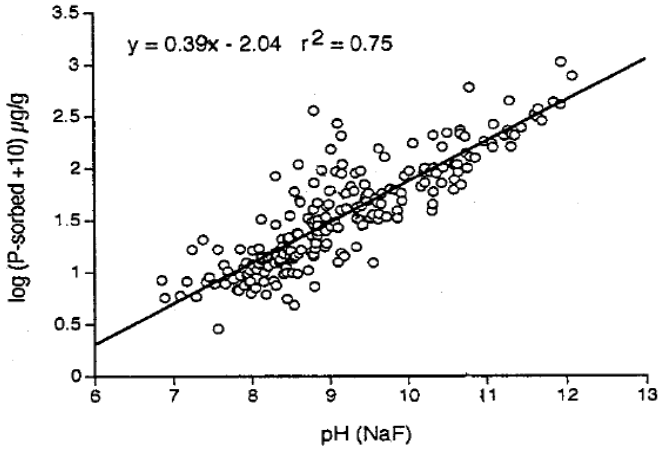
c = ความเข้มข้นของ P ในสารละลาย

Colwell P = ค่าวิเคราะห์ด้วยด้วยวิธี Colwell

θ และ b = ค่าคงที่ โดย $\theta_{\text{Col P}} = 1$ และ $\theta_{\text{Ols P}} = 4.59$

- pH (NaF)

วิธีการใช้ค่า pH 1 M NaF (pH 8.0) ตามวิธีการของ Singh และ Gilkes (1991) พบว่า ค่า pH (NaF) มีความสัมพันธ์กับศักยภาพของการดูดซับ P ของดินอันดับ Oxisols และอันดับ Ultisols ที่มีสีแดงในประเทศไทย (Trakoonyingcharoen *et al.*, 2005) และดินกรดในประเทศออสเตรเลียเช่นเดียวกัน ($R^2 = 0.75$) (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH (NaF) กับปริมาณการดูดซับ P ในดิน

ที่มา : Gilkes และ Hughes (1994)

- การศึกษาเพื่อคาดคะเน PBC จากสมบัติของดินต่างๆ ได้แก่

$$PBC_{predicted} = -0.064 + 0.0039\ (\text{oxalate Al}) + 0.282(\text{clay}) \quad R^2 = 0.8200 \qquad (8)$$

(Bolland *et al.*, 1996)

$$PBC_{Bray\ 1} = 0.9051 - 0.2839\ (\%OC) \qquad R^2 = 0.7839 \qquad (9)$$

$$PBC_{Bray\ II} = 1.0927 - 0.0393\ (Fe_{di}) \qquad R^2 = 0.9022 \qquad (10)$$

$$PBC_{Mehlich\ 1} = 0.7250 - 0.00017\ (C.E.C) \qquad R^2 = 0.9643 \qquad (11)$$

$$PBC_{Morgan} = 0.8935 - 0.0099\ (Avai.K) \qquad R^2 = 0.8487 \qquad (12)$$

(เจนจิรา และคณะ, 2553)

2.4 การประเมินปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการ (Fertilizer Requirement of Crop)

ปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการโดยทั่วไปหมายถึงปริมาณของ P ที่พืชต้องการเพื่อให้ได้ผลผลิตในระดับที่ใกล้กับระดับสูงสุดที่กำหนด ซึ่งสามารถแบ่งเกณฑ์การประเมินปริมาณความต้องดังกล่าวออกได้หลายแนวทาง ได้แก่

1) Internal nutrients requirement หมายถึง ปริมาณที่พืชดูดกินน้อยที่สุด (quantity factor) ที่สัมพันธ์กับผลผลิตที่กำหนด หรือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช (intensity factors) ที่ให้ผลผลิตใกล้ระดับสูงสุด (critical concentration, Fox, 1981)

2) ระดับวิกฤติของค่าวิเคราะห์ดิน หมายถึง ปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ในดินจากค่าวิเคราะห์ดินที่ระดับผลผลิตที่กำหนดได้จากการทดสอบการปลูกพืชเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ดิน และระดับผลผลิตที่ต้องการ (calibration curve) ความสัมพันธ์นี้จะเฉพาะเจาะจงกับชนิดของดินและพืช ซึ่งในการกำหนดระดับค่าวิกฤติดังกล่าว ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง

3) Buffer Coefficient (BC) หมายถึงสัดส่วนของค่าวิเคราะห์ดินที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยของปริมาณฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปในดิน (Yost *et al.,* 1992) ซึ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณปริมาณปุ๋ยที่ต้องการในการยกระดับค่าวิเคราะห์ดินให้เพียงพอในระดับผลผลิตที่ต้องการ และ

4) External P requirement หมายถึง ปริมาณธาตุอาหารเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายรอบบริเวณรากพืชให้เพียงพอสำหรับความต้องการของพืช (Fox and Kamprath, 1970)

ปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการจะมีช่วงปริมาณค่อนข้างกว้าง เนื่องจากเป็นผลจากความต้องการของพืช ปัจจัยด้าน capacity หรือตัวแปรด้านศักยภาพการดูดซับของดินและปัจจัยด้านพืช (ตารางที่ 9) พืชแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองความต้องการแตกต่างกันมาก (Fox *et al*., 1974; Fox, 1979; Vander Zaag *et al*., 1979) ฉะนั้น เป็นเรื่องยากที่จะทำการประเมินปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการในภาพรวม โดยไม่มีการกำหนดระบุเงื่อนไข สภาพระบบการปลูกพืชที่ชัดเจน นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณความเป็นประโยชน์ของ P ในดินที่สกัดด้วยวิธีการวิเคราะห์ดินต่างๆ (ตารางที่ 7) และชนิดพืชและวิธีการเพาะปลูก (ตารางที่ 8) จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านปริมาณและความเข้มข้นและศักยภาพการดูดซับของ P ในดินที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสารสกัดของการวิเคราะห์ดิน และปัจจัยความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน (Quantity, Intensity และ Buffer capacity)

Soil test	Factor
Colwell (0.5 M $NaHCO_3$, 1:100, soil:extratant, 16 h)	Quantity
Olsen (0.5 M $NaHCO_3$, 1:20, soil:extratant, 30 min)	Intensity, Quantity
Bray1 (0.03 M NH_4F+0.025 M HCl, 1:7, soil:extratant, 1 min)	Intensity, Quantity
0.01 M $CaCl_2$ (1 :5, soil:extratant, 16 h)	Intensity
Resin (1:2 soil: extratant, 30 min)	Intensity
Phosphorus sorption curve	Intensity, Buffer capacity
Phosphorus retention index	Buffer capacity

ที่มา : Moody และ Bolland (1999)

ตารางที่ 8 ชนิดพืชและการเพาะปลูกที่สัมพันธ์กับปัจจัยความเป็นประโยชน์ของ P ในดิน

พืชและการเพาะปลูก	Factor
การทดลองระยะสั้นในเรือนกระจก	Intensity
ดินที่มีการใส่ปุ๋ยมาก เช่น พืชสวน	Intensity
พืชที่ปลูกเป็นแถว ระยะสั้น	Intensity, Buffer capacity
พืชอายุยาว	Quantity
พืชที่มีการดูดกิน P มากในปริมาตรดินที่จำกัด เช่น การทดลองในเรือนกระจกระยะยาว	Quantity
พืชที่ปลูกในดินที่ขาด P	Quantity

ที่มา : Havlin และคณะ (2005)

2.4.1 External phosphorus requirement

ระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายดินในสภาพสมดุล ที่ถือว่าเพียงพอต่อความต้องการและระดับผลผลิตที่เหมาะสมของพืช หรือ external phosphorus requirement นั้น มีข้อสมมุติฐานและหลักฐานจากการทดลองต่างๆ ค่อนข้างหลากหลาย (Fox, 1981; Fox and Kamprath, 1970) โดยทั่วไปจะถือว่า external P requirement ของพืชจะค่อนข้างคงที่ขึ้นกับชนิดของพืชที่ปลูก และไม่ขึ้นกับประเภทของดินที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 9) อย่างไรก็ตาม Fox และคณะ (1974) พบว่าระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชในดินแต่ละดินจะ

แตกต่างกัน และจะสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของดิน (Rajan, 1975) และเนื้อดิน โดยดินเนื้อปานกลางมีความต้องการ P ต่ำกว่าดินเนื้อละเอียด (Memon and Fox, 1983)

ตารางที่ 9 Internal (critical plant P %) และ External P requirement ของพืชในระดับผลผลิต 80-95% ของผลผลิตสูงสุด

Crop	Plant P (%)	Soil-solution (mg L^{-1})	Reference
Cabbage	0.40-0.80	0.02-0.04	Hue และคณะ (2000)
Corn	-	0.30	Fox และ Kamprath (1970)
	0.29	0.32	Hassan และคณะ (1993)
	0.30-0.50	0.30-0.50	Hue และคณะ (2000)
Head lettuce	0.40-1.00	0.20-0.40	Hue และคณะ (2000)
Macadamia	0.08-0.10	0.02-0.40	Hue และคณะ (2000)
Millet in pots	-	0.30	Singh และคณะ (1971)
Potatoes	-	0.20	Vander Zaag (1979)
Soybean	0.25-0.50	0.10-0.20	Hue และคณะ (2000)
	-	0.20	Fox และ Kamprath (1970)
Sugarcane	0.18-0.30	0.02-0.04	Hue และคณะ (2000)
Sunflower	0.39	0.32	Hassan และคณะ (1993)
Tomato	0.40-1.00	0.10-0.20	Hue และคณะ (2000)

นอกจากนี้ ปริมาณความต้องการปุ๋ย และระดับ external P requirement ยังสามารถประเมินจากความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ของดิน ดังนี้

$$- P_{ext.P\ requi.} = 0.71\ (P\ sorbed) + 4.2 \quad (13)$$

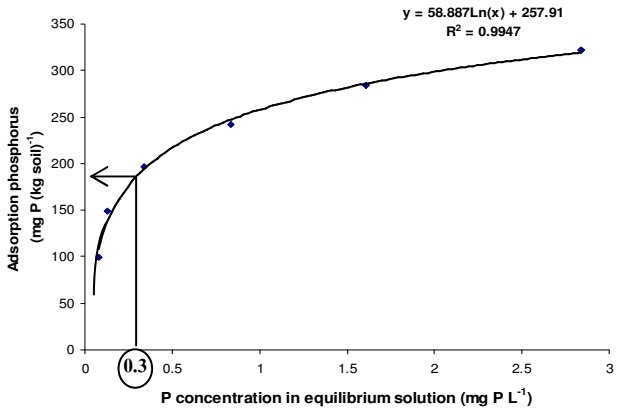
(Qzanne and Shaw, 1967)

$$- P_{sorbed\ 0.02} = 18.2 + 4.0(Fe_{di}) + 209(Al_{ox}) - 0.61(P_{ext}) - 23.8(C) + 67(Fe_{ox}) \quad (14)$$

$$- P_{sorbed\ 0.2} = -15.3 + 805(Al_{ox}) + 8.0(Fe_{di}) - 1.04(P_{ext}) - 44.0(C) + 138(Fe_{ox}) \quad (15)$$

(Toreu *et al*., 1988)

ขั้นตอนในการประเมินปริมาณความต้องการปุ๋ยจาก external P requirement สามารถหาได้จากกราฟของ phosphorus sorption isotherm โดยตรง ซึ่งเท่ากับปริมาณ P ที่ถูกดูดซับในดินเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นสมดุลในสารละลายเท่ากับระดับ external P requirement ของพืชที่กำหนด (เช่น ข้าวโพด = 0.3 mg P L^{-1}; Fox and Kamprath, 1970) (รูปที่ 9)



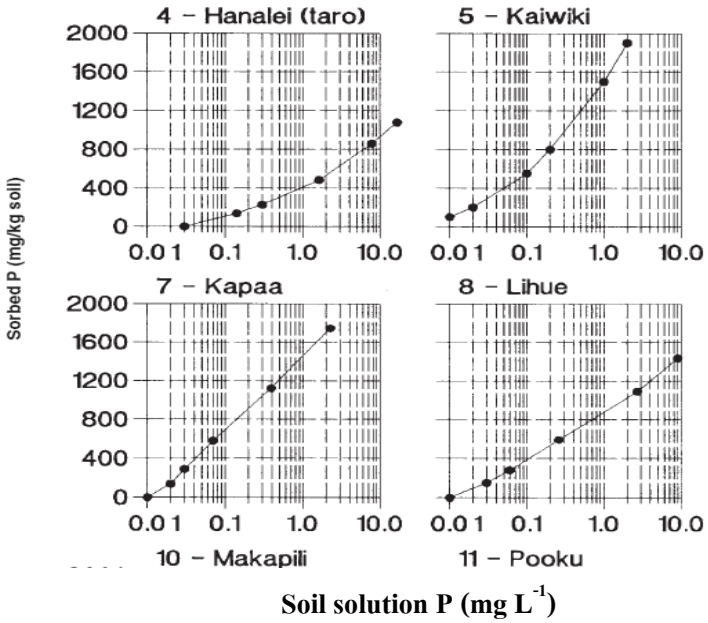
รูปที่ 9 P sorption isotherm และ external P requirement ของชุดดินโชคชัย
ที่มา : ดัดแปลงจาก ทวีทรัพย์ (2548)

Beckwith (1964) อ้างโดย ปัทมา (2533) ได้กำหนดให้ค่า External P requirement ของพืช สำหรับดินกรดเขตร้อนที่พืชส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้สูงสุด เท่ากับ 0.2 mg P L^{-1} เช่น ถั่วเหลือง ในกรณีของข้าวโพดความเข้มข้นจะเป็น 0.3 mg P L^{-1} (Fox and Kamprath, 1970) เพิ่มพูน และ อุษา (2548) ได้ทดสอบปริมาณความต้องการ P ณ ความเข้มข้นสารละลาย 0.2 mg P L^{-1} สำหรับถั่วเหลืองที่ปลูกในดินชุดยโสธร และภูผาม่าน โดยการทดลองในกระถางประกอบด้วยสิ่งทดลองที่มีการใส่ปุ๋ย P ที่ระดับ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 เท่าของ external P requirement ดังกล่าว พบว่า ถั่วเหลืองที่ปลูกในชุดดินยโสธร และชุดดินภูผาม่านให้ผลผลิตสูงสุดที่ 4 และ 0.5 เท่าของระดับ external P requirement ของดินดังกล่าว และ ทวีทรัพย์ (2548) ได้ทำการทดสอบในทำนองเดียวกันในดินชุดโชคชัย และยโสธร พบว่าระดับผลผลิตสูงสุดจะมีความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลาย ที่ 0.4 mg P L^{-1} สาเหตุความไม่สอดคล้องกันดังกล่าว อาจจะเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณความต้องการ P ของพืชในดินต่างๆ ได้แก่ความจุการดูดซับ P ของดิน พื้นที่หน้าตัดสำหรับการแพร่ของ P ไปสู่ราก ปัจจัยด้านดินที่มีผลต่อการเจริญของราก โดยเฉพาะกับรากฝอย

และการอยู่รวมกับ mycorrhizal, การย่อยสลายของอินทรีย์ P ชนิดและปริมาณเกลือในดิน อุณหภูมิ และการละลายได้ของ P ส่วนที่เป็นของแข็ง เป็นต้น (Peaslee and Fox, 1978) ตัวชี้วัดความเป็นประโยชน์ของ P จากระดับความเข้มข้นของ P ในสารละลายจะได้ผลเมื่อมีการจัดกลุ่มตามศักยภาพการดูดซับ P ของดิน และสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการปรับค่าปริมาณความต้องการปุ๋ยระหว่างดินต่างๆ ที่มีความจุในการดูดซับไม่เท่ากัน (Moody *et al*., 1988)

Hue และคณะ (2000) ได้เสนอแนวทางการประเมิน external P requirement ของพืช ร่วมกับปัจจัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ยที่ใส่ต่อการเพิ่มขึ้นของค่าวิเคราะห์ดิน หรือ buffer coefficient ในการคำนวณปริมาณปุ๋ยที่ต้องการ เพื่อยกระดับค่าวิเคราะห์ดินให้เหมาะสมสำหรับการให้ผลผลิตที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

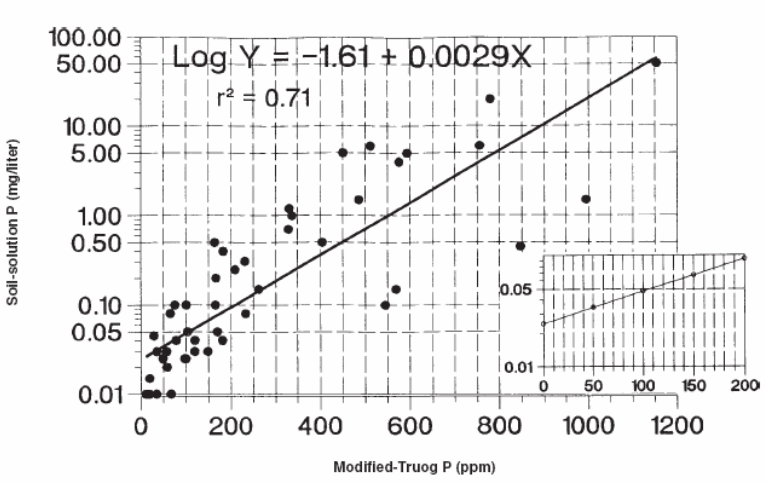
1) หาปริมาณ P ที่ต้องการ (ถูกดูดซับ) เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลายดินที่ 0.3 mg P L^{-1} (external P requirement ที่กำหนด) จากกราฟ P sorption isotherm (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล

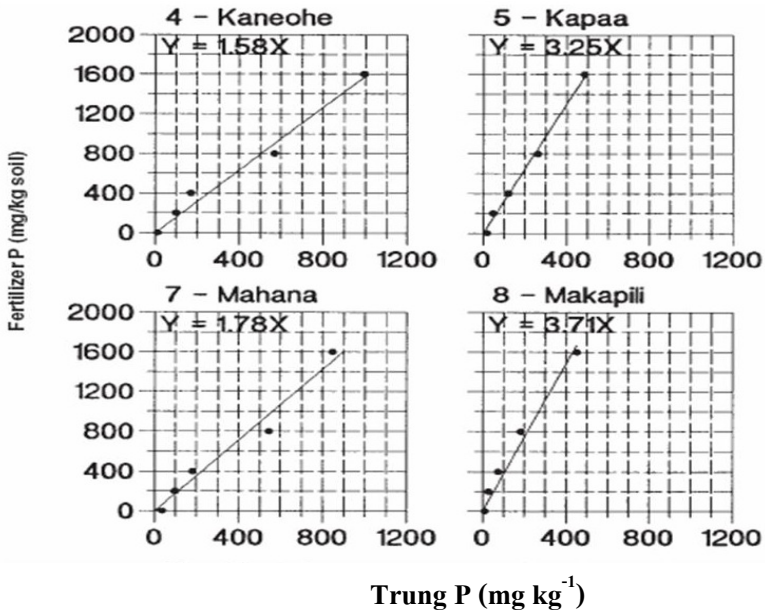
ที่มา : Hue และคณะ (2000)

2) หาระดับค่าวิเคราะห์ดินที่ต้องการ เมื่อมีการใส่ปริมาณ P ในปริมาณดังกล่าว (ขั้นตอนที่ 1) ที่ความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลายดินที่ 0.3 mg P L^{-1} (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดิน
ที่มา : Hue และคณะ (2000)

3) นำความแตกต่างของค่าวิเคราะห์ดินที่ได้ ไปหาปริมาณความต้องการปุ๋ยที่ใส่ในแต่ละชุดดิน (รูปที่ 12)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน
ที่มา : Hue และคณะ (2000)

จากแนวทางการประยุกต์ใช้ข้อมูล P sorption isotherm, BC และความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง น่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงการแนะนำปุ๋ย P ให้เหมาะสมกับพืชที่ปลูกในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ได้

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.1 ศึกษาลักษณะการดูดซับ P และปัจจัยที่เกี่ยวข้องของดินกรดที่ดอนที่สำคัญ ในภาคใต้ โดยใช้แบบจำลองต่างๆ

3.2 เพื่อศึกษาแนวทางการใช้ External และ Internal phosphorus requirement สำหรับข้าวโพดในดินกรดที่ดอนบางชุดดินของภาคใต้

3.3 เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงการประเมินปริมาณความต้องการปุ๋ย P สำหรับดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์การวิจัย

1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในภาคสนาม

- แผนที่ชุดดิน (มาตราส่วน 1:50,000)
- แผนที่ภูมิประเทศ (มาตราส่วน 1:50,000)
- เครื่องวัดพิกัดภูมิศาสตร์ (GPS)
- pH testkit
- อุปกรณ์ในการขุดดิน เช่น จอบ พลั่วตักดิน
- เทปวัดความลึก
- ถุงพลาสติกสีดำ
- กระสอบใส่ตัวอย่างดิน
- ผ้าพลาสติกขนาด 2 x 3 เมตร

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์ดินและพืช
- กระป๋องพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างดิน
- ตะแกรงร่อนดิน
- กระดาษกรอง
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ดินและพืช
- ตู้อบตัวอย่างพืช (hot air oven)
- เครื่องเขย่า (table rotary shaker)
- เครื่องเขย่า (end over end shaker)
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (conductivity meter)

