



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา)

ปริญญา

ปฐพีวิทยา สาขา ปฐพีวิทยา
ปฐพีวิทยา ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Phosphorus Adsorption and Desorption of Acid Sulfate Soils with Residual Lime

นามผู้วิจัย นางสาวจิตติรัตน์ ชูชาติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ศุภิมา ธนะจิตต์, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์วันเพ็ญ วิริยะกิจนทีกุล, ปร.ด.)

รักษาราชการแทน

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Phosphorus Adsorption and Desorption of Acid Sulfate Soils with Residual Lime

โดย

นางสาวจิตติรัตน์ ชูชาติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิตติรัตน์ ชูชาติ 2554: การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา) สาขาวิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ศุภิมา ณะจิตต์, ปร.ด. 118 หน้า

ได้ทำการศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทย จำนวน 20 บริเวณ ประกอบด้วยชุดดินองครักษ์ (Ok) รังสิต (Rs) เสนา (Se) ัญบุรี (Tan) และบางน้ำเปรี้ยว (Bp) ชุดดินละ 4 บริเวณ โดย 3 บริเวณใช้ในการปลูกข้าว ในแต่ละชุดดินพบอิทธิพลของปูนตกค้างทำให้พีเอชสนามของดินบนสูงกว่า 5.0 และอีกหนึ่งบริเวณของทั้ง 4 ชุดดินเป็นพื้นที่ที่ร้างที่พีเอชสนามมีค่าต่ำกว่า 4.5 ผลการศึกษา พบว่า สมบัติทางเคมีและแร่วิทยาส่วนใหญ่ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างยังคงไม่เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะชั้นดินล่าง โดยดินทุกบริเวณมีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายแบ่งถึงดินเหนียว ดินยังคงเป็นกรดรุนแรงมากถึงกรดจัด โดยพีเอชที่วัดในน้ำมีค่าอยู่ในพิสัย 3.4-5.1 สอดคล้องกับสภาพกรดที่สกัด ได้ที่มีค่าสูง (26-45 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) และอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบสที่ต่ำ (21.7-32.7%) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินอยู่ในระดับสูงปานกลางถึงสูง (18.0-24.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) สอดคล้องกับองค์ประกอบเชิงแร่ที่มีสมกไทต์เป็นแร่เด่น รองลงมาได้แก่โอไลไนต์ และอิลไลต์ตามลำดับ ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในพิสัย 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัม แต่รูปที่เป็นประโยชน์พบอยู่ในปริมาณต่ำ (3.0-10.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูป $Fe-P > Al-P > Ca-P$ โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 6.4-44.3, 1.0-5.8 และ 0.2-0.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์กันแบบผกผัน ($r = -0.64^{***}$) กับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 425-912 และ 7.8-28.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุดเท่ากับ 599-912 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการปลดปล่อยออกมาต่ำที่สุด (11.7-16.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด และดินบนมีปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าดินล่างในทุกบริเวณ

การดูดซับฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับปริมาณเหล็กอิสระ ($r = 0.84^{***}$) และอะลูมิเนียมอิสระ ($r = 0.79^{***}$) การปลดปล่อยฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด ($r = 0.51^{***}$) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ($r = 0.64^{***}$) และมีสหสัมพันธ์ผกผันกับเหล็กอิสระ ($r = -0.62^{***}$) ดังนั้นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายปริมาณการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินตามลำดับ คือ “P adsorption = - 71.25 + 0.46Fe_d + 0.38Al_d” ($R^2 = 0.90^{**}$) และ “P desorption = 3.81 + 0.35Total P + 0.47Total Mg - 0.42Fe_d” ($R^2 = 0.83^{**}$)

Jittirat Choochat 2011: Phosphorus Adsorption and Desorption of Acid Sulfate Soils with Residual Lime. Master of Science (Soil Science), Major Field: Soil Science, Department of Soil Science.
Thesis Advisor: Miss Suphicha Thanachit, Ph.D. 118 pages.

A study on phosphorus adsorption and desorption of acid sulfate soils with residual lime was conducted in 20 locations in Central Plain, Thailand. They consisted of four locations each of Ongkharak (Ok), Rangsit (Rs), Sena (Se), Bang Nam Prieo (Bp) and Thanyaburi (Tan) soil series. Three locations of each soils were used for paddy rice having residual lime with field pH of topsoils higher than 5.0 and the other left idle area with field pH of lower than 4.5. Results revealed that most chemical and mineralogical properties of acid sulfate soils with residual lime have not been changed by the influence of lime, especially in subsoils. The soils from all locations have silty clay to clay texture. The pH of these soils is ultra to strongly acid (pH 3.4-5.1 in 1:1 H₂O) conforming to high extractable acidity (26-45 cmol_c kg⁻¹) and low base saturation percentage (21.7-32.7%). Their CEC is moderately high to very high (18.0-24.5 cmol_c kg⁻¹) corresponding to dominant clay mineral, smectite and with respective lower amount of kaolinite and illite. They have 0.1-2.7 g kg⁻¹ of total phosphorus but with very low availability (3.0-10.2 mg kg⁻¹). Inorganic phosphorus fractions are mostly in the forms of Fe-P > Al-P > Ca-P in the ranges of 6.4-44.3, 1.0-5.8 and 0.2-0.6 g kg⁻¹, respectively. Phosphorus adsorption has negative correlation ($r = -0.64^{***}$) with P desorption in the ranges of 425-912 and 7.8-28.0 mg kg⁻¹, respectively. Ongkharak soil has the highest P adsorption ranging between 599-912 mg kg⁻¹ and the lowest P desorption (11.7-16.7 mg kg⁻¹). The acid sulfate soils with residual lime have lower P adsorption compared to normal acid sulfate soils and their topsoils have lower P adsorption than do subsoils.

Phosphorus adsorption capacities show highly significantly linear correlation with crystalline Fe ($r = 0.84^{***}$) and amorphous Al ($r = 0.79^{***}$). Phosphorus desorption has statistically highly positive linear correlation with total magnesium ($r = 0.51^{***}$) and total phosphorus ($r = 0.64^{***}$), and a negative correlation with amorphous Fe ($r = -0.79^{***}$). The equations suitable for prediction of respective P adsorption and P desorption capacity are “P adsorption = $-71.25 + 0.46Fe_d + 0.38Al_o$ ” ($R^2 = 0.90^{**}$) and “P desorption = $3.81 + 0.35Total\ P + 0.47Total\ Mg - 0.42Fe_o$ ” ($R^2 = 0.83^{**}$).

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุภิญญา ชนะจิตต์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม และอาจารย์ ดร. วันเพ็ญ วิริยะกิจนทีกุล (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม) ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความช่วยเหลือด้านการเรียน และการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลี สุทธิประการ ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และศาสตราจารย์ ดร. เอิบ เขียวรัตน์รมณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบคุณสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดินที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์สมบัติทางแร่วิทยาและองค์ประกอบทางเคมีรวมของดิน ขอขอบคุณ คุณรฐนนท์ เจริญชาศรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ ดร. วรชาติ วิสวพิพัฒน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และคุณพหล รักสำราจ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างดินภาคสนาม และเพื่อน พี่ น้อง ชาวปฐพีวิทยาทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และมิตรภาพที่ดีเสมอมา

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณตา คุณย่า คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดของข้าพเจ้ามาจนถึงทุกวันนี้

จิตติรัตน์ ชูชาติ

มิถุนายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	103
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีรวมของดินที่ทำการศึกษา	54
2	ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	58
3	องค์ประกอบทางแร่วิทยาในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	60
4	ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงสุด พลังงานการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich	66
5	สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ประเมินด้วยสมการ Freundlich กับสมบัติของดิน (n= 40)	76
6	สมการที่ใช้ทำนายการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน	81
ตารางผนวกที่		
1	บริเวณเก็บตัวอย่างดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างที่ใช้ในการศึกษา	104
2	การกระจายขนาดอนุภาคดินและชั้นเนื้อดินของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	105
3	สมบัติทางเคมีของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	106
4	ปริมาณเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสที่สกัดได้ในรูปออกไซด์อิสระและสารอินทรีย์เชิงซ้อนของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	108
5	ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	109
6	Phosphorus buffer capacity ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด	110
7	สหสัมพันธ์ของสมบัติของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง	111
8	การแบ่งกลุ่มของเนื้อดิน	112
9	ข้อกำหนดที่ใช้ในการประเมินระดับสมบัติทางเคมี	113
10	การคาดคะเนระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน	114

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	พื้นที่ทำการศึกษาระดับภูมิภาคกลางของประเทศไทย	22
2	การใช้ประโยชน์ที่ดินของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างที่ใช้ในการศึกษา	24
3	การกระจายขนาดอนุภาคของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	31
4	การจำแนกประเภทเนื้อดิน ตามสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	32
5	พีเอชของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	34
6	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ของดินของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	36
7	ปริมาณเบสที่สกัดได้ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	39
8	ปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ ปริมาณกรดที่สกัดได้ และอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	40
9	ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และสภาพการนำไฟฟ้าของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	43
10	ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Fe_o), เหล็กในรูปอิสระ (Fe_f) และเหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Fe_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	47
11	ปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Al_o), อะลูมิเนียมในรูปอิสระ (Al_f) และอะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Al_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	48
12	ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Mn_o), แมงกานีสในรูปอิสระ (Mn_f) และแมงกานีสในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Mn_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสอินทรีย์ Fe-P, Al-P และ Ca-P ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	63
14	ปริมาณการดูดซับ และการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich	67
15	ลักษณะการดูดซับฟอสฟอรัสโดยใช้สมการ Freundlich ของดินของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	68
16	ลักษณะการปลดปล่อยฟอสฟอรัสโดยใช้สมการ Freundlich ของดินของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	70
17	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด	71
18	Phosphorus buffer capacity ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด	73
19	การวิเคราะห์สถิติแบบแบ่งกลุ่ม เพื่อการจัดกลุ่มสมบัติของดิน (ก) และการจัดกลุ่มของชุดดิน (ข)	74
20	สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับพีเอช และปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดในดิน (n= 40)	78
21	สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับเหล็กออกไซด์ สถานะ เหล็กอิสระ และอะลูมิเนียมออกไซด์ (n= 40)	79
22	การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ได้จากสมการที่ใช้ในการทำนายเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จริง (n= 40)	82

การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Phosphorus Adsorption and Desorption of Acid Sulfate Soils with Residual Lime

คำนำ

ดินเปรี้ยวจัดเป็นดินที่มีปัญหาทางการเกษตร โดยทั่วไปพบจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารประกอบจาโรไซต์ (jarosite) ในชั้นใดชั้นหนึ่งของหน้าตัดดิน (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Dent and van Mensvoort, 1993; Dent and Pons, 1995; Husson *et al.*, 2000; Burton *et al.*, 2006) มีความเป็นกรดรุนแรง พีเอชดินต่ำกว่า 4 ส่งผลให้เหล็ก อะลูมิเนียม และซัลเฟตละลายออกมามากจนก่อให้เกิดความเป็นพิษ รวมทั้งมีธาตุอาหารต่ำ โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส (Attanandana, 1982; Dent, 1986; Violante *et al.*, 1991; Dent and Pons, 1995; Curtin and Syers, 2001; Brady and Weil, 2008) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีอยู่มากจะดูดซับฟอสฟอรัสทำให้ความเป็นประโยชน์ลดต่ำลง (Khare *et al.*, 2004) ดินเปรี้ยวจัดมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสสูงมากกว่าดินนาทั่วไป (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993; Quang and Dufy, 1995) อย่างไรก็ตามการดูดซับหรือปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินจะมีความสัมพันธ์กับรูปของเหล็ก พีเอชดิน และคาร์บอนิกซ์ เมื่อมีการขังน้ำฟอสฟอรัสในดินจะถูกควบคุมโดยเหล็กออกไซด์ (Sah and Mikkelsen, 1986b) และช่วยส่งเสริมให้ดินปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ดีกว่าในสภาพที่ไม่มีการขังน้ำ เนื่องจากพีเอชของดินกรดจะสูงขึ้นเมื่อมีการขังน้ำ (Krairapanond *et al.*, 1993) มีรายงานว่าดินนาในอันดับเอ็นทิซอลล์ และอัลทิซอลล์ ในประเทศจีน มีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสค่อนข้างคงที่หลังจากการขังน้ำไปแล้ว 7 วัน และเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ฟอสฟอรัสจะเริ่มถูกปลดปล่อยออกมา (Zhang *et al.*, 2003) เช่นเดียวกับ Shahandeh *et al.* (2003) ที่ศึกษาพบว่าหลังจากดิน Oxyaquic Dystruderts ขังน้ำเป็นเวลา 35 วัน ดินจะปลดปล่อยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 0.06 ถึง 0.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กและแมงกานีส

ในประเทศไทย ดินเปรี้ยวจัดส่วนใหญ่พบมากบริเวณที่ราบลุ่มใกล้ชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่เคยมีน้ำทะเลท่วมถึง โดยเฉพาะที่ราบลุ่มภาคกลางซึ่งเป็นแหล่งผลิตข้าวที่สำคัญ (Attanandana, 1982; Dent and van Mensvoort, 1993; Dent and Pons, 1995) ทำให้ผลผลิตข้าวต่ำมากถึงแม้ว่าจะมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพิ่มเติมก็ตาม เนื่องจากความเป็นกรดที่รุนแรงของดิน (Attanandana, 1982;

Attanadana and Vacharotayan, 1986) เกษตรกรส่วนใหญ่จึงมีความจำเป็นที่ต้องใส่ปุ๋ยเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ถึงแม้ว่าการใส่ปุ๋ยแต่ละครั้งมีผลตกค้างในดินนาน 4-5 ปี (Panichapong, 1982) แต่มีรายงานว่าในกรณีของดินเปรี้ยวจัดนั้นอิทธิพลของปุ๋ยจะแสดงเฉพาะในฤดูกาลเพาะปลูกเท่านั้น เมื่อดินแห้งก็จะเกิดความกรดขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง (Van Mensvoort and Le Quang Tri, 1988; Brinkman *et al.*, 1993) ดังนั้นเกษตรกรมีความจำเป็นที่จะต้องใส่ปุ๋ยอย่างต่อเนื่องในการทำการเกษตรเพื่อให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ โดยเฉพาะช่วง 20 ปีที่ผ่านมา จึงน่าที่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติดิน โดยเฉพาะดินบน และอาจส่งผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน โดย Ogunwale and Shamshuddi (1999) รายงานว่าการใส่ปุ๋ยในอัตรา 1 ตันต่อเฮกตาร์ ในดินเปรี้ยวจัดที่มีพีเอชอยู่ในพิสัย 2.97-3.36 ส่งผลให้อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลงร้อยละ 3.1-13.1 เนื่องจากการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยยังคงมีน้อย จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวกับสมบัติของดินเปรี้ยวจัดที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม รวมทั้งใช้เป็นแนวทางในการจัดการดินทางการเกษตรให้เหมาะสมกับสภาพของดินที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะการจัดการปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมกับความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสในสภาพปัจจุบันของดิน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และแร่วิทยาของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
2. ศึกษาปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับสมบัติของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง



การตรวจเอกสาร

1. นิยามและความหมายของดินเปรี้ยวจัด

ดินเปรี้ยวจัด (Acid sulfate soils) หมายถึง ดินที่มีสารประกอบไพไรต์ (pyrite) เป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชันจะทำให้เกิดกรดกำมะถันและฤทธิ์ของความเป็นกรดมักรุนแรงพอที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อพืชที่ปลูกได้ ดินชนิดนี้มักพบสารประกอบจาโรไซต์ (jarosite) ที่มีสีเหลืองฟางข้าวในชั้นใดชั้นหนึ่งของหน้าตัดดินภายใน 150 เซนติเมตร (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Dent and van Mensvoort, 1993; Dent and Pons, 1995; Husson *et al.*, 2000; Burton *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นตัวบ่งระดับความรุนแรงของความเป็นกรดในดิน กล่าวคือ ถ้าพบจาโรไซต์ในปริมาณมากและอยู่ในระดับใกล้ผิวดิน ระดับความเป็นกรดจะรุนแรงมากกว่าเมื่อพบในระดับที่ลึกกว่า (van Breeman and Pons, 1978; Fitzpatrick *et al.*, 1998; Andriessse and Mensvoort, 2006)

van der Kevie (1972) ได้ให้คำจำกัดความของดินเปรี้ยวจัดไว้ว่าเป็นดินที่มีแคตเคลย์ (cat clay) ซึ่งหมายถึงดินเหนียวที่มีสารประกอบเหล็กซัลไฟด์ หรือวัสดุซัลไฟด์ (sulfidic material) ที่มีกรดกำมะถันเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ซึ่งเกิดจากการสะสมของตะกอนน้ำกร่อย ซึ่งมีสารประกอบเกลือซัลเฟต และเมื่อมีการระบายน้ำและมีอากาศถ่ายเทจะทำให้เกิดสารประกอบจาโรไซต์ และกรดกำมะถัน เป็นสาเหตุที่ทำให้ดินเปรี้ยวหรือเป็นกรดจัด โดยทั่วไปดินมีพีเอชต่ำกว่า 4 และพบจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารประกอบจาโรไซต์ในตอนล่างของหน้าตัดดิน ปะปนอยู่กับจุดประอื่น ๆ ที่เกิดจากสารประกอบเหล็ก และแมงกานีส

Moorman (1963) ได้เสนอว่าดินเปรี้ยวจัดควรรวมไปถึงดินโคลนและที่พีเอชของดินไม่ได้เป็นกรดที่เรียกว่า non-acid mud clay แต่มีสารประกอบเหล็กซัลไฟด์อยู่ในหน้าตัดดินในปริมาณที่สูงด้วย เนื่องจากเมื่อมีการระบายน้ำออก สารประกอบซัลไฟด์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนไปเป็นกรดกำมะถัน มีผลทำให้ดินเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งเรียกดินพวกนี้ว่าดินที่มีศักยภาพที่จะเป็นดินเปรี้ยวจัด (potential acid sulfate soils) ซึ่งเป็นการนิยามดินเปรี้ยวจัดตามความหมายของดินเปรี้ยวจัดที่หมายถึง ดินที่กำลังมี อาจมี หรือได้มีกรดกำมะถันเกิดขึ้นในหน้าตัดดิน ซึ่งความเป็นกรดนี้มากพอที่จะมีผลต่อสมบัติของดิน

Soil Survey Staff (2006) ได้ให้คำจำกัดความของดินเปรี้ยวจัดว่า เป็นดินที่มีชั้นดินวินิจัยซัลฟิวริก (sulfuric horizon) ซึ่งเป็นชั้นดินแร่ที่เกิดใต้ชั้นดินบน มีความหนาตั้งแต่ 15 เซนติเมตรขึ้น

ไป ประกอบด้วยวัสดุอินทรีย์หรือวัสดุอนินทรีย์ที่มีค่าพีเอช (1:1 น้ำ) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.5 และพบจุดประของจาโรไซต์ หรือวัสดุซัลไฟด์อยู่ข้างล่าง หรือมีปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ตั้งแต่ร้อยละ 0.05 ขึ้นไป ซึ่งวัสดุซัลไฟด์ (sulfidic material) หมายถึง วัสดุอินทรีย์หรือวัสดุอนินทรีย์ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ในสภาพน้ำยังมีค่าพีเอชมากกว่า 3.5 เมื่อนำมาวางในสภาพอุณหภูมิห้อง ภายใน 8 สัปดาห์ ค่าพีเอช (1:1 น้ำ) จะลดลง 0.5 หน่วยหรือมากกว่า จนพีเอชมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4.0

Brinkman and Pons (1973) และ Fitzpatrick *et al.* (1998) ได้จำแนกดินเปรี้ยวจัดออกเป็น 3 กลุ่ม และได้นิยามของความหมายดินเปรี้ยวจัดแต่ละกลุ่มไว้ดังนี้

ดินเปรี้ยวจัดศักยภาพ (Potential acid sulfate soils) หมายถึงดินที่มีศักยภาพที่เป็นดินเปรี้ยวจัด มีกำเนิดมาจากตะกอนน้ำกร่อย (marine sediments) มีปริมาณซัลไฟด์สูง โดยเฉพาะแร่ไพไรต์ (FeS_2) สูงประมาณร้อยละ 1-2.5 (van Breeman, 1993) โดยทั่วไปมักพบในสภาพขังน้ำหรือยังไม่ได้มีการระบายน้ำออก ดินบนมีพีเอชเป็นกลางหรือด่างอ่อน (pH 7.0-8.0) หากมีการระบายน้ำออกจากดิน อากาศถ่ายเทดี ไพไรต์จะถูกออกซิไดส์เกิดกรดกำมะถันดินจะมีปฏิกิริยาเป็นกรดรุนแรง ทำให้กลายเป็นดินเปรี้ยวจัดที่แท้จริง

ดินเปรี้ยวจัดแท้จริง (Actual or mature acid sulfate soils) หมายถึงดินเปรี้ยวจัดที่กำลังมีกรดกำมะถันเกิดขึ้นในดิน ประกอบด้วยสารประกอบซัลเฟตของอะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งมีความเข้มข้นมากพอที่จะเป็นอุปสรรคต่อพืชที่ปลูกได้ มีอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในปริมาณสูง มีพีเอชต่ำกว่า 4.0 และพบสารประกอบจาโรไซต์ บางครั้งอาจพบจุดประสีขาวของสารประกอบอะลูมิเนียมซัลเฟตปะปนอยู่ด้วย

ดินเปรี้ยวจัดเทียม (Para or pseudo acid sulfate soils) หมายถึงดินที่เคยมีกรดกำมะถันเกิดขึ้นมาแล้ว แต่ต่อมารวดส่วนใหญ่ถูกชะล้างหายไป หรือถูกทำลายไป (ถูกสะเทินโดยสารประกอบคาร์บอเนต) จนมีปริมาณเหลือเพียงเล็กน้อย (pH > 4.0) ผลของการสะเทินของกรดโดยสารประกอบคาร์บอเนต จะพบแร่ิปซัมอยู่ในดิน และพบจาโรไซต์ในดินชั้นล่าง

2. สภาพแวดล้อม และการเกิดดินเปรี้ยวจัด

โดยส่วนใหญ่แล้วดินเปรี้ยวจัดเป็นดินที่เกิดจากตะกอนน้ำกร่อย (brackish water sediment) หรือตะกอนน้ำทะเล (sea water sediment) ซึ่งมีสารประกอบซัลไฟด์ในรูปแร่ไพไรต์ เมื่อถูกออกซิไดซ์จะเกิดเป็นสารประกอบจาโรไซต์ในหน้าตัดดินและมีกรดกำมะถัน (sulfuric acid) เกิดขึ้น ส่งผลให้ดินเป็นกรดจัดมาก

Pons and van der Kevie (1969) ได้อธิบายถึงลักษณะการเกิดดินเปรี้ยวจัดซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ กระบวนการทางธรณีวิทยา (geogenetic process) เป็นกระบวนการเกิดวัตถุต้นกำเนิดดินเปรี้ยวจัด และกระบวนการทางปฐพีวิทยา (pedogenetic process) เป็นกระบวนการเกิดดินเปรี้ยวจัดที่เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์สารไพไรต์ เกิดเป็นกรดกำมะถันและสารประกอบอื่น

2.1 กระบวนการทางธรณีวิทยา (geogenetic process) เป็นกระบวนการที่ทำให้ดินมีการสะสมตะกอนและเกิดสารประกอบไพไรต์ (FeS_2) โดยตะกอนที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำและน้ำทะเล จะเกิดการตกตะกอนทับถมกันอาจมีตะกอนของซัลไฟด์ โดยเฉพาะไพไรต์รวมอยู่ด้วยจากการทับถมเป็นเวลานาน ทำให้พืชพรรณตามธรรมชาติเริ่มขึ้น เมื่อดินเริ่มมีการสะสมอินทรีย์วัตถุ และมีน้ำแช่ขังตลอดเวลาทำให้ดินเกิดสภาพขาดออกซิเจน เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์พวก *Desulfovibrio sp.* และ *Desulfotomaculum sp.* ประกอบกับได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเล ซึ่งเป็นแหล่งของซัลเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ทำให้มีการเกิดตะกอนของไพไรต์และมีการสะสมตัวอย่างช้า ๆ และถ้าเวลานานขึ้น ปริมาณของไพไรต์ที่สะสมอาจสูงได้ถึงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับน้ำหนักดิน (Van Breeman and Pons, 1978)

ปฏิกิริยารวมของการเกิดไพไรต์ที่จะเปลี่ยนซัลเฟตเป็นซัลไฟด์และเปลี่ยนไปเป็นไดซัลไฟด์แสดงดังนี้



2.2 กระบวนการสร้างดินทางปฐพีวิทยา (Pedogenetic process) หรือการเติมออกซิเจนของไพไรต์ จะเริ่มเกิดจากการที่ดินมีช่วงแห้งเกิดขึ้นในบางช่วงของรอบปี การเปลี่ยนแปลงทางธรณีลักษณะ เช่น การถอยร่นของหน้าดิน หรือจากการระบายน้ำออก ทำให้พื้นที่นั้นน้ำไม่ท่วมอย่างถาวรอีกต่อไป

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ดินแปรสภาพทางกายภาพ ทางชีวะ และทางเคมี โดยอาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันหรือใกล้เคียงกัน

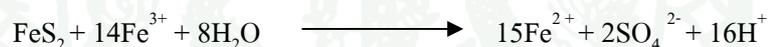
van Breeman (1982) ได้อธิบายว่าไพไรต์ จะถูกออกซิไดส์ได้ FeSO_4 และ H_2SO_4 ซึ่งเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



เมื่อการออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสของเหล็กเกิดอย่างสมบูรณ์แล้ว จะได้เฟร์ริกออกไซด์และกรดกำมะถันดังสมการ



ไพไรต์จะถูกออกซิไดส์โดยการทำปฏิกิริยากับเฟร์ริกไอออนที่ละลายได้ดังสมการ



ซึ่งเฟร์ริกไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากแร่ไพไรต์ อาจกล่าวได้ว่าเฟร์ริกไอออนสามารถทำการออกซิไดส์ไพไรต์ได้เรื่อย ๆ ตราบเท่าที่ยังมีไอออนนี้อยู่ในดิน และจะทำปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็นตะกอนของสารประกอบจาโรไซต์ ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) และแร่เกอไทต์ (goethite, FeOOH) และเกิดออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเฟร์ริกอลัฐานด้วย (van Breemen, 1982)

ดังนั้นความเป็นกรดที่รุนแรงของดินเปรี้ยวจัดนี้เกิดจากไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นในสมการดังกล่าว และเกิดจากการ hydrolysis ของแร่จาโรไซต์ ดังนั้นความรุนแรงของกรดขึ้นอยู่กับระดับความลึกของดินที่พบแร่จาโรไซต์ อย่างไรก็ตามความแห้งแล้งที่ต่อเนื่องยาวนานอาจเพิ่มความเป็นกรดของดินได้ เพราะเกลือที่เคลื่อนย้ายขึ้นมาจากชั้นดินล่างนั้นเป็นเกลือกรด (acidic salt) (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000)

3. สมบัติบางประการของดินเปรี้ยวจัด

ดินที่มีสมบัติเป็นดินเปรี้ยวจัดมีทั้งดินอินทรีย์และดินแร่ธาตุ เป็นได้ทั้งดินเนื้อหยาบและดินเนื้อละเอียด และมีทั้งดินกรดจัดที่มีสารประกอบจาโรไซต์ และไม่มีสารประกอบจาโรไซต์ในหน้าตัดดิน

ดินเปรี้ยวจัดที่เป็นดินแร่ธาตุ ส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อละเอียดตลอดหน้าตัดดิน ดินบนมีสีดำและเทาอ่อนในดินชั้นล่าง พบจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารประกอบจาโรไซต์ในดินชั้นล่างภายในระดับความลึกไม่เกิน 1.50 เมตร โดยชั้นนี้จะมีความเป็นกรดรุนแรงมากโดยทั่วไปพีเอชมีค่าต่ำกว่า 4.0 (van der Kevie, 1972; van Breemen and Harmsen, 1975) ส่วนชั้นดินที่ถัดลงมาจะเป็นชั้นดินเหนียวที่ไม่มีโครงสร้าง (โคลน) มีสีเทาปนน้ำเงิน หรือเทาเข้ม ซึ่งพีเอชของชั้นนี้จะเป็นค่า (Dent, 1986)

ดินเปรี้ยวจัดที่พบมากในบริเวณด้านตะวันตกเฉียงเหนือของดินคอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขง ส่วนใหญ่จะเป็นดินที่มีสัคย์เป็นกรด มีปริมาณซัลเฟต อะลูมินัม และเหล็กในสารละลายดินสูงพบสารประกอบไพไรต์ในระดับที่ลึกมาก และไม่พบจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารประกอบจาโรไซต์ในหน้าตัดดิน โดยทั่วไปดินล่างจะมีสีน้ำตาลเข้ม (10YR 4/3) จนถึงสีเทาเข้ม (10YR 4/1) อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการสัมผัสกับอากาศ ดินชั้นล่างจะมีสีเทาเข้มเพิ่มมากขึ้น (N 3/1) นอกจากนี้ ดินเหล่านี้มีสัมประสิทธิ์การนำน้ำเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำ (Van Mensvoort and Le Quang Tri, 1988)

van Breeman (1976) รายงานว่า ดินเปรี้ยวจัดในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย ชั้นดินบนมีความหนาอยู่ในพิสัย 20-60 เซนติเมตร มีสีเทาเข้มถึงดำ (10YR 3/2-2/1) ชั้นดินล่างมีสีน้ำตาลปนเทา (2.5YR 5/2) ตอนบนของชั้นดินล่างมีจุดประสีแดง (7.5YR 5/6) หรือสีน้ำตาลปนเหลือง (10YR 5/6) ของสารประกอบเหล็ก ในขณะที่ตอนล่างของชั้นดินล่างพบจุดประสีเหลือง (2.5Y 8/5) ของสารประกอบจาโรไซต์ที่ระดับความลึกประมาณ 1-2 เมตร

การศึกษาของ Pons and van der Kevie (1969) พบว่าดินเปรี้ยวจัดแฝงในประเทศไทย มีการกระจายขนาดอนุภาคขึ้นกับลักษณะของตะกอน โดยส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดดินเหนียวสูงที่สุด ส่วนบริเวณที่เป็นคาบสมุทรทางภาคใต้นั้นจะมีการกระจายของอนุภาคขนาดทรายแป้งด้วย หรือมีบางพื้นที่ที่พบชั้นของดินพิต โดยดินเปรี้ยวจัดมีความหนาแน่นรวมของดินอยู่ในพิสัย

0.7-1.3 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สภาพการนำน้ำของดินอิมตัวด้วยน้ำมีค่าอยู่ในพิสัย 0.3-1.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีค่า n -value น้อยกว่า 0.7 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์มีค่าอยู่ในพิสัย 20-120 กรัมต่อกิโลกรัม ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีค่าอยู่ในพิสัย 20-40 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมสูง พิเอชของดินในสภาพธรรมชาติที่มีการขังน้ำอาจสูงมากกว่า 7 แต่เมื่อดินแห้ง พิเอชจะต่ำกว่า 3.5 นอกจากนี้ดินเปรี้ยวจัดที่พบเหล่านี้ บางบริเวณมีปริมาณเกลือที่ละลายได้สูงโดยอาจมีสภาพการนำไฟฟ้าสูงถึง 8 เดซิซิเมนต์ต่อเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของน้ำทะเล ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมต่ำ แต่มีปริมาณของโซเดียมและซัลเฟอร์สูง

ดินเปรี้ยวจัดส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวสมกไทต์ ซึ่งมักพบดินเหล่านี้ในประเทศไทย ญี่ปุ่น มาเลเซีย และพม่า ในขณะที่มีรายงานว่าแร่ดินเหนียวเวอร์มิคิวไลต์ หรือ อิลไลต์พบมากในดินเปรี้ยวจัดในประเทศบังคลาเทศ และอินเดีย (Kyuma, 2004) ส่วนดินเปรี้ยวจัดในประเทศเวียดนามนั้นจะมีแร่ดินเหนียวเคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ สำหรับดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยที่มีพัฒนาการมาจากตะกอนน้ำกร่อย แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่ที่พบจะอยู่ในกลุ่ม Al-interlayered mineral และยังมีบางพื้นที่ที่เกิดจากการทับถมของตะกอนแม่น้ำจะมีองค์ประกอบเป็นแร่ดินเหนียวอิลไลต์มากกว่าแร่ดินเหนียวเคโอลิไนต์ (Kawaguchi and Kyuma, 1977)

4. การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัด

4.1 ความหมายของการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

การดูดซับฟอสฟอรัส (phosphorus adsorption) เป็นกระบวนการที่ฟอสฟอรัสถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของของแข็ง (solid-phase surface) ในดิน เกิดการสร้างพันธะที่แข็งแรงกว่าพันธะอิเล็กตรอนธรรมดา (simple electrostatic bond) ดังนั้นการดูดซับฟอสฟอรัสจึงเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ของสาร (inner-sphere ligand exchange) เมื่อเติมฟอสฟอรัสลงไปในดิน อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสบนผิวหน้าของส่วนที่เป็นของแข็ง (solid phase) ในดินจะเกิดอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะเริ่มลดลงจนกระทั่งถึงที่และเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium) (Frossard *et al.*, 1995)

กระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสในดินเกิดขึ้นจากการสร้างพันธะของฟอสฟอรัสกับสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ของสารต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (inorganic P) ในดิน ซึ่งทำให้เกิดฟอสฟอรัสในรูปแบบต่าง ๆ (P forms หรือ P fractions) ได้แก่ สารฟอสฟอรัสที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินที่มีสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Torrent, 1997) หรือฟอสฟอรัสที่ดูดซับอยู่ที่ขอบผลึกแร่ดินเหนียว และแคลไซต์ (Violante and Gianfreda, 1995; He *et al.*, 1999) นอกจากนี้แล้วการดูดซับฟอสฟอรัสยังมีความสัมพันธ์กับประจุพื้นแปรของดินอีกด้วย (Violante and Gianfreda, 1995)

การปลดปล่อยฟอสฟอรัส (phosphorus desorption) เป็นกระบวนการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากการสร้างพันธะกับผิวอนุภาคของสารที่เป็นของแข็ง (soil solid phase) ออกสู่สารละลาย ซึ่งอัตราการปลดปล่อยนี้ขึ้นอยู่กับรูปของฟอสฟอรัสในดิน (P forms หรือ P fractions) ซึ่งกระบวนการนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสกับรูปแบบในการสร้างพันธะต่าง ๆ ของฟอสฟอรัสกับของแข็ง (Barrow, 1985) ซึ่งรูปของฟอสฟอรัส ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่จับกับหมู่ไฮดรอกซิลจากสารอนินทรีย์ที่เกิดลิแกนด์กับเหล็กและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ชนิดต่าง ๆ (OH-Fe / OH-Al species) หรือฟอสฟอรัสในรูปที่เกิดพันธะกับสารประกอบพวก organo-mineral complexes กระบวนการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นเมื่อมีการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับสารประกอบต่าง ๆ แทนที่ฟอสฟอรัส ซึ่งมีความสำคัญมากต่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (Violante *et al.*, 1991; Violante and Gianfreda, 1995)

4.2 ฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัด

โดยทั่วไปดินเปรี้ยวจัดมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสสูงมากกว่าดินนาทั่วไป (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993; Quang and Dufy, 1995) ทั้งนี้เนื่องจากพีเอชที่เป็นกรดรุนแรง ส่งผลให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมามาก จึงดูดซับกับฟอสฟอรัสทำให้ความเป็นประโยชน์ลดต่ำลง พืชจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (Violante *et al.*, 1991; Curtin and Syers, 2001; Khare *et al.*, 2004; Brady and Weil, 2008) โดยหลังจากการขังน้ำ 1 วัน ฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไป ในดินร้อยละ 90 จะถูกตรึงโดยเหล็กและอะลูมิเนียมในรูปที่ละลายน้ำหรือแลกเปลี่ยนได้ รวมทั้งไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กและอะลูมิเนียม (Sanyal *et al.*, 1993; Violante and Gianfreda, 1993; Violante and Gianfreda, 1995) ส่งผลให้ฟอสฟอรัสเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการทำเกษตร

Sanyal *et al.* (1993) พบว่า ดินเปรี้ยวจัดในอันดับเอ็นทิซอลส์ และอินเซปทิซอลส์ ที่มีพีเอชอยู่ในพิสัย 3.13-4.40 ในเอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จำนวน 6 บริเวณ ดินมีการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 1797–3004 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชและปริมาณเหล็กกัมมันต์ในดิน โดยพีเอชที่ต่ำและปริมาณเหล็กที่สูงจะมีแนวโน้มให้ดินดูดซับฟอสฟอรัสไว้มากกว่า แต่ McGechan and Lewis (2002) ได้รายงานว่า ดินกรดในประเทศสเปนมีปริมาณดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าที่พบในเขตร้อน โดยมีปริมาณอยู่ในพิสัย 5-778 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกของดิน

สัมฤทธิ์ (2544) รายงานว่า ดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิตกรดจัดมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่าชุดดินรังสิตและชุดดินมโนรมย์ และเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราสูงขึ้นไปจะส่งผลให้การดูดซับฟอสฟอรัสของดินทั้งสามเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใส่ปุ๋ยอัตรา 50 มิลลิกรัม P_2O_5 ต่อกิโลกรัม ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับ 49.7, 49.3 และ 49.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยเป็น 300 มิลลิกรัม P_2O_5 ต่อกิโลกรัม ส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 289.0, 231.3 และ 217.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อคิดเป็นร้อยละการดูดซับฟอสฟอรัสของแต่ละอัตรากลับมีค่าลดลงจาก 99.3, 98.7 และ 98.0 เป็น 96.3, 77.1 และ 72.6 สำหรับดินทั้งสาม ตามลำดับ

4.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัด

ความสามารถในการดูดซับหรือปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการเกษตรและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินจะขึ้นกับสมบัติดิน เช่น อินทรีย์วัตถุ รูปของเหล็ก พีเอช คาร์บอกซ์ ชนิดของแร่ดินเหนียว เป็นต้น (Dabin, 1980; Attanandana, 1982; Sanyal *et al.*, 1993; Violante and Gianfreda, 1993; Violante and Gianfreda, 1995; He *et al.*, 1999)

4.3.1 พีเอชของดิน

ฟอสฟอรัสในสารละลายดินเป็นแอนไอออนของกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) รูปของแอนไอออนจึงมีได้สามแบบขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายดิน เมื่อพีเอชของดินต่ำกว่า 6.8 รูปที่เป็นประโยชน์และมีอยู่มากได้แก่ $H_2PO_4^-$ ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ง่ายที่สุดที่พีเอชระหว่าง 6.8-7.2 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของ HPO_4^{2-} เป็นส่วนใหญ่ พืชดูดใช้ได้ช้ากว่าในรูป

H_2PO_4^- และในกรณีที่มีพีเอชสูงกว่า 7.2 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของ PO_4^{3-} ซึ่งพืชดูดใช้ได้ยาก ดังนั้น ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะเป็นประโยชน์ที่สุดเมื่อพีเอชประมาณ 6.5 อย่างไรก็ตามหากพีเอชต่ำกว่านี้ ฟอสฟอรัสเหล่านี้จะถูกดูดซับโดยเหล็ก และอะลูมิเนียมออกไซด์ เกิดการตกตะกอนเป็นสารประกอบ AlPO_4 และ FePO_4 และในกรณีที่มีพีเอชสูงกว่า 7 ฟอสฟอรัสก็จะตกตะกอนกับ Ca^{2+} เกิดเป็นแร่ที่มีแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Ca-P mineral) (Havlin *et al.*, 2005)

4.3.2 แคลไออนในดิน

ชนิดและปริมาณแคลไออนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสฟอรัส Stoop (1983) รายงานว่าเมื่อเติมโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) ลงในดินแล้ว บ่มดินในสารละลาย 0.01M CaCl_2 , 0.01M MgCl_2 และ 0.01M KCl จะทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในดินที่บ่มในสารละลาย 0.01M KCl สูงกว่าสารละลาย 0.01M MgCl_2 และสารละลาย 0.01M CaCl_2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมมีบทบาทในการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่าแมกนีเซียม และโพแทสเซียม อย่างไรก็ตามมีรายงานโดย Iyamuremye *et al.* (1996) ที่พบว่าการใช้ปูนในดินที่เป็นกรด จะช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน และส่งเสริมให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาสู่สารละลายดินมากขึ้น

ในสภาพที่ดินเป็นกรดจะช่วยส่งเสริมให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมามาก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ H_2PO_4^- เกิดเป็นสารประกอบ hydroxy phosphate ที่ไม่ละลายน้ำ (Tanada and Navasero, 1966) โดย Havlin *et al.* (2005) รายงานว่าอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับฟอสฟอรัสมากกว่าเหล็ก เนื่องจากอะลูมิเนียม 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถตกตะกอนกับฟอสฟอรัสได้มากถึง 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสารละลายดิน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Khare *et al.* (2004) ที่รายงานว่าออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม เช่น เฟร์ริกไฮดรอกไซด์ และเบอห์ไมต์ เป็นตัวการสำคัญในดูดซับกับฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในสารละลายดิน แต่ในกรณีที่ดินเป็นด่าง ฟอสฟอรัสจะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแคลเซียมคาร์บอเนตแทน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ที่ไม่ละลายน้ำ (Sims and Pierzynski, 2005)

4.3.3 ชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียว

ชนิดของแร่ดินเหนียวมีผลต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน (Karim and Adams, 1984) ดินที่มีแร่โอไลไนต์เป็นองค์ประกอบเพียงอย่างเดียวจะตรึงฟอสฟอรัสได้มากกว่าดินที่มีแร่โอไลไนต์ผสมกับเวอร์มิคิวไลต์ (Sree Ramulu *et al.*, 1967) ในทำนองเดียวกัน Havlin *et al.* (2005) รายงานว่า แร่ดินเหนียวโอไลไนต์ และอิลไลต์มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่าแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากแร่โอไลไนต์มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในชั้น Al interlayer มากแสดงให้เห็นว่าแร่ดินเหนียวที่มีหมู่ OH มากกว่า จะมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้สูงกว่า นอกจากนี้แร่ดินเหนียวโอไลไนต์ยังมีประจุที่ขอบผิวของแร่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชของดินซึ่งส่งเสริมให้สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้เพิ่มขึ้น แต่การศึกษาของ Toor *et al.* (1997) พบว่าแร่ในกลุ่มออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม จะสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้สูงกว่าแร่ดินเหนียว ดังนั้นดินที่มีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมสูงย่อมจะทำให้ดินนั้นมีการดูดซับฟอสฟอรัสไว้สูง ซึ่งการดูดซับฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายดินเพิ่มขึ้น

4.3.4 อินทรีย์วัตถุในดิน

การเพิ่มเติมอินทรีย์วัตถุจะช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัสได้ (Reddy *et al.*, 1980) เนื่องจากกรดอินทรีย์ และฮิวมัสที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ สามารถลดการดูดซับฟอสฟอรัสได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์แทนฟอสฟอรัส ทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาแทน อินทรีย์วัตถุจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสได้ (Havlin *et al.*, 2005) Violante *et al.* (2002) ทำการศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เมื่อมีการใส่กรดอินทรีย์ออกซาเลตลงไป พบว่า การดูดซับฟอสฟอรัสจะลดลงและมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ากรดอินทรีย์ช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัสได้ โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ได้จากกรดอินทรีย์จะไปทำปฏิกิริยากับเหล็กและอะลูมิเนียม แทนฟอสฟอรัสเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า organo-mineral complexes ยึดเกาะกับผลึกแร่ดินเหนียว ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวแทนที่ฟอสเฟตที่ยึดเกาะอยู่กับขอบผลึกแร่ดินเหนียว ทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมา

อย่างไรก็ตามในกรณีของดินนา การเพิ่มอินทรีย์วัตถุกลับทำให้ดินเกิดการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดภายหลังจากการขังน้ำเพียง 2 วัน เช่นเดียวกับกับในกรณีการศึกษาของ

Sah and Mikkelsen (1989) ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีผลช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงค่า redox potential (Eh) และ การแปรสภาพของเหล็ก โดยทำให้ความเข้มข้นของเหล็กรูปออกไซด์เพิ่มขึ้น (Sah and Mikkelsen, 1986a)

4.3.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการดูดซับฟอสฟอรัสในดิน โดย Tisdale and Nelson (1975) กล่าวว่า โดยทั่วไปดินในเขตร้อนจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่า ดินในเขตหนาวเนื่องจากอุณหภูมิในเขตร้อนทำให้ดินมีปริมาณไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และ อะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น การศึกษาของ Sah and Mikkelsen (1989) พบว่า ดินที่มีการใส่เชลลูโลสรวมกับการบ่มดินที่อุณหภูมิ 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 วัน โดยดินจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการศึกษาของ Quang and Dufey (1995) ที่พบว่าดิน Sulfic Tropaquept ในประเทศเวียดนามที่มีการขังน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ดินมีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่าการขังน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดของดินมีค่าอยู่ในพิสัย 9.24-14.47 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นอยู่ในพิสัย 13.22-79.80 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาของ Chien *et al.* (1982) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินกรดที่บ่มในสารละลาย 0.01M CaCl₂ เป็นเวลา 6 วัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 5 ถึง 45 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินจะลดลง และในกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นดินมีอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมามากกว่าการดูดซับฟอสฟอรัส

4.3.6 การขังน้ำ

โดยทั่วไปแล้วภายใต้สภาพน้ำขังปราศจากออกซิเจน เหล็กส่วนใหญ่อยู่ในรูปออกไซด์ (Sah and Mikkelsen, 1986b) และการดูดซับหรือปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินในสภาพการขังน้ำจะมีความสัมพันธ์กับรูปของเหล็กโดยเฉพาะในรูปออกไซด์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเหล็กอิสระ ทำให้ดูดซับฟอสฟอรัสได้มากขึ้น (Sah and Mikkelsen, 1989) การศึกษาของ Khalid *et al.* (1977) ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างปริมาณเหล็กออกไซด์กับปริมาณ

ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับภายใต้สภาพน้ำขัง โดยเมื่อปริมาณเหล็กออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้นฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับได้มากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามการดูดซับฟอสเฟตจะไม่เพิ่มขึ้น แม้ปริมาณเหล็กจะสูงขึ้นก็ตาม ทั้งนี้การที่ฟอสเฟตถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการแปรสภาพของสารประกอบเหล็กและอะลูมิเนียมในรูปผลึกเปลี่ยนไปเป็นรูปออกไซด์ที่ทำให้เกิดพันธะกับฟอสเฟต

Krairapanond *et al.* (1993) รายงานว่า ในกรณีของดินเปรี้ยวจัดบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทยภายใต้การขังน้ำจะทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ดีกว่าในสภาพที่ไม่มีน้ำขังน้ำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Holford and Patrick (1979) ที่รายงานว่า การขังน้ำจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายดิน และลดลงภายหลังจากการขังน้ำไปแล้ว 56 วัน เนื่องจากฟอสฟอรัสถูกดูดซับเข้าไปที่อนุภาคของแร่ดินเหนียว หรืออะลูมิเนียมออกไซด์อีก หรืออาจเกิดการตกตะกอนเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ขณะที่ Shahandeh *et al.* (2003) ได้รายงานว่าหลังจากดินขังน้ำเป็นเวลา 35 วัน ดินจะเริ่มปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมา โดยในสารละลายดินจะมีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ฟอสฟอรัสในสารละลายมีความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กและแมงกานีสในเชิงบวก โดยเมื่อปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเหล็กและแมงกานีสในสารละลายดินเพิ่มขึ้นอยู่ในพิสัย 0.2-22 และ 0.08-6.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินมีสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ร้อยละ 65-91 และมีความสัมพันธ์กับแมงกานีสออกไซด์ร้อยละ 2.0-14.0 แสดงให้เห็นว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในสภาพที่มีการขังน้ำจะเกี่ยวข้องกับปริมาณเหล็กมากกว่าในกรณีของแมงกานีส

Quang and Dufey (1995) รายงานว่า ดิน Sulfic Tropaquept ในสภาพที่มีการขังน้ำที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดอยู่ในพิสัย 9.24-79.80 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าในกรณีที่ทำให้ดินแห้งหลังจากการขังน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (15.24-24.78 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม) และในสภาพที่ไม่มีน้ำขัง (7.25 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม) และการดูดซับฟอสฟอรัสของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการขังน้ำนานขึ้น โดยหลังจากการขังน้ำ 56 วัน จะส่งผลให้ดินมีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับ 14.47 และ 79.80 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม สำหรับการขังน้ำที่อุณหภูมิ 20 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ดินขังน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อทำการปล่อยน้ำออกจะทำให้การดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดต่ำลง โดยหลังจากการปล่อยน้ำออกไป 36 วัน ดินจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับ 24.78 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม

Litaor *et al.* (2005) ทำการศึกษาดินในอันดับฮิสโทซอลล์ บริเวณแม่น้ำจอร์แดน พบว่า ดินที่มีการขังน้ำจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าการไม่ขังน้ำทั้งในกรณีของดินต้นและดินลึก โดยภายใต้สภาพที่มีการขังน้ำ การดูดซับฟอสฟอรัสของดินมีค่าอยู่ในพิสัย 625-775 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ดินที่ไม่มีการขังน้ำจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 670-1750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Zhang *et al.* (2003) ในประเทศจีน ที่พบว่าในช่วงแรกของการขังน้ำการดูดซับฟอสฟอรัสของดินนาในอันดับเอ็นทิซอลล์และอัลติซอลล์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อนข้างคงที่หลังจากการขังน้ำไปแล้ว 7 วัน และการดูดซับฟอสฟอรัสของดินจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3852 และ 2703 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อทำการขังน้ำไปแล้ว 14 วัน สำหรับดินนาในอันดับเอ็นทิซอลล์และอัลติซอลล์ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการขังน้ำ (1727 และ 1850 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินนาในอันดับเอ็นทิซอลล์และอัลติซอลล์ ตามลำดับ) ในขณะที่การไม่ขังน้ำจะส่งเสริมให้ดินมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าในกรณีที่มีการขังน้ำ ดังนั้นดินนาในอันดับเอ็นทิซอลล์ที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่า จึงปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาต่ำกว่าดินนาอันดับอัลติซอลล์

5. การแจกกระจายของดินเปรี้ยวจัด

5.1 ดินเปรี้ยวจัดในโลก

ดินเปรี้ยวจัดเกิดได้ในทุกสภาพภูมิอากาศ ตั้งแต่ภูมิอากาศหนาว อบอุ่น จนถึงเขตร้อนชื้น แต่พบกระจายเป็นบริเวณกว้างขวางในเขตร้อนและกึ่งร้อน (Qi-fan, 1981) การกระจายของดินเปรี้ยวจัดทั่วโลกมีพื้นที่ประมาณ 17 ล้านเฮกตาร์ พบในทวีปแอฟริกาประมาณ 4.5 ล้านเฮกตาร์ ในทวีปออสเตรเลียประมาณ 3 ล้านเฮกตาร์ ในทวีปอเมริกาใต้ประมาณ 2.8 ล้านเฮกตาร์ ในทวีปอเมริกาเหนือพบเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 1 ล้านเฮกตาร์ ในทวีปยุโรปโดยพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศฟินแลนด์ เนเธอร์แลนด์ และสวีเดน ประมาณ 0.23 ล้านเฮกตาร์ และในทวีปเอเชียมีพื้นที่ประมาณ 6.5 ล้านเฮกตาร์ ซึ่งในบริเวณเอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศบังกลาเทศ อินเดีย พม่า ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย เวียดนาม และประเทศไทย (Andriessie and Mensvoort, 2006)

5.2 ดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย ดินเปรี้ยวจัดมีพื้นที่ประมาณ 1.5 ล้านเฮกตาร์ ส่วนใหญ่เป็นบริเวณพื้นที่ที่ราบภาคกลาง คิดเป็นร้อยละ 56 ของพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดทั้งประเทศ หรือเท่ากับ 0.84 ล้านเฮกตาร์ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่หลายจังหวัด ได้แก่ จังหวัดปทุมธานี กรุงเทพมหานคร นครนายก ปราจีนบุรี ฉะเชิงเทรา สระบุรี พระนครศรีอยุธยา นครปฐม และ สุพรรณบุรี นอกจากนี้ยังพบเป็นบริเวณเล็ก ๆ แจกกระจายอยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกในบริเวณจังหวัดจันทบุรี และตราด คิดเป็นพื้นที่ 0.2 ล้านเฮกตาร์ รวมทั้งยังพบอีกประมาณ 0.5 ล้านเฮกตาร์ บริเวณฝั่งทะเลตะวันออกของภาคใต้ ในเขตจังหวัดสงขลา นราธิวาส และปัตตานี (Pons *et al.*, 1969; Kevie and Yenmanas, 1972; Attanandana and Vacharotoyan, 1984) และได้มีการจำแนกดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยตามระบบอนุกรมวิธานดิน (Soil taxonomy) ของกระทรวงเกษตรประเทศสหรัฐอเมริกา (Soil Survey Staff, 2006) ได้ดังนี้

ดินเปรี้ยวจัดในอันดับดินฮิสโทซอลส์ (Histosols) เป็นดินเปรี้ยวจัดที่มีการสะสมของอินทรียสาร (organic soil material) เป็นลักษณะเด่น โดยทั่วไปจะเกิดในสภาพแ่งต่ำ มีลักษณะน้ำขังตลอดเวลาหรือเกือบตลอดเวลา ดินเปรี้ยวจัดในอันดับดินฮิสโทซอลส์ในประเทศไทยประกอบด้วยดินในอันดับดินย่อย Hemists เป็นดินที่มีการสลายตัวของอินทรียสารในระดับปานกลาง และสามารถจำแนกย่อยในระดับกลุ่มดินใหญ่โดยใช้ระดับความลึกของชั้นวินิจฉัยซัลฟูริก หรือชั้นวัสดุซัลไฟด์ที่พบเป็นเกณฑ์ แบ่งออกเป็นกลุ่มดินใหญ่ Sulfohemists เป็นดินที่พบชั้นวินิจฉัยซัลฟูริกภายใน 50 เซนติเมตร จากผิวดิน และกลุ่มดินใหญ่ Sulfishemists เป็นดินที่พบวัสดุซัลไฟด์ภายใน 100 เซนติเมตรของหน้าตัดดิน เช่น ชุดดินกาบแดง