- เครื่องกลั่นไนโตรเจน (nitrogen distillation apparatus)
- เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Visible spectrophotometer)
- เครื่องเฟลมโฟโทมิเตอร์ (Flame Photometer)
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)
- เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม
- เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 กรัม
- เครื่องบดตัวอย่างพืช (digestion block)
- ถุงกระดาษสำหรับอบตัวอย่างพืช
- วัสดุสำนักงาน

1.3 ชุดดินที่ใช้ทำการทดลอง

ชุดดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกจากพื้นที่ที่เป็นดินกรด จำนวน 17 ชุดดิน โดยสถานที่เก็บตัวอย่างดินแต่ละชุดดินมีดังนี้

1) ชุดดินอ่าวลึก (Ak : Very-fine, kaolinitic, isohyperthermic, Rhodic Kandiudoxs) บริเวณสวนยางพารา โรงเรียนบ้านช่องหาร ตำบลช่องหาร อำเภอวังวิเศษ จังหวัดตรัง

2) ชุดดินชุมพร (Cp : Clayey-skeletal, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Paleudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านพร้าว ตำบลทุ่งลาน อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา

3) ชุดดินฝั่งแดง (Fd : Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Rhodic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านบนควน ตำบลทุ่งค่าย อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง

4) ชุดดินหาดใหญ่ (Hy : Clayey-skeletal, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Paleudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านควนตีน ตำบลทุ่งหมอ อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา

5) ชุดดินกระบี่ (Kbi : Fine, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านหยงสตาร์ ตำบลท่าข้าม อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

6) ชุดดินคอหงษ์ (Kh : Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านไร่ ตำบลบ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

7) ชุดดินเขาขาด (Kkt : Clayey-skeletal, kaolinitic, isohyperthermic, Typic (Kandic) Plinthudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านสามแยก ตำบลท่าข้าม อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

8) ชุดดินคลองเต็ง (Klt : Fine-loamy, mixed, semiactive, shallow, isohyperthermic, Typic Haplohumults) บริเวณสวนยางพารา บ้านทุ่งรวงทอง ตำบลท่าข้าม อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

9) ชุดดินคลองท่อม (Km : Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านโป๊ะหมอ ตำบลบ้านพรุ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

10) ชุดดินคลองนกกระทุง (Knk : Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านคลองหวะ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

11) ชุดดินลำภูรา (Ll : Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic, Typic Palehumults) บริเวณสวนยางพารา บ้านหนองยายแม็ม ตำบลบ้านนา อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

12) ชุดดินนาท่าม (Ntm : Fine-loamy, mixed, semiactive, isohyperthermic, Typic (Aquic) Plinthudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านนาโต๊ะเสี้ย ตำบลบ้านนา อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง

13) ชุดดินภูเก็ต (Pk : Fine, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านโคกทัง ตำบลพิจิตร อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา

14) ชุดดินรือเสาะ (Ro : Fine-silty, mixed, semiactive, isohyperthermic, Typic Palehumults) บริเวณสวนลองกอง บ้านเหนือคลอง ตำบลทุ่งหมอ อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา

15) ชุดดินท่าแซะ (Te : Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านบกหัก ตำบลหาดสำราญ อำเภอหาดสำราญ จังหวัดตรัง

16) ชุดดินทุ่งหว้า (Tg : Coarse-loamy, siliceous, subactive, isohyperthermic, Typic Paleudults) บริเวณสวนยางพารา บ้านทุ่งงาย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

17) ชุดดินยะลา (Ya : Clayey-skeletal, kaolinitic, isohyperthermic, Typic Kandiudults) บริเวณสวนยางพารา ถนนวังปริง ตำบลพังลา อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา

หมายเหตุ : ชุดดินและหน่วยอนุกรมวิธานดิน (วงศ์ดิน) ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน (2551)

ซึ่งชุดดินทั้งหมดนี้ เป็นชุดดินที่มีปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำ

1.4 ธาตุอาหารพืช

1.4.1 ปุ๋ยฟอสฟอรัส

ปุ๋ยทริปเปิลซุปเปอร์ฟอสเฟต (45% avai.P_2O_5)

1.4.2 ธาตุอาหารพื้นฐาน (basal nutrient)

NH_4NO_3, KCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$ และ Na_2SO_4

1.5 พืชที่ใช้ทดลอง

เมล็ดข้าวโพดหวาน พันธุ์ซุปเปอร์สวีทอาร์โก้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างดินและการวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้น

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างชุดดินสำคัญๆ ในภาคใต้ (ข้อ1.3) ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ผึ่งดินในที่ร่มให้แห้ง เก็บเศษวัชพืชออก แล้วร่อนดินผ่านตะแกรงขนาดช่องตา 5 มิลลิเมตร แบ่งตัวอย่างดินส่วนหนึ่งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องตา 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ได้แก่ ความเป็นกรดด่าง (pH) การนำไฟฟ้า (EC) อินทรียวัตถุ (organic matter) ไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียมและอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K, Ca, Mg, Na และ Al) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และเนื้อดิน (soil texture) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของดิน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
pH (ดิน : น้ำ 1: 5)	pH Meter (จำเป็น, 2547)
EC (ดิน : น้ำ 1: 5)	Conductivity meter (จำเป็น, 2547)
Organic matter (g kg^{-1})	Walkley - Black method (จำเป็น, 2547)
Total N (g kg^{-1})	Kjeldahl method (จำเป็น, 2547)
Avail.P (mg kg^{-1})	Bray II method, Molybdenum blue method (จำเป็น, 2547)
Exch.Ca, Mg ($cmol_c$ kg^{-1})	NH_4OAc Ext., Atomic Absorption Spectrophotometer (จำเป็น, 2547)
Exch.K, Na ($cmol_c$ kg^{-1})	NH_4OAc Ext., Flame Photometer (จำเป็น, 2547)
Exch.Al ($cmol_c$ kg^{-1})	KCl Ext., titration (จำเป็น, 2547)
Fe_2O_3 (g kg^{-1})	conc. Nitric acid วิธี ICP-OES, X-Ray Fluorescence spectrometry
Soil texture	Hydrometer method (คณาจารย์ภาควิชาธรณีศาสตร์, 2546)

2.2 การหา phosphorus sorption isotherm ของชุดดินกรดที่สำคัญๆ ในภาคใต้

วิธีการหา phosphorus sorption isotherm (Rayment และ Higginson, 1992) ชั่งดิน 4 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 0.01 M $CaCl_2$ 40 mL (ดินต่อสารละลาย 1:10) เติม P ในรูปของ KH_2PO_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในช่วง 0-30 mg P L^{-1} (อัตรา 0, 2.5, 5, 10, 15, 20 และ 30 mg P L^{-1}) เติมคลอโรฟอร์ม 0.25% (0.1 mL) เพื่อยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปเขย่าด้วยเครื่อง end-over-end ที่ความเร็วประมาณ 15-30 รอบต่อนาที (rpm) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาถึงจุดสมดุล แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2500 rpm นำสารละลายที่ได้มากรองผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 5 นำสารละลายส่วนที่ใสมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ P โดยวิธีทำให้เกิดสีของ Murphy และ Riley (1962) แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 820 nm

คำนวณปริมาณการดูดซับ P ของดิน (mg P kg^{-1}) จากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของ P แรกที่ใส่ (mg P kg^{-1}) และความเข้มข้นของ P ที่เหลือที่วัดได้ในสารละลายที่จุดสมดุล (equilibrium solution) (mg P L^{-1}) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ (mg P kg^{-1}) และความเข้มข้นของ P ที่เหลือที่วัดได้ในสารละลายที่จุดสมดุล (mg P L^{-1}) หรือ phosphorus sorption isotherm

นำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบความเหมาะสมของการอธิบายลักษณะการดูดซับด้วยสมการ Langmuir และ Freundlich

2.2.1 การหา external P requirement ของข้าวโพด

คำนวณหาปริมาณการดูดซับ P ของดินที่ระดับความเข้มข้นสมดุลในสารละลายที่ 0.3 mg P L^{-1} หรือ (external P requirement) ของข้าวโพดที่ปลูกในชุดดินต่างๆ (Fox and Kamprath, 1970)

2.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณฟอสฟอรัสที่ใส่

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ และปริมาณ P ที่ใส่ในชุดดินต่างๆ 5 ชุดดิน ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก คลองเต็ง ชุมพร ภูเก็ต และคอหงษ์ นำดินดังกล่าวมาบ่มด้วยสารละลาย P ในรูปของ KH_2PO_4 ที่ความเข้มข้นอัตรา 0, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 mg P L^{-1} (0, 9.75, 19.50, 48.75, 97.50, 146.25 และ 195 kg P ha^{-1}) ในอัตราส่วนดิน:สารละลาย เท่ากับ 1:1

(ดิน 20 g : จำนวน 20 ml) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์โดยวิธี Bray II

2.4 การหา Phosphorus sorption isotherm ของดิน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2 แต่เติม P ในรูปของ KH_2PO_4 ที่ความเข้มข้นอัตรา 0, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10 mg P L^{-1} นำไปหาความเข้มข้นของ P ในสารละลายดิน

- หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) และความเข้มข้นของ P ในสารละลายดินในชุดดินอ่าวลึก คลองเต็ง ชุมพร ภูเก็ต และคอหงษ์

โดยการนำค่าความเข้มข้นของ P ในสารละลายดินจากกราฟของ phosphorus sorption isotherm (การทดลองที่ 2.4) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ดิน Bray II และปริมาณ P ที่ใส่ (การทดลองที่ 2.3 - Lab incubation) มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลายดิน และค่าวิเคราะห์ดิน (Bray II) ในชุดดินอ่าวลึก คลองเต็ง ชุมพร ภูเก็ต และคอหงษ์ เพื่อใช้ในคาดคะเนความต้องการปุ๋ย P ในแต่ละชุดดินต่อไป

2.5 ทดสอบการตอบสนองของพืชในกระถาง

การทดสอบปลูกพืชในกระถาง โดยคัดเลือกชุดดินที่มีศักยภาพการดูดซับ P แตกต่างกัน 3 ระดับที่ ระดับสูง ปานกลาง และต่ำ ระดับละ 1 ชุดดิน

นำตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องตา 5 มิลลิเมตร ชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงส์ จำนวน 5 กิโลกรัม บ่มด้วยปุ๋ย P ตามอัตราที่กำหนด (ตารางที่ 11) จำนวน 4 ซ้ำ คลุกเคล้าให้เข้ากัน บ่มดินเป็นเวลา 1 สัปดาห์ รดน้ำให้ดินมีระดับความจุความชื้นสนาม (field capacity) หรือไม่ให้ดินแห้งหรือเปียกจนเกินไป และใส่ธาตุอาหารพื้นฐานต่างๆ (ชัยรัตน์ และคณะ , 2538) (รายละเอียดดูในตารางที่ 12) ประมาณ 3-4 วันก่อนปลูกข้าวโพด ทำการปลูกข้าวโพดในเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ โดยหยอดเมล็ดข้าวโพดลงไปในกระถางทดลองกระถางละ 3-4 เมล็ด เมื่อเมล็ดงอกถอนแยกเหลือต้นที่แข็งแรงไว้กระถางละ 1 ต้น หลังจากนั้นดูแลใส่ธาตุอาหารที่เหลืออีกครั้ง เมื่อพืชเจริญเติบโตเป็นเวลา 25 วัน เก็บตัวอย่างพืชไปทำการวิเคราะห์ต่อไป (Moody *et al*., 1988)

นอกจากนี้ ยังได้ทำการเก็บดินจากกระถางปลูกพืชสำรองเพื่อเก็บตัวอย่างในช่วงหลังการบ่มดินในการทดลองปลูกพืชในกระถาง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ P ที่เป็นประโยชน์ (Bray II) ก่อนการปลูกข้าวโพด

ตารางที่ 11 ปริมาณปุ๋ยที่ใส่เฉพาะเจาะจงในแต่ละชุดดิน

ศักยภาพการดูดซับฟอสฟอรัส / ชุดดินที่คัดเลือก	ระดับสูง / ชุดดินอ่าวลึก(Ak)	ระดับปานกลาง / ชุดดินชุมพร(Cp)	ระดับต่ำ / ชุดดินคอหงษ์(Kh)
ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่ (mg P kg^{-1})	95	53	31
ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่ (kg P rai^{-1})*	30	17	10

* คำนวณจากดิน 1 ไร่ หนัก = 312,000 กิโลกรัม ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร

2.5.1 การจัดสิ่งทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ทั้งหมด 21 สิ่งทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย ปุ๋ย P ในอัตรา 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 เท่าของ external P requirement ของดินแต่ละชนิดที่ได้คาดคะเนไว้ในตารางที่ 11 ดังนี้

สิ่งทดลองที่ 1 = ชุดดินดั่งเดิม
สิ่งทดลองที่ 2 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 0 (ควบคุม)
สิ่งทดลองที่ 3 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 0.25 เท่า
สิ่งทดลองที่ 4 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 0.5 เท่า
สิ่งทดลองที่ 5 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 1 เท่า
สิ่งทดลองที่ 6 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 2 เท่า
สิ่งทดลองที่ 7 = ชุดดิน + ปริมาณปุ๋ย P อัตรา 4 เท่า

หมายเหตุ

- ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใช้ คือ ปุ๋ยทริปเปิลซุปเปอร์ฟอสเฟต (45% avai.P_2O_5; วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-OES) บดเป็นผงละเอียด คลุกเคล้ากับดินให้เข้ากัน
- รายละเอียดวิธีการใส่ปุ๋ย และธาตุอาหารพื้นฐานที่จำเป็น

ปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้คำนวณปริมาณสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ทั้งหมด แล้วนำไปละลายน้ำโดยให้มีเนื้อสารที่ใช้ในแต่ละกระถางเท่ากับ 10 มิลลิลิตร โดยสารแต่ละชนิด N, K, Ca, Mg และ S เตรียมเป็นสารละลายแยก แล้วดูดใช้อย่างละ 10 มิลลิลิตร ยกเว้น N ใช้ครั้งละ 5 มิลลิลิตร คลุกเคล้ากับดินให้เข้ากันทุกกระถาง ส่วน N ส่วนที่เหลือให้ใส่เมื่อข้าวโพดอายุ 15 วัน

ตารางที่ 12 ธาตุอาหารพื้นฐานและอัตราที่ใช้เพื่อปรับความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ธาตุอาหาร	รูปธาตุอาหาร	ปริมาณการใช้	
		กิโลกรัม/เฮกตาร์	กรัม/กระถาง
N*	NH_4NO_3	400	1.026
K	KCl	200	0.513
Ca	$CaCl_2$	40	0.103
Mg	$MgCl_2$	6	0.015
S	Na_2SO_4	4	0.010

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชัยรัตน์ และคณะ (2538)

* ธาตุ N ให้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เหลือให้ใส่อีกครั้งเมื่อข้าวโพดอายุ 15 วัน

2.6 การเก็บข้อมูลหลังปลูกข้าวโพด

2.6.1 การบันทึกข้อมูล

เมื่อข้าวโพดอายุ 25 วันหลังงอก ตัดต้นข้าวโพด บันทึกน้ำหนักสดของต้นข้าวโพด และนำตัวอย่างข้าวโพดที่ได้อบที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักแห้งคงที่ บันทึกน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพด แล้วคำนวณหาค่าผลผลิตสัมพัทธ์ (relative yield)

$$\% \text{ Relative Yield} = (DM / DM_{max}) \times 100$$

โดยที่ DM = น้ำหนักแห้งของข้าวโพดในแต่ละสิ่งทดลอง

DM_{max} = น้ำหนักแห้งของข้าวโพดในสิ่งทดลองที่มีค่าสูงสุด

2.6.2 การวิเคราะห์พืช

ตัวอย่างพืชข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส นำมาบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียด นำตัวอย่างพืชที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณ P ทั้งหมด โดยวิธีการย่อยตัวอย่างพืชด้วยกรดผสมไนตริกและเพอร์คลอริก (3:1; v/v) ทำการวิเคราะห์ปริมาณ P ทั้งหมดด้วยวิธี Yellow molybdovanadophosphoric acid (จำเป็น, 2547)

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลสมบัติดินทางเคมีและกายภาพของดินที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ P มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณ P ที่ถูกดูดซับสูงสุด (x_m) ที่คำนวณได้จากสมการ Langmuir ด้วยวิธี Stepwise regression analysis

และนำข้อมูลผลผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละสิ่งทดลองตามวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สมบัติเบื้องต้นของดินกรดที่ดอนที่สำคัญในภาคใต้

จากการศึกษาสมบัติดินกรดที่ดอนที่สำคัญๆ พบว่า ดินมี pH เป็นกรดในระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ย 5.19) มีข้อจำกัดด้านความอุดมสมบูรณ์ โดยเฉพาะธาตุ N และ P โดยมีค่าเฉลี่ยของ N ทั้งหมดและ P ที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 0.90 g kg^{-1} และ 6.35 mg P kg^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและแคตไอออนที่เป็นด่าง (exch.Ca, Mg และ Na) อยู่ในระดับต่ำ ส่วนอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้และปริมาณเหล็กออกไซด์ อยู่ในระดับสูง โดยมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่า pH (1:5) 5.19±0.37, ค่า EC 0.05±0.04 dS m^{-1} OM 16.20±6.00 g kg^{-1}, total N 0.90±0.33 g kg^{-1}, avail. P 6.35±2.89 mg P kg^{-1}, avail. K 54.76±22.60 mg kg^{-1}, clay 27.69±11.08 %, C.E.C 3.57±2.33 $cmol_c$ kg^{-1}, Exch.Na, Al และ Mg 0.05±0.01, 1.13±0.66 และ 0.62±0.84 $cmol_c$ kg^{-1} ตามลำดับ และ Fe oxides 3.90±1.80 g kg^{-1} (ตารางที่ 13)

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของชุดดินต่างๆที่จัดทำขึ้นโดย สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2550) พบว่า ค่าเฉลี่ยของสมบัติดินทั้ง 17 ชุดดิน มีค่า pH ดินเป็นกรด (4.98), ค่า EC 0.08 dS m^{-1}, avail. P 3.53 mg P kg^{-1}, avail.K 70.54 mg kg^{-1}, OM 24.70 g kg^{-1} total N 1.30 g kg^{-1}, exch. Mg 0.48 $cmol_c$ kg^{-1} และ C.E.C 6.70 $cmol_c$ kg^{-1} ซึ่งค่าเฉลี่ยของสมบัติดินต่างๆ ดังกล่าวมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของดินที่ได้จากการศึกษา (ตารางที่ 13) และเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานความอุดมสมบูรณ์ของดิน (เอิบ 2544) พบว่า ดินมีระดับ pH เป็นกรดปานกลาง และ avail.P และ C.E.C อยู่ในระดับต่ำ (ตารางที่ 2) คือ 10-15 mg P kg^{-1} และ 10-15 $cmol_c$ kg^{-1} ตามลำดับ ส่วน avail.K และ OM อยู่ในระดับเกณฑ์ปานกลาง คือ 60-90 mg kg^{-1} และ 15.0-25.0 g kg^{-1} ตามลำดับ โดยสรุป ดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ส่วนใหญ่มีระดับ avail. P ต่ำและความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของชุดดินต่างๆทางภาคใต้ของประเทศไทย