ดินเปรี้ยวจัดในอันดับดินเวอร์ทิซอลส์ (Vertisols) เป็นดินเปรี้ยวจัดที่มีชั้นดินบนมีปริมาณดินเหนียวมากกว่าร้อยละ 30 พบรอยไถล (slickensides) ในชั้นใดชั้นหนึ่งของหน้าตัดภายในความลึกของดิน 100 เซนติเมตร ซึ่งชั้นดังกล่าวมีความหนาอย่างน้อย 25 เซนติเมตร หรือพบรอยแตก (cracks) ดินเปรี้ยวจัดที่พบเป็นอันดับดินย่อย Aquerts ที่แสดงลักษณะของการขังน้ำช่วงหนึ่ง โดยสีพื้นของดินมีค่ารงค์ (chroma) ต่ำกว่า 2 และจำแนกเป็นกลุ่มดินย่อย Sulfaqueptic Dystraquerts เป็นดินที่พบชั้นที่มีความหนาอย่างน้อย 25 เซนติเมตร ที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 4 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร นอกจากนี้จะต้องพบจาโรไซต์ภายในความลึก 100 เซนติเมตร และมีค่า พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 เช่น ชุดดินองครักษ์ ชุดดินรังสิต ชุดดินเสนา ชุดดินธัญบุรี เป็นต้น

ดินเปรี้ยวจัดในอันดับดินอินเซปทิซอลส์ เป็นดินแร่ธาตุที่ไม่มีวัสดุซัลไฟด์ หรือมีชั้นดินล่างวินิจฉัยซัลไฟริกภายในระดับความลึก 150 เซนติเมตร ภายในระดับความลึก 50 เซนติเมตร จากผิวหน้าดิน มีค่าปัจจัยน้ำ (n-values) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 ในชั้นดินใดชั้นหนึ่งภายในความลึกระหว่าง 20-50 เซนติเมตร ซึ่งในประเทศไทยดินเปรี้ยวจัดที่พบจัดอยู่ในอันดับดินย่อย Aquepts ซึ่งแสดงลักษณะของการขังน้ำ ที่มีระยะเวลาเนิ่นเกิน 3 เดือนในแต่ละช่วงหนึ่งของปี ประกอบด้วยกลุ่มดิน sulfaquepts เป็น Aquepts ที่มีชั้นวินิจฉัยซัลไฟริกและพบจุดประสีเหลืองฟางข้าวภายใน 50 เซนติเมตรจากผิวดิน และกลุ่มดินย่อย Sulfic Endoaquepts เป็นดิน Aquepts ที่เปียกอยู่เสมอหรือแสดงอิทธิพลของการมีน้ำทะเลท่วมถึง และมีชั้นวินิจฉัยซัลไฟริกอยู่ภายใน 50 เซนติเมตร แต่มีร้อยละความอิ่มตัวด้วยไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 15

ดินเปรี้ยวจัดในอันดับดินเอ็นทิซอลส์ (Entisols) เป็นดินแร่ธาตุที่พบวัสดุซัลไฟด์ ภายในระดับความลึก 50 เซนติเมตร และมีค่าปัจจัยน้ำ (n-values) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 ประกอบด้วยกลุ่มดิน Sulfaquents เป็นดินที่แสดงลักษณะที่เกิดจากอิทธิพลของการขังน้ำ และมีชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำถาวรใต้ชั้นวัสดุซัลไฟด์ และที่พบวัสดุซัลไฟด์ภายใน 50 เซนติเมตร เช่น ชุดดินบางปะกง และกลุ่มดินย่อย Sulfic Hydraquents เป็นดินที่พบวัสดุซัลไฟด์โดยมีความหนาของชั้นอย่างน้อย 15 เซนติเมตร ภายในความลึกของหน้าตัดดิน 100 เซนติเมตร และมีพีเอชอยู่ระหว่าง 3.5-4.0 โดยชุดดินที่เป็นตัวแทนได้แก่ ชุดดินชะอำ

โดยทั่วไปดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มดินย่อย Sulfaqueptic Dystraquerts ซึ่งประกอบด้วย ชุดดินองครักษ์ ชุดดินรังสิต ชุดดินเสนา ชุดดินชัยบุรี และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ซึ่งโดยส่วนใหญ่พบบริเวณพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย เนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 30 พบวัสดุซัลไฟด์ หรือชั้นวินิจฉัยซัลไฟริกในหน้าตัดดินภายในความลึก 100 เซนติเมตร และมีจุดประของจาโรไซต์ ดินบนมีสีเทาเข้ม พบจุดประสีน้ำตาลปนเหลือง ดินล่างเป็นสีน้ำตาลปนเทาเข้มจุดประสีน้ำตาลเข้มมีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างสูง จึงมีศักยภาพต่อการทำการทำนาข้าว แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญได้แก่ ความเป็นกรดของดิน (Kevie and Yenmanas, 1972; Attanadana and Vacharotayan, 1986)

5.3 ปัญหาของดินเปรี้ยวจัดและการแก้ไข

ดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยส่วนใหญ่พบมากบริเวณที่ราบลุ่มใกล้ชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่เคยมีน้ำทะเลท่วมถึง ประกอบกับเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว มีความอุดมสมบูรณ์อยู่

ในระดับปานกลาง จึงมีความเหมาะสมต่อการปลูกข้าวมากกว่าการปลูกพืชอื่น ๆ (Tadano and Yoshida, 1978; Attanandana, 1986; Dent, 1986) แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญในเรื่องความเป็นกรดที่รุนแรง และความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสที่ต่ำ (Yoshida, 1981; Attanandana, 1986) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีในปริมาณที่มีอยู่มากจึงดูดซับฟอสฟอรัสทำให้ความเป็นประโยชน์ลดต่ำลง (Attanandana, 1986; Dent, 1986; Dent and Pons, 1995; Curtin and Syers, 2001; Khare *et al.*, 2004; Brady and Weil, 2008) ทำให้ผลผลิตข้าวต่ำมากถึงแม้ว่าจะมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพิ่มเติมก็ตาม (Attanandana, 1986; Attanandana and Vacharotayan, 1986) และเนื่องจากความเป็นกรดที่รุนแรง เหล็ก อะลูมิเนียม และซัลเฟตจึงละลายออกมามากจนก่อให้เกิดความเป็นพิษ โดยมีรายงานว่าดินเปรี้ยวจัดหลังจากมีการขังน้ำ สารละลายดินอาจมีปริมาณของเหล็กสูงขึ้นถึง 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมากกว่า (Tanaka and Navasero, 1966) และมีปริมาณของอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงสุดถึง 1359 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Attanandana, 1982) โดยเฉพาะความเป็นพิษของอะลูมิเนียมจะขัดขวางการดูดตั้งธาตุอาหารพืชโดยตรง ส่งผลให้การแตกแขนงของรากพืชถูกยับยั้ง ปลายรากตาย รากสั้น หนา และมีสีน้ำตาล (Islam *et al.*, 1980)

จากสภาพของดินเปรี้ยวจัดที่มีความเป็นกรดรุนแรงมาก ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะสำหรับการผลิตข้าว (Attanandana, 1986) เกษตรกรส่วนใหญ่จึงมีความจำเป็นต้องใส่ปูนเพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการใส่ปูนเป็นการเพิ่มพีเอชของดิน ลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม นอกจากนี้จะช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัส ทำให้ฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์เพิ่มมากขึ้น (Iyamuremye *et al.*, 1996)

ถึงแม้ว่าการใส่ปูนแต่ละครั้งมีผลตกค้างในดินนาน 4-5 ปี ก็ตาม (Panichapong, 1982) แต่การศึกษาของ Brinkman *et al.* (1993) รายงานว่าการแก้ปัญหาคือความเป็นกรดของดินเปรี้ยวจัดในประเทศเวียดนาม จะต้องใส่ปูนในอัตรา 800 กิโลกรัมต่อไร่ หากไม่มีการชะล้างดินก่อน แต่หากทำการชะล้างด้วยน้ำดินก่อน ปูนที่ใส่จะใช้ในอัตราต่ำลงครึ่งหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลของปูนจะแสดงเฉพาะในฤดูกาลเพาะปลูกเท่านั้น เมื่อดินแห้งก็จะเกิดความกรดขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง (Van Mensvoort and Le Quang Tri, 1988; Brinkman *et al.*, 1993) ดังนั้นเกษตรกรมีความจำเป็นที่จะต้องใส่ปูนอย่างต่อเนื่องในการทำการเกษตรเพื่อให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการจึงน่าที่จะส่งผลต่อสมบัติดิน โดยเฉพาะดินบน เนื่องจากปูนที่ใส่ลงในนั้นสามารถลดความเป็นกรดของดินที่ความลึกระดับรากพืชเท่านั้น (นคร, 2523; Prabuddham, 1982)

การศึกษาของ Ogunwale and Shamshuddi (1999) พบว่าการใส่ปุ๋ยในอัตรา 1 ตันต่อเฮกตาร์ในดินเปรี้ยวจัดในดินประเทศมาเลเซีย ที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 2.97-3.36 ส่งผลให้อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลงร้อยละ 3.1-13.1 แต่เมื่อมีการใส่ปุ๋ยมากกว่า 2 ตันต่อเฮกตาร์ส่งผลให้การดูดซับฟอสฟอรัสสูงขึ้น เนื่องจากฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับโดยแคลเซียม และเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟตแทน



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

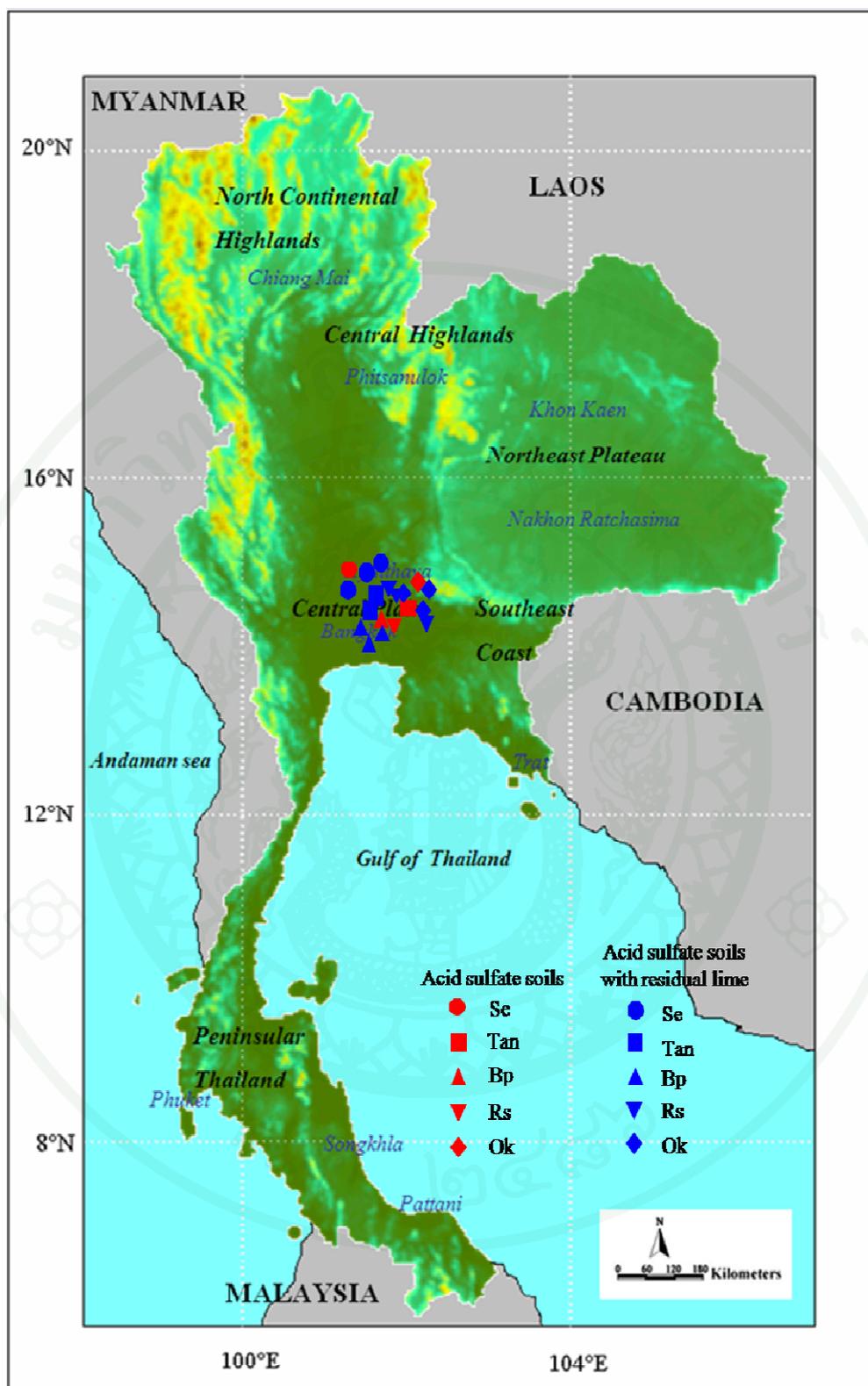
1. แผนที่ดินจังหวัดชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพฯ ชนบุรี สมุทรสาคร สมุทรปราการ และ นครนายก มาตรฐาน 1:100,000 (กองสำรวจดิน, 2515, 2519ก, 2519ข)
2. อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน และเครื่องมือการสำรวจดินภาคสนามมาตรฐาน (Soil Survey Division Staff, 1993)
3. เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินทางเคมี ฟิสิกส์ และแร่วิทยา

วิธีการ

1. พื้นที่ศึกษา

ทำการศึกษาชนิด ปริมาณ และการแจกกระจายของดินเปรี้ยวจัดในบริเวณภาคกลางตอนล่าง โดยใช้แผนที่ดินมาตรฐาน 1:100,000 (กองสำรวจดิน, 2515, 2519ก, 2519ข)

สำรวจและคัดเลือกพื้นที่ศึกษาที่เป็นดินเปรี้ยวจัด จำนวน 5 ชุดดิน ประกอบด้วย ชุดดินรังสิต (Rs: Sulfaqueptic Dystraquets) ชุดดินองครักษ์ (Ok: Sulfic Endoaquepts) ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว (Bp: Sulfic Endoaquepts) ชุดดินชัยบุรี (Tan: Vertic Sulfaquepts) และชุดดินเสนา (Se: Sulfaqueptic Dystraquets) (Soil Survey Staffs, 2006) ชุดดินละ 4 บริเวณ รวม 20 บริเวณ ครอบคลุมจังหวัดกรุงเทพฯ ปทุมธานี และอยุธยา ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พื้นที่ทำการศึกษาระดับบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางของประเทศไทย

2. การเก็บตัวอย่างดิน

ทำการเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้ส่วนเจาะดินที่ 2 ระดับความลึก ได้แก่ดินบน (0-30 เซนติเมตร) และ ดินล่าง (30-60 เซนติเมตร) และในแต่ละชุดดินประกอบด้วยดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างจำนวน 3 บริเวณ ซึ่งพีเอชสนามของดินบนมีค่ามากกว่า 5 และใช้ในการปลูกข้าว ขณะที่อีก 1 บริเวณเป็นพื้นที่รกร้างและไม่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินซึ่งพีเอชสนามของดินบนจะมีค่าต่ำกว่า 4.5 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ (ภาพที่ 2)

3. การวิเคราะห์ดิน

นำตัวอย่างดินที่ได้มาส่งให้แห้งในร่ม บดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตรและนำไปวิเคราะห์สมบัติดินในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย

3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์

การกระจายขนาดของอนุภาคดิน (soil particle size distribution) โดยวิธีแยกด้วยตะแกรง (sieving method) ในขนาดอนุภาคทรายและโดยวิธีปิเปตต์ (Pipette method) (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965) ในขนาดอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาแจกแจงประเภทของเนื้อดิน (soil textural class) โดยการเปรียบเทียบกับชั้นเนื้อดินตามเกณฑ์ของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA textural class) (Soil Survey Staff, 2006)

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

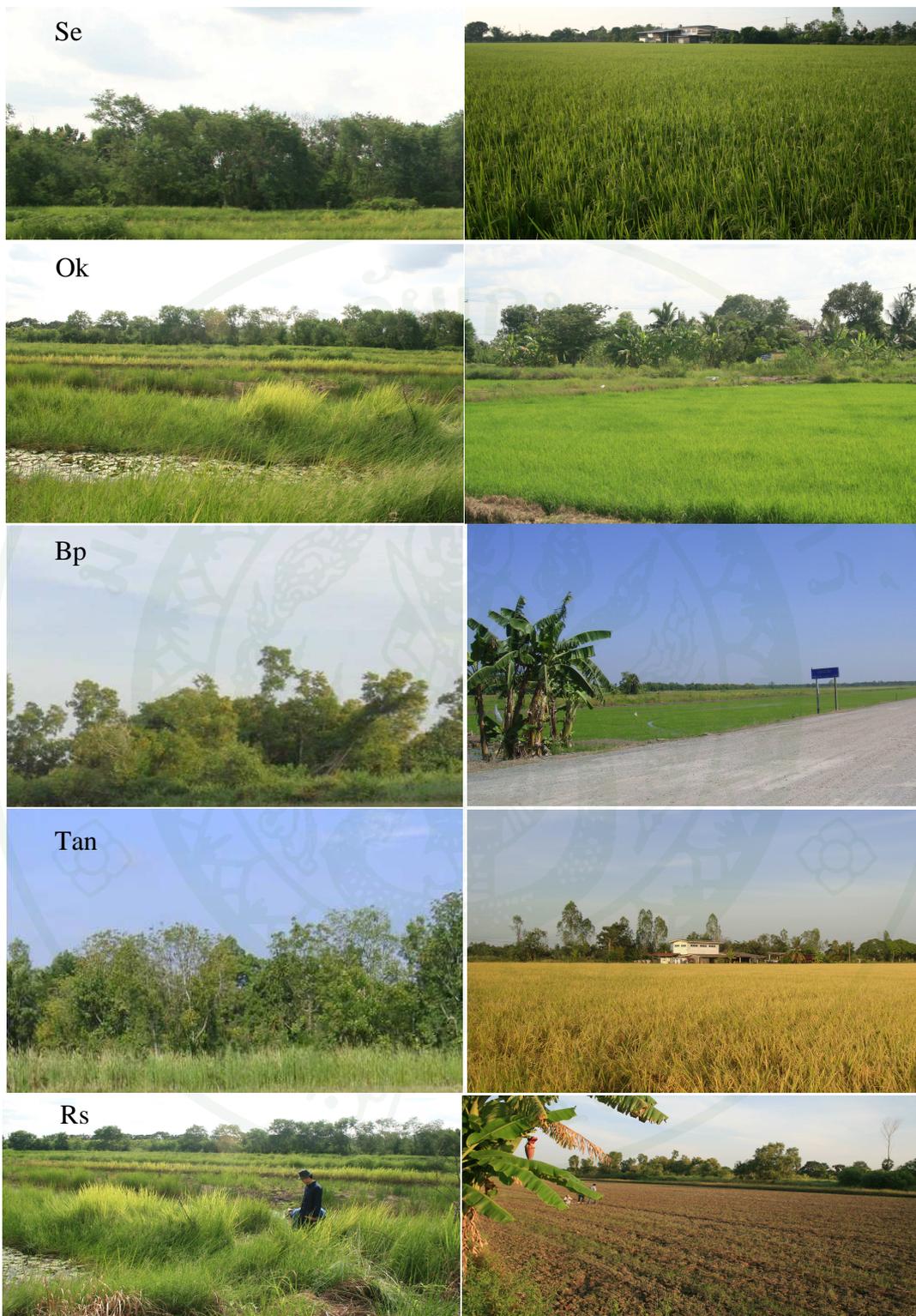
3.2.1 พีเอชดิน (soil pH) โดยใช้เครื่องมือวัดพีเอชดิน (pH meter) โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ และดินต่อสารละลาย 1M KCl เท่ากับ 1:1 (Thomas, 1996; National Soil Survey Center, 1996)

3.2.2 คาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon) โดยวิธี Walkley และ Black Titration (Walkley and Black, 1934) แล้วคำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter content) จาก

$$\text{สูตร: Organic matter} = \text{Organic carbon} \times 1.724$$

Acid sulfate soils

Acid sulfate soils with residual lime



ภาพที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างที่ใช้ในการศึกษา

3.2.3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) สกัดโดยวิธี Bray II (Bray and Kurtz, 1945) แล้ววัดปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง spectrophotometer ด้วยวิธี molydate blue method (Murphy and Riley, 1962) ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร

3.2.4 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity: CEC) โดยการชะละลายแคตไอออนด้วยสารละลาย 1M NH₄OAc ที่เป็นกลาง (pH 7) และแทนที่แอมโมเนียมไอออนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10% ในสภาพที่เป็นกรด กลั่นหาแอมโมเนียมไอออน แล้วคำนวณหาความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Chapman, 1965)

3.2.5 ปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ (extractable bases) ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม โดยสกัดด้วยสารละลาย 1M NH₄OAc ที่เป็นกลาง (pH 7.0) (Peech, 1945) แล้ววัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.6 สภาพกรดที่สกัดได้ (extractable acidity) ทำการสกัดด้วยสารละลายแบเรียมคลอไรด์ไตรเอทานอลามีน (barium chloride-triethanolamine) pH 8.2 (Peech, 1965)

3.2.7 อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส (base saturation percentage) โดยการคำนวณจากค่าเบสรวม (sum bases) ซึ่งได้แก่ผลรวมของแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม และความเป็นกรดที่สกัดได้ (National Soil Survey Center, 1996) จากสูตร

$$\%BS = \frac{\text{Sumbases}}{\text{Sum bases} + \text{Extractable acidity}} \times 100$$

3.2.8 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก แมงกานีส และอะลูมิเนียมในรูปอิสระโดยวิธี dithionite-citratebicarbonate (Mehra and Jacson, 1960) และวัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.9 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก แมงกานีส และอะลูมิเนียมในรูปออกไซด์โดยวิธี ammonium oxalate (McKeague and Day, 1966) และวัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.10 วิเคราะห์ปริมาณเหล็ก แมงกานีสและอะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์โดยวิธี sodium pyrophosphate (McKeague, 1967) และวัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.11 สภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) โดยวัดสภาพการนำไฟฟ้าของ สารสกัดคิมตัวของดิน (saturation extract) วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง electrical conductivity bridge (Richards, 1954)

3.2.12 วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ โดยวิธีของ Peterson and Corey (1966) และ Smillie and Syers (1972) ที่ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Chang และ Jackson (1957)

ทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ความเข้มข้น 1M ลงในตัวอย่างดิน 1.0 กรัม เพื่อให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ละลายได้ จากนั้นทำการสกัดดินด้วยสารละลายแอมโมเนียม ฟลูออไรด์ (NH_4F) ความเข้มข้น 0.5M จากนั้นนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็น เวลา 10 นาที กรองและนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูป Al-P

ทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1M ลงใน หลอดเหยียงที่มีดินหลังจากแยกสารละลายออกไป เขย่าประมาณ 17 ชั่วโมง จากนั้นนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที กรองและนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ ฟอสฟอรัสในรูป Fe-P

จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ลงนำตัวอย่างดินที่เหลือ เขย่าประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที กรองและนำ สารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูป Ca-P

หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดแต่ละวิธีไปวัดปริมาณฟอสฟอรัส ในแต่ละรูป ด้วยวิธี molybdate blue method และวัดปริมาณด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความ ยาวคลื่น 882 นาโนเมตร (Murphy and Riley, 1962)

3.2.13 องค์ประกอบทางเคมีรวม (Total chemical analysis)

การเตรียมตัวอย่าง ทำการเตรียมตัวอย่างแบบ press powder ซึ่งทำโดยบดตัวอย่างดินให้ละเอียด ด้วยเครื่องบด (grinding mill) จนได้อนุภาคขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร แล้วนำตัวอย่างดินมาอัดเป็นแผ่น โดยใช้ผงกรดบอริก แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวัดปริมาณธาตุรวม ประกอบด้วย ธาตุซิลิกอน กำมะถัน อะลูมิเนียม เหล็ก ไทเทเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม แมงกานีส และฟอสฟอรัสในดิน โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescense spectrophotometer (XRF) (Norrish and Hutton, 1969; Angela, 1982)

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ของดิน

3.3.1 วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแร่ในกลุ่มของอนุภาคดินเหนียว (clay fraction) ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) โดยการทำอนุภาคขนาดดินเหนียวให้อิ่มตัวด้วยโพแทสเซียม โพแทสเซียมเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แมกนีเซียม และแมกนีเซียมที่อิ่มตัวด้วย ethylene glycol จากนั้นนำสไลด์ที่ได้ไปเข้าเครื่องวิเคราะห์ โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับชนิดของแร่มาตรฐาน (standard minerals) และประเมินหาปริมาณของแร่ชนิดต่าง ๆ ประเมินโดยวิธี relative peak height และ peak area (Whittig and Allardice, 1986)

3.3.2 วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแร่ในกลุ่มอนุภาคทรายแป้ง (silt fraction) ที่มีขนาดอนุภาค 2-50 ไมโครเมตร โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับชนิดของแร่มาตรฐาน (Brindley and Brown, 1980) สำหรับปริมาณของแร่ชนิดต่าง ๆ ประเมินโดยวิธี Relative peak height และ peak area (Whittig and Allardice, 1986)

4. การศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสด้วยเทคนิค Phosphorus sorption and desorption isotherms (Fox and Kamprath, 1970; Sanyal *et al.*, 1993)

ซั่งดินขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 กรัม ใส่ในหลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 0.01M CaCl₂ ที่ประกอบด้วย KH₂PO₄ เข้มข้น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปจำนวน 30 มิลลิลิตร เติม chloroform 3 หยดลงไปเพื่อยับยั้งกิจกรรมจุลินทรีย์ นำสารละลายดินไปเขย่าวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที เป็นเวลา 12 วัน เพื่อให้สารละลายดินเข้าสู่สมดุล (equilibrium) จากนั้นนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธี molybdate blue method (Murphy and Riley, 1962)

หลอดเหวี่ยงที่มีดินหลังจากแยกสารละลายออกไป เติมสารละลาย 0.01M CaCl₂ ลงไป 28 มิลลิลิตร นำสารละลายดินไปเขย่าวันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที เป็นเวลา 5 วัน เพื่อให้สารละลายดินเข้าสู่สมดุล จากนั้นนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธี molybdate blue method (Murphy and Riley, 1962) เพื่อหาอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

การคำนวณหาอัตราการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสโดยใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich

สมการ Langmuir

$$\frac{c}{x} = \frac{1}{bX_m} + \frac{c}{X_m}$$

เมื่อ โดย c เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตร (mg P L⁻¹)

X_m เป็นค่าการดูดซับสูงสุดของสมการ Langmuir มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อน้ำหนักดิน (mg P kg⁻¹ soil)

b เป็นค่า bonding energy ของสมการ

สมการ Freundlich :

$$x = kc^B$$

- เมื่อโดย c เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (mg P L^{-1})
- x เป็นค่าการดูดซับฟอสฟอรัสมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อน้ำหนักดิน ($\text{mg P kg}^{-1} \text{ soil}$)
- k เป็นค่าการดูดซับสูงสุดของสมการ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อน้ำหนักดิน ($\text{mg P kg}^{-1} \text{ soil}$)
- B เป็นค่า bonding energy ของสมการ

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการหาสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างการดูดซับฟอสฟอรัส การปลดปล่อยฟอสฟอรัส กับสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และแร่วิทยาของดิน และวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์แบบถดถอย (multivariate stepwise regression analysis) เพื่อประเมินลักษณะการดูดซับฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง โดยใช้โปรแกรม STATISTICA version 8.0

6. สถานที่และระยะเวลาที่ทำการทดลอง

6.1 สถานที่ทำการทดลอง

6.1.1 พื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในบริเวณภาคกลางตอนล่าง

6.1.2 ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

6.1.3 สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กรุงเทพฯ

6.2 ระยะเวลาที่ทำการทดลอง

ตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2553 ถึงเดือน เมษายน พ.ศ. 2554

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
ชุดดินรังสิต ชุดดินเสนา ชุดดินองครักษ์ ชุดดินธัญบุรี และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว มีดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดิน

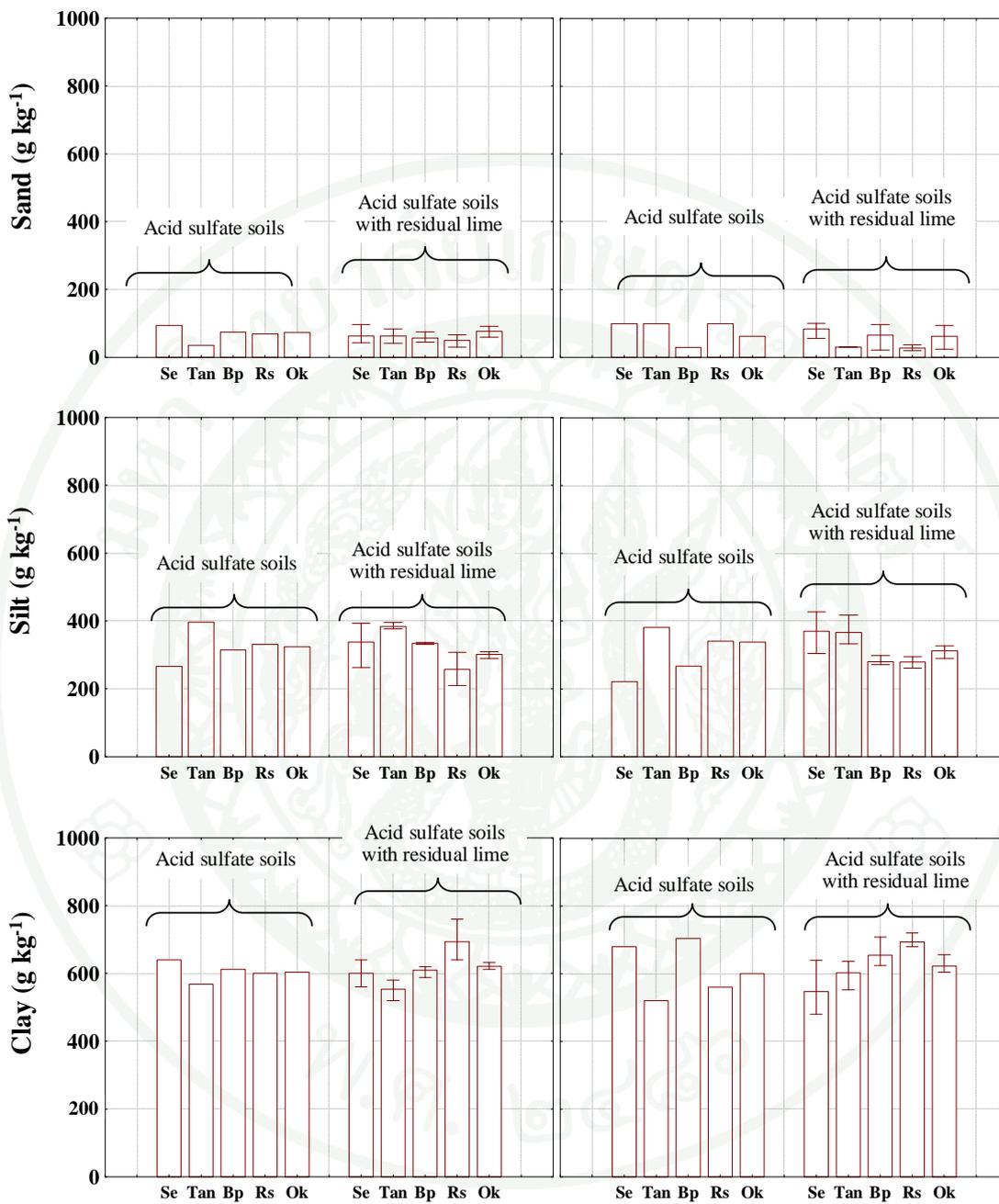
1.1 การกระจายขนาดอนุภาคและเนื้อดิน

การกระจายขนาดอนุภาคดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีการกระจาย
ของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน โดยดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีอนุภาคขนาดดินเหนียวสูง
กว่าอนุภาคขนาดทรายแป้งและขนาดทราย โดยมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวอยู่ในพิสัย
647-736 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณอนุภาคขนาดทรายแป้งอยู่ในพิสัย 150-233 กรัมต่อกิโลกรัม และ
ปริมาณอนุภาคทรายอยู่ในพิสัย 89-137 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยชุดดินรังสิตและชุดดินบาง
น้ำเปรี้ยวมีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวสูงกว่าชุดดินอื่น ๆ ในขณะที่ดินชุดดินเสนาเป็นดินที่มี
ปริมาณอนุภาคขนาดทรายและทรายแป้งสูงกว่าดินอื่น ๆ (ภาพที่ 3)

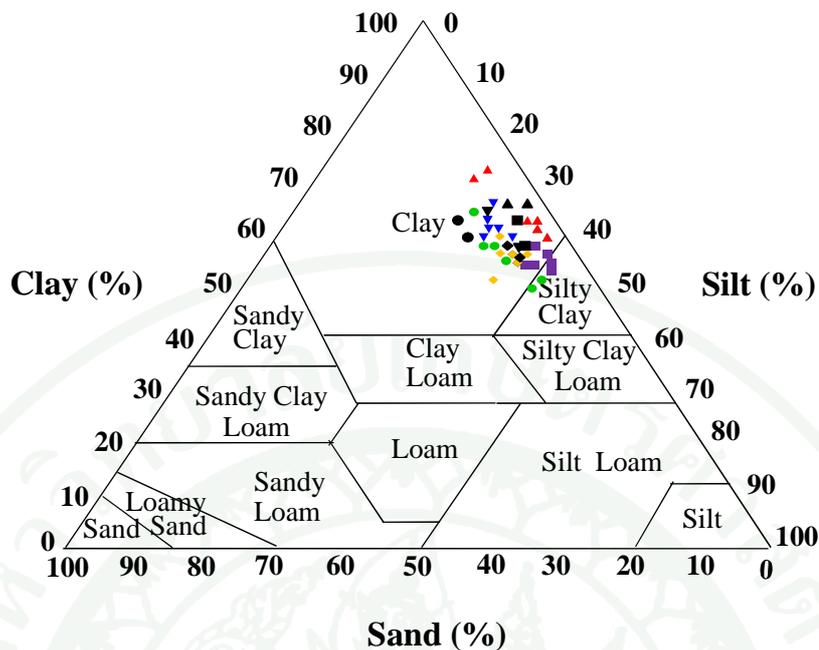
เมื่อนำผลจากการศึกษาการกระจายของอนุภาคดินมาแจกแจง พบว่าดินทั้งหมดจัดอยู่
ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด โดยส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว ยกเว้นชุดดินเสนาและชุดดินธัญบุรีบางบริเวณ
ที่มีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (ภาพที่ 4) ซึ่งการที่ดินมีเนื้อละเอียดนั้นเป็นลักษณะเด่นที่
ตกค้างมาจากวัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งเป็นตะกอนน้ำกร่อยหรือตะกอนน้ำทะเล
(van Breemen and Harmsen, 1975; Dent, 1986; Buol *et al.*, 2003)

Topsoils (0-30 cm)

Subsoils (30-60 cm)



ภาพที่ 3 การกระจายอนุภาคของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด



Acid sulfate soils

● Se ■ Tan ▲ Bp ▼ Rs ◆ Ok

Acid sulfate soils with residual lime

● Se ■ Tan ▲ Bp ▼ Rs ◆ Ok

ภาพที่ 4 การจำแนกประเภทเนื้อดิน ตามสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

1.2 พีเอชดิน

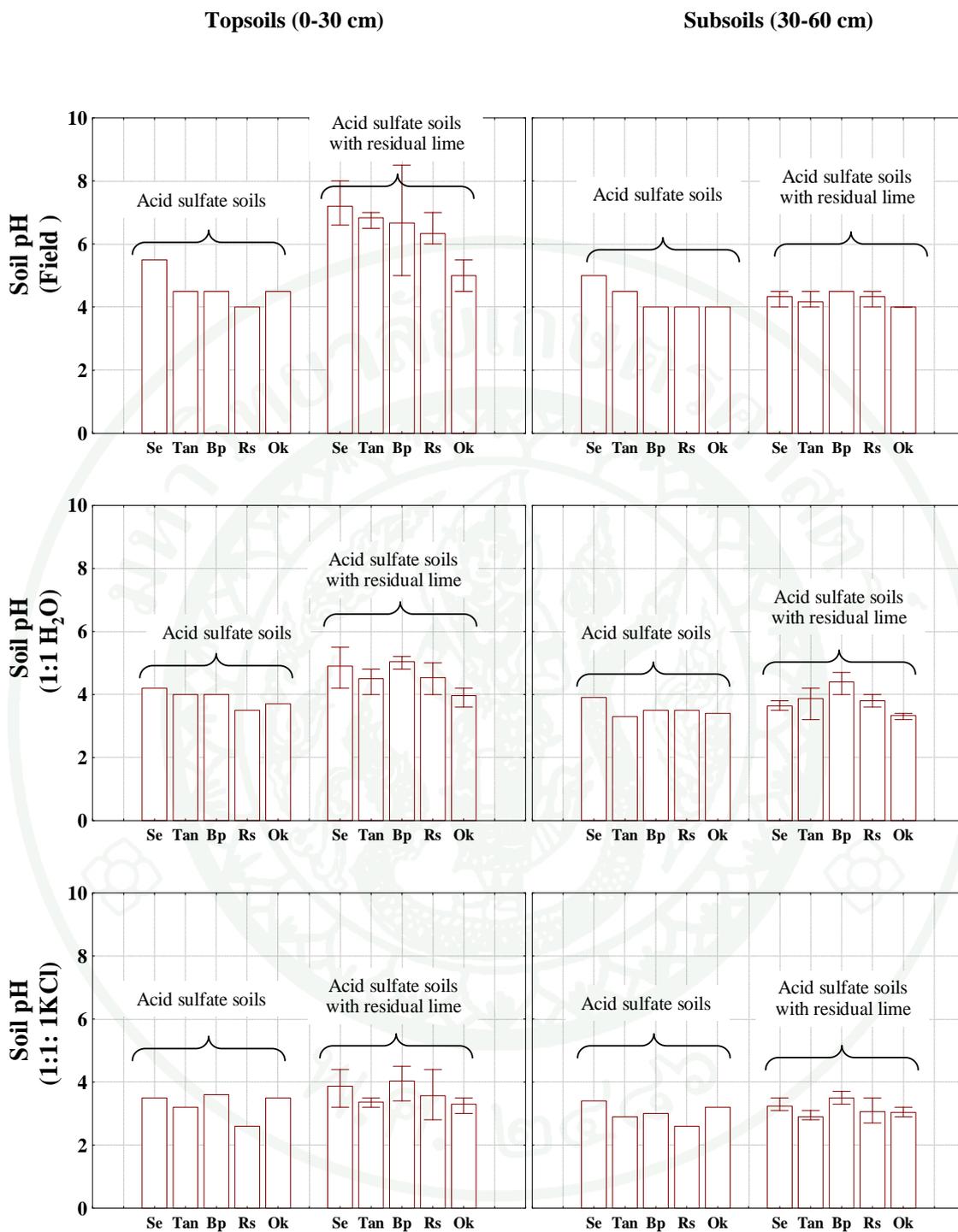
ดินบนของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างจะมีพีเอชที่วัดในสนามสูงกว่า 5.0 ซึ่งมีค่าสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลจากการใช้ปูนปรับปรุงดินของเกษตรกรเพื่อใช้ที่ดินในการทำการเกษตรอาจตกค้างอยู่ในดิน โดยชุดดินเสนาจะมีความเป็นกรดน้อยที่สุด โดยมีพีเอชของดินบนอยู่ในพิสัย 6.5-8.0 รองลงมาได้แก่ ชุดดินธัญบุรี (pH 6.5-8.0) ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว (pH 5.0-8.5) ชุดดินรังสิต (pH 6.0-7.0) และชุดดินองครักษ์ (4.5-5.5) ตามลำดับ (ภาพที่ 5) ในขณะที่ดินล่างของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง มีความเป็นกรดรุนแรงไม่แตกต่างกัน โดยมีพีเอชที่วัดในสนามอยู่ในพิสัย 4.0-4.5 และ 4.0-5.0 สำหรับดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดิน

เปรี้ยวจัดตามลำดับ (ภาพที่ 5) แสดงให้เห็นว่าปูนที่ใส่ลงในนั้นยังคงตกค้างอยู่ในระดับรากพืชเท่านั้นเนื่องจากดินเหล่านี้มีการชะละลายต่ำ (นคร, 2523; Prabuddham, 1982; Buol *et al.*, 2003)

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวัดพีเอชดินในน้ำในสัดส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 พบว่า ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างยังคงมีความเป็นกรดจัดถึงเป็นกรดรุนแรงมาก โดยมีพีเอชอยู่ในพิสัย 5.1-3.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับดินเปรี้ยวจัดที่มีพีเอชอยู่ในพิสัย 4.2-3.4 โดยเฉพาะในดินต่าง (3.2-4.7 และ 3.4-3.9 สำหรับดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดตามลำดับ) ส่วนในกรณีของดินบนพีเอชของดินเปรี้ยวจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการใส่ปูน (pH 3.6-5.5) เมื่อเทียบกับดินเปรี้ยวจัด (pH 3.5-4.2) (ภาพที่ 5) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันของแร่ไพไรต์และสารประกอบจาโรไซต์ที่มีอยู่ในดินจึงทำให้เกิดกรดซัลฟิวริกขึ้นส่งผลให้ดินเป็นกรดจัดมาก (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000) ซึ่งชุดดินบางน้ำเปรี้ยวเป็นดินที่มีพีเอชที่วัดในน้ำสูงสุด รองลงมาคือชุดดินเสนา (pH 3.5-5.5) ชุดดินธัญบุรี (pH 3.2-4.8) ชุดดินรังสิต (pH 3.6-5.0) และชุดดินองครักษ์ (pH 3.2-4.2) ตามลำดับ ซึ่งค่าพีเอชดินที่วัดในน้ำให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าพีเอชสนามของดิน ยกเว้นชุดดินบางน้ำเปรี้ยว และชุดดินธัญบุรีที่พีเอชสนามของดินบนเป็นด่างปานกลางและด่างจัด (8.0 และ 8.5 สำหรับดินทั้งสองตามลำดับ)

นอกจากนี้ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีค่าพีเอชที่วัดในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ในสัดส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:1 มีค่าอยู่ในพิสัย 2.7-4.5 และ 2.6-3.6 ตามลำดับ (ภาพที่ 5) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าพีเอชดินที่วัดได้ในน้ำในอัตราส่วนเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าผลรวมของประจุสุทธิที่ผิวของอนุภาคดินเป็นลบ (Diatto *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของดินเหล่านี้ที่มีแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เป็นองค์ประกอบที่สำคัญจึงมักเกิดกระบวนการแทนที่ของไอออนที่ขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดประจุลบที่ผิวของดินเหนียว ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออนได้ดีกว่าแอนไอออน (Buol *et al.*, 2003; Brady and Weil, 2008)

และจากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ดินที่ทำการศึกษาเหล่านี้ยังมีค่าพีเอชที่เป็นกรดรุนแรงมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดธาตุอาหารบางธาตุ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส หรือเกิดความเป็นพิษของธาตุอาหารพืชได้ เช่น เหล็กและอะลูมิเนียม (Attanandana, 1986; Dent, 1986; Dent and Pons, 1995; Curtin and Syers, 2001; Brady and Weil, 2008; Khare *et al.*, 2004)



ภาพที่ 5 พีเอชของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

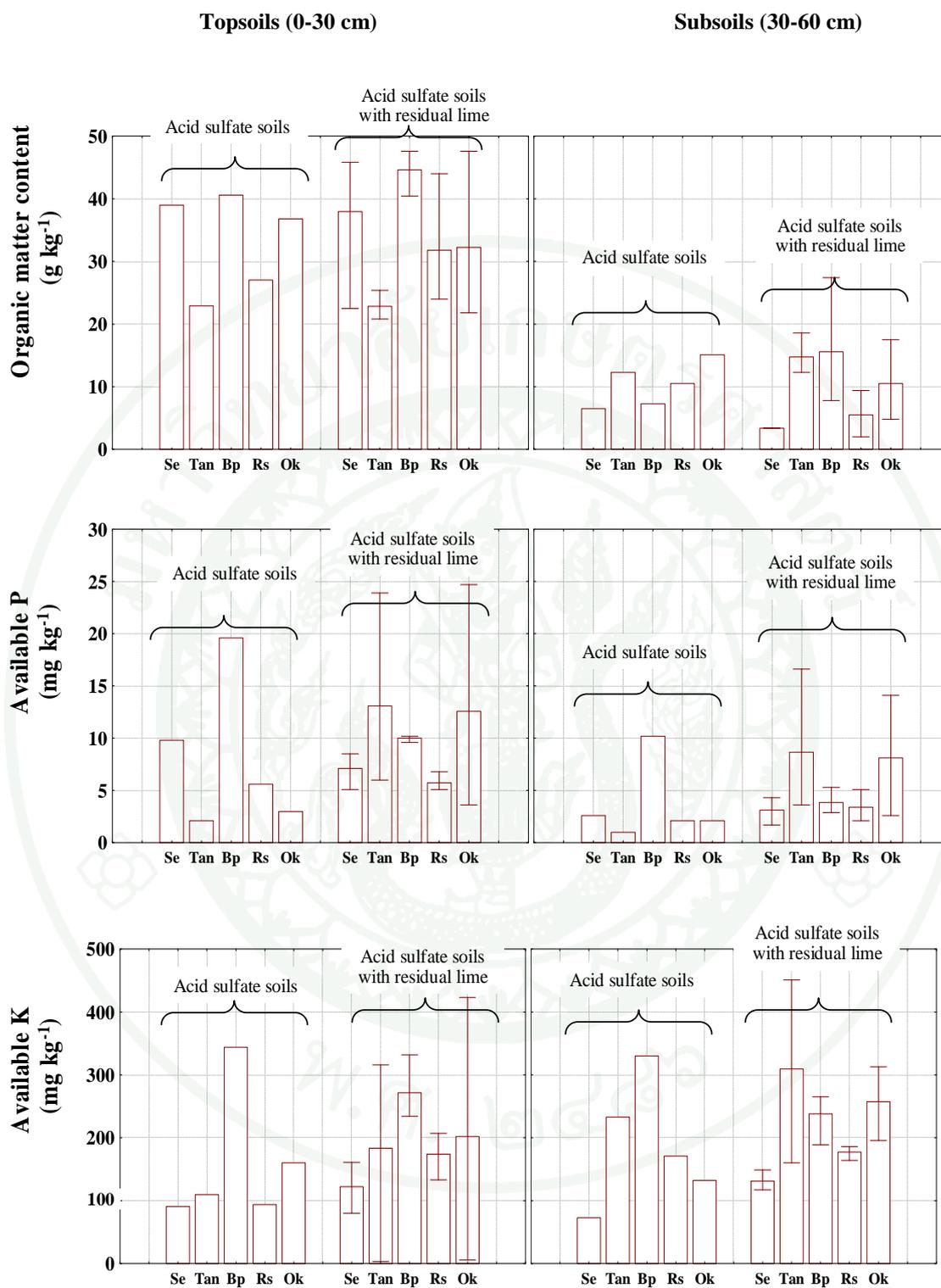
1.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหาร

1.3.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก (2.0-47.6 กรัมต่อกิโลกรัม) (ภาพที่ 6) โดยดินบนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมากมีค่าอยู่ในพิสัย 20.8-47.6 กรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากชั้นดินบนเป็นชั้นที่มีการทับถมหรือสะสมของเศษพืช รวมถึงชิ้นส่วนต่อช่วงข้าวที่หลงเหลือจากการเกษตรกรรม ตลอดจนรากพืชที่ปกคลุมอยู่บนผิวดิน เมื่อสลายตัวจึงทำให้มีการสะสมอินทรีย์วัตถุในดินบน (Thompson and Troeh, 1978) ในขณะที่ดินล่างมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในปริมาณต่ำมากถึงปานกลาง (3.4-15.1 กรัมต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้ดินเหล่านี้เป็นดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ส่งผลให้การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในดินเป็นไปได้ช้า ๆ (Thompson and Troeh, 1978; Stevenson, 1986; Brady and Weil, 2008)

1.3.2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงค่อนข้างต่ำ (3.0-10.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (ภาพที่ 6) ยกเว้นชุดดินบางน้ำเปรี้ยวที่มีอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (2.9-19.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลตกค้างมาจากการจัดการในพื้นที่ เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้น้อยในดินจึงมักจะสะสมอยู่ในดิน โดยเฉพาะในดินชั้นบน (Tisdale *et al.*, 1993) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินบนมีปริมาณสูงกว่าในดินล่างซึ่งให้ผลสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เมื่อเกิดการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในดิน จะเกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสบางส่วนให้แก่ดิน (Meena *et al.*, 2007; Seiksepour *et al.*, 2008) นอกจากนี้การที่ดินเป็นกรดรุนแรง (pH 5.1-3.4) โดยเฉพาะในดินล่าง ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนของเหล็กและอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำยาก ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จึงต่ำ (Havlin *et al.*, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับดินชุดดินรังสิต และชุดดินองครักษ์ที่มีความเป็นกรดที่รุนแรงที่สุด จึงมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำที่สุด (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ของดินของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

1.3.3 ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูงถึงสูงมากทั้งในดินบนและดินล่างโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 122-327 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 6) ซึ่งสอดคล้องกับการที่ดินมีปริมาณดินเหนียวสูงรวมทั้งมีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เช่น แร่สมกไทต์เป็นแร่เด่น ทำให้ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินสูง โพแทสเซียมจึงถูกชะละลายออกไปจากหน้าตัดดินได้น้อย (Sanchez, 1976; Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้แร่ดินเหนียวเหล่านี้เมื่อเกิดการผุพังก็จะปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Nursyamsi *et al.*, 2008) ประกอบกับสภาพพื้นที่ที่พบดินเหล่านี้เป็นพื้นที่ราบลุ่มจึงเป็นแหล่งรวมตะกอนที่เป็นตะกอนน้ำพาและตะกอนน้ำกร่อยซึ่งมีธาตุโพแทสเซียมสูง (Chittleborough *et al.*, 1984) นอกจากนี้การที่ดินบนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงปานกลางถึงสูงมาก (20.8-47.6 กรัมต่อกิโลกรัม) ส่งผลให้ดินดูดซับโพแทสเซียมไว้ได้สูง เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออนได้สูง รวมทั้งเมื่อเกิดการสลายตัวจะมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์บางส่วนให้กับดินด้วย (Chittleborough *et al.*, 1984; Brady and Weil, 2008)

1.4 สมบัติแลกเปลี่ยนของดิน

1.4.1 ปริมาณเบสที่สกัดได้

ปริมาณเบสที่สกัดได้ ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม โดยดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีปริมาณแคลเซียมที่สกัดอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (6.4-15.0 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) แมกนีเซียมที่สกัดได้อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก (4.8-9.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้อยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก (0.6-1.7 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) โซเดียมที่สกัดได้อยู่ในระดับสูงมาก (2.3-3.1 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) (ภาพที่ 7) ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีแนวโน้มมีปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียม และโพแทสเซียมสูงกว่าดินเปรี้ยวจัด ในขณะที่มีโซเดียมที่สกัดได้ในปริมาณที่ต่ำกว่า (ภาพที่ 7) ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการใช้ปูนในพื้นที่จึงทำให้มีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินสูง และอาจช่วยลดอิทธิพลของโซเดียมในดินลง (Sanchez *et al.*, 1976; Fitzpatrick *et al.*, 1998; Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้ดินล่างทุกบริเวณจะมีปริมาณโซเดียมที่สกัดได้ในระดับสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมที่หลงเหลือจากวัตถุดิบกำเนิดซึ่งเป็นอิทธิพลของน้ำทะเล (Sanchez *et al.*, 1976; Fitzpatrick *et al.*, 1998; Pant and Reddy, 2001; Brady and Weil, 2008)

1.4.2 ปริมาณเบสรวมที่สกัดได้

ปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ของดินที่ทำการศึกษาอยู่ในระดับสูงโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 9.5-34.1 เซนติโมลต่อกิโกรัม (ภาพที่ 8) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากวัตถุดิบกำเนิดดินที่เป็นตะกอนน้ำทะเล หรือน้ำกร่อย (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Dent and van Mensvoort, 1993; Dent and Pons, 1995; Pant and Reddy, 2001) โดยปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างจะสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดเล็กน้อยที่มีค่าอยู่ในพิสัย 11.0-3.1 และ 9.5-34.1 เซนติโมลต่อกิโกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 8) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปูนที่ตกค้างในดินมีเพียงเล็กน้อย (Buol *et al.*, 2003)