Soil series	Texture	pH (1:5 H_2O)	EC ($dS\ m^{-1}$)	Avai.P ($mg\ P\ kg^{-1}$)	OM ($g\ kg^{-1}$)	Total N ($g\ kg^{-1}$)	Avai.K ($mg\ kg^{-1}$)	Exch.Ca ($cmol_c\ kg^{-1}$)	Exch.Mg ($cmol_c\ kg^{-1}$)	C.E.C. ($cmol_c\ kg^{-1}$)
1. Ak	Clay	5.00(5.98)	0.07(0.08)	3.41(4.35)	15.50(46.70)	0.86(2.30)	52.56(348.60)	0.23(6.37)	0.56(1.82)	5.28(17.99)
2. Kbi	Clay	4.94(5.51)	0.03(0.09)	3.63(4.91)	21.50(22.40)	1.21(1.10)	60.60(39.32)	0.91(3.22)	0.68(2.16)	9.08(5.44)
	ค่าเฉลี่ย	4.97(5.75)	0.05(0.09)	3.52(4.63)	18.50(34.50)	1.04(1.70)	56.58(193.96)	0.57(4.80)	0.63(1.99)	7.18(11.72)
3. Ll	Sandy clay	5.04(4.86)	0.02(0.12)	5.55(3.34)	18.30(40.20)	1.23(2.50)	71.64(169.12)	1.17(0.95)	0.42(0.81)	7.45(11.78)
4. Knk	Clay loam	6.26(4.25)	0.17(0.34)	4.36(3.68)	27.80(20.20)	1.48(1.00)	111.70(61.64)	5.82(0.43)	0.94(0.17)	5.59(3.84)
5. Kkt	Clay loam	5.23(5.15)	0.03(0.11)	12.69(1.44)	19.90(25.20)	1.24(1.30)	52.11(69.44)	1.06(1.07)	0.86(0.52)	4.28(6.85)
6. Hy	Clay loam	5.25(4.88)	0.04(0.01)	6.98(5.72)	13.00(28.80)	0.80(1.40)	55.23(58.60)	0.45(0.44)	0.52(0.49)	2.50(9.90)
7. Ro	Clay loam	5.90(4.98)	0.09(0.08)	4.52(2.28)	16.60(45.70)	1.23(2.80)	94.96(106.72)	3.17(0.50)	3.69(0.50)	4.99(10.62)
	ค่าเฉลี่ย	5.66(4.82)	0.08(0.14)	7.14(3.28)	19.30(30.00)	1.00(1.60)	78.5(74.1)	2.63(0.61)	1.57(0.42)	4.34(7.8)
8. Tg	Sandy clay loam	5.10(4.42)	0.05(0.02)	10.55(7.22)	24.40(11.20)	1.11(0.60)	67.12(47.48)	0.28(0.19)	0.63(0.04)	3.72(2.73)
9. Te	Sandy clay loam	5.07(4.75)	0.02(0.01)	9.20(2.30)	14.70(12.20)	0.79(0.70)	35.33(30.28)	1.21(0.37)	0.10(0.27)	2.41(4.59)
10. Fd	Sandy clay loam	5.00(5.44)	0.02(0.18)	7.24(2.74)	18.10(16.20)	0.90(0.80)	39.28(51.08)	0.29(0.28)	0.08(0.21)	2.61(4.20)
11. Pk	Sandy clay loam	5.33(4.45)	0.03(0.01)	2.94(4.03)	8.70(15.70)	0.59(0.80)	42.37(17.44)	1.47(0.32)	0.16(0.11)	2.41(4.10)
	ค่าเฉลี่ย	5.13(4.76)	0.03(0.06)	7.48(4.07)	16.50(13.80)	0.85(0.70)	46.03(36.57)	0.81(0.29)	0.24(0.16)	2.79(3.91)
12. Ntm	Loam	5.17(4.93)	0.03(0.04)	4.20(2.30)	15.20(42.40)	0.70(2.60)	43.03(38.12)	0.20(0.65)	0.56(0.41)	2.91(6.53)
13. Klt	Loam	4.96(5.58)	0.04(0.03)	7.80(2.08)	23.80(31.40)	1.19(1.60)	67.57(94.48)	0.12(0.18)	0.67(0.20)	3.33(10.60)
	ค่าเฉลี่ย	5.07(5.26)	0.04(0.04)	6.00(2.19)	19.50(36.90)	0.95(2.10)	55.3(66.3)	0.16(0.42)	0.62(0.31)	3.12(8.57)
14. Ya	Sandy loam	5.22(4.94)	0.03(0.12)	5.71(8.47)	11.20(31.40)	0.62(1.60)	32.70(47.32)	0.41(0.35)	0.23(0.15)	1.06(5.65)
15. Cp	Sandy loam	4.83(5.20)	0.03(0.20)	5.29(2.34)	11.00(16.00)	0.50(0.80)	38.65(76.80)	0.18(0.87)	0.15(0.29)	1.55(4.68)
16. Km	Sandy loam	4.96(4.70)	0.02(0.07)	3.60(1.10)	8.00(13.30)	0.39(0.30)	27.25(16.72)	0.10(0.35)	0.05(0.25)	0.70(2.01)
17. Kh	Sandy loam	4.94(4.88)	0.05(0.02)	10.23(1.75)	7.90(15.90)	0.45(0.80)	38.84(16.92)	0.21(0.10)	0.18(0.07)	0.80(3.38)
	ค่าเฉลี่ย	4.99(4.93)	0.03(0.10)	6.21(3.42)	9.50(19.20)	0.49(0.90)	34.36(39.44)	0.23(0.42)	0.15(0.19)	1.03(8.45)

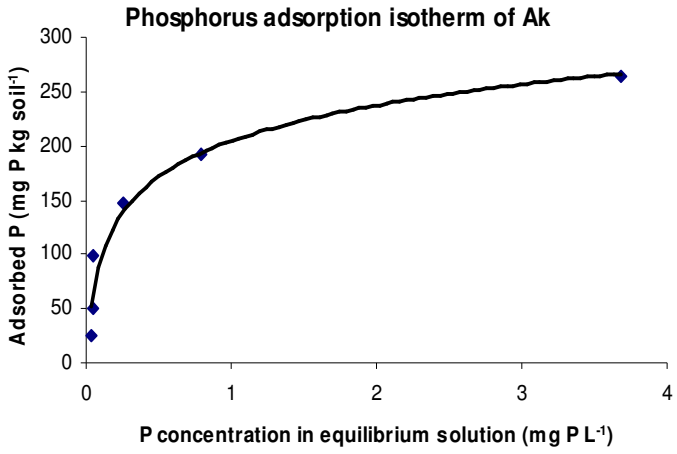
หมายเหตุ ค่าใน ( ) อ้างอิงมาจาก สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2550)

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของชุดดินต่างๆทางภาคใต้ของประเทศไทย (ต่อ)

Soil series	Exch.Na ($cmol_c\ kg^{-1}$)	Exch.Al ($cmol_c\ kg^{-1}$)	Clay (%)	$Fe_2O_{3(Ni)}$ ($g\ kg^{-1}$)
1. Ak	0.07	0.94	41.66	4.1
2. Kbi	0.06	1.94	49.36	8.9
ค่าเฉลี่ย	0.07	1.44	45.51	6.5
3. Ll	0.05	2.29	47.77	7.5
4. Knk	0.07	0.17	38.46	3.8
5. Kkt	0.05	0.90	30.60	3.9
6. Hy	0.04	1.02	26.14	2.7
7. Ro	0.07	0.14	29.63	2.2
ค่าเฉลี่ย	0.06	0.56	31.21	3.2
8. Tg	0.06	1.41	29.18	3.4
9. Te	0.04	1.59	27.85	3.5
10. Fd	0.03	1.63	25.84	4.9
11. Pk	0.04	0.47	22.09	2.9
ค่าเฉลี่ย	0.04	1.28	26.24	3.7
12. Ntm	0.04	1.88	17.25	4.1
13. Klt	0.06	1.84	21.69	3.3
ค่าเฉลี่ย	0.05	1.86	19.47	3.7
14. Ya	0.03	0.48	17.79	2.4
15. Cp	0.05	1.24	17.73	2.7
16. Km	0.04	0.64	15.55	2.5
17. Kh	0.04	0.59	12.20	2.8
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.73	15.83	2.6

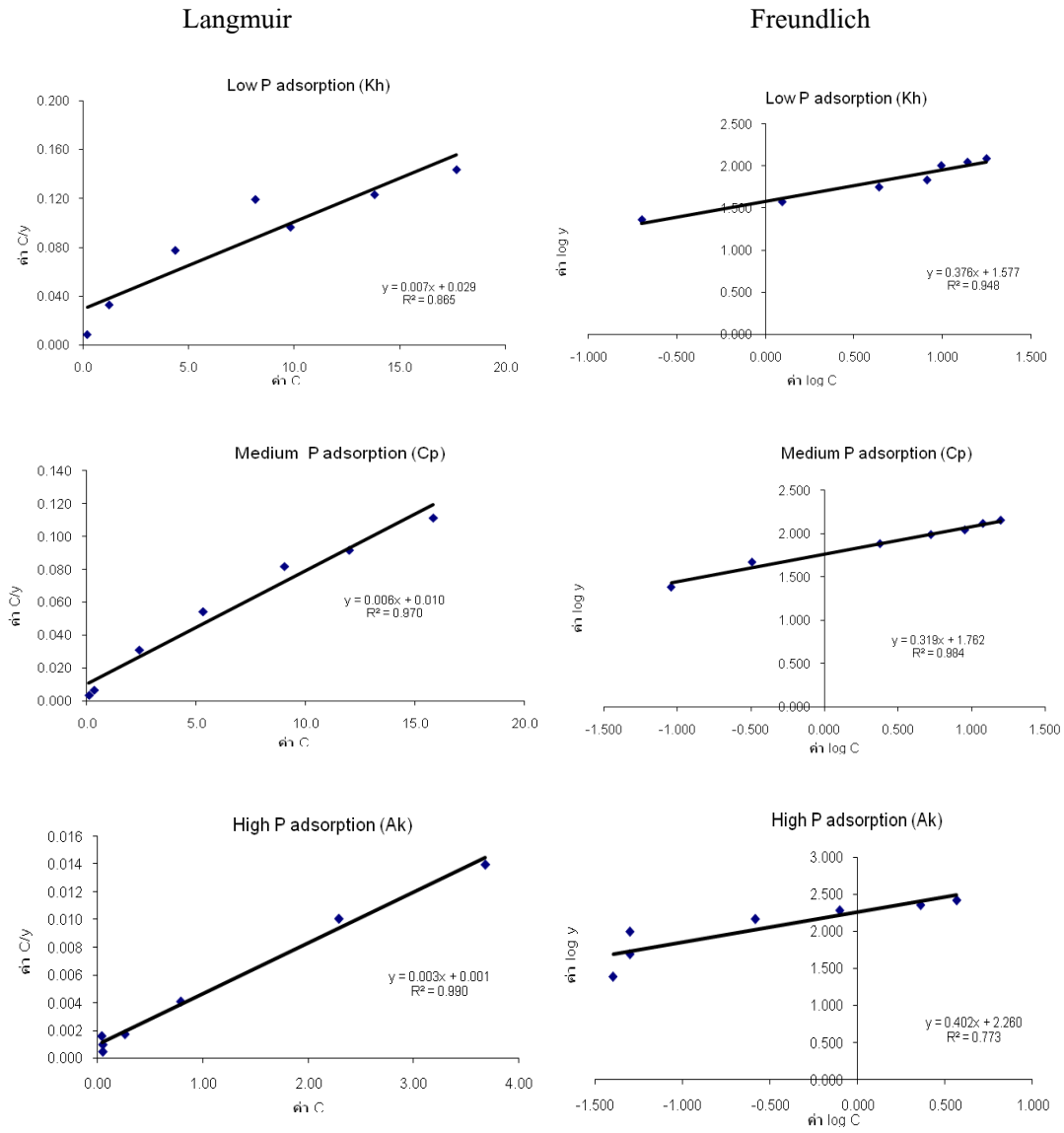
2. ลักษณะการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน

จากผลการวิเคราะห์การดูดซับ P ของชุดดินชุดสำคัญในภาคใต้ พบว่า รูปแบบการดูดซับ P ของดินจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่เพิ่มขึ้น จนถึงจุดๆหนึ่งการดูดซับ P จะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นอีก (รูปที่ 13)



รูปที่ 13 ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินอ่าวลึก

โดยที่ดินต่างชนิดกันมีปริมาณการดูดซับ P สูงสุดแตกต่างกันตามสมบัติของดินนั้นๆ ลักษณะการดูดซับ P ของดิน มีค่าสัมประสิทธิ์การการกำหนด (R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลายในสภาวะสมดุล (C) กับปริมาณการดูดซับ P (mg P kg^{-1}) (C/y) จากสมการ Langmuir และค่า R^2 ของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า log C และ log y (ค่า log ของปริมาณการดูดซับ P) จากสมการ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.85 ถึง 0.98 และ 0.77 ถึง 0.99 ตามลำดับ (รูปที่ 14) ซึ่งค่า R^2 ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 0.900 แสดงให้เห็นว่า สมการทั้ง 2 แบบ สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ P ในดินได้ จากสมการ Langmuir มีค่า $R^2 > 0.95$ ได้แก่ ชุดดิน Fd, Ak, Tg kkt, Te, Klt, Ntm, Knk, Pk, Cp และ Ro และ ค่า $R^2 < 0.89$ ได้แก่ ชุดดิน Kh และ Ya ส่วนในสมการ Freundlich ค่า $R^2 > 0.95$ ได้แก่ ชุดดิน Ll, Klt, Hy Knk, Pk, Cp, Km และ Ro และ ค่า $R^2 < 0.89$ ได้แก่ ชุดดิน Kbi, Fd และ Ak



รูปที่ 14 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในตัวอย่างที่ดูดซับ P ในระดับต่ำ (Kh) ปานกลาง (Cp) และสูง (Ak) ตามลำดับ

ปริมาณการดูดซับ P สูงสุด (x_m) ของดินจากสมการ Langmiur มีค่าตั้งแต่ 106.38 ถึง 526.32 mg P kg^{-1} และค่ามัธยฐาน (median) มีค่าเท่ากับ 188.68 mg P kg^{-1} ค่า Max. buffering capacity ($x_m a$) มีค่าตั้งแต่ 24 ถึง 3,332 mg P kg^{-1} มีค่ามัธยฐาน (median) เท่ากับ 436 mg P kg^{-1} ค่า Affinity coefficients (a) มีค่าตั้งแต่ 0.21 ถึง 13.00 มีค่ามัธยฐาน (median) เท่ากับ 1.96 และค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.852-0.997 (ตารางที่ 14) และค่าศักยภาพการดูดซับ P ของดิน (PBC) มีค่าตั้งแต่ 5.98-62.11 mg P kg^{-1} และค่า median มีค่าเท่ากับ 8.82 mg P kg^{-1}

ตารางที่ 14 ค่าตัวแปรจากสมการ Langmuir, และค่า phosphorus buffer capacity (PBC) ของชุดดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

Soil series	Texture	Langmuir model				
		Max. buffering Capacity ($x_m a$) (mg P kg^{-1})	Maximum sorption (x_m) (mg P kg^{-1})	Affinity coefficients (a)	Correlation coefficient (R^2)	PBC* (mg P kg^{-1})
Ll	S.C	3,332	526.32	6.33	0.903	39.34
Kbi	C	5,000	384.62	13.00	0.933	62.11
Fd	S.C.L	2,500	312.50	8.00	0.986	17.98
Ak	C	1,000	270.27	3.70	0.997	15.99
Tg	S.C.L	1,668	250.00	6.67	0.987	12.60
Kkt	C.L	715	250.00	2.86	0.987	11.71
Te	S.C.L	436	222.22	1.96	0.983	11.49
Knk	C.L	176	185.19	0.95	0.992	9.64
Ntm	L	475	188.68	2.52	0.996	8.82
Klt	L	476	200.00	2.38	0.970	8.18
Pk	S.C.L	169	156.25	1.08	0.982	7.13
Cp	S.L	99	150.00	0.66	0.986	6.96
Kh	S.L	34	140.85	0.24	0.971	6.92
Hy	C.L	264	172.41	1.53	0.866	6.91
Km	S.L	34	125.00	0.27	0.941	6.61
Ya	S.L	24	114.94	0.21	0.852	6.10
Ro	C.L	49	106.38	0.46	0.958	5.98
Range		24-5,000	106.38-526.32	0.21-13.00	0.852-0.997	5.98-62.11
Mean		967.53	220.62	3.11	0.960	14.38
Median		436	188.68	1.96	0.980	8.82

*PBC = (P adsorbed at 0.25 – 0.35 mg P L^{-1}, Ozanne and Shaw, 1967)

ส่วนค่าพลังงานในการดูดซับ P ของดิน (k) จากสมการ Freundlich มีค่าตั้งแต่ 30 ถึง 1,109 และค่า medium เท่ากับ 102 (ค่า log k = 1.46 ถึง 3.05) ค่า P sorption energy (*b*) มีค่าตั้งแต่ 30-1,109 L kg^{-1} มีค่ามัธยฐาน (median) เท่ากับ 0.36 และค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.773-0.987 (ตารางที่ 15) ปริมาณการดูดซับ P สูงสุดของชุดดินทั้ง 17 ชุดดินจากสมการ Langmuir เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ชุดดินลำภูรา (Ll) > กระบี่ (Kbi) > ฝั่งแดง (Fd) > อ่าวลึก (Ak) > ทุ่งหว้า (Tg) > เขาขาด (Kkt) > ท่าแซะ (Te) > คลองเต็ง (Klt) > นาท่าม (Ntm) > คลองนกกระทุง (Knk) > หาดใหญ่ (Hy) > ภูเก็ต (Pk) > ชุมพร (Cp) > คอหงษ์ (Kh) > คลองท่อม (Km) > ยะลา (Ya) และชุดดินรือเสาะ (Ro) ความสามารถในการดูดซับ P ของดินแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ระดับปฏิกิริยาดิน ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของดิน เช่น ปริมาณเหล็ก อะลูมินัม และแคลเซียม เป็นต้น (Zu *et al*., 1997; อมรา, 2550) นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่จัดจำแนกเป็นชุดดินเดียวกันแต่อยู่ในต่างพื้นที่ก็มีความสามารถในการดูดซับ P ได้แตกต่างกัน (เพิ่มพูน และคณะ, 2546; ทวีทรัพย์, 2548; อมรา, 2545)

เมื่อลำดับปริมาณการดูดซับ P สูงสุดออกเป็น กลุ่มที่มีการดูดซับ P ในระดับต่ำ ปานกลาง และ ระดับสูง (ตารางที่ 16) พบว่า

ชุดดินในกลุ่มที่ 1 มีการดูดซับ P ในระดับต่ำในสมการ Langmuir ประกอบด้วยชุดดิน Ro, Km, Kh และ Ya ส่วนสมการ Freundlich ประกอบด้วยชุดดิน Kh, Ro, Km และ Ya

ชุดดินในกลุ่มที่ 2 มีการดูดซับ P ในระดับปานกลางในสมการ Langmuir ประกอบด้วยชุดดิน Te, Knk, Ntm, Klt, Hy, Pk และ Cp ส่วนสมการ Freundlich ประกอบด้วยชุดดิน Kkt, Tg, Te, Klt, Pk, Ntm, Hy, Knk และ Cp

ชุดดินในกลุ่มที่ 3 มีการดูดซับ P ในระดับสูงในสมการ Langmuir ประกอบด้วยชุดดิน Ll, Kbi, Fd, Ak, Kkt และ Tg ส่วนสมการ Freundlich ประกอบด้วยชุดดิน Ll, Kbi, Fd และ Ak

และเมื่อจำแนกตามศักยภาพการดูดซับ (PBC) แบ่งออกเป็นระดับต่ำประกอบด้วยชุดดิน Pk, Cp, Kh, Hy, Km, Ya, และ Ro ระดับปานกลาง Knk, Ntm, Klt, Tg, Kkt และ Te และระดับสูง Ll, Kbi, Fd และ Ak

ตารางที่ 15 ค่าตัวแปรจากสมการ Freundlich ของชุดดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

Soil series	Texture	Freundlich model		
		Sorption capacity (k) (mg P kg^{-1})	P sorption energy (*b*) (L kg^{-1})	Correlation coefficient (R^2)
Ll	S.C	1,109	0.784	0.961
Kbi	C	762	0.623	0.889
Fd	S.C.L	298	0.441	0.774
Ak	C	182	0.402	0.773
Kkt	C.L	146	0.350	0.935
Tg	S.C.L	114	0.158	0.907
Te	S.C.L	113	0.357	0.930
Klt	L	109	0.291	0.982
Ntm	L	102	0.314	0.935
Hy	C.L	89	0.269	0.986
Knk	C.L	77	0.362	0.981
Pk	S.C.L	72	0.296	0.951
Cp	S.L	58	0.320	0.984
Kh	S.L	38	0.377	0.948
Ro	C.L	38	0.323	0.985
Km	S.L	35	0.380	0.987
Ya	S.L	30	0.368	0.945
Range		30-1,109	0.158-0.784	0.773-0.987
Mean		198	0.38	0.930
Median		102	0.36	0.950

ตารางที่ 16 การจัดกลุ่มการดูดซับ P ในดินกรดที่ดอนทางภาคใต้ของประเทศไทย

P sorption	Langmuir equation	Freundlich equation	PBC
High	Ll, Kbi, Fd, Ak, Kkt และ Tg	Ll, Kbi, Fd และ Ak	Ll, Kbi, Fd และ Ak
Medium	Te, Knk, Ntm, Klt, Hy, Pk และ Cp	Kkt, Tg, Te, Klt, Pk, Ntm, Hy, Knk และ Cp	Ntm, Klt, Te, Tg, Kkt และ Knk
Low	Ro, Km, Kh และ Ya	Kh, Ro, Km และ Ya	Pk, Cp, Kh, Hy, Km, Ya, และ Ro

จากการศึกษาการดูดซับ P ของดินกรดที่ดอนในภาคใต้ของประเทศไทย พบว่าชุดดินในอันดับ Ultisols มีปริมาณการดูดซับ P สูงสุด (x_m) จากสมการ Langmuir มีค่าระหว่าง 106.38 ถึง 526.32 mg P kg^{-1} และค่า log k จากสมการ Freundlich มีค่าตั้งแต่ 1.46 ถึง 3.05 โดยค่าเฉลี่ย ของ x_m และ Median ของชุดดินในอันดับ Ultisols ทางภาคใต้ มีค่าเท่ากับ 220 และ 188 mg P kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 17) เมื่อเทียบกับการศึกษาปริมาณการดูดซับของดินกรดที่ดอนอื่นๆ ในประเทศไทยพบว่า ค่าเฉลี่ย ของ x_m จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าน้อยกว่าดินในอันดับ Oxisols และ Ultisols ที่มีสีแดง ซึ่งมีค่าเฉลี่ย X_m เท่ากับ 378 mg P kg^{-1} (Trakoonyingcharoen และคณะ, 2005) และดินในอันดับ Ultisols ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเท่ากับ 285 mg P kg^{-1} (อมรา, 2545) และชุดดินในอันดับ Ultisols และ Alfisols ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเท่ากับ 56 mg P kg^{-1} (เพิ่มพูน และคณะ, 2546) ส่วนในดินที่มีสีแดงของ เมือง Lampung ประเทศอินโดนีเซียมีปริมาณการดูดซับ P สูงมาก มีค่าเฉลี่ย x_m ที่ 1,871 mg P kg^{-1} (Siradz, 2009) เนื่องจาก ดินที่มีสีแดงจะมีปริมาณเหล็กออกไซด์และปริมาณดินเหนียวในดินสูง ทำให้สามารถดูดซับ P ได้สูง

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับ P สูงสุดจากสมการ Langmuir (x_m) และพลังงานในการดูดซับ P ของดินจากสมการ Freundlich (k) ในดินเขตร้อนชื้น

Reference	Sampling Area	x_m (mg P kg^{-1}) Mean / Median	*k* Mean / Median
การศึกษานี้	Oxisols and Ultisols, Southern Thailand	106 – 526 220 / 188	30 – 1,109 198 / 102
Trakoonyingcharoen และคณะ (2005)	red Oxisols and red Ultisols, Thailand	18 - 1,111 378 / -	9 – 652 -
เพิ่มพูน และคณะ (2546)	Ultisols and Alfisols, Thailand	7 – 129 56 / 38	7 – 14,125 629 / 794
อมรา (2545)	Ultisols, Thailand	4 – 833 285 / -	-
กาญจนารัตน์ (2550)	Saline soil, Thailand	40 - 180 93 / 75	-
Siradz (2009)	Red soil, Indonesia	719 – 2,747 1,871 / 1,825	388 – 1,569 955 / 923

2.1 ศักยภาพการดูดซับฟอสฟอรัสของดินและสมบัติต่างๆของดิน

สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสมการการดูดซับ P และสมบัติต่างๆของดิน แสดงในตารางที่ 18 พบว่า ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด (x_m) จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิด (**)กับ log k, Ext.P req., $Fe_2O_{3(Ni)}$, Clay, C.E.C และ Exch.Al โดยมีค่า R^2 ที่ระดับ 0.970**, 0.956** 0.898**, 0.772**, 0.730** และ 0.727** ตามลำดับ แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับ (ns) ปริมาณอินทรียวัตถุและ P ที่เป็นประโยชน์ โดยมีค่า R^2 ที่ระดับ 0.428^{ns} และ 0.034^{ns} ตามลำดับ

ตารางที่ 18 ค่าสหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างค่าการดูดซับ P ในดินและสมบัติดินต่างๆ

Parameter	Log k	Ext.P req.	$Fe_2O_{3(Ni)}$	Clay	C.E.C	Exch.Al	OM	Avai.P
x_m	0.970**	0.956**	0.898**	0.772**	0.730**	0.727**	0.428^{ns}	0.034^{ns}
Log k		0.981**	0.925**	0.789**	0.771**	0.759**	0.470^{ns}	0.023^{ns}
P req.			0.913**	0.753**	0.747**	0.776**	0.472^{ns}	0.028^{ns}
$Fe_2O_{3(Ni)}$				0.770**	0.811**	0.669**	0.416^{ns}	0.155^{ns}
Clay					0.943*	0.309^{ns}	0.600*	0.186^{ns}
C.E.C						0.353^{ns}	0.652**	0.219^{ns}
Exch.Al							0.288^{ns}	0.123^{ns}
OM								0.193^{ns}

หมายเหตุ : ns ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

* แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมัน 95 % โดยวิธี DMRT

** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมัน 99 % โดยวิธี DMRT

x_m = ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับสูงสุด จากสมการ Langmuir

Log k = ค่าคงที่ จากสมการ Freundlich

Ext.P req. = external P requirement ที่ 0.2 mg P L^{-1}

$Fe_2O_{3(Ni)}$ = เหล็กออกไซด์ (%) ย่อยด้วย conc. Nitric acid และวัดด้วยวิธี ICP-OES

Exch. Al = อะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ ($cmol_c$ kg^{-1})

Clay = ปริมาณดินเหนียว (%)

C.E.C = ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ($cmol_c$ kg^{-1})

OM = อินทรียวัตถุ (g kg^{-1})

Avai.P = P ที่เป็นประโยชน์ที่สกัดด้วยน้ำยา Bray 2 (mg P kg^{-1})

กรณี Fe และ Al oxides มีบทบาทที่สำคัญในการดูดซับ P ในดิน เนื่องจาก Fe และ Al มีอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากจึงทำให้สามารถดูดซับ P ได้มาก สอดคล้องกับ Singh และ Singpuri (1986) ที่พบว่า ปริมาณของ oxides ของ Fe และ Al ในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ (r = 0.405) และค่าคงที่ของพลังงานที่ดูดซับ P ของดินเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ และ (r = 0.372) ตามลำดับ

ดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียว หรือปริมาณ Fe, Al oxides สูง สามารถดูดซับ P ได้สูง (Singh and Gilkes, 1991; Schaefer *et al*., 2004) และ Nwoke และคณะ (2003) รายงานว่า การดูดซับ P สูงสุดของดินในพื้นที่แอฟริกาตะวันตกสัมพันธ์กับเนื้อดินและปริมาณของFe และ Al ที่อยู่ในรูปของอสัณฐานและรูปสัณฐาน การศึกษาในประเทศไทย อมรา (2545) พบว่า การดูดซับ P สูงสุดมีความสัมพันธ์กับ Fe oxides รูป Fe_{ox} ($R^2 = 0.927$) กับรูป Fe_{pyro} ($R^2 = 0.847$) แสดงให้เห็นว่า Fe oxides มีบทบาทต่อการดูดซับ P ในดิน ส่วน Avail. P และ OM พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ต่อปริมาณ P ที่ดูดซับได้สูงสุด ($R^2 = 0.428^{ns}$ และ 0.034^{ns} ตามลำดับ)

Trakoonyingcharoen และคณะ (2005) รายงานว่า ชุดดินในอันดับ Oxisols ที่มีสีแดง มีปริมาณดินเหนียวสูงถึง 92 % และมีการดูดซับ P สูงสุดเท่ากับ 1,111 mg P kg^{-1} ดังนั้น ชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินเหนียวจะมีความสามารถในการดูดซับ P มากที่สุด รองลงมาจะเป็นดินร่วนและดินทราย ตามลำดับ (อมรา 2550) เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับ P มากกว่าอนุภาคดินชนิดอื่น (Duffera and Robarge, 1999) Borggaard และคณะ (1990) รายงานว่า OM ไม่สามารถเข้าไปแย่งชิงตำแหน่งที่ดูดซับ P (sorption site) กับฟอสเฟตไอออน แต่ OM จะมีผลกระทบทางอ้อม โดยมีส่วนในการยับยั้งการเป็นผลึกของ Al ซึ่งมีผลทำให้การดูดซับ P สูงขึ้น

จากผลการทดลอง พบว่า กลุ่มชุดดินที่มีการดูดซับ P สูง มีค่า x_m ตั้งแต่ 250 – 526 mg P kg^{-1} มีค่าเฉลี่ย 332 mg P kg^{-1} ระดับปานกลาง มีค่า x_m ตั้งแต่ 145 – 222 mg P kg^{-1} มีค่าเฉลี่ย 181 mg P kg^{-1} และระดับต่ำ มีค่า x_m ตั้งแต่ 106 – 140 mg P kg^{-1} มีค่าเฉลี่ย 122 mg P kg^{-1} โดยกลุ่มชุดดินที่มีการดูดซับ P สูง จะมีค่า CEC, OM, Clay และ Fe oxides สูงกว่า ชุดดินที่มีการดูดซับ P ในปานกลาง และต่ำ (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 19 สมบัติของกลุ่มชุดดินที่มีการดูดซับ P ในระดับต่างๆ

P sorption	Langmuir equation	x_m mg P kg^{-1}	C.E.C. $cmol_c$ kg^{-1}	OM g kg^{-1}	Clay %	$Fe_2O_{3(Ni)}$ g kg^{-1}
High	Ll, Kbi, Fd, Ak,	250 – 526	2.61-9.08	15.50-24.40	25.84-49.36	3.40-8.90
	Kkt และ Tg	332	5.40	19.62	37.40	5.54
Medium	Te, Knk, Ntm, Klt,	145 – 222	1.55-5.59	8.70-27.80	17.25-38.46	2.70-4.10
	Hy, Pk และ Cp	181	2.96	16.31	24.46	3.28
Low	Ro, Km, Kh	106 – 140	0.70-4.99	7.90-16.60	12.20-29.63	2.20-2.80
	และ Ya	122	1.89	10.92	18.79	2.47

2.2 Stepwise Multiple Regression

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับกับสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินของแต่ละชุดดิน (ตารางที่ 5) โดยการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแบบหลายตัวแปร (stepwise multiple regression) ปรากฏผลดังนี้

$x_m = 12.262 + 53.987(Fe_2O_3)$ $R^2 = 0.807^{**}$ (1)

$x_m = 12.341 + 53.810\ (Fe_2O_3) + 0.169\ (C.E.C)$ $R^2 = 0.807^{**}$ (2)

$x_m = -\ 5.752 + 44.926\ (Fe_2O_3) + 1.913\ (Clay)$ $R^2 = 0.823^{**}$ (3)

$x_m = 5.614 + 44.852\ (Fe_2O_3) + 37.156\ (Exch.Al)$ $R^2 = 0.836^{**}$ (4)

$x_m = -\ 67.237 + 53.115(Fe_2O_3) + 6.925(Clay) - 30.519(C.E.C)$ $R^2 = 0.863^{**}$ (5)

$x_m = -33.992 + 21.254(Fe_2O_3) + 3.758\ (Clay) + 60.729\ (Exch.Al)$ $R^2 = 0.884^{**}$ (6)

$x_m = -\ 83.256+ 30.400(Fe_2O_3) + 7.817(Clay) - 25.774(C.E.C) + 55.009(Exch.Al)$

$R^2 = 0.912^{**}$ (7)

$x_m = -\ 84.383 + 30.652(Fe_2O_3) + 7.818(Clay) - 26.059(C.E.C)$

$+ 54.651(Exch.Al) + 0.097(OM)$ $R^2 = 0.912^{**}$ (8)

$x_m = -\ 98.591+ 30.144(Fe_2O_3) + 7.426(Clay) - 19.768(C.E.C)$

$+ 50.827(Exch.Al) - 1.361(OM) + 5.122(Avai.P)$ $R^2 = 0.926^{**}$ (9)

** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมัน 99 เปอร์เซ็นต์

จากค่า R^2 ระหว่างการดูดซับฟอสฟอรัสในดินและสมบัติดินต่างๆ (ตารางที่ 19) และสมการถดถอยดังกล่าว จะเห็นได้ว่าปริมาณของ Fe ในดินจะสามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณการดูดซับ P ได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ปริมาณของ Exch.Al และ % Clay ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สมการที่รวมเอาสมบัติอื่นๆ เพิ่มขึ้น พบว่าสามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับได้ถูกต้องเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงว่าสมบัติต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลต่อความถูกต้องในการคาดคะเนปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน

3. External P Requirement

ในการคำนวณปริมาณ External P requirement ของข้าวโพด ได้กำหนดที่ระดับความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลายดินที่ 0.3 mg P L^{-1} (Fox and Kamprath, 1970) และทำการประเมินปริมาณ P ที่ถูกดูดซับจากกราฟ sorption isotherm ปริมาณดังกล่าวในชุดดินทั้งหมด 17 ชุดดิน มีค่าตั้งแต่ 16 – 299 mg P kg^{-1} หรือ 5 – 93 kg P rai^{-1} (ตารางที่ 20) และสามารถจำแนกปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ต้องการออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ดังนี้

ตารางที่ 20 ความต้องการฟอสฟอรัสของชุดดินต่างๆที่ทำให้สารละลายดินที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 0.3 mg P L^{-1} จากสมการ sorption isotherm

ชุดดิน	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ใส่ในดิน		
	mg P kg^{-1}	kg P rai^{-1}*	ปุ๋ยสูตร 15-15-15 (kg P_2O_5 rai^{-1})*
Ya	16	5	76
Kh	18	6	92
Km	19	6	92
Ro	22	7	107
ค่าเฉลี่ย	19	6	92
Cp	44	14	214
Pk	60	19	290
Knk	61	19	290
Hy	81	25	382
Ntm	89	28	427
Te	97	30	458
Klt	98	31	473
Kkt	124	39	595
ค่าเฉลี่ย	82	26	397
Ak	147	46	702
Tg	149	46	702
Fd	201	63	962
Kbi	287	90	1,374
Ll	299	93	1,420
ค่าเฉลี่ย	217	68	1,038

* คำนวณจากดิน 1 ไร่ หนัก = 312,000 กิโลกรัม ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร

1) ดินที่มีความต้องการปริมาณปุ๋ย P ในระดับต่ำ มีค่า < 30 mg P kg^{-1} (<10 kg P rai^{-1}) ได้แก่ ชุดดินยะลา คอหงษ์ คลองท่อม และรือเสาะ

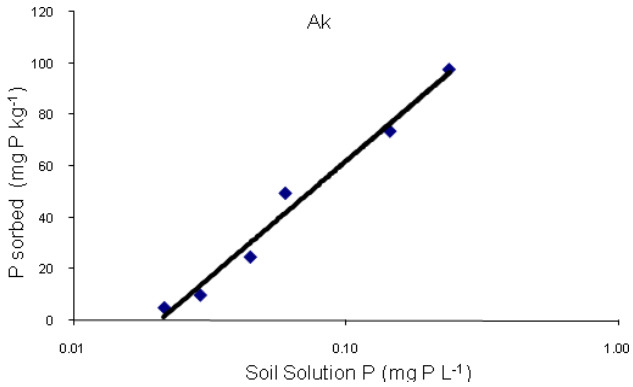
2) ดินที่มีความต้องการปริมาณปุ๋ย P ในระดับปานกลาง มีค่าตั้งแต่ 30 - 130 mg P kg^{-1} (10 - 40 kg P rai^{-1}) ได้แก่ ชุดดินชุมพร ภูเก็ต คลองนกกระทุง หาดใหญ่ นาท่าม ท่าแซะ คลองเต็ง และเขาขาด

3) ดินที่มีความต้องการปริมาณปุ๋ย P ในระดับสูง มีค่า > 130 mg P kg^{-1} (> 40 kg P rai^{-1}) ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก ทุ่งหว้า ฝั่งแดง กระบี่ และลำภูรา

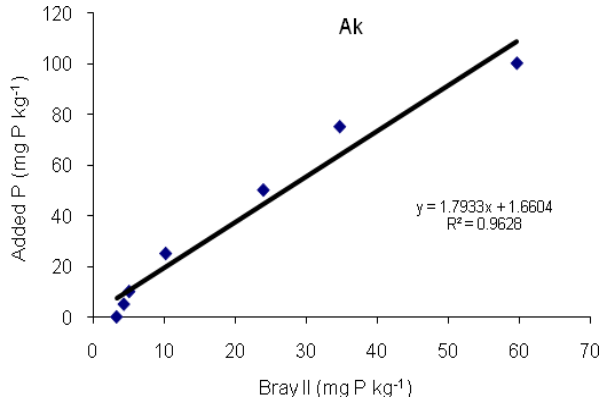
เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความต้องการปุ๋ยของดินต่างๆ ดังกล่าว และสมบัติต่างๆ ของดิน พบว่า ปริมาณความต้องการปุ๋ยของดินกรดที่ดอนในภาคใต้มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับค่า x_m ที่ประเมินได้จากสมการ Langmuir (R^2= 0.956**), ค่า log k จากสมการ Freundlich (R^2=0.981**), ปริมาณเหล็กออกไซด์ (R^2= 0.913**), อะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (R^2= 0.776**), ปริมาณดินเหนียว (R^2= 0.753**) และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (R^2= 0.747**) (ตารางที่ 18) แสดงให้เห็นว่า สมบัติของดิน เช่น ปริมาณดินเหนียว ปริมาณเหล็กออกไซด์ และปริมาณอะลูมินัม มีผลต่อการการกำหนดปริมาณความต้องปุ๋ยฟอสฟอรัสของดิน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ เพิ่มพูน และคณะ (2546) พบว่า ปริมาณความต้องการปุ๋ย P ที่ 0.2 mg P L^{-1} ของดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับค่า x_m ที่ประเมินได้จากสมการ Langmuir (R^2= 0.76**) หรือปริมาณดินเหนียว (R^2= 0.67**) หรือปริมาณเหล็กออกไซด์ (R^2= 0.54**)

3.1 การประเมิน external P requirement ตามแนวทางของ Hue และคณะ (2000)

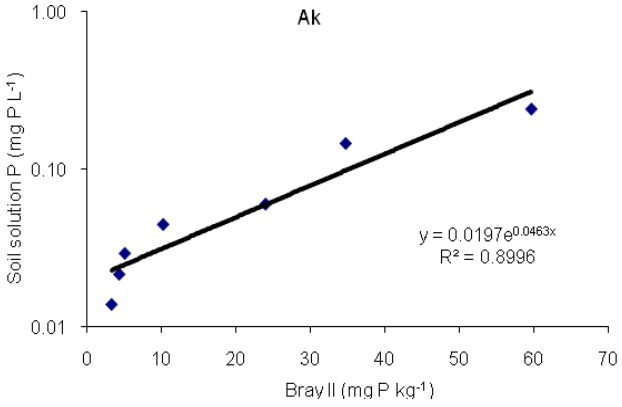
แนวทางในกาประเมิน external P requirement ของ Hue และคณะ (2000) โดยใช้ P sorption isotherm (รูปที่ 15) และได้มีการพิจารณาประสิทธิภาพของปริมาณปุ๋ยที่ใส่ต่อการเพิ่มขึ้นของค่าวิเคราะห์ดิน (buffer coefficient) ซึ่งได้แก่สัดส่วนค่าวิเคราะห์ดินที่เพิ่มขึ้น ต่อหน่วยของปริมาณปุ๋ยที่ใส่ (รูปที่ 16) แล้วทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทั้งสองให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลาย และ ค่าวิเคราะห์ดินในตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณความต้องการปุ๋ยดังกล่าว (รูปที่ 17)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของ P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน (BrayII)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดิน

ในขั้นตอนการเชื่อมโยงให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P สมดุลในสารละลายดิน (equilibrium concentration solution P) และ ค่าวิเคราะห์ดินของดิน ได้ทำการทดสอบ 2 วิธีได้แก่ การเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทั้งสองของแต่ละชุดดินแยกกัน และการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทั้งสองโดยใช้ข้อมูลจาก 5 ชุดดิน ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก คลองเต็ง ชุมพร ภูเก็ต และคอหงษ์ ซึ่งเป็นตัวแทนของดินกรดที่ดอนที่มีระดับการดูดซับ P ต่างๆ กัน

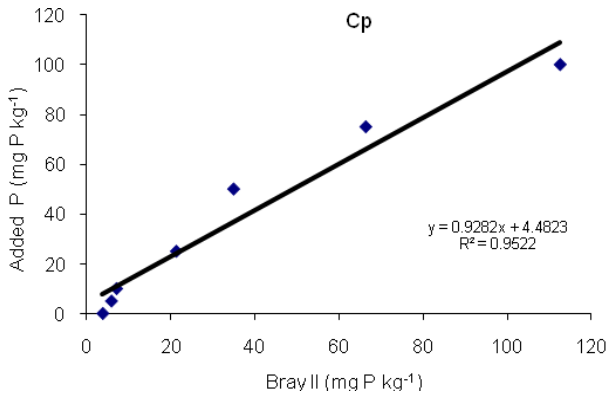
3.1.1 การประเมินปริมาณปุ๋ยที่ต้องการ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P สมดุลในสารละลายดิน (equilibrium concentration solution P) และ ค่าวิเคราะห์ดินของดินแบบเฉพาะแต่ละชุดิน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) หาค่าวิเคราะห์ของดิน (Bray II) ของตัวอย่างดินที่ต้องการ เช่น ชุดดินอ่าวลึกที่มีค่าวิเคราะห์ดิน Bray II เท่ากับ 3.41 mg P kg^{-1}

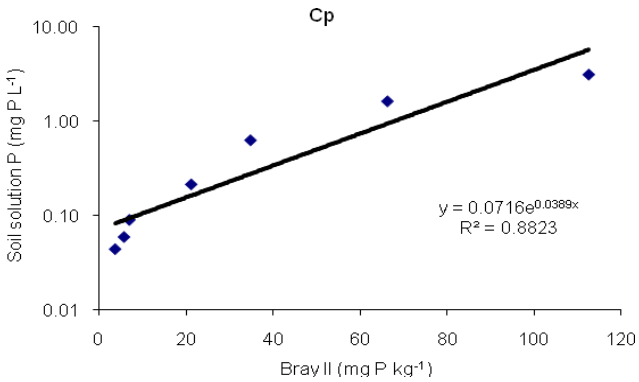
2) เทียบค่าดังกล่าวจาก รูปที่ 17 จะได้ระดับ soil-solution P เพียง 0.02 mg P L^{-1} ซึ่งต่ำกว่าระดับ 0.3 mg P L^{-1} ที่กำหนด แสดงว่า ชุดดินดังกล่าวมี Pไม่เพียงพอต่อความต้องการของข้าวโพด และ

3) ถ้าต้องการ soil-solution P ที่ระดับ 0.3 mg P L^{-1} จะต้องมีค่า Bray II ที่ 58 mg P kg^{-1} (รูปที่ 17) และ 4) เทียบค่า Bray II ที่ 58 mg P kg^{-1} จาก รูปที่ 16 จะได้ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่เท่ากับ 107 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับ 33 kg P rai^{-1} (P added, Y = 1.793*58 + 1.660)