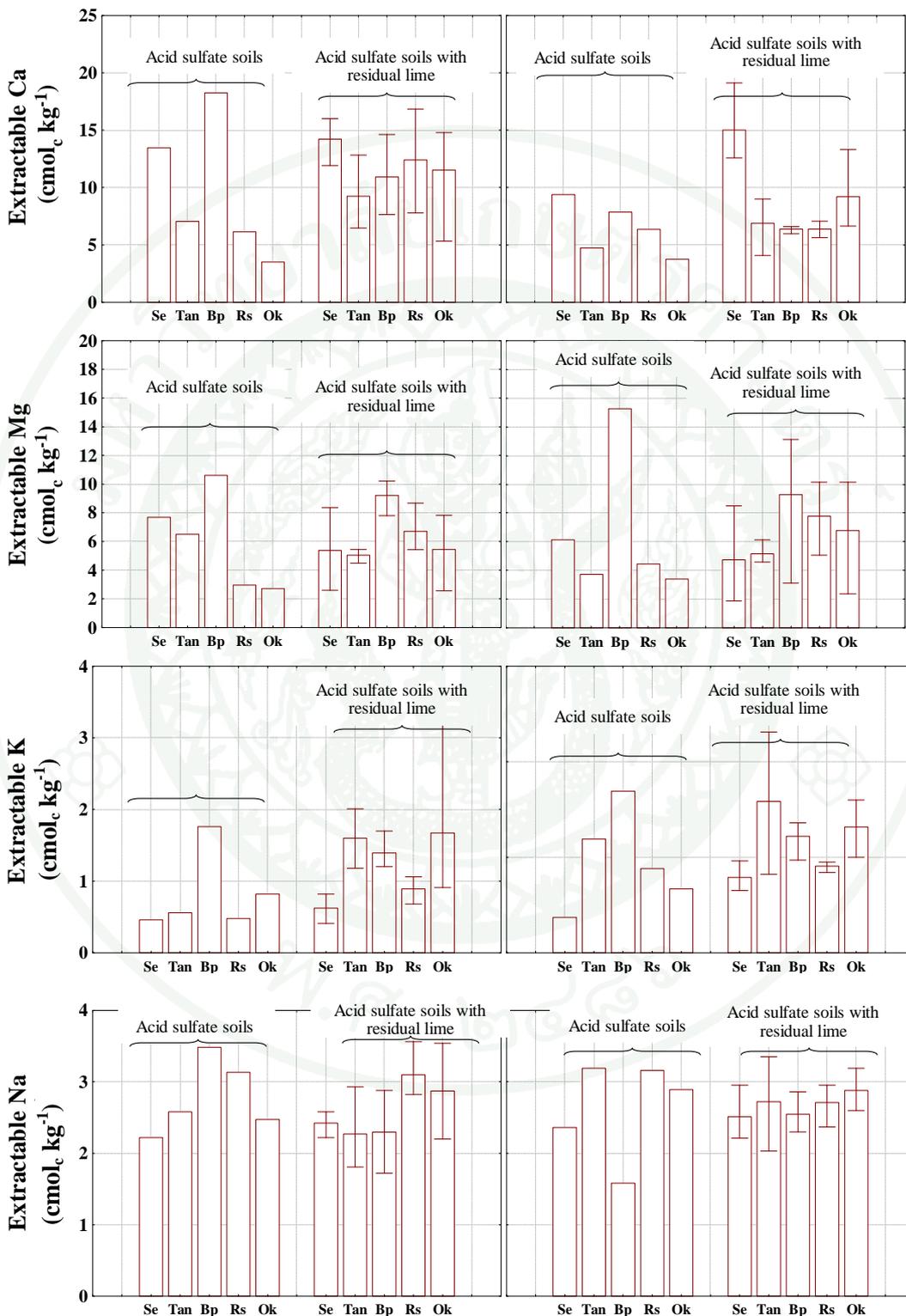
1.4.3 สภาพกรดที่สกัดได้

สภาพกรดที่สกัดได้ของดินที่ทำการศึกษาทั้ง 5 ชุดดินอยู่ในระดับสูงมาก มีค่าอยู่ในพิสัย 28.3-48.0 เซนติโมลต่อกิโกรัม ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าพีเอชของดิน โดยชุดดินองค์กรักษ์จะมีสภาพกรดที่สกัดได้สูงที่สุดโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 33.0-48.0 เซนติโมลต่อกิโกรัม รองลงมาได้แก่ชุดดินรังสิต (22-35 เซนติโมลต่อกิโกรัม) ชุดดินเสนา (25-39 เซนติโมลต่อกิโกรัม) ชุดดินธัญบุรี (23-37 เซนติโมลต่อกิโกรัม) และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว (23-39 เซนติโมลต่อกิโกรัม) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสภาพกรดที่สกัดได้กับระดับความลึกในหน้าตัดดิน พบว่าดินล่างมีสภาพกรดที่สกัดได้สูงกว่าดินบน (ภาพที่ 8) และผลการศึกษาพบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีสภาพกรดที่สกัดได้ลดลงเพียงเล็กน้อยจากดินเปรี้ยวจัด โดยมีความอยู่ในพิสัย 22-48 และ 26-39 เซนติโมลต่อกิโกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 8)

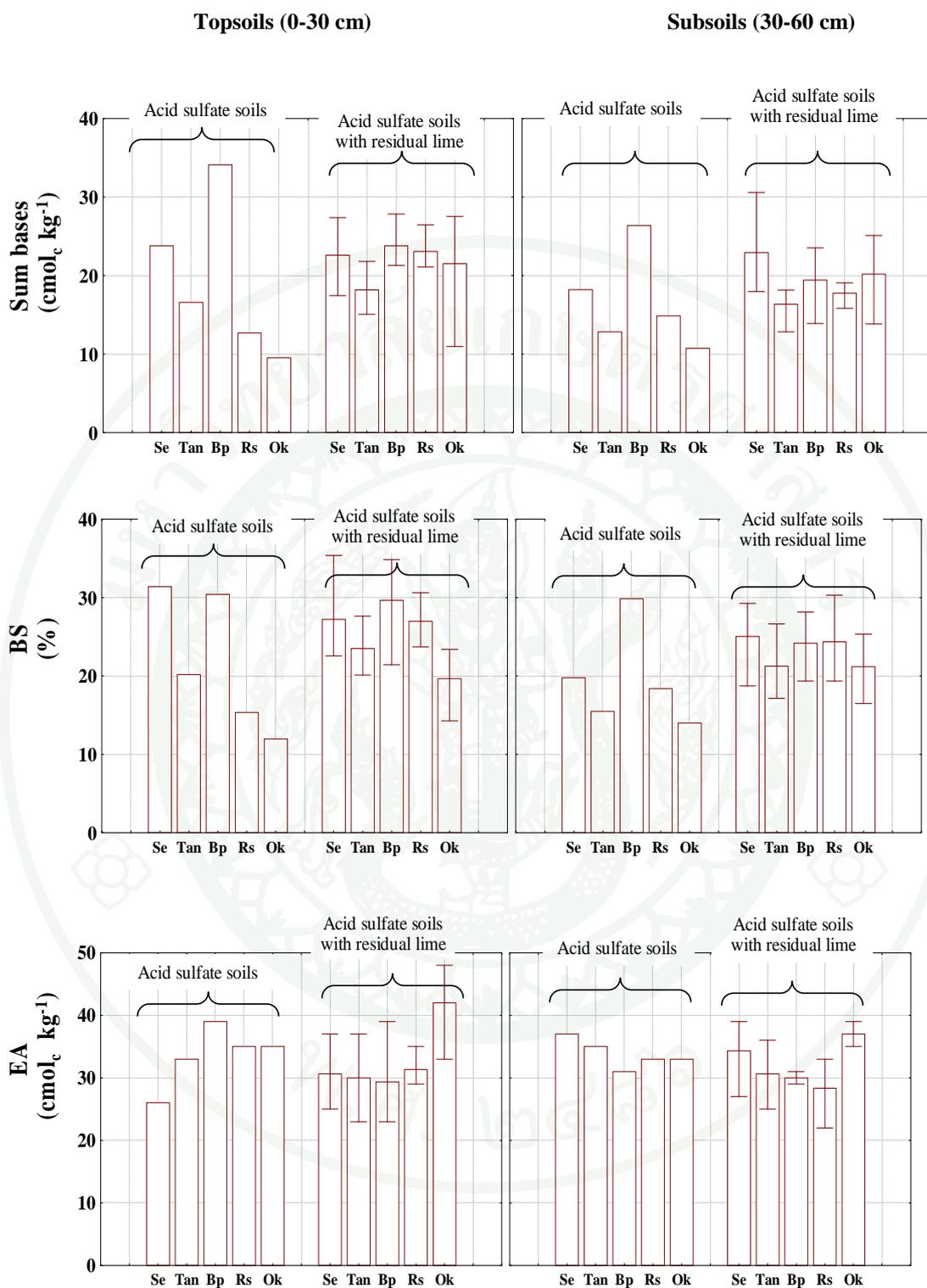
จากการศึกษาพบว่าสภาพกรดที่สกัดได้มีปริมาณสูงมากตลอดทั้งสองความลึก โดยมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช และมีความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียม และการที่ที่ดินมีสภาพกรดที่สกัดได้สูงนั้นเนื่องมาจากการออกซิไดส์ของสารประกอบไพไรต์เกิดเป็นกรดกำมะถัน และการไฮโดรไลซ์ของสารประกอบจาโรไซต์ซึ่งทำให้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นมากในดิน (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000)

Topsoils (0-30 cm)

Subsoils (30-60 cm)



ภาพที่ 7 ปริมาณเบสที่สกัดได้ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด



ภาพที่ 8 ปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ ปริมาณกรดที่สกัดได้ และอัตราร้อยละความอิ่มตัวของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

โดยทั่วไปสภาพกรดที่สกัดได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพัฒนาการของดิน (Prabuddham, 1982; Attanadana and Vacharotayan, 1986; Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000) โดยดินเปรี้ยวจัดจะมีพีเอชเป็นกรดรุนแรง ส่งเสริมให้มีปริมาณของเหล็กไอออน ไฮโดรเจนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนในสารละลายดินสูง ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบกำเนิดที่มี สารประกอบเหล็กซัลไฟด์สูง เมื่อมีการออกซิเดชันของสารประกอบดังกล่าว จะทำให้เกิดกรดขึ้น ในหน้าตัดดิน ดินจึงมีพีเอชต่ำมาก ทำให้ดินมีสภาพกรดที่สกัดได้อยู่ในระดับสูงมาก (นคร, 2523; Attanadana and Vacharotayan, 1986; Brady and Weil, 2008; Buol *et al.*, 2003)

1.4.4 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในพิสัย 20.0-31.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในระดับค่อนข้างสูงถึงสูง (ภาพที่ 9) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับกับการที่ดินเป็นดินในกลุ่มเนื้อละเอียดและมีปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง โดยทั่วไปความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ เนื้อดิน และชนิดของแร่ดินเหนียว (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548; Sanchez, 1976; Brady and Weil, 2008) ส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ทำให้ดินมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในรูป ไอออนบวกมีปริมาณสูงไปด้วย (Sanchez, 1976; Thompson and Troeh, 1978; Brady and Weil, 2008) โดยชุดดินบางน้ำเปรี้ยวมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเฉลี่ยสูงที่สุด (20.0-24.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) รองลงมาได้แก่ชุดดินรังสิต (14.0-25.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ชุดดินองครักษ์ (20.0-25.0 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ชุดดินเสนา (17.5-27.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) และชุดดินชัยบุรี (17.0-31.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ

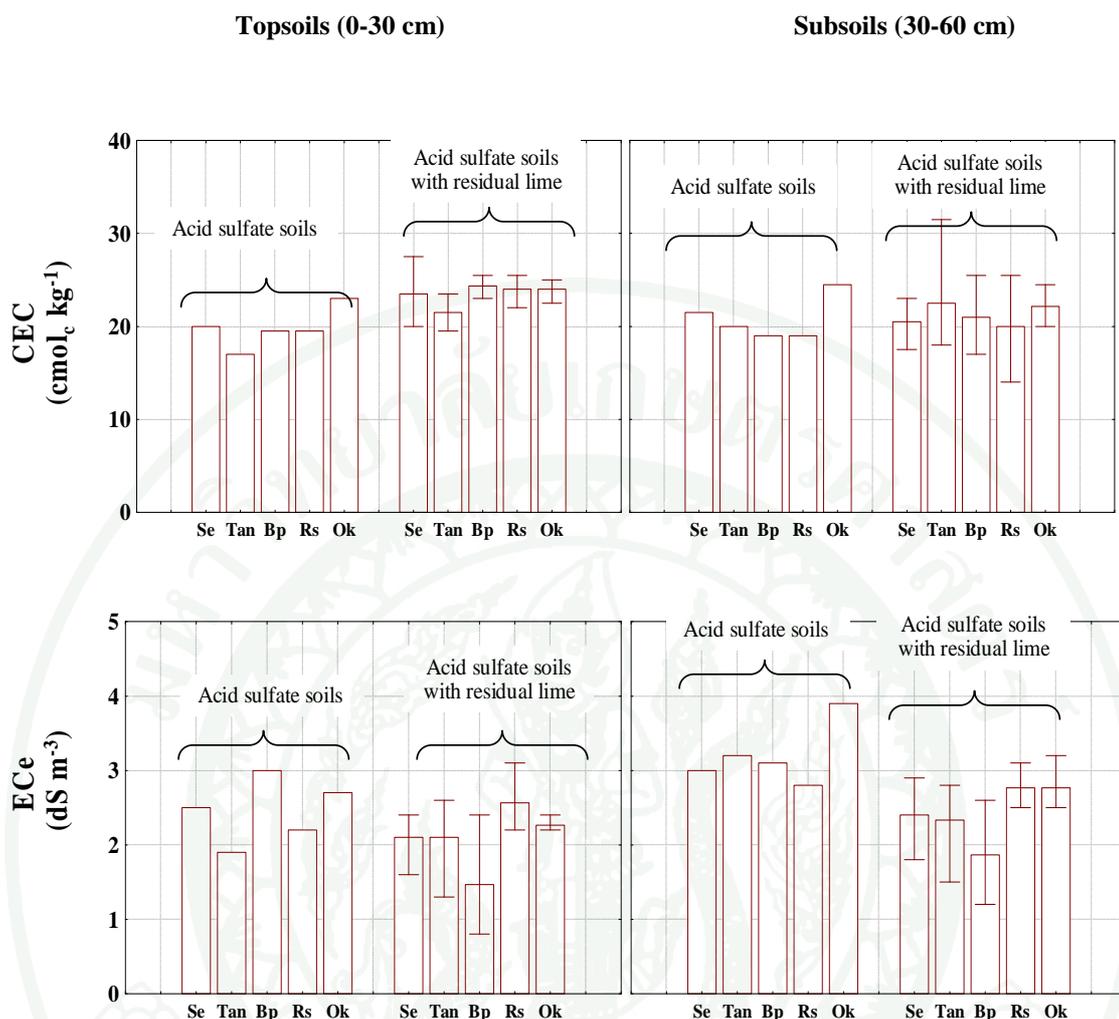
นอกจากนี้ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินที่ทำการศึกษาี้มีความสัมพันธ์กับชนิดของแร่ดินเหนียว เนื่องจากแร่ดินเหนียวในดินส่วนใหญ่เป็นแร่สมกไทต์ ซึ่งเป็นแร่ที่มีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ส่งผลให้ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินอยู่ในระดับสูงตามไปด้วย (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548; Sanchez, 1976; Brady and Weil, 2008)

1.4.5 อัตราร้อยละความอึมตัวเบส

ถึงแม้ว่าปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ของดินที่ทำการศึกษาอยู่ในระดับสูง แต่อัตราร้อยละความอึมตัวเบสของดินกลับมีค่าอยู่ในระดับต่ำ โดยในดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างจะมีค่าอยู่ในพิสัยร้อยละ 19.7-32.7 ซึ่งมีปริมาณไม่แตกต่างจากในดินเปรี้ยวจัดมากนัก (ร้อยละ 14.0-31.4) (ภาพที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดที่สกัดได้สูงมาก ดินบนจะมีร้อยละความอึมตัวเบสสูงกว่าดินล่าง อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของปูนที่ตกค้างอยู่ในดินบน (Sanchez, 1976; Thompson and Troeh, 1978; Attanadana and Vacharotayan, 1986; Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละความอึมตัวเบสมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของดิน ซึ่งผลของการที่ดินมีพีเอชต่ำทำให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมาได้มากขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมมักจะไปลดอิทธิพลของเบสต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน (Attanadana and Vacharotayan, 1986; Van Mensvoort *et al.*, 1991; Violante *et al.*, 1991; Violante and Gianfreda, 1995; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000)

1.4.6 สภาพการนำไฟฟ้า

สภาพการนำไฟฟ้าของสารสกัดอึมตัวของดิน (saturation extract) ของดินที่ทำการศึกษาทั้งหมดมีค่าอยู่ในพิสัย 0.8-3.9 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (ภาพที่ 9) ซึ่งถือว่าไม่มีความเค็มที่เป็นอุปสรรคต่อการปลูกพืช (Brady and Weil, 2008; Khresat, 2007; Husson *et al.*, 2000) ซึ่งดินเปรี้ยวจัดมีสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในพิสัย 1.8-3.9 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ซึ่งสูงกว่าในดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง (0.8-3.2 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) ซึ่งสอดคล้องกับโซเดียมที่สกัดได้ในดินเปรี้ยวจัดที่มีปริมาณมากกว่า (1.6-3.5 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) สภาพการนำไฟฟ้าของชุดดินองครักษ์และชุดดินรังสิตมีแนวโน้มสูงกว่าดินอื่น ๆ โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 2.3-3.1 และ 0.8-3.2 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ตามลำดับรองลงมาได้แก่ ชุดดินธัญบุรี (1.3-3.2 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) ชุดดินเสนา (1.6-3.0 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว (0.8-3.1 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) ตามลำดับ และโดยทั่วไปสภาพการนำไฟฟ้าของดินล่างมีแนวโน้มสูงกว่าดินบน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเค็มของดินอาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อดินล่างมากกว่าในดินบน (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000)



ภาพที่ 9 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และสภาพการนำไฟฟ้าของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

1.5 เหล็กในดินที่สกัดได้

1.5.1 ปริมาณเหล็กอสัณฐาน (Amorphous form)

เหล็กในรูปอสัณฐาน (amorphous form; Fe₀) โดยใช้วิธีสกัดด้วยสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลต (ammonium oxalate) เป็นเหล็กในรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ เช่น เฟอร์ริไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) และรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (organic complex) (Mehra and Jackson, 1960; Rayment and Higginson, 1992; National Soil Survey Center, 1996)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กในรูปออกไซด์อยู่ในพิสัย 4.4-10.3 และ 2.3-9.4 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 4.4-7.4 และ 2.3-7.2 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 5.6-10.3 และ 4.8-9.4 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 10)

1.5.2 ปริมาณเหล็กอิสระ (Free form)

เหล็กในรูปอิสระ (free form; Fe_p) โดยใช้วิธีสกัดด้วยสารละลายไดไซโอไนต์-ซิเตรต-ไบคาร์บอเนต (dithionite-citrate-bicarbonate) เป็นเหล็กที่อยู่ในรูปสารออกไซด์ และรูปที่มีผลึก ซึ่งรูปที่มีผลึกในดินส่วนใหญ่ได้แก่ เกอไทต์ (α -FeOOH) ฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) (McKeague and Day, 1966; Hodges and Zelazny, 1980; Rayment and Higginson, 1992)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กในรูปอิสระอยู่ในพิสัย 11.1-22.2 และ 11.2-19.8 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 11.1-15.5 และ 11.1-18.4 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 14.2-22.2 และ 11.9-19.8 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 10)

1.5.3 ปริมาณเหล็กในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic complex form)

เหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (organic complex form; Fe_p) เป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลาย และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในดิน (McKeague, 1967; Rayment and Higginson, 1992)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนอยู่ในพิสัย 1.2-6.4 และ 0.4-6.8 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงในชั้นดินล่าง ยกเว้นดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิต ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างชุดดินรังสิตและชุดดินองครักษ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 1.6-6.4 และ 0.4-5.6 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 1.2-5.6 และ 0.8-6.8 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 10)

ในภาพรวม พบว่าดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในรูปต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน โดยดินจะมีปริมาณเหล็กอิสระสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ เหล็กออกไซด์และเหล็กในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกับรูปของเหล็กที่โดยทั่วไปในดินมักอยู่ในรูปของเกอไทต์ (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993) ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไฟโรต์ถูกออกซิไดซ์โดยการทำให้ได้เฟร์ริกไฮดรอกไซด์ และทำปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็นสารประกอบจาโรไซต์ ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) และแร่เกอไทต์ (goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$) รวมทั้งเกิดออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเฟร์ริกออกไซด์ด้วย (van Breemen, 1980) จึงทำให้ดินมีปริมาณของเหล็กในรูปอิสระและออกไซด์ในปริมาณที่สูงกว่าเหล็กในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน

ชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินรังสิต ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินชัยบุรี และชุดดินเสนา ตามลำดับ เช่นเดียวกัน ชุดดินองครักษ์ก็เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กอิสระสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินรังสิต ชุดดินชัยบุรี ชุดดินเสนา และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ซึ่งปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินให้ผลสอดคล้องกับค่าพีเอชดิน โดยดินที่มีพีเอชต่ำจะส่งผลให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมามาก (Attanadana and Vacharotayan, 1986; Buol *et al.*, 2003; Brady and Weil, 2008) และชุดดินองครักษ์ก็เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนสูงที่สุด รองลงมา เป็นชุดดินรังสิต ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินเสนา และชุดดินชัยบุรี ตามลำดับ

ในภาพรวม พบว่าดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในรูปต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน โดยดินจะมีปริมาณเหล็กอิสระสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ เหล็กออกไซด์และเหล็กในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกับรูปของเหล็กที่โดยทั่วไปในดินมักอยู่ในรูปของเกอไทต์ (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993) ซึ่งอาจเกิดจากการที่ไฟโรต์ถูกออกซิไดซ์โดยการทำให้ได้เฟร์ริกไฮดรอกไซด์ และทำปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็นสารประกอบจาโรไซต์ ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) และแร่เกอไทต์ (goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$) รวมทั้งเกิดออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเฟร์ริกออกไซด์ด้วย (van Breemen, 1980) จึงทำให้ดินมีปริมาณของเหล็กในรูปอิสระและออกไซด์ในปริมาณที่สูงกว่าเหล็กในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน

ชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินรังสิต ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินชัยบุรี และชุดดินเสนา ตามลำดับ เช่นเดียวกัน ชุดดินองครักษ์ก็เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กอิสระสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินรังสิต ชุดดินชัยบุรี ชุดดินเสนา และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ซึ่งปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินให้ผลสอดคล้องกับค่าพีเอชดิน โดยดินที่มีพี

เอชต่ำจะส่งผลให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมามาก (Attanadana and Vacharotayan, 1986; Buol *et al.*, 2003; Brady and Weil, 2008) และชุดดินองครักษ์ก็เป็นดินที่มีปริมาณเหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนสูงที่สุด ร่องลงมาเป็นชุดดินรังสิต ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินเสนา และชุดดินชัยบุรี ตามลำดับ

1.6 ปริมาณอะลูมิเนียมในดินที่สกัดได้

1.6.1 ปริมาณอะลูมิเนียมในรูปอสัณฐาน (Amorphous form)

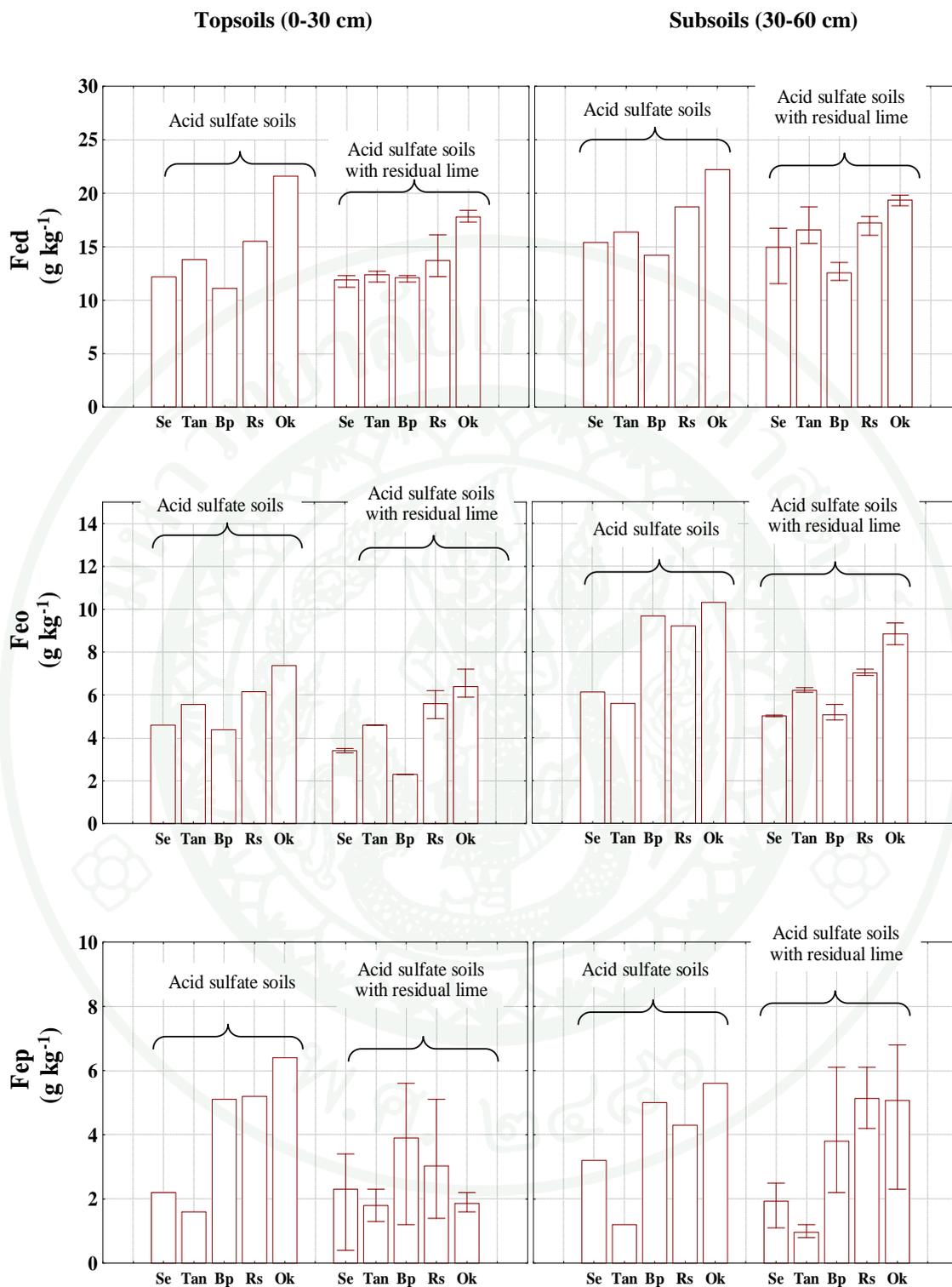
ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณอะลูมิเนียมในรูปอสัณฐานอยู่ในพิสัย 26.1-45.9 และ 21.5-41.1 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 21.1-40.1 และ 21.5-41.1 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 36.7-45.6 และ 33.7-41.1 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 11)

1.6.2 ปริมาณอะลูมิเนียมในรูปอิสระ (Free form)