ในทำนองเดียวกัน ชุดดินชุมพรที่มีค่าวิเคราะห์ดิน Bray II เท่ากับ 5.29 mg P kg^{-1} เมื่อเทียบค่าดังกล่าวจาก รูปที่ 19 จะได้ระดับ soil-solution P เพียง 0.09 mg P L^{-1} ซึ่งต่ำกว่าระดับ 0.3 mg P L^{-1} ที่กำหนด แสดงว่า ชุดดินดังกล่าวมี P ไม่เพียงพอต่อความต้องการของข้าวโพด และถ้าต้องการ soil-solution P ที่ระดับ 0.3 mg P L^{-1} จะต้องมีค่า Bray II ที่ 37 mg P kg^{-1} (รูปที่ 19) และเทียบค่า Bray II ที่ 37 mg P kg^{-1} จาก รูปที่ 18 จะได้ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่เท่ากับ 39 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับ 12 kg P rai^{-1} (P added, Y = 0.9282*37 + 4.4823)

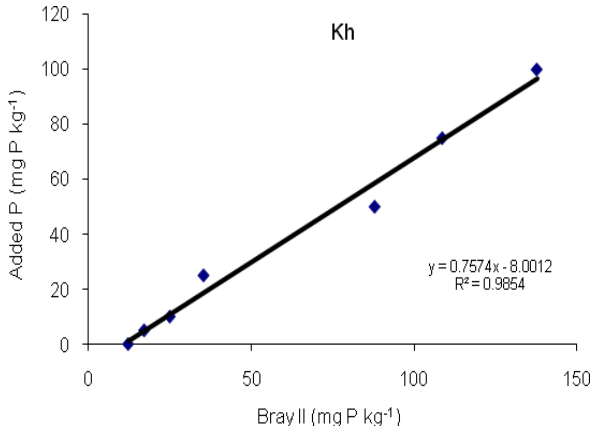


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่และค่าวิเคราะห์ P ของชุดดินชุมพร

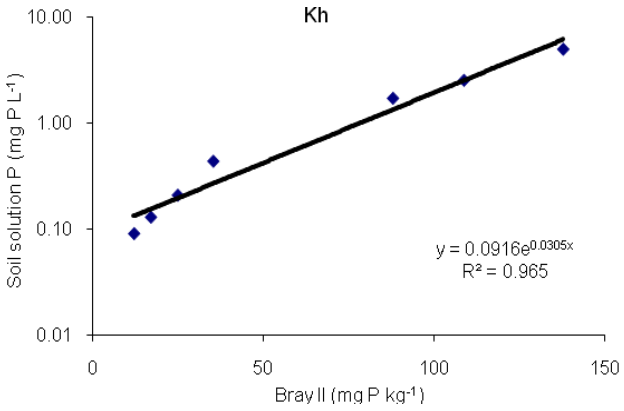


รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในชุดดินชุมพร

และในทำนองเดียวกัน ชุดดินคอหงษ์ที่มีค่าวิเคราะห์ดิน Bray II เท่ากับ 10.23 mg P kg^{-1} จะได้ปริมาณปุ๋ยที่ต้องใส่เท่ากับ 22 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับ 7 kg P rai^{-1} (P added, Y = 0.7574*39 – 8.0012)



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ของชุดดินคอหงษ์



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลายและค่าวิเคราะห์ Pในชุดดินคอหงษ์

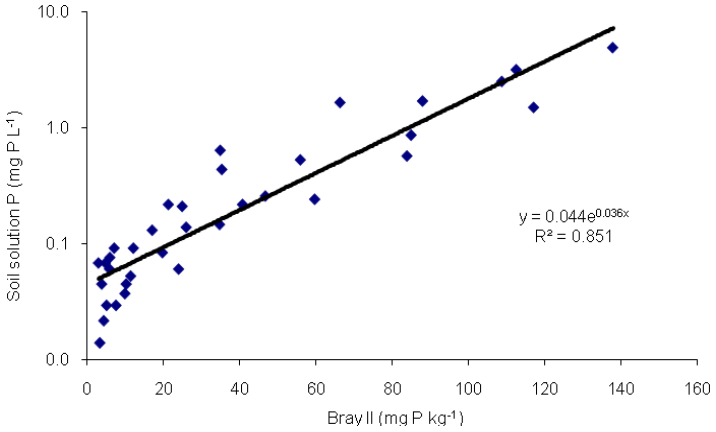
เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณความต้องการปุ๋ยของดินดังกล่าว กับระดับผลผลิตที่ 80 % ของผลผลิตสูงสุด จากการทดลองในกระถาง พบว่าค่อนข้างสอดคล้องกันในชุดดินที่มีระดับ/ศักยภาพการดูดซับสูงและต่ำ (ชุดดินอ่าวลึกและคอหงษ์ ตามลำดับ) ส่วนในชุดดินที่มีศักยภาพการดูดซับปานกลาง (ชุดดินชุมพร) จะแตกต่างกันค่อนข้างมาก อาจจะเนื่องมาจากระดับผลผลิตสูงสุดที่ได้จากการทดลองในกระถางมีความผันแปรค่อนข้างสูง (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 21 ปริมาณ external P requirement (mg P kg^{-1}) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลาย และ ค่า Bray II ในแต่ละชุดดิน เปรียบเทียบกับปริมาณปุ๋ยที่ระดับ 80 % ของผลผลิตสูงสุดจากการทดลองในกระถาง

Soil series	External P requirement[1] (1)	80% Optimum yield[2] (2)	Different between (1) and (2) (+/-)
Ak (H)	107 (33)	103 (32)	+ 4 (+ 1)
Cp (M)	39 (12)	123 (38)	- 84 (- 26)
Kh (L)	21 (7)	25 (8)	-3 (- 1)

[1] จากสมการ Sorption isotherm , [2] จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Relative yield และ Added P (รูปที่ 23)
ค่าในวงเล็บ = kg P rai^{-1}

3.1.2 การประเมินปริมาณปุ๋ยที่ต้องการ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P สมดุลในสารละลายดิน (equilibrium concentration solution P) และ ค่าวิเคราะห์ดินแบบรวมทั้ง 5 ชุดดิน (รูปที่ 22) พบว่า ปริมาณความต้องการปุ๋ยของดินเมื่อเปรียบเทียบกับระดับผลผลิตที่ 80 % ของผลผลิตสูงสุด จากการทดลองในกระถาง มีความสอดคล้องกันในระดับใกล้เคียงกันกับการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ดิน (Bray II) ในแต่ละดินแยกกัน (ตารางที่ 22) แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P สมดุลในสารละลายดิน และค่าวิเคราะห์ดินBray II ในดินกรดที่ดอนในภาคใต้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และน่าจะนำไปประยุกต์ใช้กับชุดดินอื่นๆ ได้



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ P ในสารละลาย และค่าวิเคราะห์ P ในดินกรดที่ดอนที่มีระดับการดูดซับ P ต่างๆ

ตารางที่ 22 ปริมาณ external P requirement (mg P kg^{-1}) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสมดุลของ P ในสารละลาย และ ค่า Bray II ของ 5 ชุดดิน เปรียบเทียบกับปริมาณปุ๋ยที่ 80 % ของผลผลิตสูงสุดจากการทดลองในกระถาง

Soil series	External P requirement[1] (1)	80% Optimum yield[2] (2)	Difference between (1) and (2) (+/-)
Ak (H)	95 (30)	103 (32)	- 8 (- 2)
Cp (M)	53 (17)	123 (38)	- 70 (21)
Kh (L)	31 (10)	25 (8)	+ 7 (+ 2)

[1] จากสมการ Sorption isotherm , [2] จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง %Relative yield และ Added P (รูปที่ 23)

ค่าในวงเล็บ = kg P rai^{-1}

4. การตอบสนองของข้าวโพดต่ออัตราปุ๋ยฟอสฟอรัส

การตอบสนองของข้าวโพดต่ออัตราปุ๋ย P ที่เหมาะสม โดยการทดลองปลูกพืชในกระถาง ใน 3 ชุดดินที่เป็นตัวแทนของดินกรดที่ดอนในภาคใต้ที่มีศักยภาพการดูดซับฟอสฟอรัสสูง ปานกลาง และต่ำ ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ ตามลำดับ อัตราปุ๋ย P ที่ใช้ในการทดสอบปลูกข้าวโพดในกระถาง ได้แก่ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 เท่าของ external P requirement

ของแต่ละชุดดิน (0.3 mg P L^{-1} หัวข้อที่ 3.1) ซึ่งเท่ากับปริมาณฟอสฟอรัส 95, 53 และ 31 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับ 30, 17 และ 10 kg P rai^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 23) ปลูกข้าวโพดเป็นระยะเวลา 25 วัน (Moody *et al*., 1988) ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ

ตารางที่ 23 อัตราปุ๋ย P ที่ใส่ในการทดลองปลูกข้าวโพดในกระถาง

สิ่งทดลอง	ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่					
	Ak		Cp		Kh	
	mg P kg^{-1}	kg P rai^{-1}	mg P kg^{-1}	kg P rai^{-1}	mg P kg^{-1}	kg P rai^{-1}
ดินดั้งเดิม	0	0	0	0	0	0
Control	0	0	0	0	0	0
C + P0.25	24	7	13	4	8	2
C + P0.5	48	15	27	8	16	5
C + P1	95	30	53	17	31	10
C + P2	190	59	106	33	62	19
C + P4	380	119	212	66	124	39

4.1 อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสกับการเจริญเติบโตของข้าวโพด

ดินที่ไม่มีการใส่ธาตุอาหารเสริม และปุ๋ย P (Control, P0) ทั้ง 3 ชุดดิน ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดน้อยมาก ลักษณะอาการที่สังเกตพบคือ ลำต้นเล็ก ผอม ใบเล็ก ปลายใบเหลือง ปลายใบมวน ใบหัก เจริญเติบโตช้า แสดงว่าดินกรดที่ดอนทั้ง 3 ชุดดินมีข้อจำกัดของธาตุอาหารต่างๆ รวมถึงธาตุฟอสฟอรัสในระดับที่ค่อนข้างรุนแรง

ผลการศึกษาการตอบสนองของข้าวโพดต่ออัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสในชุดดิน อ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ พบว่า เมื่ออัตราปุ๋ยเพิ่มขึ้นมีผลทำให้น้ำหนักแห้งข้าวโพด เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ เมื่อเทียบกับสิ่งทดลองที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ย P อย่างไรก็ตาม ระดับน้ำหนักแห้งสูงสุดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดที่ปลูกในดินทั้ง 3 แตกต่างกัน โดยน้ำหนักแห้งสูงสุด ของต้นข้าวโพดในชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ เท่ากับ 2.76, 1.25 และ 1.97 กรัมต่อกระถาง และน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1.32, 0.56 และ 1.00 กรัมต่อกระถาง ตามลำดับ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่จริงให้แก่ข้าวโพดที่ปลูกในแต่ละชุดดินไม่เท่ากัน อัตราที่ใส่สูงสุดในชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงส์ เท่ากับ 380, 212 และ 124 mg P kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 24)

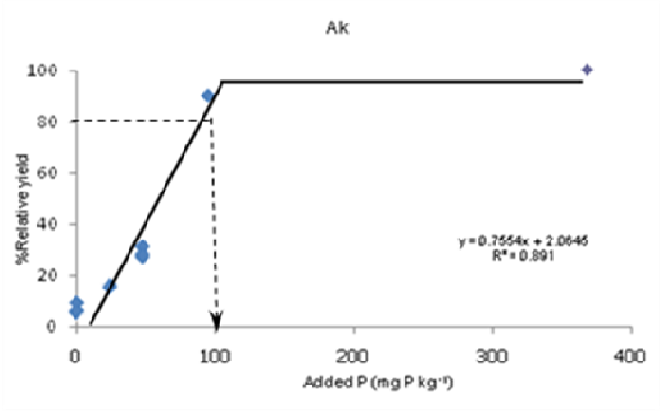
ในระหว่างการทดลองในกระถาง สังเกตพบว่าชุดดินชุมพรมีการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสน้อยกว่าชุดดินอื่นๆ อาจเนื่องมาจาก ลักษณะเนื้อดินที่อัดแน่นเกินไป ทำให้การระบายน้ำและอากาศไม่ดี ดังนั้นการเจริญเติบโตของข้าวโพดในชุดดินชุมพรจึงไม่ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะในกระถางที่มีอัตราฟอสฟอรัสสูงๆ

ตารางที่ 24 ผลของปุ๋ย P ต่อน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของข้าวโพดหลังจากปลูก 25 วัน

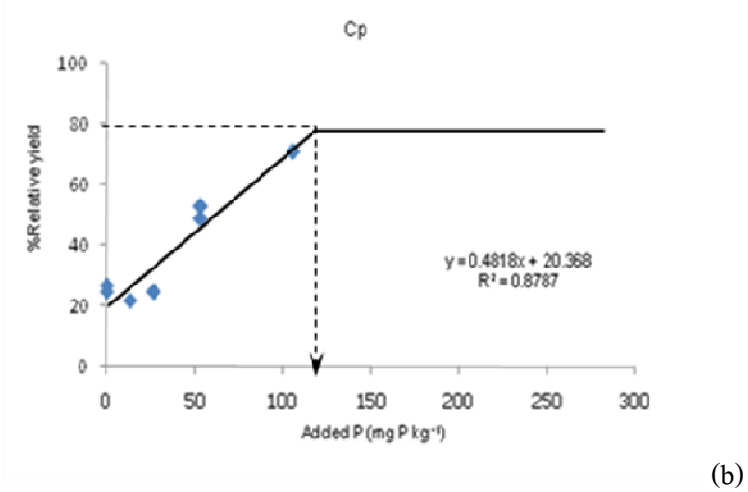
สิ่งทดลอง	น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของข้าวโพด (กรัม/กระถาง)		
	ชุดดินอ่าวลึก	ชุดดินชุมพร	ชุดดินคอหงษ์
ดินดั้งเดิม	0.24 c	0.18 c	0.39 c
Control	0.18 c	0.34 c	0.39 c
C + P0.25	0.46 c	0.29 c	1.15 b
C + P0.5	0.92 c	0.31 c	1.19 b
C + P1	2.08 b	0.69 b	1.97 a
C + P2	2.63 ab	0.84 b	0.71 c
C + P4	2.76 a	1.25 a	1.19 b
Average	1.32	0.56	1.00
F-test	**	**	**
C.V. (%)	30.93	45.46	39.43

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในชุดเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 99 % โดยวิธี DMRT และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

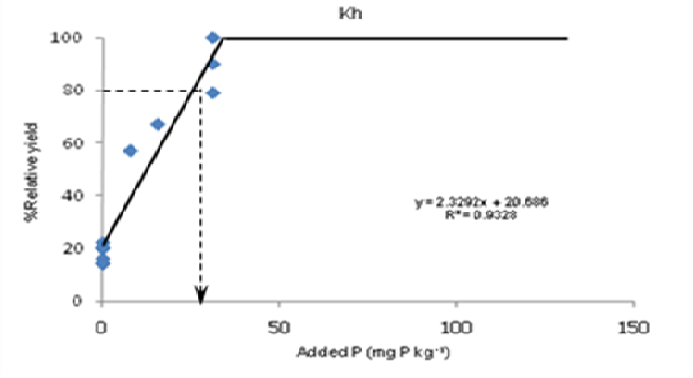
เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของน้ำหนักแห้งต้นข้าวโพดในรูปของผลผลิตสัมพันธ์ (80% relative yield) พบว่า เมื่อตัดข้อมูลที่เป็น outliner ออก (รูปที่ 23) พบว่า การตอบสนองต่อปุ๋ย P ในชุดดิน อ่าวลึก ชุมพรและคอหงส์ เท่ากับ 103, 123 และ 25 mg P kg^{-1} หรือ ที่ระดับ 32, 38 และ 8 kg P rai^{-1} ตามลำดับ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 23 การตอบสนองของต้นข้าวโพดต่อปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c) (linear-linear model)

4.2 ค่าวิกฤติความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในพืช (% critical P concentration)

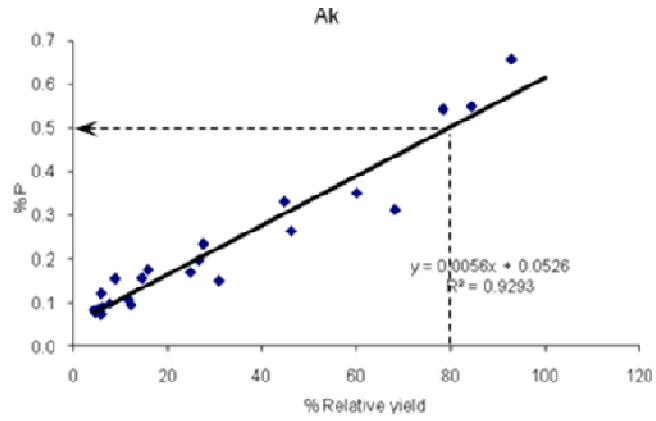
ระดับความเข้มข้น P ของข้าวโพดที่ปลูกในทั้ง 3 ชุดดินอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.97 %P โดยมีค่าเฉลี่ยใน ชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ เท่ากับ 0.37, 0.21 และ 0.37 %P ตามลำดับ (ตารางที่ 25) ซึ่งพบว่า ส่วนใหญ่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกับ ค่า critical level ในข้าวโพดส่วนใหญ่ซึ่งอยู่ในช่วง 0.30-0.50 % (Hassan *et al*., 1993; Hue *et al*., 2000)

ตารางที่ 25 ความเข้มข้นของ P เฉลี่ยในข้าวโพด (%P) ที่ปลูกในชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์

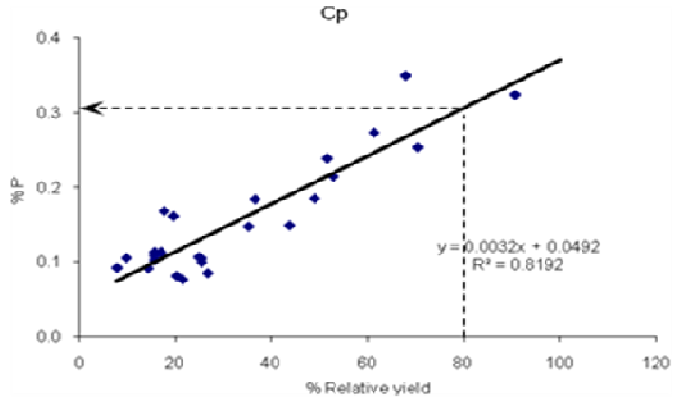
สิ่งทดลอง	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเฉลี่ยในข้าวโพด (%)		
	ชุดดินอ่าวลึก	ชุดดินชุมพร	ชุดดินคอหงษ์
ดินดั้งเดิม	0.12 d	0.10 b	0.13 d
Control	0.08 d	0.09 b	0.11 d
C + P0.25	0.14 d	0.13 b	0.17 cd
C + P0.5	0.19 cd	0.11 b	0.22 cd
C + P1	0.30 c	0.17 b	0.54 b
C + P2	0.52 b	0.24 b	0.38 bc
C + P4	0.97 a	0.52 a	0.78 a
Average	0.37	0.21	0.37
F-test	**	**	**
C.V. (%)	23.77	35.82	38.20

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในชุดเดียวกันมีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % โดยวิธี DMRT และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

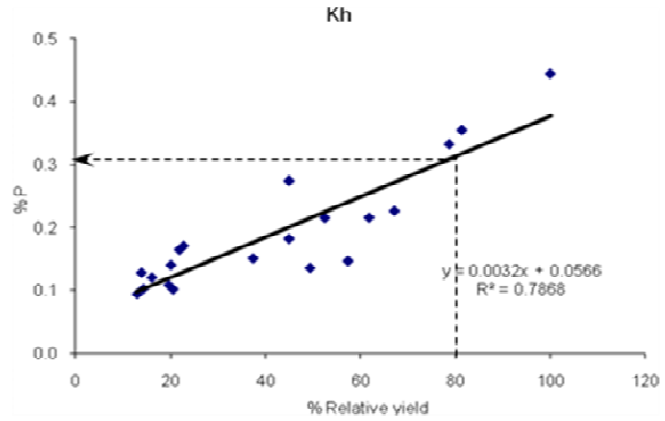
ผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของ P ในข้าวโพดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปุ๋ย P ที่เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นวิกฤติของ P (critical P %) ในข้าวโพด ที่ปลูกในชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงส์ มีค่าเท่ากับ 0.50, 0.31 และ 0.31 % ตามลำดับ (รูปที่ 24) ระดับวิกฤติของฟอสฟอรัสในพืชดังกล่าวสอดคล้องกับค่า critical level ของข้าวโพดโดยทั่วไป (ตารางที่ 10) และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของ P ในแต่ละชุดดิน พบว่า ระดับความเข้มข้นของ P ในข้าวโพดในชุดดินอ่าวลึกมีระดับสูงสุด เนื่องจาก ชุดดินอ่าวลึกมีอัตราการใส่ปุ๋ย P ในระดับสูงกว่า ทำให้ระดับผลผลิตและความเข้มข้นของ P ในพืชสูงกว่าในข้าวโพดที่ปลูกในชุดดินชุมพรและคอหงษ์



(a)



(b)

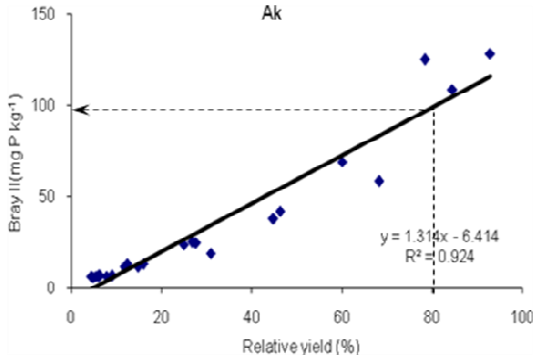


(c)

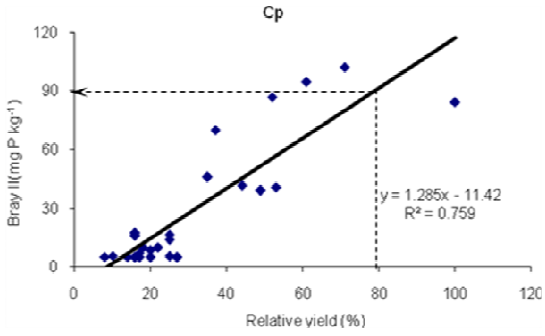
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ P ในข้าวโพด และผลผลิตสัมพันธ์ของข้าวโพด ในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)

4.3 ค่าวิกฤติของค่าวิเคราะห์ดิน (critical levels)

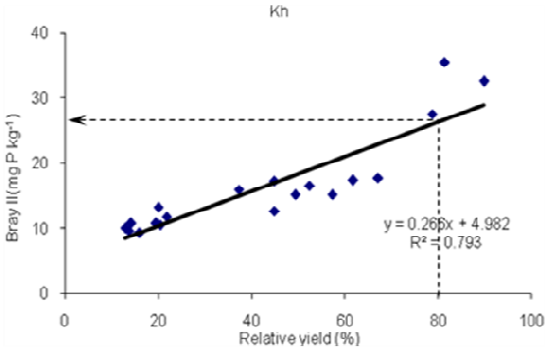
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (Bray II) และผลผลิตสัมพันธ์ของข้าวโพดของชุดดินตัวแทนที่มีระดับการดูดซับต่างๆ พบว่าค่าวิกฤติของ Bray II ของชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ เท่ากับ 96, 91 และ 27 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับ 30, 28 และ 8 kg P rai^{-1} ในดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูง ปานกลาง และต่ำ ตามลำดับ (รูปที่ 25) จะเห็นได้ว่าในชุดดินที่มีระดับการดูดซับแตกต่างกัน จะได้ระดับวิกฤติของ Bray II แตกต่างกัน ส่วนค่า critical level ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะกำหนดไว้ที่ 16-30 mg P kg^{-1} ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างมาก (สุมาลี, 2536)



(a)



(b)



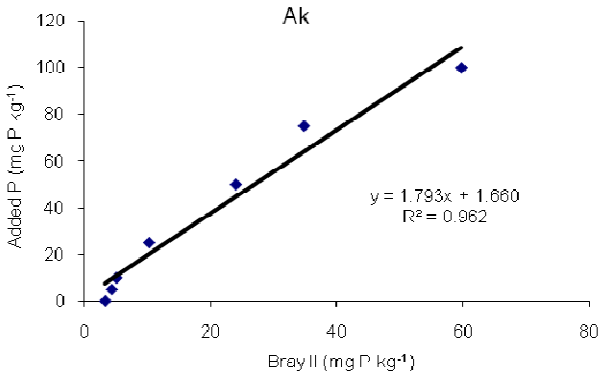
(c)

รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) และผลผลิตสัมพันธ์ของข้าวโพดในชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)

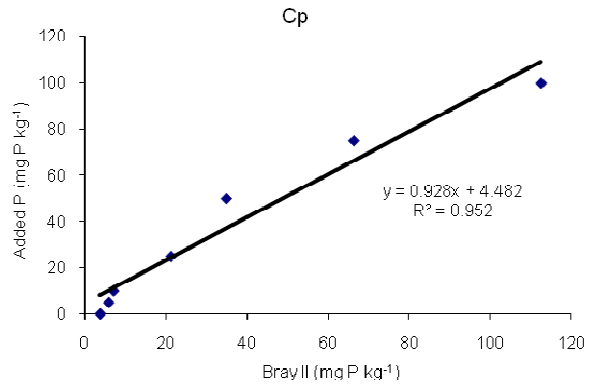
4.4 สัมประสิทธิ์การบัฟเฟอร์ของดิน (buffer coefficient)

P buffer coefficient (BC) หรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ยที่ใส่ต่อการเพิ่มขึ้นของค่าวิเคราะห์ Bray II พบว่า ค่า BC ของดินมีแนวโน้มลดลงตามระดับการดูดซับ P ของดินที่ลดลง โดยชุดดินอ่าวลึก ชุมพร และคอหงษ์ มีค่า buffer coefficient เท่ากับ 1.8, 0.9 และ 0.7 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 26) แสดงว่า ในชุดดิน Ak ที่มีศักยภาพการดูดซับ P สูง จะต้องใส่ปุ๋ย P ต่อหน่วยของค่าวิเคราะห์ดินที่เพิ่มขึ้นมากกว่า (1.8 เท่า) เมื่อเทียบกับชุดดินคอหงษ์ (0.7 เท่า) ข้อมูลดังกล่าวจำเป็นสำหรับการคำนวณหาปริมาณปุ๋ยที่ต้องการในแต่ละชุดดิน ตามลำดับ

ค่า BC ในฮาวายที่สกัดด้วยวิธี Mehlich 3, Olsen และ modified Truog จะเท่ากับ 8.6, 4.2 และ 2.2 เท่าตามลำดับ (Hue และคณะ 2000) และได้ให้เหตุผลว่าค่า BC ที่แตกต่างกันน่าจะขึ้นกับชนิดสารสกัด เนื้อดิน และชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ และเวลาหลังการใส่ปุ๋ย

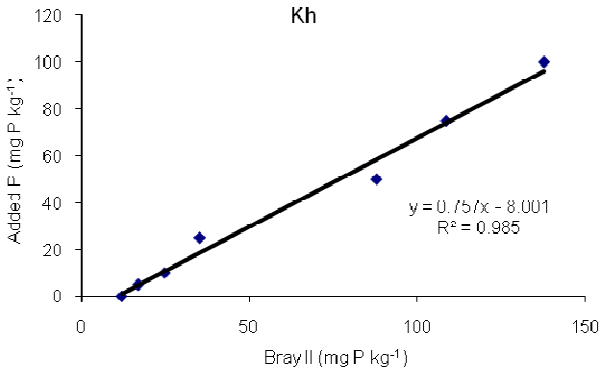


(a)



(b)

รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) ของชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c)



(c)

รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ย P ที่ใส่ และค่าวิเคราะห์ P ในดิน (Bray II) ของชุดดินอ่าวลึก (a) ชุดดินชุมพร (b) และชุดดินคอหงษ์ (c) (ต่อ)

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุป

ลักษณะการดูดซับ P ของดินกรดที่ดอนที่สำคัญๆ ในภาคใต้สามารถอธิบายได้ดีทั้งสมการ Langmuir และ Freundlich โดยมีค่า R^2 จากสมการ Langmuir และ Freundlich อยู่ในช่วง 0.85 ถึง 0.98 และ 0.77 ถึง 0.99 ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (x_m) จากสมการ Langmuir ในช่วง 106 – 526 mg P kg^{-1} และค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานในการดูดซับของดิน (k) จากสมการ Freundlich ที่ 30 – 1,109 ตามลำดับ และสามารถจัดกลุ่มระดับการดูดซับ P ของดินออกเป็น ชุดดินที่มีการดูดซับ P ในระดับต่ำ ได้แก่ Ro, Km, Kh และ Ya มีค่า x_m ในช่วง 106 – 140 mg P kg^{-1}, หรือเท่ากับปริมาณความต้องการปุ๋ย (P external requirement) น้อยกว่า <10 kg P rai^{-1}, ชุดดินที่มีการดูดซับ P ในระดับปานกลาง ได้แก่ Te, Knk, Ntm, Klt, Hy, Pk และ Cp มีค่า x_m ในช่วง 150 – 222 mg P kg^{-1} หรือเท่ากับปริมาณความต้องการปุ๋ยที่ระดับ 10 - 40 kg P rai^{-1} และชุดดินในกลุ่มที่ 3 ที่มีการดูดซับ P ในระดับสูง ได้แก่ Ll, Kbi, Fd, Ak, Kkt และ Tg มีค่า x_m ในช่วง 250 – 526 mg P kg^{-1} ตามลำดับ หรือเท่ากับปริมาณความต้องการปุ๋ยที่ระดับ > 40 kg P rai^{-1})

ปริมาณการดูดซับ P สูงสุดขึ้นกับสมบัติของดินและจะสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ ปริมาณ Fe_2O_3, Clay (%) และ Exch. Al ของดินโดยมีค่า R เท่ากับ 0.89, 0.73 และ 0.73 ตามลำดับ และสามารถคาดคะเนของปริมาณการดูดซับ P สูงสุดของดินจากปริมาณ Fe_2O_3 ด้วยสมการ $x_m = 12.262 + 53.987(Fe_2O_3)$ ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.807$**

ค่า buffer coefficient หรือ สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า Bray II ต่อหน่วยของปุ๋ยที่ใส่ ในชุดดินที่มีระดับศักยภาพการดูดซับ สูง ปานกลาง และ ต่ำ (Ak Cp และ Kh ตามลำดับ) พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.8, 0.9 และ 0.7 ในชุดดิน Ak, Cp และ Kh ตามลำดับ ลดลงตามระดับการดูดซับ P ของดิน ซึ่งหมายถึงในดิน Ak ที่มีระดับการดูดซับ P สูง ค่า Bray II เพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย จะต้องใส่ปุ๋ย P 1.8 หน่วย เมื่อเทียบกับชุดดิน Kh ซึ่งมีการดูดซับ P ต่ำ จะใส่ปุ๋ย P เพียง 0.7 หน่วยเท่านั้น

ในการทดลองปลูกข้าวโพดในกระถางในดินที่มีศักยภาพการดูดซับ P ระดับต่างๆ ดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความต้องการปุ๋ย (external requirement) ตามแนวทาง P

sorption isotherm ร่วมกับค่าวิเคราะห์ดิน (Bray II) ของ Hue และคณะ (2000) โดยกำหนดปริมาณความต้องการที่ความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินเท่ากับ 0.3 mg P L^{-1} พบว่า ในชุดดินที่มีระดับการดูดซับ P สูง และต่ำ (Ak และ Kh ตามลำดับ) ผลผลิตที่ระดับ 80% ของผลผลิตสูงสุดจะมีค่าความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินที่ 0.33 และ 0.21 mg P L^{-1} หรือ แตกต่างจากปริมาณ external P requirement ที่คาดคะเนเท่ากับ 0 และ +8 mg P kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับระดับความต้องการปุ๋ยที่ 0.3 mg P L^{-1} ที่กำหนด ยกเว้นชุดดินชุมพรที่มีระดับการดูดซับ P ปานกลาง แต่มีค่าความเข้มข้นสมดุลของสารละลายดินสูงถึง 4.34 mg P L^{-1} หรือแตกต่างจากที่คาดคะเนถึง 70 mg P kg^{-1} ทั้งนี้อาจเนื่องจากระดับผลผลิตจากการทดลองในกระถาง ในดินชุดนี้มีความผันแปรค่อนข้างสูงจากการอัดแน่นของดินในกระถางในระหว่างการปลูกข้าวโพด (CV. 46%)

ค่าวิกฤติความเข้มข้นของ P ในพืช ที่ระดับ 80% ของผลผลิตสูงสุด พบว่าสอดคล้องกับค่าที่กำหนดในข้าวโพด (0.30-0.50) โดยในดิน Ak และ Kh มีค่าเท่ากับ 0.37 ส่วนในดิน Cp เท่ากับ 0.21 ตามลำดับ

ค่าวิกฤติของ Bray II ที่ได้จากระดับ 80% ของผลผลิตสูงสุดในดินที่มีศักยภาพการดูดซับ P สูง กลาง และต่ำ เท่ากับ 96, 91 และ 27 mg P kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้การแปลความหมายค่าวิเคราะห์ดินและการแนะนำปุ๋ยให้เจาะจงมากขึ้น เปรียบเทียบกับค่า critical level ที่ใช้กันโดยทั่วไปที่ระดับ 16 – 30 mg P kg^{-1} (สุมาลี, 2536)

2. ข้อเสนอแนะ

เป็นเรื่องยากที่จะทำการประเมินปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการในภาพรวม โดยไม่มีการกำหนดระบุเงื่อนไข สภาพระบบการปลูกพืชที่ชัดเจน เนื่องปริมาณปุ๋ยที่พืชต้องการจะมีช่วงค่อนข้างกว้าง ขึ้นกับศักยภาพการดูดซับของดินและปัจจัยด้านพืช พืชแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองความต้องการแตกต่างกันมาก (Fox *et al*., 1974)

แนวทางการประเมินความต้องการปุ๋ยจาก external requirement ดังกล่าว สามารถประเมินความต้องการปุ๋ยให้เฉพาะเจาะจงตามศักยภาพการดูดซับ P ของดิน ทำให้สามารถประหยัดเวลา และเงินทุนในการทดสอง calibration curves ที่จำเป็นในระดับดินและพืชที่กำหนดในกระบวนการแนะนำปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้แนวทางการคาดคะเนปุ๋ยดังกล่าว ยังต้องการทดสอบในระดับกระถางและแปลงของชุดดินและพืชต่างๆ ให้กว้างขวางมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. ระบบการจำแนกดินที่ใช้ในดิน : ข้อมูลดิน. [Online]. Available from http://www.ldd.go.th/Lddwebsite/web_osl/survey_1/Tseries_south.pdf (Accessed, 5 December 2007)

กาญจนารัตน์ ช่อรักษ์. 2550. พฤติกรรมการดูดซับฟอสฟอรัสในดินเค็มและผลของความเค็มที่มีต่อการดูดซึมฟอสฟอรัสในต้นคะน้า. ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 26 : 24-30.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จำเป็น อ่อนทอง. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จุฑารัตน์ อินทร์นา. 2550. การดูดซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเรซิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เจนจิรา เทเวศร์วรกุล, ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และจงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2553. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Phosphorus Buff Coefficient กับสมบัติของ 7 ชุดดินที่ใช้ปลูกอ้อย. ใน เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. หน้า 39-46. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัยรัตน์ นิลนนท์, วิเชียร จาฏุพจน์, วรรณา เลี้ยววาริณ และสุภาณี ยงค์. 2538. สภาพความอุดมสมบูรณ์ของดินปลูกมังคุดบางชนิดในภาคใต้ของประเทศไทย. ว.สงขลานครินทร์ (วทท.) 17 : 381-393.

ทวีทรัพย์ อิสดี. 2548. การตอบสนองของถั่วเหลืองต่อฟอสฟอรัสภายใต้สภาพการใส่และไม่ใส่ปูนที่ปลูกในดินที่สามารถดูดซับฟอสฟอรัสต่างกัน.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ธงชัย มาลา. 2546. จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต. ใน ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ : เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. หน้า 123-142. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัทมา วิตยากร. 2533. ดิน: แหล่งธาตุอาหารพืช. เอกสารประกอบการสอนวิชา ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. ขอนแก่น : ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร, สมศักดิ์ สุขจันทร์ และเกรียงศักดิ์ จันโททัย. 2546. การหาความต้องการฟอสฟอรัสของดินชุดต่างๆ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส. รายงานการวิจัย ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร และอุษา เกลาฉีด. 2548. การตอบสนองของถั่วเหลืองต่ออัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ประเมินได้จากค่าความต้องการฟอสฟอรัสของดิน. รายงานการวิจัย ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. การแลกเปลี่ยนแอนไอออนและการตรึงฟอสเฟต. ใน เคมีดิน. หน้า 153-169. เชียงใหม่ : คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ธาตุฟอสฟอรัส. ใน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. หน้า 155-174. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2546. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิเชียร จาฏุพจน์. 2549. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์
คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศิริพรรณ ปัญญาด้วง. 2552. ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของดินนาข้าวอินทรีย์.
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุมาลี สุทธิประดิษฐ์. 2536. เอกสารคำสอนวิชาความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สงขลา :
ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุวพันธ์ รัตนะรัต, นงลักษณ์ วิบูลสุข, พิชิต พงษ์สกุล, จิรพงษ์ ประสิทธเขตร, มณเฑียร จินดาและ
สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์. 2543. ลักษณะอาการขาดธาตุอาหารของพืช. เอกสารวิชาการ
ประกอบภาพ. กรุงเทพฯ : กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2550. บัญชีธาตุอาหารในดินตามชุดดินประเทศไทย.
กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน. 2549. กรมพัฒนาที่ดิน : ดินที่มีปัญหา.
[Online]. Available from http://www.ldd.go.th/Thai-html/work1.htm
(Accessed, 24 January 2008)

อมรา ดาวไธสง. 2550. การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลาง
ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อมรา วงษ์จันทร์แดง. 2545. การดูดซับฟอสเฟตในดินชุดต่างๆ ที่มีรูปออกไซด์ของเหล็กและ
อะลูมินัมในปริมาณต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

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

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

Ahmad, A.R. 1982. Phosphate adsorption characteristics of some Malaysian soils. l Conformity with adsorption model. MARDI Res. Bull, 1: 52-64.

Allen, D.G., Barrow, N.J. and Bolland, M.D.A. 2001. Comparing simple methods for measuring phosphate sorption by soils. Aust. J. Soil Res. 39 : 1433-1442.

Aslam, M., Sharif, M.Z., Rahmat, ullah. and Yasin, M. 2000. Application of Freundlich isotherm to determine phosphorus requirement of several rice soils. Int. J. Agri. Biol. 2 : 286-288.

Ayodele, O.J., Sobulo, R.A. and Agboola, A.A. 1984. Use of sorption isotherms to evaluate P requirements of some savannah soils of Western Nigeria. Trop. Agric. 61 : 226-229.

Bache, B.W. and Williams, E.G. 1971. A phosphorus sorption indexes for soils. J. Soil Sci. 22 : 289-301.

Barrow, N.J. 1973. Relationship between a soil's ability to adsorb phosphate and the residual effectiveness of superphosphate. Aust. J. Soil Res. 11 : 57-63.

Barrow, N.J. 2000. Towards a single-point method for measuring phosphate sorption by soils. Aust. J. Soil Res. 38 : 1099-1113.

Beckwith, R.S. 1965. Sorbed phosphate at standardnsupernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils Australian. J. Exp. Agri. An. Husb. 5 : 52-58.

Bertrand, I., Hinsinger, P. Jaillard, B. and Arvieu, J.C. 1999. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. Plant Soil. 211 : 111-119.

Bhatti, H.M., Ibrahim, M. and Nadeem, M.Y. 1988. Calibration of soil test and crop (wheat) response to applied phosphorus. Proc. The 1st Nat. Cong. Soil Sci. Lahore, Pak.

Bolland, M.D.A., Wilson, I.R. and Allen, D.G. 1994. Effect of P buffer capacity and P retention index of soils on soil test P, soil test P calibration and yield response curvature. Aust. J. Soil Res. 32 : 503-517.

Bolland, M.D.A., Gilkes, R.J., Brennan, R.F., Allen, D.G., 1996. Comparison of seven phosphorus sorption indices. Aust. J. Soil Res. 34, 81–89.

Bolland, M.D.A., Allen, D.G. and Barrow, N.J. 2003. Sorption of phosphorus by soils: how it is measured in Western Australia. Department of Agriculture, Government of Western Australia, Perth. Bull. 4591.

Boschetti, A.N.G., Quintero, G.C.E. and Benavidez, Q.R.A. 1998. Characterization of the capacity factor of phosphorus in soils of Enter Rios, Argentina. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 22 : 95-99.

Burkitt, L.L., Moody, P.W., Gourley, C.J.P. and Hannah, M.C. 2002. A simple phosphorus buffering index for Australian soils. Aust. J. Soil Res. 40 : 497-513.

Cho-ruk, K. 2003. Phosphorus influence on the response of pasture plants to Salinity. Ph.D. Thesis. Environmental Science University of Wollongong Australia.

Cox, F.R. 1994. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. Soil Sci. Soc. Am. J. 58 : 1249-1253.

Cox, J.W., Kirkby, C.A., Chittleborough D.J., Smythe, L.J. and Fleming, N.K. 2000. Mobility of phosphorus through intact soil cores collected from the Adelaide Hills, South Australia. Aust. J. Soil Res. 38 : 973-990.

Dear, B.S., Helyar, K.R., Muller, W.J. and Loveland, B. 1992. The phosphorus fertilizer requirements of subterranean clover, and the soil phosphorus status, sorption and buffering capacities from two phosphorus analyses. Aust. J. Soil Res. 30 : 27-44.

Derici, M.R. and Agca, N. 1999. Phosphorus adsorption of the soils of the Gaziantep Kayacik Plain. Turkish J. Agri. Forestry. 23 : 395-400.

Duffera, M. and Robarge, W.P. 1999. Soil characteristics and management effects on phosphorus sorption by highland plateau soils of Ethiopia. Soil Sci. Soc. Am. J. 63 : 1455 -1462

Easterwood, G.M. and Sartain, J.B. 1990. Clover residue effectiveness in reducing orthophosphate sorption on ferric hydroxide coated soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 54 : 1345-1350.

Ehsan, ul Haq. 2003. Phosphorus requirement of Maize in relation to soil characteristics. Ph.D thesis in soil science. University of Agriculture, Faisalabad.

Fox, R.L. 1979. Comparative response of field-grown crops to phosphate concentrations in soil solutions. In H. Mussell and R. Staple (eds.), stress physiology in crop plants. NY : John wily and sons.