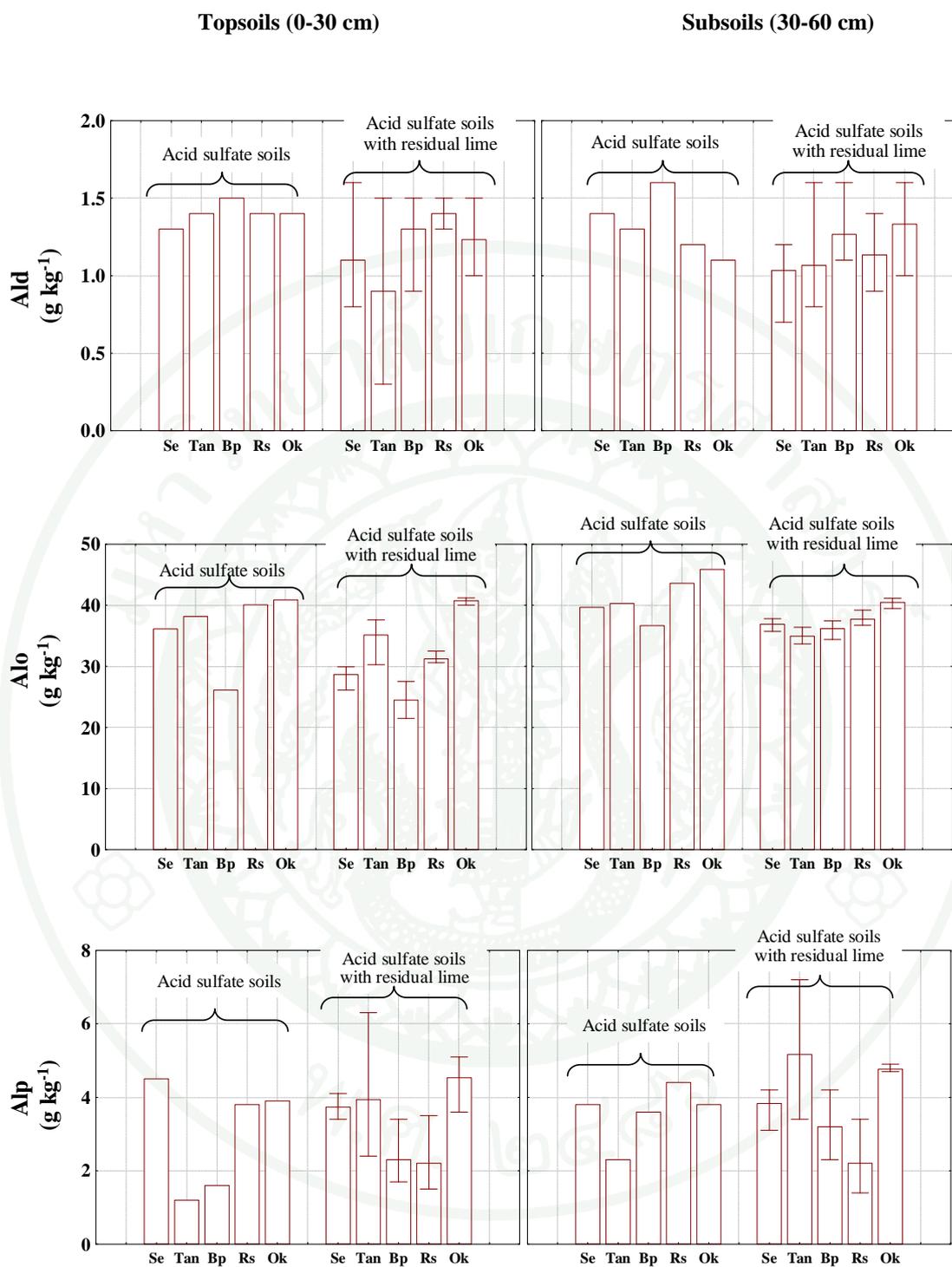
ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณอะลูมิเนียมในรูปอิสระอยู่ในพิสัย 1.1-1.6 และ 0.3-1.6 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 1.3-1.5 และ 0.3-1.6 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 1.1-1.6 และ 0.7-1.6 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 11)

1.6.3 ปริมาณอะลูมิเนียมในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic complex form)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีอะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนอยู่ในพิสัย 1.2-4.5 และ 1.4-6.3 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 1.2-4.5 และ 1.5-6.3 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 2.3-4.4 และ 1.4-7.2 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 10 ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Fe_o), เหล็กในรูปอิสระ (Fe_d) และเหล็กในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Fe_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด



ภาพที่ 11 ปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Al₀), อะลูมิเนียมในรูปอิสระ (Al₁) และอะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Al_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

ผลการศึกษาพบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณอะลูมิเนียมในรูปต่าง ๆ ต่ำกว่าดินเปรี้ยวจัดเล็กน้อยในทุกชุดดิน ซึ่งดินมีปริมาณอะลูมิเนียมอสัณฐานสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ อะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน และอะลูมิเนียมอิสระตามลำดับ และการที่ดินมีปริมาณ อะลูมิเนียมอสัณฐานสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ ammonium oxalate ในการสกัดซึ่งส่งผลให้ อะลูมิเนียมที่อยู่ในส่วนของ layered aluminosilicates ละลายออกมา ในขณะที่การสกัดด้วย dithionite-citrate-bicarbonate (Mehra and Jackson, 1960) ไม่สามารถสกัดอะลูมิเนียมในส่วนนี้ได้ หรือสกัดได้แต่น้อย (Rayment and Higginson, 1992) ลักษณะเช่นนี้มักพบในดินที่มีการสลายตัวผุพังสูง ดินมีแร่ชนิด hydroxy aluminum interlayered mineral หรือดินมีแร่ที่มีการจัดเรียงตัวของ อะลูมิเนียมไม่เป็นระเบียบ รวมทั้งดินเปรี้ยวจัดด้วย (Yampracha, 2006)

ชุดดินองครักษ์มีปริมาณอะลูมิเนียมอสัณฐานสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ชุดดิน รังสิต ชุดดินเสนา และชุดดินชัยบุรี ตามลำดับ เช่นเดียวกับ ชุดดินองครักษ์ที่มีอะลูมิเนียมในรูป อิสระมากที่สุด รองลงมาเป็นชุดดินรังสิต ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินชัยบุรี และชุดดินเสนา ตามลำดับ และชุดดินชัยบุรีเป็นดินที่มีปริมาณอะลูมิเนียมในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนมากที่สุด รองลงมาได้แก่ชุดดินองครักษ์ ชุดดินเสนา ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว และชุดดินรังสิต ตามลำดับ

1.7 ปริมาณแอมกานีสที่สกัดได้

1.7.1 ปริมาณแอมกานีสในรูปอสัณฐาน (Amorphous form)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณแอมกานีสในรูป อสัณฐานอยู่ในพิสัย 0.02-0.58 และ 0.02-0.72 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.04-0.58 และ 0.04-0.72 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.02-0.50 และ 0.02-0.49 กรัม ต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 12)

1.7.2 ปริมาณแอมกานีสในรูปอิสระ (Free form)

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณแอมกานีสในรูปอิสระอยู่ ในพิสัย 0.05-0.22 และ 0.03-0.13 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.05-0.09 และ 0.03-0.13 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.06-0.11 และ 0.03-0.12 กรัมต่อ กิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ (ภาพที่ 12)

1.7.3 ปริมาณแมงกานีสในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic complex form)

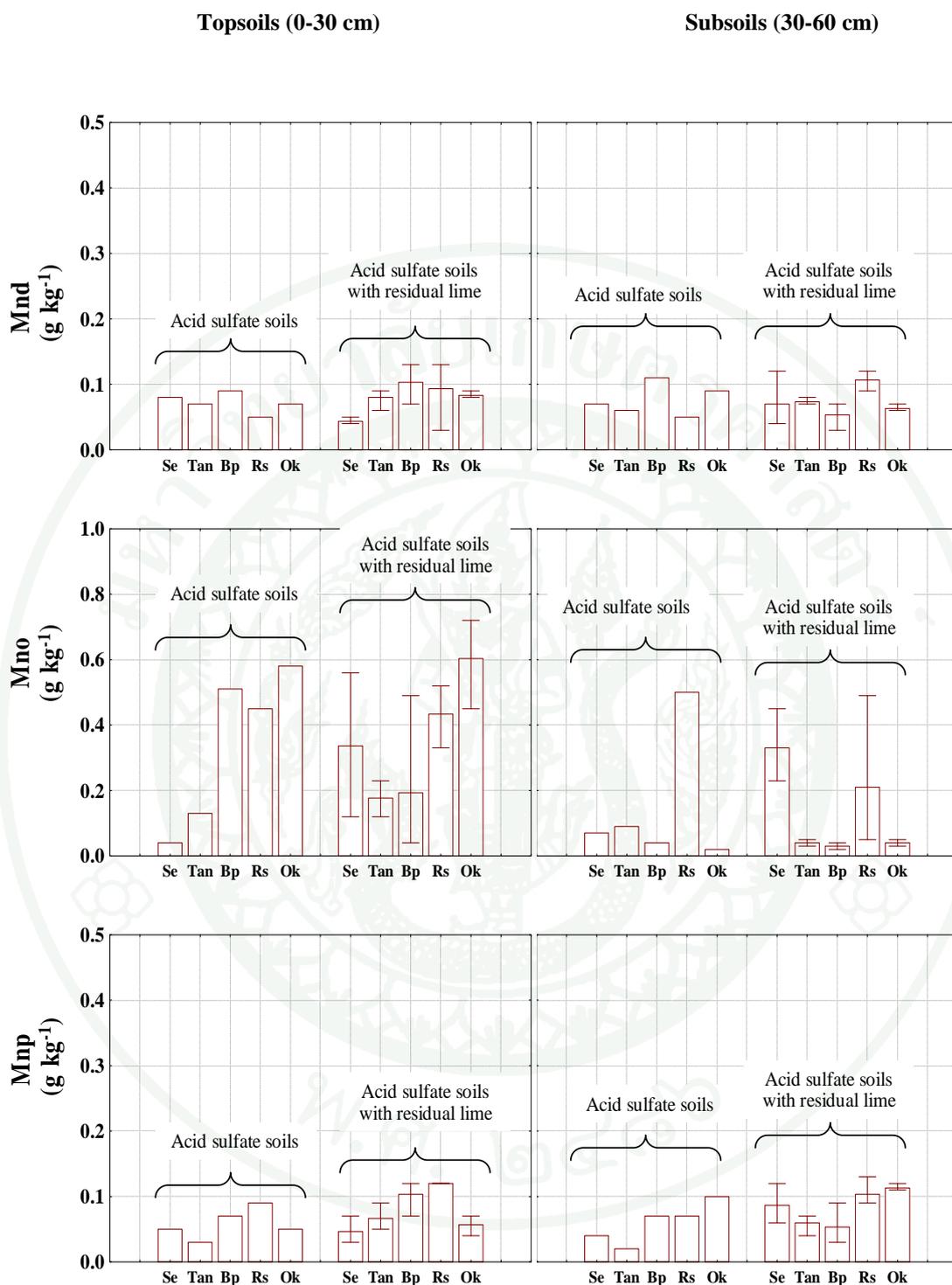
ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีแมงกานีสในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อนในรูปอยู่ในพิสัย 0.02-0.16 และ 0.03-0.13 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.03-0.09 และ 0.03-0.12 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.02-0.10 และ 0.03-0.13 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ปริมาณแมงกานีสในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปออสัญฐาน รองลงมาได้แก่แมงกานีสอิสระ และแมงกานีสในรูปของสารอินทรีย์เชิงซ้อน ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณแมงกานีสในดินขึ้นอยู่กับพีเอชของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความชื้นและอากาศภายในดิน แมงกานีสจะมีน้อยในดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง (มากกว่า 6 กรัมต่อกิโลกรัม) หรือในดินที่มีการระบายอากาศไม่ดี หรือดินที่อยู่ในสภาพรีดักชันที่รุนแรงโดยแมงกานีสออกไซด์จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปละลายได้ (Mn^{2+}) แล้วถูกชะละลายออกไปจากดิน (Schulte and Kelling, 1999) ทำให้คงอยู่ในดินในปริมาณที่ต่ำ (Buol *et al.*, 2003)

1.8 องค์ประกอบทางเคมีรวม

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีรวมประกอบด้วย ปริมาณรวมของธาตุซิลิคอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) ไทเทเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) และฟอสฟอรัส (P) ของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณซิลิคอนอยู่ในพิสัย 277.5-334.1 และ 267.6-314.7 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 297.6-334.1 และ 281.5-314.5 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 281.9-314.6 และ 267.7-314.7 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ



ภาพที่ 12 ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในรูปออกไซด์ (Mn_d), แมงกานีสในรูปอิสระ (Mn_f) และแมงกานีสในรูปสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Mn_p) ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ในพิสัย 88.0-109.7 และ 93.7-118.8 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 88.0-106.9 และ 96.6-118.8 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 94.3-109.8 และ 93.7-111.5 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณเหล็กอยู่ในพิสัย 28.01-88.8 และ 19.2-86.8 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 28.1-50.9 และ 23.4-48.3 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 47.2-88.8 และ 19.2-86.8 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณโพแทสเซียมอยู่ในพิสัย 12.2-17.4 และ 8.0-17.9 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 12.1-16.5 และ 12.7-17.0 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 13.0-17.4 และ 8.0-17.9 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณกำมะถันอยู่ในพิสัย 2.6-46.5 และ 0.9-60.1 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชั้นดินล่าง โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 2.6-18.6 และ 2.9-12.2 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 3.0-46.5 และ 1.1-60.1 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณไทเทเนียมอยู่ในพิสัย 5.2-6.0 และ 5.0-6.0 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 5.2-6.0 และ 5.0-6.0 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 5.2-6.0 และ 5.2-6.3 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในพิสัย 3.8-8.8 และ 3.9-8.1 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 3.8-6.8 และ 4.1-6.4 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 4.4-8.8 และ 3.9-8.1 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณแคลเซียมอยู่ในพิสัย 0.7-2.5 และ 0.9-2.7 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.8-2.5 และ 1.1-6.1 กรัมต่อกิโลกรัม

และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.7-1.7 และ 0.9-3.4 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณโซเดียมอยู่ในพิสัย 1.3-2.2 และ 1.3-2.5 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 1.3-2.2 และ 1.3-2.2 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 1.3-2.2 และ 1.5-2.5 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 0.1-0.6 และ 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.3-0.6 และ 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.1-0.4 และ 0.1-0.7 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณแมงกานีสอยู่ในพิสัย 0.8-1.9 และ 0.6-2.4 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.8-1.9 และ 0.8-2.4 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.9-1.4 และ 0.6-2.1 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณสังกะสีอยู่ในพิสัย 38.0-67.0 และ 39.0-62.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 38.0-67.0 และ 41.0-62.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 39.0-57.0 และ 39.0-54.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีรวมในดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

Soil series	Depth (cm)	Si	Al	Fe	Ti	Na	Mg	K	Ca	P	S	Mn	Cu	Zn
(-----g kg ⁻¹ -----)														
Acid sulfate soils														
Se	0-30	315.2	101.6	31.5	6.0	1.3	4.8	13.8	4.0	0.4	2.4	1.9	13	38
	30-60	299.8	102.2	61.9	5.5	1.7	5.6	16.4	3.0	0.4	4.2	1.1	14	57
Tan	0-30	334.1	88.0	28.1	6.1	1.9	4.7	14.3	1.5	0.4	6.0	0.9	14	39
	30-60	281.9	94.3	52.9	6.0	1.7	4.9	13.5	0.9	0.3	5.3	1.0	16	52
Bp	0-30	297.6	104.8	33.2	5.3	2.2	6.8	16.5	2.5	0.6	2.6	1.1	13	49
	30-60	291.2	109.7	47.2	5.8	2.2	8.8	17.4	1.7	0.4	3.0	1.4	14	52
Rs	0-30	297.0	102.8	45.6	5.6	1.2	4.2	12.1	1.2	0.4	7.2	0.8	14	67
	30-60	314.6	100.0	60.5	5.8	1.3	4.4	13.0	1.1	0.2	10.9	0.9	14	39
Ok	0-30	300.0	106.9	50.9	5.5	1.4	3.8	12.2	0.8	0.1	18.6	0.8	14	43
	30-60	277.5	104.3	88.8	5.2	2.2	4.6	17.4	0.7	0.1	46.5	0.8	14	49
Acid sulfate soils with residual lime														
Se1	0-30	304.4	116.2	30.4	5.4	1.4	4.7	14.0	6.1	0.5	2.3	0.8	14	50
	30-60	289.0	106.7	19.2	5.5	1.9	5.3	15.4	3.1	0.5	4.0	0.6	10	39
Se2	0-30	290.8	114.1	25.7	5.8	2.2	5.9	14.6	2.5	0.5	3.7	1.1	14	51
	30-60	296.2	109.6	51.3	5.5	2.5	5.8	14.5	2.3	0.5	4.3	1.0	14	52
Se3	0-30	286.6	118.8	43.1	5.8	1.5	5.9	14.7	3.5	0.9	2.1	1.1	14	47
	30-60	268.2	110.3	30.8	5.6	1.9	7.0	15.9	3.4	0.4	4.6	0.7	14	54
Tan1	0-30	310.3	99.5	34.0	5.8	1.8	6.2	16.1	3.0	0.6	3.2	1.5	14	51
	30-60	297.6	111.5	40.2	6.3	1.7	6.1	16.1	1.2	0.4	3.8	1.2	14	53
Tan2	0-30	302.8	103.0	44.1	6.0	1.4	5.1	14.0	3.1	0.7	2.6	1.5	16	45
	30-60	290.3	101.9	27.6	5.9	1.6	5.5	14.0	1.4	0.5	8.6	1.4	16	54
Tan3	0-30	300.0	110.0	37.6	5.6	1.5	5.0	14.7	3.2	0.7	4.9	1.2	13	45
	30-60	305.1	104.3	38.5	6.2	1.9	5.0	14.7	1.4	0.5	4.1	1.1	13	43

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Soils series	Depth (cm)	Si	Al	Fe	Ti	Na	Mg	K	Ca	P	S	Mn	Cu	Zn
(-----g kg ⁻¹ -----)														
Acid sulfate soils with residual lime														
Bp1	0-30	314.5	102.8	23.9	5.2	1.9	6.2	14.9	4.2	1.6	1.6	1.3	14	62
	30-60	309.7	107.6	35.2	5.3	2.2	6.9	8.0	1.5	0.5	1.6	1.0	17	43
Bp2	0-30	309.0	101.8	26.5	5.2	2.2	6.3	15.4	4.7	2.7	0.9	2.4	13	51
	30-60	281.0	105.2	44.5	5.4	1.5	4.8	13.1	2.4	0.7	1.4	1.1	11	47
Bp3	0-30	300.4	99.3	32.2	5.0	1.8	6.0	14.9	3.2	1.7	1.0	1.9	13	60
	30-60	299.0	108.9	38.1	5.2	2.2	8.1	17.9	2.3	0.7	1.2	1.3	13	44
Rs1	0-30	293.9	107.0	48.3	5.8	1.8	6.4	16.4	1.5	1.0	5.8	1.3	14	43
	30-60	298.1	108.4	42.3	5.8	2.2	6.4	17.1	1.1	0.3	5.8	1.4	13	49
Rs2	0-30	301.8	100.6	34.7	5.5	1.3	4.8	12.7	1.5	1.0	4.4	1.3	14	46
	30-60	267.7	93.7	86.8	5.3	1.9	5.2	17.7	1.1	0.4	6.9	1.1	18	53
Rs3	0-30	307.2	96.6	29.2	5.3	1.6	5.4	13.2	1.1	1.0	6.5	1.3	13	54
	30-60	306.5	101.4	35.0	5.5	1.9	6.3	15.4	1.1	0.4	21.1	2.1	12	48
Ok1	0-30	286.7	105.7	46.8	5.4	1.5	4.1	13.5	1.2	0.2	10.5	0.8	14	46
	30-60	286.4	109.8	64.3	5.9	1.9	3.9	12.7	0.9	0.5	17.8	0.9	14	49
Ok2	0-30	285.4	108.6	43.2	5.4	1.6	5.0	14.7	1.6	0.3	7.9	1.0	17	50
	30-60	314.7	96.8	49.1	5.3	2.1	6.2	15.9	1.2	0.1	60.1	1.1	14	44
Ok3	0-30	281.5	107.8	36.9	5.6	2.1	5.3	17.0	1.4	0.4	12.2	1.1	14	52
	30-60	280.6	109.1	47.2	5.2	2.4	6.0	16.9	1.0	0.1	28.6	1.1	13	45

ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณทองแดงอยู่ในพิสัย 13.0-16.0 และ 1.0-18.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 13.0-14.0 และ 13.0-17.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 14.0-16.0 และ 1.0-18.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ

โดยภาพรวมพบว่า ดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณซัลฟอนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ อะลูมินัม เหล็ก โพแทสเซียม กำมะถัน ไทเทเนียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส แมงกานีส สังกะสี และทองแดงตามลำดับ

การที่ซัลฟอนมีปริมาณสูงที่สุดในดินเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่น ๆ นั้นเนื่องจากซัลฟอนเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของแร่ปฐมภูมิหลายชนิด โดยเฉพาะแร่ควอตซ์ (Wilson, 1987; Ece *et al.*, 1999) ซึ่งเป็นแร่ที่พบมากที่สุดได้ออกไซด์ในอนุภาคขนาดทรายแป้งของดิน อีกทั้งสภาพแวดล้อมของดินที่ทำการศึกษามีผลทำให้ซัลฟอนอยู่ในระบบดิน (Sanchez, 1976; Buol *et al.*, 2003) นอกจากนี้ซัลฟอนและอะลูมินัมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างแร่ดินเหนียวซัลเฟตในดิน (Wilson, 1987; Ece *et al.*, 1999) โดยมีการศึกษารายงานว่าสัดส่วนระหว่างซัลฟอนและอะลูมินัมสูงกว่า 4:1 แร่ดินเหนียวที่พบในดินส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวประเภท 2:1 มากกว่าแร่ดินเหนียวประเภท 1:1 (Sanchez, 1976; Buol *et al.*, 2003) เช่นเดียวกับการที่มีปริมาณเหล็ก อะลูมินัม และกำมะถัน ในดินที่ทำการศึกษามาก เนื่องจากวัตถุดิบกำเนิดของดินมีวัสดุซัลไฟด์และ/หรือสารประกอบไพไรต์ (FeS_2) ในปริมาณสูง (Sanchez, 1976; Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้เนื่องจากธรรมชาติของดินเปรี้ยวจัดเองที่ต้องมีปริมาณของเหล็กอยู่ในปริมาณที่พอเพียงต่อการเกิดไพไรต์ รวมทั้งเหล็กอิสระในดินมักอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว หรือเคลือบอนุภาคดิน หรือผสมอยู่กับแร่ดินเหนียว ในกรณีของแมงกานีสพบอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าเหล็ก เนื่องจากแมงกานีสพบอยู่ในเปลือกโลกน้อยมาก (Krauskopf, 1972; Schulte and Kelling, 1999) หรืออาจเกี่ยวข้องกับเคลื่อนย้ายของแมงกานีสในหน้าตัดดินที่ทำให้แมงกานีสมักอยู่ในระดับลึกกว่าเหล็กเสมอ หรือแมงกานีสมักจะเกิดในสภาพออกซิไดซ์และรีดิวซ์ที่รุนแรง นอกจากนี้พื้นที่ที่พบดินเหล่านี้เป็นพื้นที่ราบลุ่ม จึงเป็นส่วนรับตะกอนหรือสารละลายที่เคลื่อนย้ายมา จึงมักมีการสะสมธาตุที่เป็นค่าในปริมาณสูง (Schulte and Kelling, 1999)

1.9 การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน

การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยใช้หลักเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน (กองสำรวจดิน, 2523; Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) โดยใช้ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดิน ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และค่าอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส ซึ่งได้แสดงวิธีคาดคะเนระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินไว้ในตารางที่ 2 พบว่า ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับปานกลางทั้งในดินบนและดินล่าง โดยมีอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงสูง ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง และอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบสอยู่ในระดับต่ำ

ในภาพรวม พบว่าดินทุกบริเวณยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการด้านธาตุอาหารพืชโดยเฉพาะฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปริมาณที่ต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการที่ดินเป็นกรดรุนแรง ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนของเหล็กและอะลูมิเนียมที่ละลายน้ำยาก ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จึงต่ำ (Van Mensvoort *et al.*, 1991; Cook *et al.*, 2000; Husson *et al.*, 2000) ดังนั้นการใช้ปูนเพื่อลดความเป็นกรดของดินจะช่วยลดการละลายของเหล็กและอะลูมิเนียมในสารละลายดิน (Eiumnroh, 1984; Van Mensvoort and Le Quang Tri, 1988; Brinkman *et al.*, 1993) ยังคงมีความจำเป็นในกรณีที่ใช้พื้นที่เหล่านี้เพื่อทำการเกษตร

ตารางที่ 2 ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

Soil series	Depth (cm)	OM (g kg ⁻¹)	Avail. P (mg kg ⁻¹)	Avail. K (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	BS (%)	Sum of score	Fertility status
Acid sulfate soils								
Se	0-30	39.0(3)	9.8(1)	91(3)	20.0(2)	31.4(1)	10	Medium
	30-60	6.5(1)	2.6(1)	73(2)	21.5(3)	19.8(1)	8	Medium
Tan	0-30	22.9(2)	2.1(1)	110(3)	17.0(2)	20.2(1)	9	Medium
	30-60	12.3(1)	1.0(1)	233(3)	20.0(2)	15.5(1)	8	Medium
Bp	0-30	40.6(3)	19.6(2)	344(3)	19.5(2)	30.4(1)	11	Medium
	30-60	7.3(1)	10.2(2)	330(3)	19.0(2)	29.9(1)	9	Medium
Rs	0-30	27.0(2)	5.6(1)	94(3)	19.5(2)	15.4(1)	9	Medium
	30-60	10.5(1)	2.1(1)	171(3)	19.0(2)	18.4(1)	8	Medium
Ok	0-30	36.8(3)	3.0(1)	160(3)	23.0(3)	12.0(1)	11	Medium
	30-60	15.1(2)	2.1(1)	132(3)	24.5(3)	14.0(1)	10	Medium
Acid sulfate soils with residual lime								
Se	0-30	45.5(3)	7.7(1)	126(3)	23.0(3)	23.7(1)	11	Medium
	30-60	3.4(1)	3.4(1)	128(3)	21.0(3)	27.2(1)	9	Medium
Tan	0-30	22.3(2)	9.4(1)	316(3)	21.5(3)	22.8(1)	10	Medium
	30-60	13.4(1)	5.8(1)	317(3)	18.0(2)	20.1(1)	8	Medium
Bp	0-30	45.8(3)	10.2(2)	249(3)	24.5(3)	32.7(1)	12	Medium
	30-60	11.6(1)	3.3(1)	260(3)	20.5(3)	25.1(1)	9	Medium
Rs	0-30	27.3(2)	5.3(1)	182(3)	24.5(3)	26.7(1)	10	Medium
	30-60	5.1(1)	3.0(1)	182(3)	20.5(3)	23.5(1)	9	Medium
Ok	0-30	27.3(2)	5.3(1)	182(3)	24.5(3)	26.7(1)	10	Medium
	30-60	9.3(1)	7.7(1)	263(3)	22.0(3)	21.7(1)	9	Medium

หมายเหตุ OM (g kg⁻¹) <15 = 1, 15–35 = 2, >35 = 3;

Available P (mg kg⁻¹) <10 = 1, 10–25 = 2, >25 = 3,

Available K (mg kg⁻¹) <60 = 1, 60–90 = 2, >90 = 3,

CEC (cmol kg⁻¹) <10 = 1, 10–20 = 2, >20 = 3;

BS (%) <35 = 1, 35–75 = 2, >75 = 3

Sum of scores: ≤7 = low fertility; 8–12 = medium fertility; ≥13 = high fertility.