Fox, R.L. 1981. External phosphorus requirement of crops. In Chemistry in the Soil Environment. pp. 233-239. Wisconsin : American Society of Agronomy, Madison.

Fox, R.L. 1989. Soil fertility research at Tandojam : Some observations and suggestions. Constancy report, USAID/MART,PARC. Islamabad, Pak.

Fox, R.L. and Kamprath, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34 : 902–907.

Fox, R.L., Bossbart, R.P., Somponge, D. and Lin, M.L. 1989. Phosphorus requirement and management of sugarcane, pineapple and bananas. In P requirements for Suitable Agriculture in Asia and Ocean. pp. 409-425. Los Banos, Philippnes : Filipinas, Manila

Fox, R.L., Nishmoto, R.K., Thompson, J.R. and Peno, R.S. de la. 1974. Comparative external phosphorus requirement of plants growing in tropical soils. Trans. 10th Congr. Soil Sci. 4 : 232-239.

Ghanbari, A., Maftoun, M. and Karimian, N. 1998. Phosphorus adsorption-dessorption characteristics of some selected highly calcareous soils of Fars province. Iran. J. Agric. Sci. 29 : 181-194.

Goldberg, S., Lebron, I., Suarez, D.L. and Hinedi, Z.R. 2001. Surface characterization of amorphous aluminum oxides. Soil Sci. Soc. Am. J. 65 : 78-86.

Guilherme,.L.R.G., Curi, N., Silva, M.L.N., Reno, N.B. and Machado, R.A.F. 2000. Phosphorus adsorption in lowland soils from Minas Gerais State [Brazil]. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 24 : 27-34.

Gunary, D. 1970. A new adsorption isotherm for phosphate in soil. J. Soil Sci. 21 : 72-77.

Hassan, M.M., Rashid, A. and Akhtar, M.S. 1993. Phosphorus requirement of corn and sunflower grown on calcareous soils of Pakistan. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 24 : 1529-1541.

Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. 2005. Phosphorus. In Soil Fertility and Fertilizer : An Introduction to Nutrient Management 7th ed. pp. 160-198. New Jersey : Pearson Education, Inc., Upper Saddle River.

Helyar, K.R. and Spencer, K. 1977. Sodium bicarbonate soil test values and the phosphate buffering capacity of soils. Aust. J. Soil Res. 15 : 263-273.

Holford, I.C.R., Morgan, J.M., Bradley, J. and Cullis, B.R. 1985. Yield responsiveness and response curvature as essential criteria for the evaluation and calibration of soil phosphate tests for wheat. Aust. J. Soil Res. 23 : 167-180.

Huang, Q. N. 1998. Properties of phosphorus adsorption and desorption in red soil under a stand of Chinese fir in Fujian. J. Nanjing Forestry Uni. 22: 39-44.

Hue, N.V., Ikawa, H. and Huang, X. 2000. Predicting soil phosphorus requirements. In Plant nutrient management in Hawaii's soils: Approaches for tropical and subtropical agriculture. College of Trop. Agric. and Human Resour. pp. 95–99. Hawaii : University of Hawaii.

Hussain, A.A., Ghafoor, M., Anwar, U.H. and Nawaz, M. 2003. Application of the Langmuir and the Freundlich equations for P adsorption phenomenon in saline sodic soils. Int. J. Agri. Biol. 5 : 349-356.

Hussein, H., Ibrahim, S.F., Kandeel, K., Moawad, H. 2004. Biosorption of heavy metals from waste water using *Pseudomonas* sp. Electronic J. Biotechnology. 7 : 30-37.

Javaid, S. 1999. Residual effect of Phosphate fertilizer measured using the Olsen method in Pakitan soils. Ph.D. Thesis. Department of Soil Science University of Reading, UK.

Jones, J.P., Singh, B.B., Fosberg. M.A. and Falen, A.L. 1979. Physical, Chemical and mineralogical characteristics of soils from volcanic ash in northern Idaho. II. Phosphate sorption. Soil Sci. Soc. Am. J. 43 : 547-552.

Juo, A.S.R. and Fox, R.I. 1977. Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. J. Soil Sci. 124 : 370-376.

Kafkafi, U., Posner, A.M. and Quirk, J.P. 1967. Desorption of phosphate from kaolinite. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31 : 348-353.

Le Mare, P., Pereira, H.J. and Goedert, W.J. 1987. Effect of green manure on isotopically exchangeable phosphate in a dark red latosol in Brazil. J. Soil Sci. 38 : 199-209.

Lucresio, F.S. and Duque, C.M. 1999. Alleviating soil acidity with organic matter, Lime and phosphorus application. CMU-J. Sci. 8 : 2-20.

Maida, J.H.A. 1980. Phosphate availability indices related to fractions in selected Malawi soils. J. Sci. Food Agric. 29 : 423-428.

Memon, K.S. 1982. The phosphorus requirement of cereal crops with emphasis on the tropics. Ph.D. Thesis. Dept. Agronomy and Soil Sci. Uni. Hawaii, USA.

Memon, K.S. and Fox. R.L. 1983. Utility of phosphate sorption curves in estimating P requirements of cereal crops : Wheat (*Triticum Aestivium*). Proc. 3rd Int. Cong. On Phosphorus Compounds, Brussels, Belgium. Oct. 4-6.

Memon, K.S., Rashid, A. and Puno, H.K. 1992. Phosphorus deficiency diagnosis and P soil test calibration in Pakistan. In Phosphorus Decision Support System Workshop. pp. 117-139. Hawaii : University of Hawaii, USA.

Menzies, N. 2009. The science of phosphorus nutrition: forms in the soil, plant uptake and plant response. Ph.D. Thesis. Department of Crop and Food Science University of Queensland, Australian.

Moody, P.W., Aitken, R.L., Compton, B.L. and Hunt, S. 1988. Soil phosphorus parameter affecting phosphorus availability to and fertilizer requirements of maize (*Zea mays*). Aust. J. Soil Res. 26 : 611-622.

Moody, P.W. and Bolland, M.D.A. 1999. Phosphorus. In Soil analysis : an interpretation manual. pp. 187–220. CSIRO Publishing : Melbourne.

Moreno, E.C., Lindsay, W.L. and Osborn, G. 1960. Reaction of dicalcium phosphate dihydrate in soils. Soil Sci. 90 : 58-68.

Murphy, J. and Riley, H.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. Anal. Chem. Acta. 27 : 31-36.

Nisar, A. 1988. Phosphorus use efficiency and soil test crop response correlation. Ph.D.Thesis. Department of Soil Science, University of Agriculture Faisalabad, Pakistan.

Nishimoto, R.K., Fox, R.L. and Parvin, P.E. 1977. Response of vegetable crop of phosphorus concentration in soil solution. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 120 : 705-709.

Olsen, S.R. and Watanabe, F.S. 1965. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 27 : 648-653.

Olsen, S.R., and Khasawneh, F.E. 1980. Use and limitations of physico chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In Dinauer, R.C. (ed.) The role of phosphorus in agriculture. pp. 361–410. Madison : ASA, CSSA, and SSSA.

Onthong, J., Osaki, M., Nilnond, C. and Tadano, T. 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 Shaw, T.C. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of phosphate requirement for pasture growth. Aust. J. Agric. Res. 18 : 601-612.

Ozanne, P.G. and Shaw, T.C. 1968. Advantage of the recently developed phosphate sorption test over the older extracting method for soil phosphate. Cong. Soil Sci. Adelaide. 2 : 282-280.

Peaslee, D.E., and Fox, R.L. 1978. Phosphorus fertilizer requirements as estimated by phosphate sorption. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 9 : 975–993.

Quang, V.D. and Dufey, J.E. 1995. Effect of temperature and flooding duration on phosphate sorption in an acid sulphate soil from Vietnam. Euro. J. Soil Sci. 46 : 641-647.

Rajan, S.S.S. 1975. Adsorption of divalent phosphate on hydrous alunminum oxide. Nature. 253 : 434-436.

Rashid, A. 1992. Internal P requirement of crops and use of universal soil tests for evaluating P fertility of Pakistani soils. In Role of P in Crop Prod. pp. 175-195. Islamabad : National Fertilizer Development Center, Islamabad.

Rayment, G.E. and Higginson, F.R. 1992. Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Melbourne : Reed International Books Australia P/L, Trading as Inkata Press.

Robert, D. H. 1969. Phosphorus adsorption in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33 : 630-663.

Sample, E.C., Soper, R.J. and Racz, G.J. 1980. Reaction of phosphate fertilization in soil. In Khawsaneh et al., (Ed) The Role of phosphorus in Agriculture. pp. 260-310. Madison : ASA. CSSA and SSSA.

Saunder, W.M.H. 1965. Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter and other soil properties. N.Z. J. Agri. Res. 8 : 30-57.

Singh, B. and Gilkes, R. J. 1991. Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of South-western Australia. Aust. J. Soil Res. 29 : 603-618.

Singh, K.P. and Singpuri, M.K. 1986. Sorption of phosphorus as related to properties of soils of Bihar. J. Indian Soc. Soil Sci. 34 : 603-604.

Singh, R.K., Sastry, T.G., Sengupta, M.B., Goswami, N.N. and Singh, B.P. 1971. Phosphate adsorption in salt-affected soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 34 : 603-604.

Singh, R.K., Sengupta, M.B., Goswami, N.N. and Sastry, T.G. 1990. Release of phosphate by anion exchange resin in neutral saline sodic soils. J. Indian Soc. Sci. 38 : 609-612.

Siradz, S.A. 2000. Mineralogy and chemistry of red soils of Indonesia. Ph.D. Thesis, The University of Western Australia. Soil Science and Plant Nutrition, Faculty of Agriculture, WA.

Siradz, S.A. 2009. Phosphorus sorption characteristics of red soil from Lampung, West and Central Java. J. Tanah Trop. 14 : 25-31.

Spark, K.M., Johnon, B.B. and Wells, J.D. 1995. Characterrizing heavy metal adsorption on Oxides and oxyhydroxides. Euro. J. Soil Sci. 46 : 621-631.

Toreu, B.N., Thomas, F.G. and Gillman, G.P. 1988. Phosphate-sorption characteristics of soil of the North Queensland Coastal Region. Aust. J. Soil Res. 26 : 465-477.

Trakoonyingcharoen, P., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A. and Gilkes, R.J. 2005. Phosphate sorption by Thai red Oxisols and red Ultisols. Soil Sci. 170 : 716-725.

Vander Zaag, P. 1979. The phosphorus requirements of root crops. Ph.D. Thesis. Dept. Agronomy and Soil Sci. Uni. Hawaii, USA.

Vander Zaag, P., Fox, R.L., Pena, R.S., Laughlin, W.M., Ryskamp, A., Villa-gracia, S. and Westermann, D.T. 1979. The utility of phosphate sorption curves for transferring soil management information. Trop. Agri. 56 : 153-160.

Velayutham, M. 1980. The problem of phosphate fixation by minerals and colloids. Phosphorus in Agric. 77 : 1-8.

von Uexkull, H. R. 1986. Efficient fertilizer use in acid upland soils of the humid tropics. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bull. 10.

Walthall, P.M. and Nolfe, J.D. 1998. Poultry litter amendments and the mobility and immobility of phosphorus in soil landscapes of northern Louisiana. Louisiana Agric. 41 : 28-38.

Weir, C.C. 1972. Phosphate studies on the Jamaica bauxite soils. Trop. Agri. 49 : 89-96.

White, R.E. 1980. Retention and release of phosphate by soils and soil constituents. Crit. Rep. App. Chem. 2 : 71-114.

Wijesundara, S.M., Martens, D.C. and Zelazny, L.W. 1997. Phosphate adsorption in Virginia Piedmont Ultisols under long-term phosphorus applications. Trop. Agri. Res. 9 : 261-275.

Yost, R., Onken, A.B., Cox, F. and Reid, S. 1992. The diagnosis of phosphorus deficiency and predicting phosphorus requirement. Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุลของชุดดิน 17 ชุดดิน ที่ระดับ P ในอัตราต่างๆ

ชุดดิน	อัตรา P ที่เติม ($mg\ P\ kg^{-1}$)	ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ($mg\ P\ L^{-1}$)	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ ($mg\ P\ kg^{-1}$)
Ak	25	0.04	24.61
	50	0.05	49.52
	100	0.05	99.52
	150	0.26	147.35
	200	0.79	192.14
	300	3.68	263.21
Hy	25	0.01	24.87
	50	0.13	48.74
	100	0.62	93.79
	150	3.04	119.64
	200	6.06	139.40
	300	12.40	175.97
Pk	25	0.06	24.39
	50	0.12	48.76
	100	1.37	86.34
	150	4.37	106.33
	200	7.08	129.23
	300	14.77	152.35
Km	25	0.27	22.30
	50	1.28	37.19
	100	4.51	54.91
	150	7.85	71.50
	200	11.17	88.35
	300	18.90	110.99
Ro	25	0.2	22.99
	50	1.08	39.18
	100	4.16	58.45
	150	7.58	74.17
	200	10.98	90.16
	300	19.35	106.5

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุลของชุดดิน 17 ชุดดิน ที่ระดับ P ในอัตราต่างๆ (ต่อ)

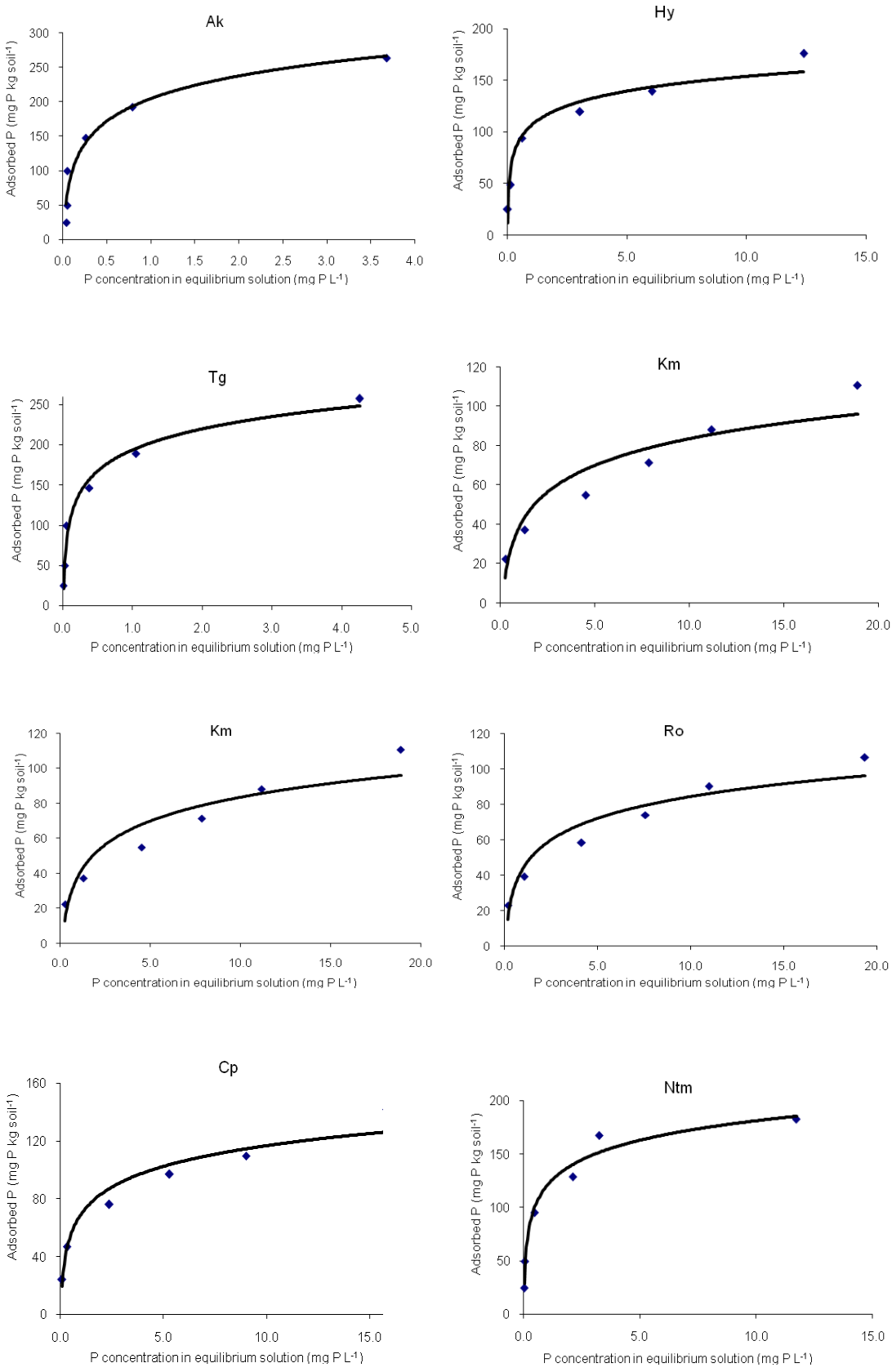
ชุดดิน	อัตรา P ที่เติม (mg P kg^{-1})	ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg P L^{-1})	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ (mg P kg^{-1})
Cp	25	0.09	24.11
	50	0.32	46.78
	100	2.38	76.23
	150	5.29	97.05
	200	9.01	109.93
	300	15.81	141.90
Klt	25	0.01	24.87
	50	0.05	49.52
	100	0.40	96.05
	150	1.55	134.49
	200	4.13	158.69
	300	10.45	195.52
Ya	25	0.32	21.78
	50	1.58	34.17
	100	5.22	47.83
	150	9.29	57.08
	200	12.1	79.02
	300	19.2	107.97
Kkt	25	0.02	24.85
	50	0.02	49.85
	100	0.22	97.76
	150	0.76	142.41
	200	1.82	181.81
	300	5.49	245.09
Fd	25	0.02	24.85
	50	0.02	49.85
	100	0.02	99.85
	150	0.12	148.85
	200	0.29	197.13
	300	1.37	286.34

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุลของชุดดิน 17 ชุดดิน ที่ระดับ P ในอัตราต่างๆ (ต่อ)

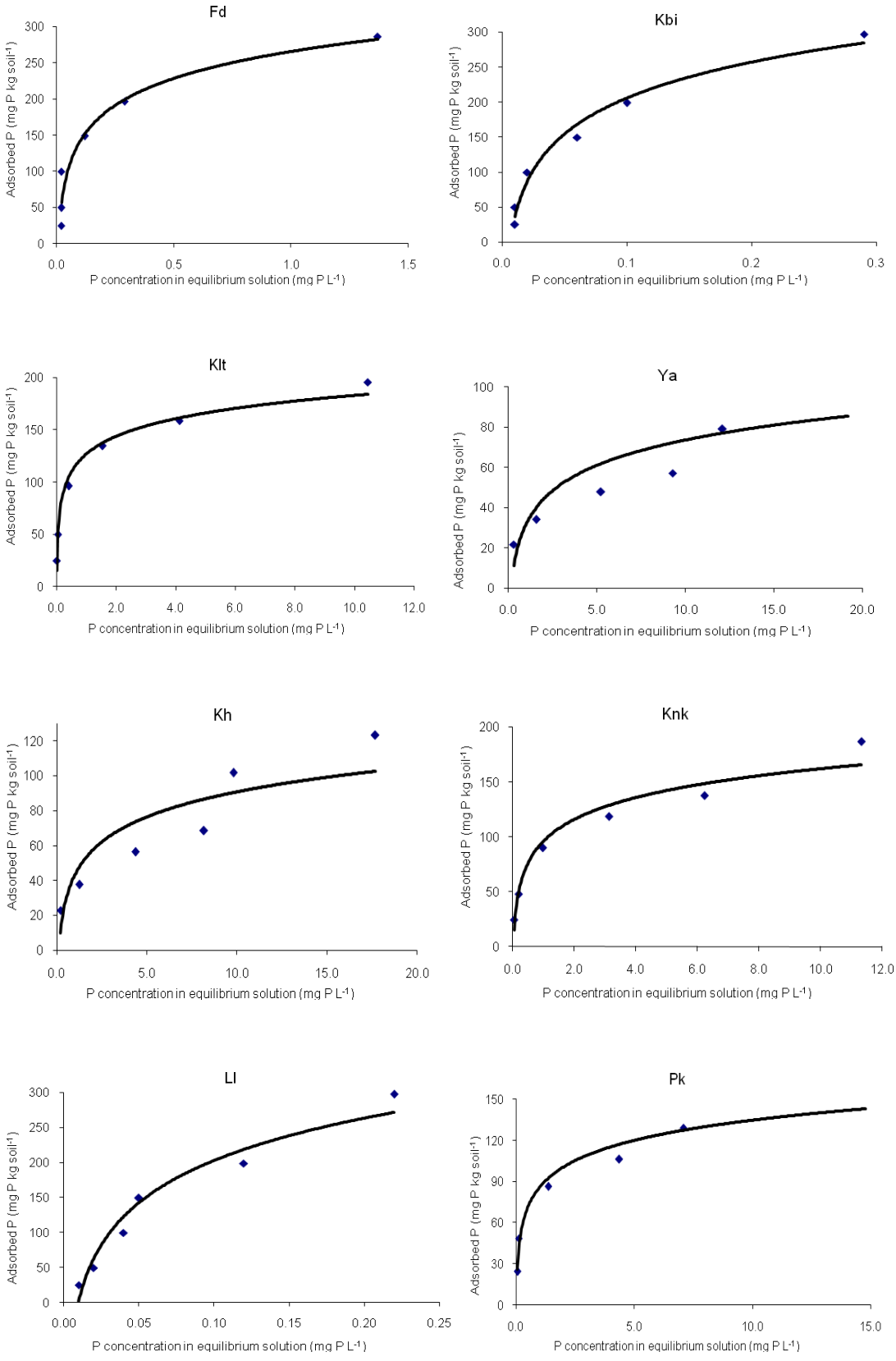
ชุดดิน	อัตรา P ที่เติม ($mg\ P\ kg^{-1}$)	ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ($mg\ P\ L^{-1}$)	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ ($mg\ P\ kg^{-1}$)
Te	25	0.04	24.57
	50	0.05	49.48
	100	0.37	96.31
	150	1.25	137.49
	200	3.09	169.11
	300	7.7	222.97
Kh	25	0.20	23.03
	50	1.24	37.61
	100	4.37	56.33
	150	8.16	68.44
	200	9.82	101.76
	300	17.68	123.16
Ll	25	0.01	24.90
	50	0.02	49.80
	100	0.04	99.60
	150	0.05	149.50
	200	0.12	198.80
	300	0.22	297.80
Tg	25	0.01	24.90
	50	0.03	49.70
	100	0.05	99.50
	150	0.38	146.20
	200	1.05	189.50
	300	4.26	257.38
Ntm	25	0.03	24.70
	50	0.05	49.52
	100	0.47	95.27
	150	2.12	128.76
	200	3.25	167.46
	300	11.73	182.66

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุลของชุดดิน 17 ชุดดิน ที่ระดับ P ในอัตราต่างๆ (ต่อ)

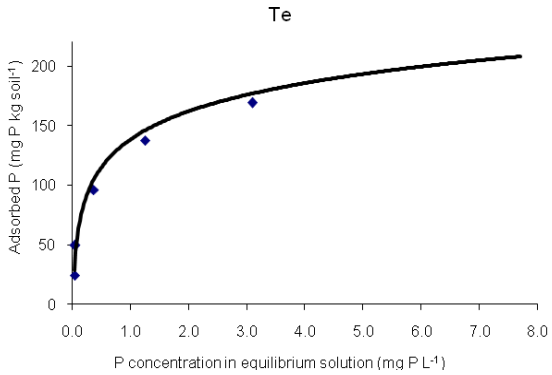
ชุดดิน	อัตรา P ที่เติม ($mg\ P\ kg^{-1}$)	ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ($mg\ P\ L^{-1}$)	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ ($mg\ P\ kg^{-1}$)
Kbi	25	0.01	24.90
	50	0.01	49.90
	100	0.02	99.80
	150	0.06	149.40
	200	0.10	199.00
	300	0.29	297.10
Knk	25	0.06	24.39
	50	0.21	47.85
	100	0.99	90.05
	150	3.14	118.57
	200	6.24	137.57
	300	11.33	186.71



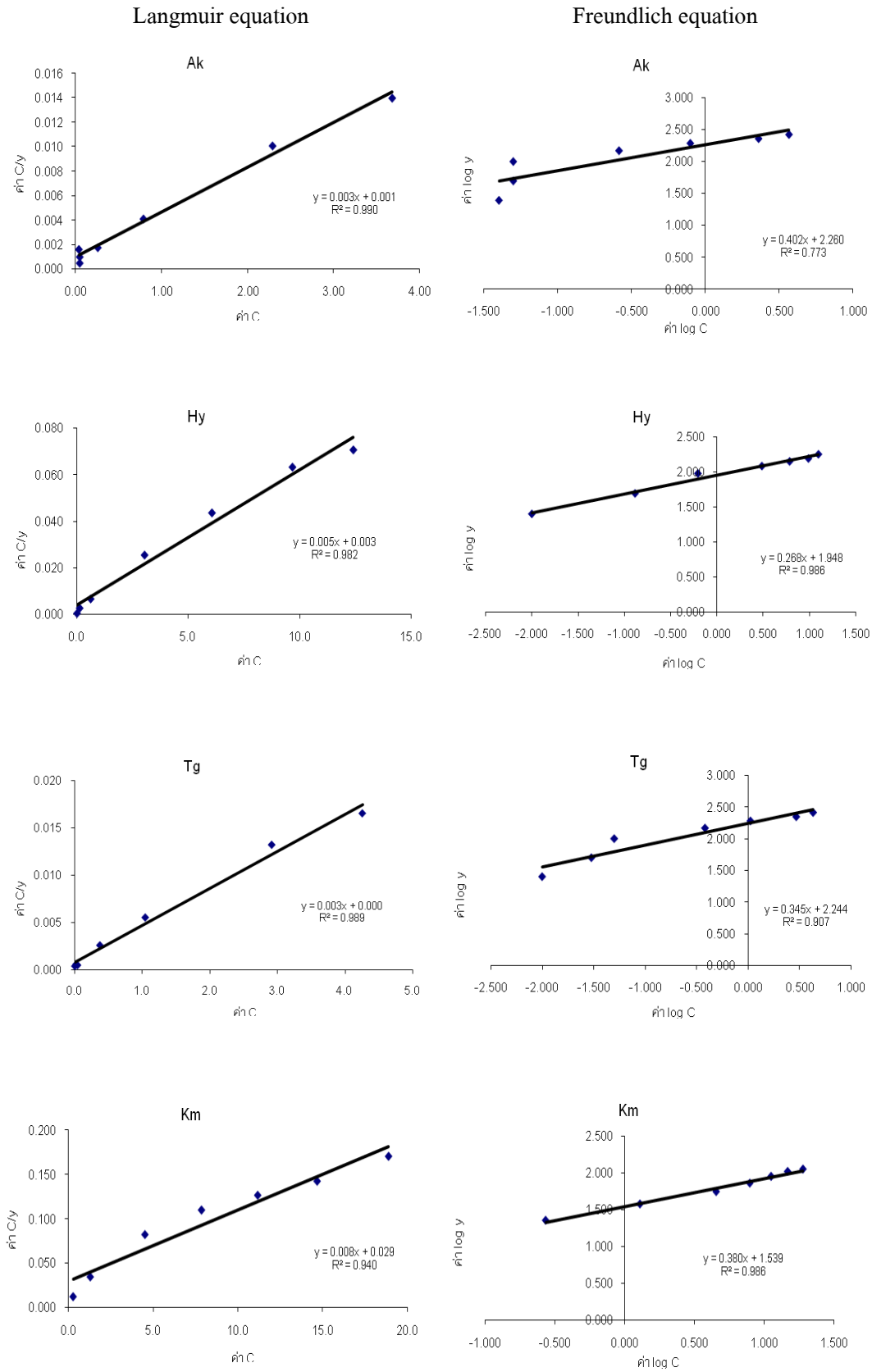
รูปผนวกที่ 1 ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน)



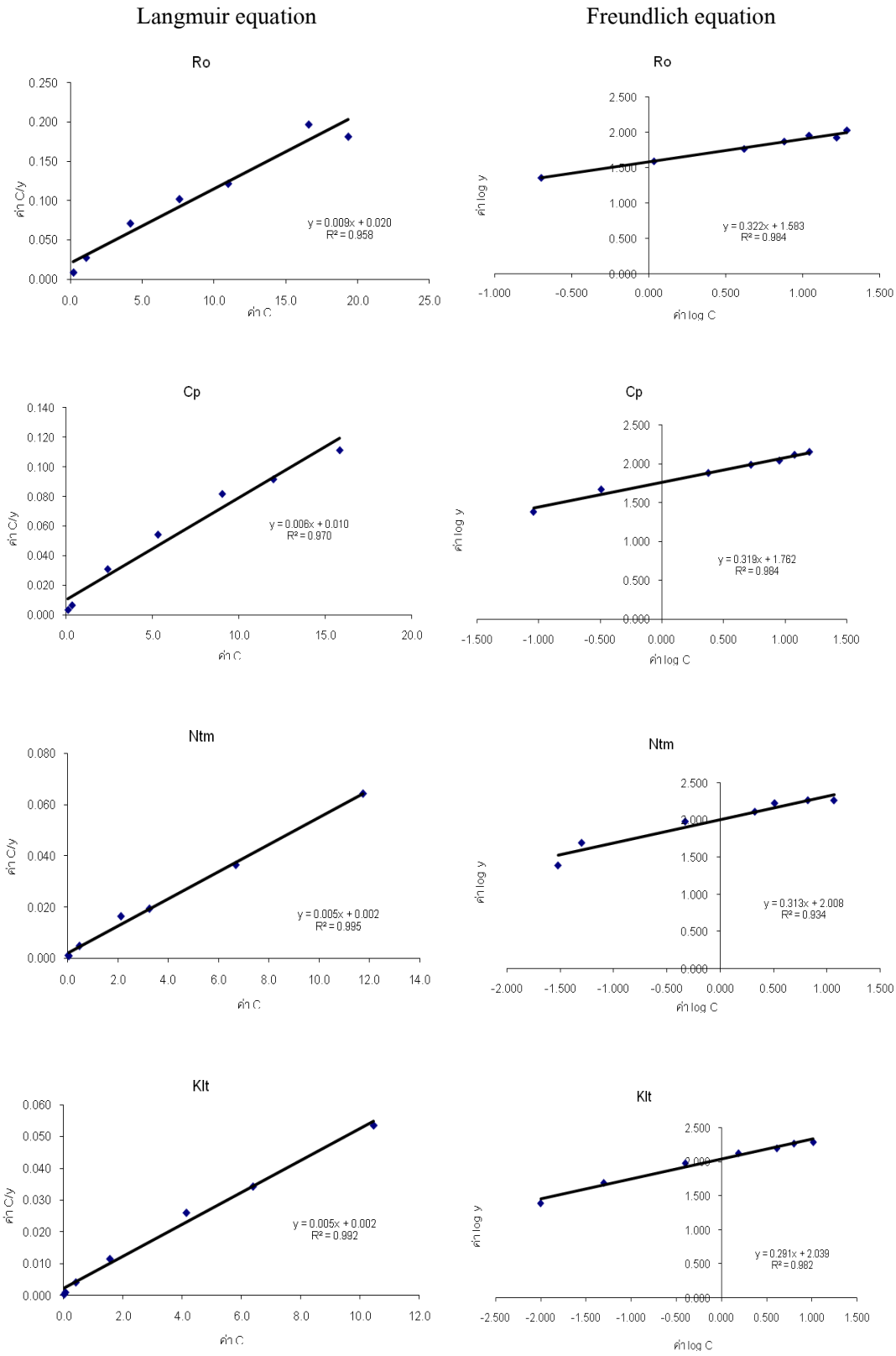
รูปผนวกที่ 1 ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)



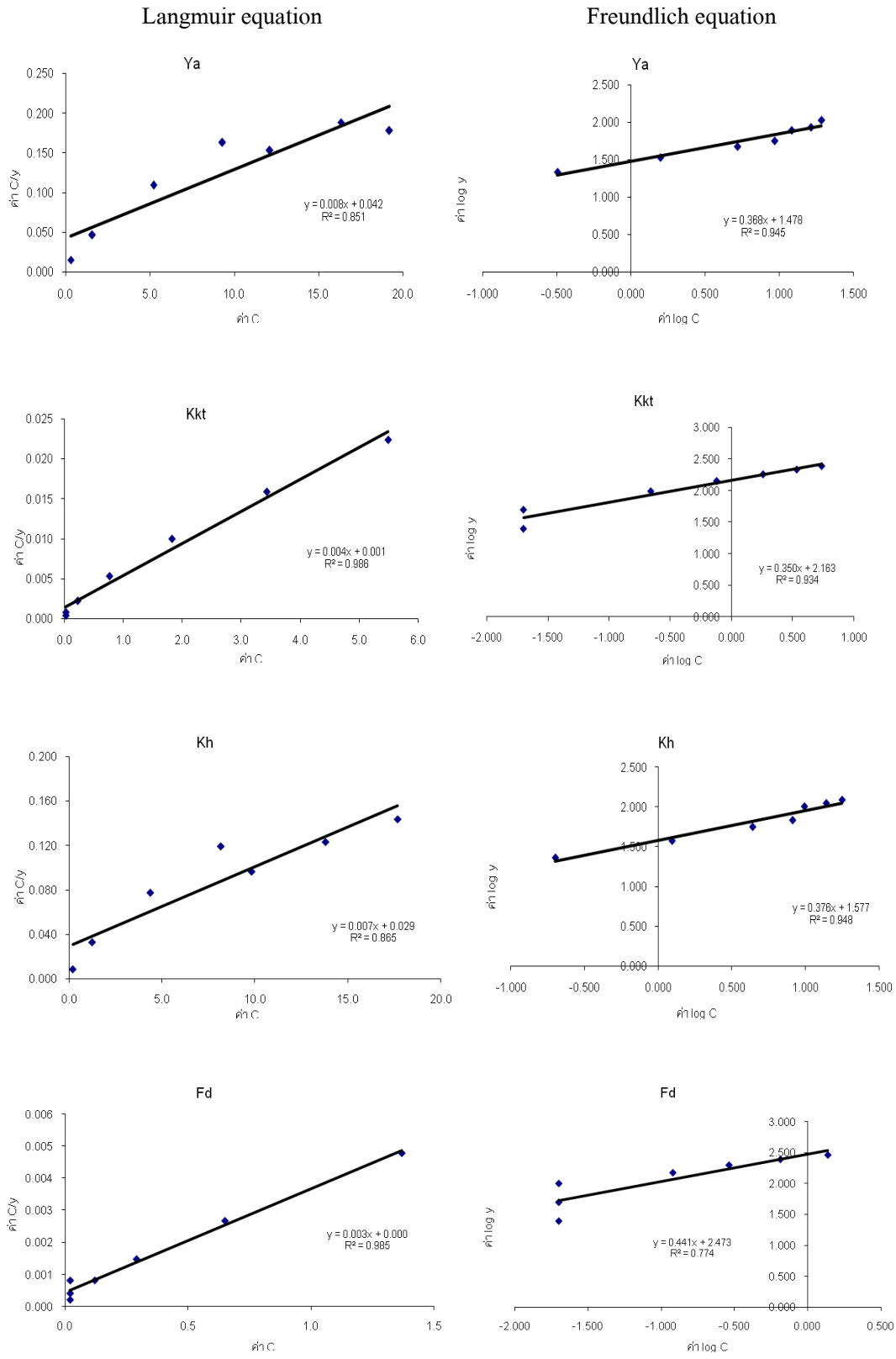
รูปผนวกที่ 1 ลักษณะการดูดซับ P ของชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)



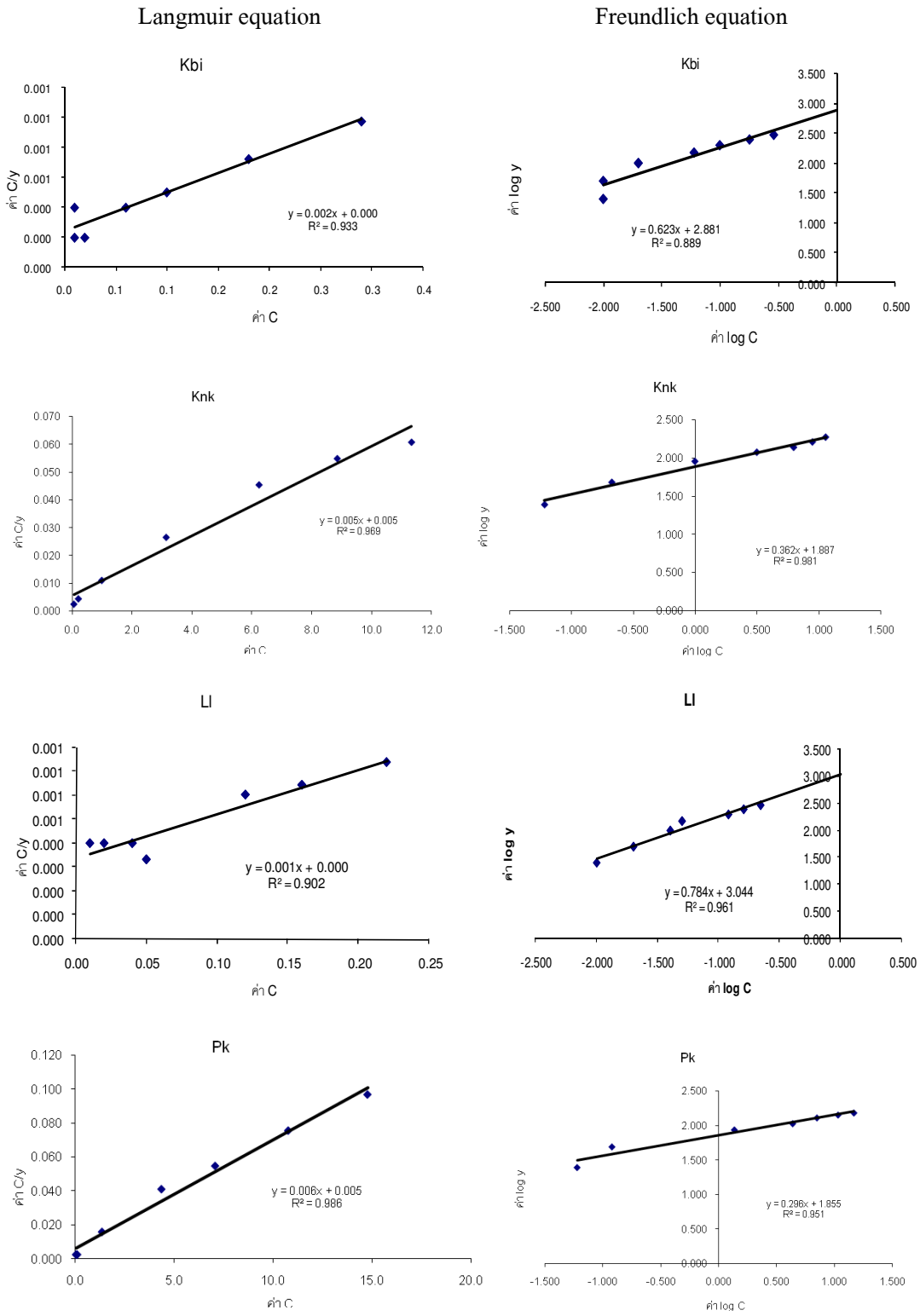
รูปผนวกที่ 2 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน)



รูปผนวกที่ 2 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)

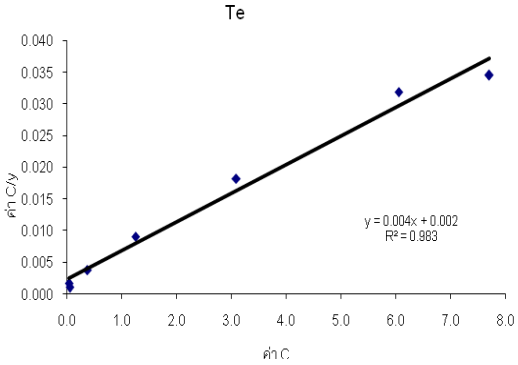


รูปผนวกที่ 2 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)

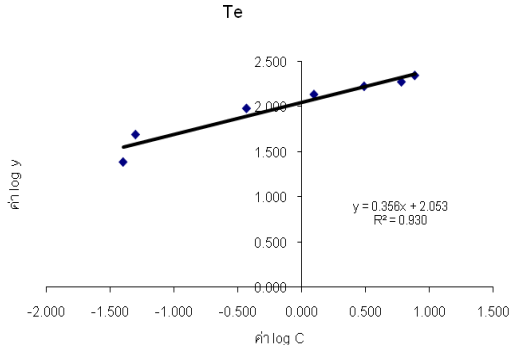


รูปผนวกที่ 2 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)

Langmuir equation



Freundlich equation



รูปผนวกที่ 2 การดูดซับ P โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ในชุดดินต่างๆ (17 ชุดดิน) (ต่อ)

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ, ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล และค่าวิเคราะห์ P ที่สกัดด้วย Bray ll ในการบ่มดินด้วย P ในอัตราต่างๆ

ชุดดิน	อัตรา P ที่เติม (mg P kg^{-1})	ความเข้มข้น P ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg P L^{-1})	ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับ (mg P kg^{-1})	ค่าวิเคราะห์ P (Bray ll) (mg P kg^{-1})
1. Ak	0	0.01	-0.14	3.30
	5	0.02	4.79	4.33
	10	0.03	9.71	5.08
	25	0.04	24.55	10.22
	50	0.06	49.40	23.97
	75	0.15	73.55	34.72
	100	0.24	97.60	59.66
2. Klt	0	0.03	-0.29	7.55
	5	0.04	4.63	9.89
	10	0.05	9.48	11.40
	25	0.08	24.17	19.72
	50	0.22	47.84	40.74
	75	0.53	69.74	55.91
	100	0.86	91.40	84.95
3.Cp	0	0.04	-0.45	3.82
	5	0.06	4.40	5.85
	10	0.09	9.09	7.07
	25	0.22	22.84	21.27
	50	0.64	43.65	34.88
	75	1.65	58.54	66.30
	100	3.16	68.43	112.51
4. Pk	0	0.07	-0.68	2.93
	5	0.07	4.32	4.79
	10	0.08	9.25	5.93
	25	0.14	23.62	25.95
	50	0.26	47.44	46.72
	75	0.57	69.32	83.86
	100	1.49	85.08	117.09
5. Kh	0	0.09	-0.91	12.10
	5	0.13	3.70	17.04
	10	0.21	7.91	24.90
	25	0.43	20.65	35.31
	50	1.69	33.06	87.95
	75	2.50	50.00	108.74
	100	4.90	51.04	137.82

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวจุฑารัตน์ เทพนวล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910620008

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549