4. สมบัติทางแร่วิทยาของดิน

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบเชิงแร่ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว และอนุภาคขนาดทรายแป้ง โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแร่มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3

4.1 แร่ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีสเมกไทต์เป็นแร่องค์ประกอบหลัก โดยดินส่วนใหญ่มีสเมกไทต์มากกว่าร้อยละ 60 ยกเว้นชุดดินเสนาที่มีและไม่มีปูนตกค้าง และบางบริเวณของดินที่มีปูนตกค้างได้แก่ ชุดดินชัยบุรี ชุดดินรังสิต และชุดดินองครักษ์ ที่มีแร่สเมกไทต์ปานกลางประมาณร้อยละ 40-60 ดินที่ทำการศึกษายพบแร่เคโอลิไนต์ในปริมาณน้อยถึงปานกลาง (ร้อยละ 20-60) แร่อิลไลต์ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 20-40) และแร่ควอตซ์ในปริมาณน้อยมาก (< ร้อยละ 5)

โดยทั่วไป สภาพแวดล้อมของดินที่ทำการศึกษามีเหมาะสมต่อการกำเนิดหรือการสร้างตัวของแร่สเมกไทต์มากกว่าแร่ดินเหนียวเคโอลิไนต์ (Fitzpatrick *et al.*, 1998; Buol *et al.*, 2003) โดยมีวัตถุดิบกำเนิดที่สลายตัวแล้วให้เกิดไอออนที่จำเป็นสำหรับการสร้างตัว สภาพภูมิประเทศเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้มีการสะสมของธาตุที่เป็นค่ารวมทั้งซิลิกอน ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเกิดแร่สเมกไทต์ (Furquim *et al.*, 2008) เช่นเดียวกับกับแร่อิลไลต์ที่มักพบในดินเขตร้อนที่มีพัฒนาการของหน้าตัดดินน้อย และมักเกิดได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างและมีน้ำขัง เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากในหินตะกอน และในสภาพที่มีการตกตะกอนต่างๆ และพบมากที่สุดใสภาพแวดล้อมในทะเล (Fitzpatrick *et al.*, 1998) จากการที่พบแร่เคโอลิไนต์ในดินในปริมาณที่ค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่าดินที่ทำการศึกษามีพัฒนาการในระดับปานกลาง โดยชุดดินเสนาจะมีพัฒนาการของดินสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดอื่น ๆ ส่วนแร่ควอตซ์ที่พบในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว นั้นอาจเกิดจากสารละลายซิลิกา หรือลักษณะที่เป็นคอลลอยด์ของสารเชื่อมที่เกิดจากซิลิกา (siliceous) ในหินตะกอนที่ถูกพัดพามาโดยน้ำในลักษณะทุติยภูมิ (Brikeland, 1974; Buol *et al.*, 2003; Brady and Weil, 2008)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางแร่วิทยาในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Soil series	Depth (cm)	Clay fraction			Silt fraction	
		Smectite	Kaolinite	Illite	Quartz	Quartz
Acid sulfate soils						
Se	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Tan	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Bp	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Rs	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Ok	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Acid sulfate soils with residual lime						
Se1	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Se2	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	x	x	tr	xxxx
Se3	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	x	x	tr	xxxx
Tan1	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Tan2	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Tan3	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Bp1	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	-	xxxx
Bp2	0-30	xxx	xx	x	-	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Bp3	0-30	xxx	xx	x	-	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	-	xxxx
Rs1	0-30	xxx	x	x	-	xxxx
	30-60	xxx	x	x	-	xxxx
Rs2	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Rs3	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Ok1	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx
Ok2	0-30	xx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xx	xx	x	tr	xxxx
Ok3	0-30	xxx	xx	x	tr	xxxx
	30-60	xxx	xx	x	tr	xxxx

หมายเหตุ xxxx = dominant (>60%), xxx = large (40-60%), xx = moderate (20-40%),

x = small (5-20%), tr = trace (<5%), - = not detected

4.2 แร่ในอนุภาคขนาดทรายแป้ง

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีแร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบเชิงแร่หลัก และมีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 60 สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุรวมซึ่งพบซิลิกอนในปริมาณสูง ซึ่งแร่ควอตซ์ที่พบนั้นน่าจะเป็นผลจากวัตถุต้นกำเนิด (Brikeland, 1974; Buol *et al.*, 2003; Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้แร่ควอตซ์ยังเป็นแร่ที่มีความคงทนต่อการสลายตัวสูงมาก จึงมักเป็นแร่ที่หลงเหลืออยู่ในดิน (อัญชลี, 2534; Calvert *et al.*, 1980)

จากลักษณะเชิงแร่ที่พบในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียวและทรายแป้งในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นอิทธิพลร่วมของน้ำจืดและน้ำทะเลในสภาพแวดล้อมของน้ำกร่อยเป็นส่วนใหญ่ (เอิบ, 2548)

นอกจากนี้ จากผลการศึกษาที่พบว่าแร่สเมกไทต์เป็นแร่องค์ประกอบหลัก แสดงให้เห็นว่าแร่สเมกไทต์จะมีอิทธิพลหลักในการควบคุมสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินมากกว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินที่อยู่ในระดับสูง ทำให้มีปริมาณธาตุอาหารพืชตามธรรมชาติค่อนข้างมาก แต่อาจมีข้อจำกัดทางด้านฟิสิกส์ เนื่องจากแร่ดินเหนียวเหล่านี้มีสมบัติในการยึดเหนี่ยวสูง (Bhattacharyya *et al.*, 200; Brady and Weil, 2008) ส่งผลช่วงเวลาในการไถพรวนดินมีอยู่อย่างจำกัด รวมทั้งเกิดความเสียหายของรากพืชได้ ในกรณีที่ใช้ปลูกพืชไร่ที่ดอน

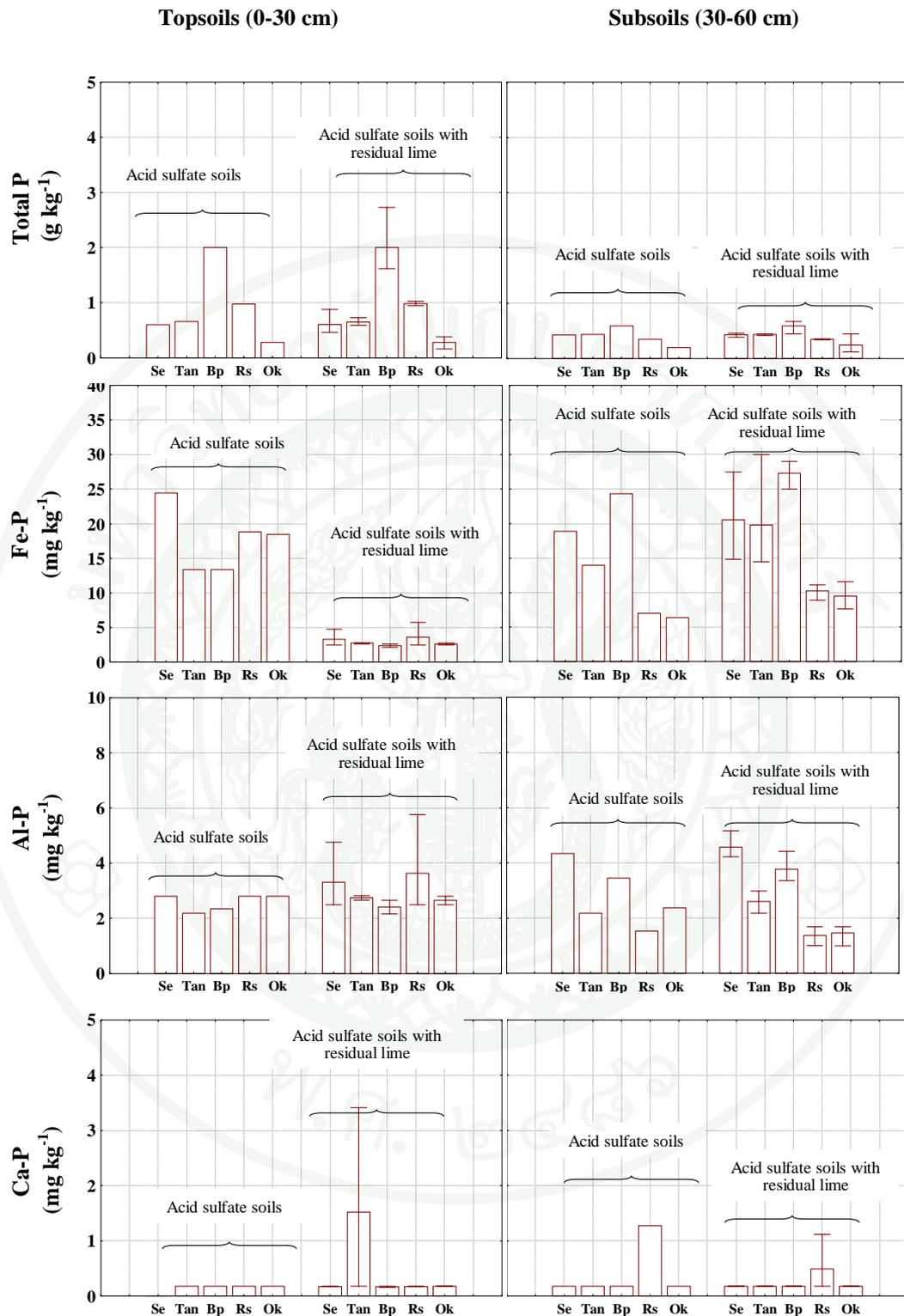
5. ฟอสฟอรัสในดิน

ดินเปรี้ยวจัดจะมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดต่ำกว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง โดยมีปริมาณอยู่ในพิสัย 0.1-0.6 และ 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.3-0.6 และ 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.1-0.4 และ 0.1-0.7 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ ซึ่งดินบางน้ำเปรี้ยวจะมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงที่สุดโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 0.4-2.7 กรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาได้แก่ชุดดินชัยบุรี (0.4-0.7 กรัมต่อกิโลกรัม) ชุดดินเสนา (0.4-0.9 กรัมต่อกิโลกรัม) ชุดดินรังสิต (0.2-1.0 กรัมต่อกิโลกรัม) และชุดดินองครักษ์ (0.1-0.5 กรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ (ภาพที่ 13) โดยปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของดินจะมีปริมาณผกผันกับพีเอชดิน โดยดินที่มีความเป็นกรดรุนแรงก็จะมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดต่ำกว่าดินที่เป็นกรดเล็กน้อย

แต่อย่างไรก็ตามดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างกลับมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่เพียง 3.0-10.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และฟอสฟอรัสอนินทรีย์ของดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Fe-P โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 6.4-34.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาได้แก่ Al-P และ Ca-P ที่มีค่าอยู่ในพิสัย 1.0-5.8 และ 0.2-3.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 13) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสัมฤทธิ์ (2544) ที่ได้รายงานไว้ว่า ดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิต และชุดดินรังสิตกรดจัดจะมีปริมาณ Fe-P > Re-P > Al-P > Ca-P เช่นเดียวกันกับการศึกษาของนิตยา (2532) ที่รายงานไว้ว่า ดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิต ชุดดินรังสิตกรดจัด และชุดดินเสนา จะมีปริมาณ Fe-P มากที่สุดเช่นกัน ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าในชุดดินบางกอก ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ดินเปรี้ยวจัดเป็นดินที่มีพีเอชต่ำมาก ส่งผลให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมามากในสารละลายดิน จึงทำให้ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ตกตะกอนเกิดสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับเหล็ก และอะลูมิเนียม ทำให้พบฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในรูป Fe-P และ Al-P มากกว่า Ca-P ซึ่งฟอสฟอรัสเหล่านี้เป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ จึงส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเหล่านี้มีค่าต่ำ (Sanchez, 1976; Brady and Weil, 2008)

อย่างไรก็ตาม ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ดินบนจะมีปริมาณ Fe-P ต่ำกว่าดินเปรี้ยวจัด โดยมีค่าเท่ากับ 3.4-5.8 และ 13.8-24.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ดินล่างมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยมีเท่ากับ 5.8-24.5 และ 7.0-34.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ตามลำดับ (ภาพที่ 13) แต่ในกรณีของ Al-P กลับพบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีปริมาณสูงกว่าดินเปรี้ยวจัด โดยมีปริมาณ Al-P เท่ากับ 2.2-5.8 และ 2.2-2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินบน และ 1.0-5.2 และ 1.5-4.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินล่าง ตามลำดับ (ภาพที่ 13)

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและเปรี้ยวจัดจะมีปริมาณ Ca-P ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณอยู่ในพิสัย 0.18-3.41 และ 0.18-1.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 13) ดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 0.18-3.41 และ 0.18-0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 0.18-1.12 และ 0.18-1.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสอินทรีย์ Fe-P, Al-P และ Ca-P ของดิน
เบรียวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเบรียวจัด

เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า ดินชุดดินบางน้ำเปรี้ยวจะมีปริมาณ Fe-P สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินธัญบุรี ชุดดินเสนา ชุดดินองครักษ์ และชุดดินรังสิต ตามลำดับ ขณะที่ชุดดินเสนามีปริมาณ Al-P สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ชุดดินธัญบุรี ชุดดินรังสิต และชุดดินองครักษ์ ตามลำดับ แต่ในกรณีของ Ca-P นั้นจะมีปริมาณใกล้เคียงกันในเกือบทุกชุดดิน ยกเว้น ชุดดินรังสิต และชุดดินธัญบุรีที่มีปริมาณ Ca-P สูงกว่าดินอื่น ๆ (ภาพที่ 13)

6. การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

6.1 การดูดซับฟอสฟอรัส

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสของดินที่ประเมินด้วยสมการ Langmuir (X_m) มีค่าอยู่ในพิสัย 417-714 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีสัมประสิทธิ์การกำหนดอยู่ในพิสัยร้อยละ 94-100 ในขณะที่เมื่อใช้สมการ Freundlich (k) ในการประเมินจะส่งผลให้การดูดซับฟอสฟอรัสของดินสูงขึ้นโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 425-912 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่กลับให้สัมประสิทธิ์การกำหนดมีค่าต่ำลงโดยอยู่ในพิสัยร้อยละ 89-100 (ตารางที่ 4) ดังนั้นสมการ Langmuir เป็นสมการที่มีความเหมาะสมในการใช้ประเมินอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินมากกว่าการใช้สมการ Freundlich เนื่องจากให้ความแม่นยำสูงกว่า แต่โดยทั่วไปในกรณีที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำ ๆ สมการ Langmuir จะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากกว่าการใช้สมการ Freundlich แต่สมการ Freundlich จะเหมาะสมในกรณีที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง ๆ ซึ่งในความเป็นจริงการดูดซับในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรงและค่อย ๆ คงที่ จึงทำให้สมการ Freundlich นั้นอธิบายได้ถูกต้องมากกว่า (Fox and Kamprath, 1970; Frossard *et al.* 1995) เช่นในกรณีที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับฟอสฟอรัสของดินดังเช่นที่เคยมีรายงานมาก่อนหน้านี้ (สัมฤทธิ์, 2544; Krairapanond *et al.*, 1993; Samadi, 2003; Wiriyakitnateekul *et al.*, 2005; Wisawapipat *et al.*, 2009)

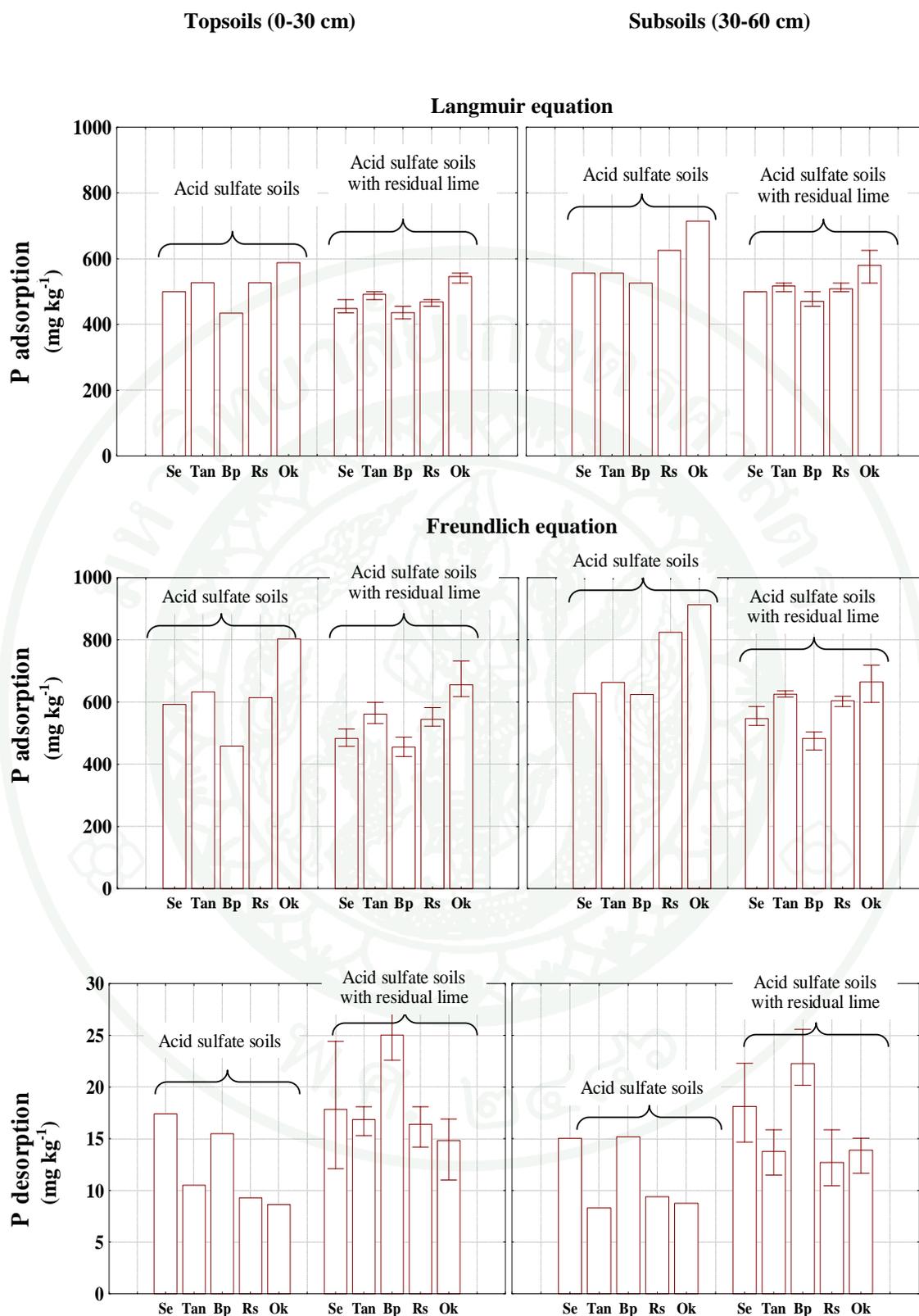
ดังนั้นจากสมการ Freundlich พบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าดินเปรี้ยวจัด โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 425-732 และ 459-912 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14-15) และพบว่าอิทธิพลของปูนน่าจะส่งผลต่อการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน ซึ่งกรณีของดินบนจะมีการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าในดินล่างโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 425-732 และ 459-802 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับดินบน และ 446-718 และ 624-912 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับดินล่างของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14-15)

ทั้งนี้เนื่องจากดินเปรี้ยวจัดที่มีปุ๋ยตกค้างรวมทั้งดินบนอาจได้รับอิทธิพลมาจากการใส่ปุ๋ยจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลง (Havlin *et al.*, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ogunwale and Shamshuddi (1999) ที่พบว่าการใส่ปุ๋ยในอัตรา 1 ตันต่อเฮกตาร์ในดินเปรี้ยวจัดในประเทศมาเลเซีย ที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 2.97-3.36 ส่งผลให้อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลงร้อยละ 3.1-13.1 ทั้งนี้เนื่องจากปุ๋ยส่งผลให้พีเอชของดินเพิ่มขึ้น จึงทำให้เหล็กและอะลูมิเนียมเกิดการตกตะกอนขึ้น และไม่สามารถทำปฏิกิริยาฟอสฟอรัสในสารละลายดินได้ (Violante *et al.*, 1991; Curtin and Syers, 2001; Khare *et al.*, 2004; Brady and Weil, 2008) และเมื่อพิจารณาถึงค่าพลังงานในการดูดซับ พบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปุ๋ยตกค้างจะมีค่าต่ำกว่าดินเปรี้ยวจัด และในดินบนจะมีค่าต่ำกว่าในดินล่าง (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14-15) โดยหากมีพลังงานในการดูดซับสูงก็จะส่งผลให้ดินมีการดูดซับฟอสฟอรัสได้สูงด้วย (Fox and Kamprath, 1970; Sanyal *et al.*, 1993)

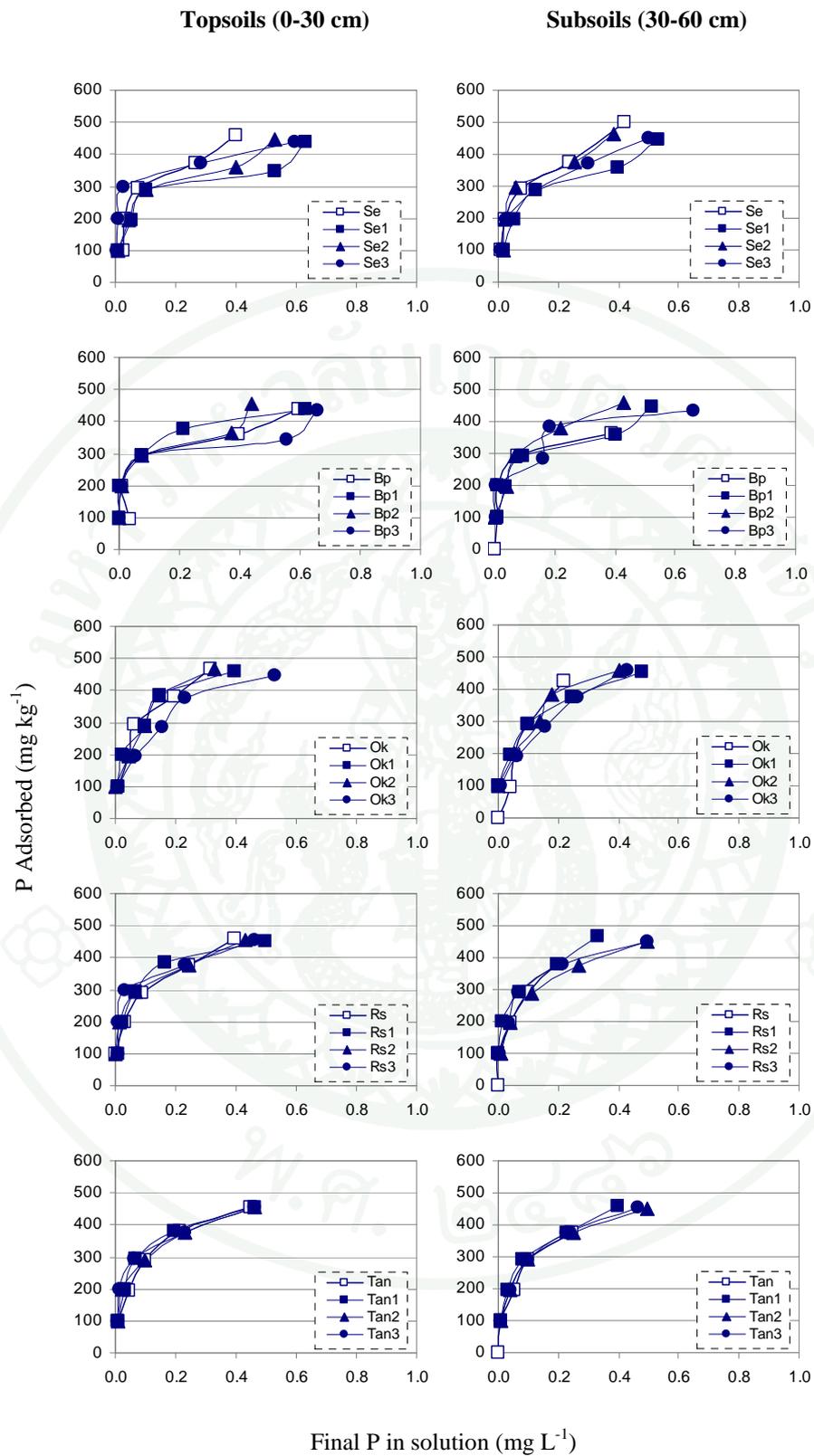
ชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีพลังงานการดูดซับฟอสฟอรัสที่ประเมินด้วยสมการ Freundlich สูงที่สุด ส่งผลให้มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดโดยมีปริมาณเท่ากับ 599-912 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือชุดดินรังสิต ชุดดินชัยบุรี ชุดดินเสนา และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว โดยมีปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 522-824, 531-663, 458-627 และ 425-624 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยดินบนมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 617-803, 522-614, 531-632, 458-592 และ 425-487 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าในดินล่างที่มีค่าอยู่ในพิสัย 599-912, 584-824, 615-663, 525-627 และ 446-624 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินทั้ง 5 ชุดดินตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14-15) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา โดย Krairapanond *et al.* (1993) ที่ได้ทำการศึกษาในดินเปรี้ยวจัดชุดดินรังสิต ชุดดินรังสิตกรจัด และชุดดินมหาโพธิ์ พบว่ามีการดูดซับฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 508-699 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามดินที่ได้ทำการศึกษานี้มีการดูดซับฟอสฟอรัสน้อยกว่าดินเปรี้ยวจัดที่พบในบริเวณอื่น ๆ ของโลก โดย Sanyal *et al.* (1993) รายงานว่าดินเปรี้ยวจัดในอันดับ เอ็นทิซอลล์ และอินเซปทิซอลล์ ที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 3.13-4.40 จำนวน 6 บริเวณในเอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะมีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงมากโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 1797-3004 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4 ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงสุด พลังงานการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดมีปูนตกค้าง โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich

Soil series	Depth (cm)	P Adsorption						P Desorption		
		Langmuir			Freundlich			Freundlich		
		Xm (mg kg ⁻¹)	b	R ²	k (mg kg ⁻¹)	B	R ²	k (mg kg ⁻¹)	B	R ²
Acid sulfate soils										
Se	0-30	500	19.0	1.00	592	0.4	0.98	17.4	1.32	0.99
	30-60	556	9.0	0.99	627	0.4	0.96	15.0	1.24	0.99
Tan	0-30	526	20.0	0.98	632	0.3	0.97	10.5	1.33	0.99
	30-60	556	10.0	0.98	663	0.3	0.96	8.3	1.63	1.00
Bp	0-30	435	18.0	0.98	459	0.4	0.92	15.5	1.26	0.99
	30-60	526	7.0	0.92	624	0.5	0.96	15.2	1.25	0.99
Rs	0-30	526	19.0	0.98	614	0.3	0.99	9.3	1.16	0.99
	30-60	625	8.0	0.98	824	0.5	1.00	9.4	1.17	0.99
Ok	0-30	588	23.0	0.98	803	0.2	0.98	8.6	1.13	1.00
	30-60	714	10.0	0.94	912	0.2	0.93	8.8	1.13	0.99
Acid sulfate soils with residual lime										
Se1	0-30	435	20.0	1.00	458	0.3	0.95	17.0	1.30	0.98
	30-60	500	19.0	0.99	525	0.3	0.99	14.7	1.35	0.99
Se2	0-30	476	20.0	0.99	513	0.3	1.00	24.1	1.49	0.99
	30-60	500	20.0	1.00	585	0.4	0.98	22.3	1.49	1.00
Se3	0-30	435	10.5	0.99	477	0.2	1.00	12.1	1.27	0.99
	30-60	500	9.5	1.00	531	0.4	0.98	17.4	1.38	0.97
Tan1	0-30	500	23.0	0.96	599	0.3	0.87	18.1	1.29	0.99
	30-60	526	10.0	0.97	624	0.3	0.96	15.9	1.25	1.00
Tan2	0-30	500	21.0	0.97	553	0.3	0.94	17.2	1.43	0.98
	30-60	500	18.0	0.97	636	0.3	0.99	11.5	1.12	0.99
Tan3	0-30	476	23.0	0.99	531	0.2	0.95	15.3	1.37	0.99
	30-60	526	20.0	0.98	616	0.3	0.99	13.9	1.25	0.98
Bp1	0-30	455	9.5	0.99	454	0.3	0.97	24.5	1.44	0.96
	30-60	455	19.0	1.00	504	0.3	0.98	20.2	1.39	0.98
Bp2	0-30	435	8.5	0.99	487	0.4	0.97	28.0	1.53	0.98
	30-60	500	8.5	0.98	498	0.4	0.95	21.1	1.44	1.00
Bp3	0-30	417	9.0	0.99	425	0.4	0.96	22.6	1.52	0.99
	30-60	455	5.3	0.99	446	0.5	1.00	25.6	1.54	0.96
Rs1	0-30	476	10.5	1.00	582	0.3	0.96	18.1	1.29	0.99
	30-60	500	10.0	0.98	609	0.3	0.99	15.9	1.25	1.00
Rs2	0-30	476	10.5	0.99	528	0.2	0.99	14.2	1.28	0.98
	30-60	526	9.5	0.99	618	0.4	0.99	11.8	1.12	1.00
Rs3	0-30	455	22.0	0.99	522	0.2	0.96	16.9	1.43	0.98
	30-60	500	20.0	1.00	585	0.3	0.93	10.5	1.12	0.99
Ok1	0-30	526	22.0	1.00	617	0.1	0.97	11.0	1.22	0.99
	30-60	526	22.0	0.97	599	0.3	0.95	11.7	1.11	0.99
Ok2	0-30	556	23.0	0.97	732	0.2	0.95	16.6	1.46	0.98
	30-60	588	19.0	1.00	718	0.3	0.93	15.0	1.21	1.00
Ok3	0-30	556	24.0	0.97	617	0.2	0.93	16.9	1.54	0.99
	30-60	625	11.0	0.98	677	0.2	0.89	15.1	1.24	0.99



ภาพที่ 14 ปริมาณการดูดซับ และการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง
เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด โดยใช้สมการ Langmuir และ Freundlich



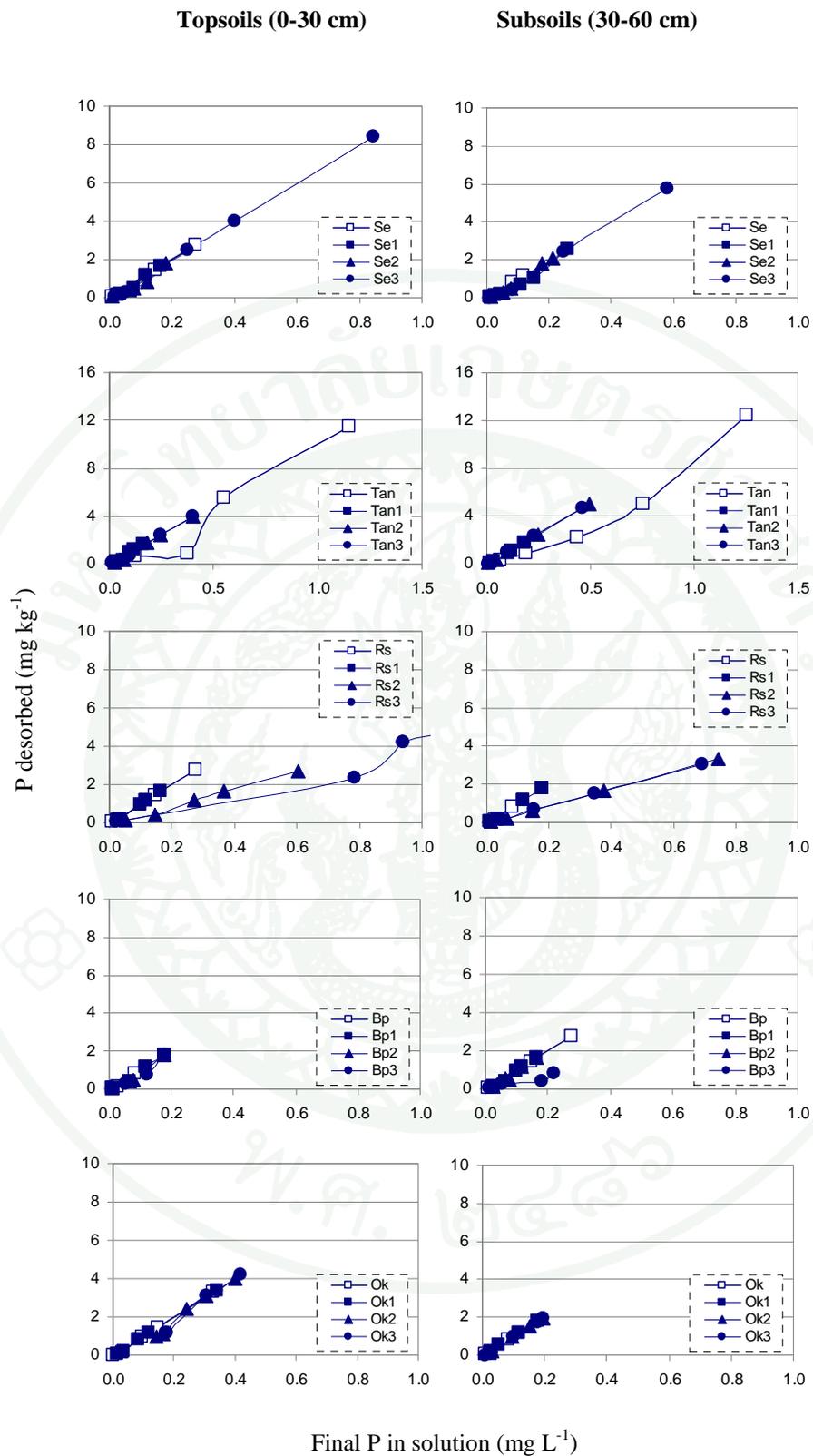
ภาพที่ 15 ลักษณะการดูดซับฟอสฟอรัสโดยใช้สมการ Freundlich ของดินของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

6.2 การปลดปล่อยฟอสฟอรัส

การปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ไม่สามารถประเมินได้ด้วยสมการ Langmuir ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบลักษณะการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จึงไม่สามารถใช้สมการ Langmuir ที่เป็นการประเมินด้วยสมการเชิงเส้นตรง ในการประเมินได้ (Fox and Kamprath, 1970; Frossard *et al.* 1995)

เมื่อใช้สมการ Freundlich ในการประเมินการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน พบว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าดินเปรี้ยวจัด โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 10.5-28.0 และ 8.3-17.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14 และ 16) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การกำหนดอยู่ในพิสัย 0.96-1.00 และ 0.96-1.00 ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการดูดซับฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีค่าสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

ดินที่มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงสุดได้แก่ ชุดดินบางน้ำเปรี้ยว โดยมีปริมาณปลดปล่อยฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 20.2-28.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมรองลงมาคือชุดดินเสนา ชุดดินชัยบุรี ชุดดินรังสิต และชุดดินองครักษ์ ซึ่งมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 14.7-24.1, 11.5-18.1, 9.3-18.1 และ 8.6-16.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ เช่นเดียวกันกับดินบนจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าดินล่าง โดยดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอยู่ในพิสัย 8.6-17.4 และ 11.0-28.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 8.3-15.0 และ 10.5-25.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินบนและดินล่างตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14 และ 16) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลจากการใส่ปูนที่ทำให้มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Iyamuremye *et al.* (1996) ที่พบว่าการใส่ปูนเป็นการเพิ่มพีเอชของดิน ลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม ซึ่งช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัส ทำให้ฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์เพิ่มมากขึ้น

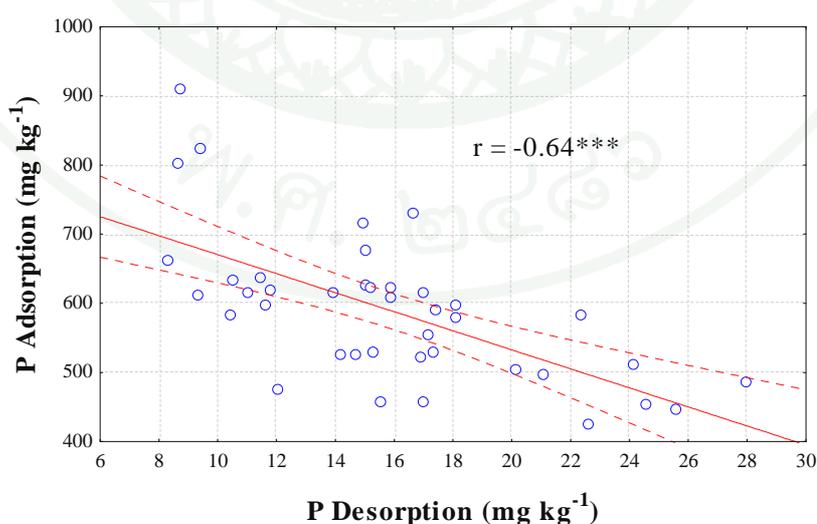


ภาพที่ 16 ลักษณะการปลดปล่อยฟอสฟอรัสโดยใช้สมการ Freundlich ของดินของดินเปรี้ยวจัด ที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

ในภาพรวมพบว่าการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินมีสหสัมพันธ์กัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติแบบผกผัน ($r=-0.64^{**}$) (ภาพที่ 17) ดังนั้นดินที่มีการดูดซับ ฟอสฟอรัสต่ำจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูงกว่าดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงกว่า โดยชุดดิน องค์กรักษ์เป็นดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุด จะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันดินบางน้ำเปรี้ยวมีการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำที่สุดก็จะมีการปล่อยฟอสฟอรัสสูง ที่สุดด้วย (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14-16)

6.3 Phosphorus buffer capacity ของดิน

Ozanne and shaw (1967) และ Fox and Kamprath (1970) ได้กำหนดว่าความเข้มข้น ของฟอสฟอรัสในสารละลายดิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่จุดสมดุล จะเป็นความเข้มข้นของ ฟอสฟอรัส ที่ทำให้พืชส่วนใหญ่เจริญเติบโตสูงสุด เรียกว่า phosphorus buffer capacity (PBC) ซึ่งมักใช้เป็นคำแนะนำอัตราฟอสฟอรัสที่ใช้ในการปลูกพืชเศรษฐกิจ ในขณะที่มีบางการศึกษา ที่รายงานถึงความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อพืชบางชนิด เช่น Roy and De Datta (1985) พบว่าฟอสฟอรัสในสารละลายดินที่ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้ผลผลิตข้าวสูงสุด เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Samadi (2003) ที่ดำเนินการปลูกข้าวสาลี และนอกจากนี้ การศึกษาโดย นัจกัก (2550) พบว่า ข้าวที่ปลูกในชุดดินบางน้ำเปรี้ยวและชุดดินรังสิตจะมี ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายดินเท่ากับ 0.34 และ 0.33 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

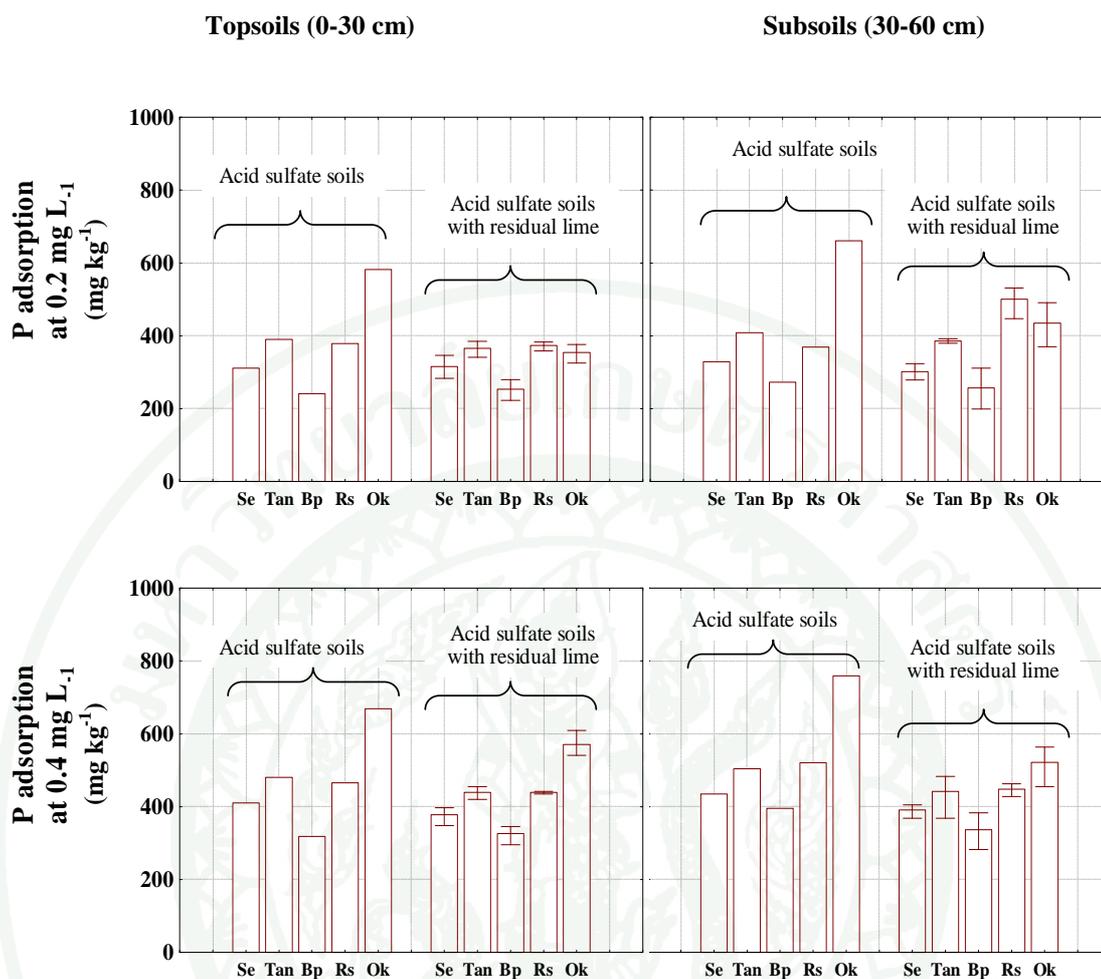


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มี ปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด

ผลการศึกษา พบว่า ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีค่า PBC ที่ความเข้มข้นของสารละลายดิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าอยู่ในพิสัย 199-531 และ 241-661 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 223-535 และ 241-582 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 262-491 และ 279-661 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด ตามลำดับ ซึ่งชุดดินองครักษ์มีฟอสฟอรัสที่จุด PBC สูงที่สุดโดยอยู่ในพิสัย 370-531 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาได้แก่ชุดดินชัยบุรี (341-385 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ชุดดินรังสิต (325-378 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ชุดดินเสนา (279-346 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว (223-311 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ (ภาพที่ 18) ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายดินเป็น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ทุกชุดดินจะมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายดิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัดมีปริมาณอยู่ในพิสัย 282-609 และ 318-759 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดินบนมีค่าอยู่ในพิสัย 295-609 และ 318-699 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีค่าอยู่ในพิสัย 282-564 และ 395-759 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างตามลำดับ เช่นเดียวกันกับชุดดินองครักษ์ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นของสารละลายดินเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงกว่าดินอื่น ๆ รองลงมาได้แก่ชุดดินชัยบุรี ชุดดินรังสิต ชุดดินเสนา และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ตามลำดับ (ภาพที่ 18)

ซึ่งโดยภาพรวมของพบว่าดินที่มีปูนตกค้างจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นของสารละลายดิน 0.2 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าต่ำกว่าในดินเปรี้ยวจัด และพบว่าดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นของสารละลายดิน 0.2 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงกว่าดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่า (ภาพที่ 18)

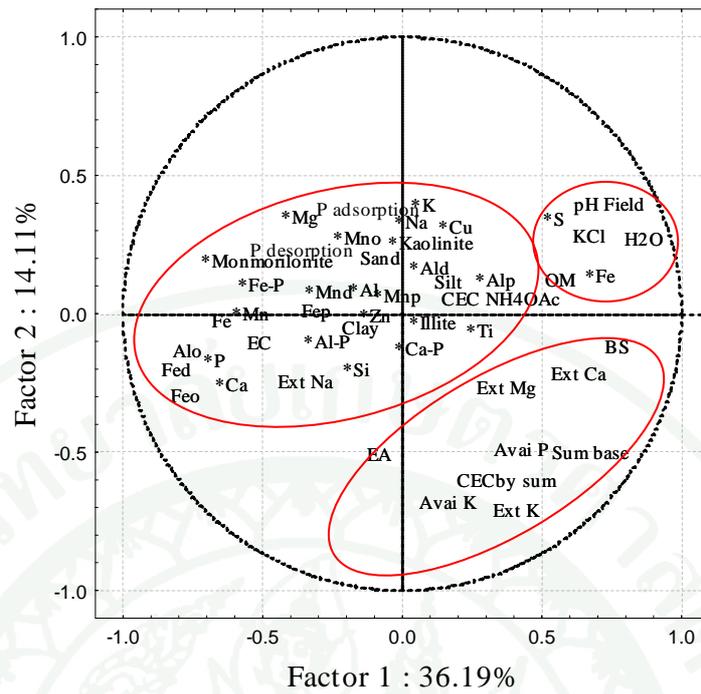
จากผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี แร่วิทยา รวมทั้งการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบแบ่งกลุ่ม เพื่อจัดกลุ่มสมบัติดินที่มีพฤติกรรมในสภาวะแวดล้อมหนึ่งเหมือนกัน และยังสามารถรวมกลุ่มดินที่มีสมบัติเหมือนกัน พบว่าปัจจัยที่หนึ่งและปัจจัยที่สอง สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เพียงร้อยละ 50 (ภาพที่ 19) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของวัตถุดิบกำเนิดดินน่าจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมสมบัติดินมากกว่าสภาพแวดล้อมรวมทั้งการจัดการในพื้นที่



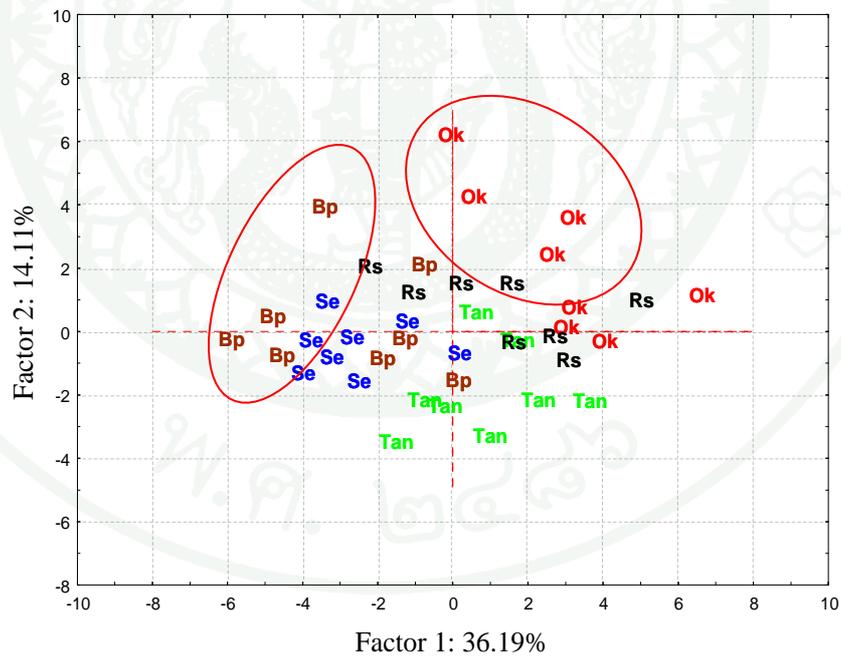
ภาพที่ 18 Phosphorus buffer capacity ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด

สมบัติดินของดินที่ทำการศึกษามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (ภาพที่ 19ก) กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยกำมะถันทั้งหมด พีเอชดินที่วัดในน้ำ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และในสนาม กลุ่มที่ 2 ได้แก่ เบสต่าง ๆ ที่สกัดได้ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และสภาพกรดที่สกัดได้ และกลุ่มสุดท้าย ได้แก่การดูดซับฟอสฟอรัส เหล็ก แคลเซียม และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด

และเมื่อพิจารณาการรวมกลุ่มของดิน (ภาพที่ 19ข) พบว่าสมบัติดินส่วนใหญ่ของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ทั้ง 5 ชุดดิน มีความคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปูนที่ตกค้างอยู่ส่งผลต่อสมบัติดินไม่ชัดเจน ยกเว้นชุดดินของกรังจ์ และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว โดยดินส่วนใหญ่มีความแปรปรวนค่อนข้างกว้างภายในแต่ละชุดดิน ยกเว้นชุดดินเสนาที่ทำการเก็บตัวอย่างทั้ง 4 บริเวณมีสมบัติที่ไม่ผันแปร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 19 การวิเคราะห์สถิติแบบแบ่งกลุ่ม เพื่อการจัดกลุ่มสมบัติของดิน (ก) และการจัดกลุ่มของชุดดิน (ข)

7. ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับสมบัติดินบางประการ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และแร่วิทยาของดิน กับการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส พบว่า พีเอชมีสหสัมพันธ์ทั้งในเชิงเส้นตรงและผกผันกับสมบัติส่วนใหญ่ของดิน (ตารางผนวกที่ 7) โดยเฉพาะปริมาณเหล็กออกไซด์และเหล็กอิสระ ($r = -0.64^{**}$ และ $r = -0.55^{**}$ ตามลำดับ) และอะลูมิเนียม ($r = -0.66^{**}$) ซึ่งสมบัติดินเหล่านี้มักเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินดังที่เคยมีรายงานมาก่อนหน้านี้ (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993; Quang and Dufy, 1995) โดยทั่วไปฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะเป็นประโยชน์ที่สุดเมื่อพีเอชประมาณ 6.5 อย่างไรก็ตามหากพีเอชต่ำกว่านี้ ฟอสฟอรัสเหล่านี้จะถูกดูดซับโดยเหล็ก และอะลูมิเนียมออกไซด์ เกิดการตกตะกอนเป็นสารประกอบ $AlPO_4$ และ $FePO_4$ และในกรณีที่พีเอชสูงกว่า 7 ฟอสฟอรัสก็จะตกตะกอนกับ Ca^{2+} เกิดเป็นแร่ที่มีแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Ca-P mineral) (Ogunwale and Shamshuddi, 1999)

จากสหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับสมบัติต่าง ๆ ของดิน พบว่า การดูดซับฟอสฟอรัสของดินมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเหล็กอิสระ ($r = 0.84^{***}$), กำมะถันทั้งหมด ($r = 0.64^{***}$), เหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ ($r = 0.79^{***}$ และ 0.79^{***} ตามลำดับ) และสภาพการนำไฟฟ้า ($r = 0.47^{***}$) (ตารางที่ 5) แต่มีสหสัมพันธ์ผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับแคลเซียมที่สกัดได้ ($r = -0.45^{***}$), พีเอชสนามของดิน ($r = -0.50^{***}$), พีเอชที่วัดในสารละลาย KCl ($r = -0.49^{**}$), พีเอชที่วัดในน้ำ ($r = -0.61^{***}$), ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด ($r = -0.62^{***}$), ฟอสฟอรัสทั้งหมด ($r = -0.59^{***}$), แมกนีเซียมทั้งหมด ($r = -0.39^*$) และแมงกานีสทั้งหมด ($r = -0.32^*$) (ตารางที่ 5)

ในขณะที่การปลดปล่อยฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพีเอชที่วัดในน้ำ ($r = 0.57^{***}$), พีเอชที่วัดในสารละลาย KCl ($r = 0.51^{***}$), พีเอชสนาม ($r = 0.42^{**}$), สภาพการนำไฟฟ้า ($r = 0.51^{***}$), แมกนีเซียมที่สกัดได้ ($r = 0.43^{***}$), ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด ($r = 0.56^{***}$), ฟอสฟอรัสทั้งหมด ($r = 0.64^{***}$) และแคลเซียมที่สกัดได้ ($r = 0.34^*$) และมีสหสัมพันธ์ผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณเหล็กทั้งหมด ($r = -0.47^{***}$), เหล็กออกไซด์ ($r = -0.62^{***}$), เหล็กอิสระ ($r = -0.56^{***}$), อะลูมิเนียมออกไซด์ ($r = -0.57^{**}$), ปริมาณกำมะถันทั้งหมด ($r = -0.38^*$) และฟอสฟอรัสอนินทรีย์ส่วนใหญ่ในรูป Fe-P ($r = 0.50^{**}$) (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ประเมินด้วยสมการ Freundlich กับสมบัติของดิน (n= 40)

Parameter	P Adsorption	P Desorption
pH Field	-0.50***	0.42**
pH H ₂ O	-0.61***	0.57***
pH KCl	-0.49**	0.51***
OM	-0.31ns	0.26ns
Avail. P	-0.12ns	0.20ns
Avail. K	0.06ns	0.18ns
Ext Ca	-0.45***	0.34*
Ext Mg	-0.29ns	0.43***
Ext K	0.06ns	0.18ns
Ext Na	0.24ns	-0.23ns
EA	0.26ns	-0.11ns
CEC	-0.03ns	0.21ns
EC	0.47***	-0.51***
Sand	0.05ns	-0.11ns
Silt	0.04ns	-0.11ns
Clay	-0.06ns	0.15ns
Feo	0.79***	-0.62***
Fed	0.84***	-0.56***
Fep	0.19ns	-0.18ns
Alo	0.79***	-0.57***
Ald	-0.06ns	-0.11ns
Alp	0.28ns	-0.15ns
Si	-0.11ns	0.15ns
Al	-0.22ns	0.24ns
Fe	0.63***	-0.47***
Ti	0.20ns	-0.35*
Na	-0.03ns	0.37*
Mg	-0.39*	0.51***
K	0.07ns	0.12ns
Ca	-0.62***	0.56***
P	-0.59***	0.64***
S	0.64***	-0.38*
Mn	-0.32*	0.42**
Cu	0.25ns	-0.18ns
Zn	-0.21ns	0.16ns
Fe-P	-0.38*	0.50**
Al-P	-0.33*	0.37*

หมายเหตุ *** = significant at $p = 0.001$, **=significant at $p = 0.01$,

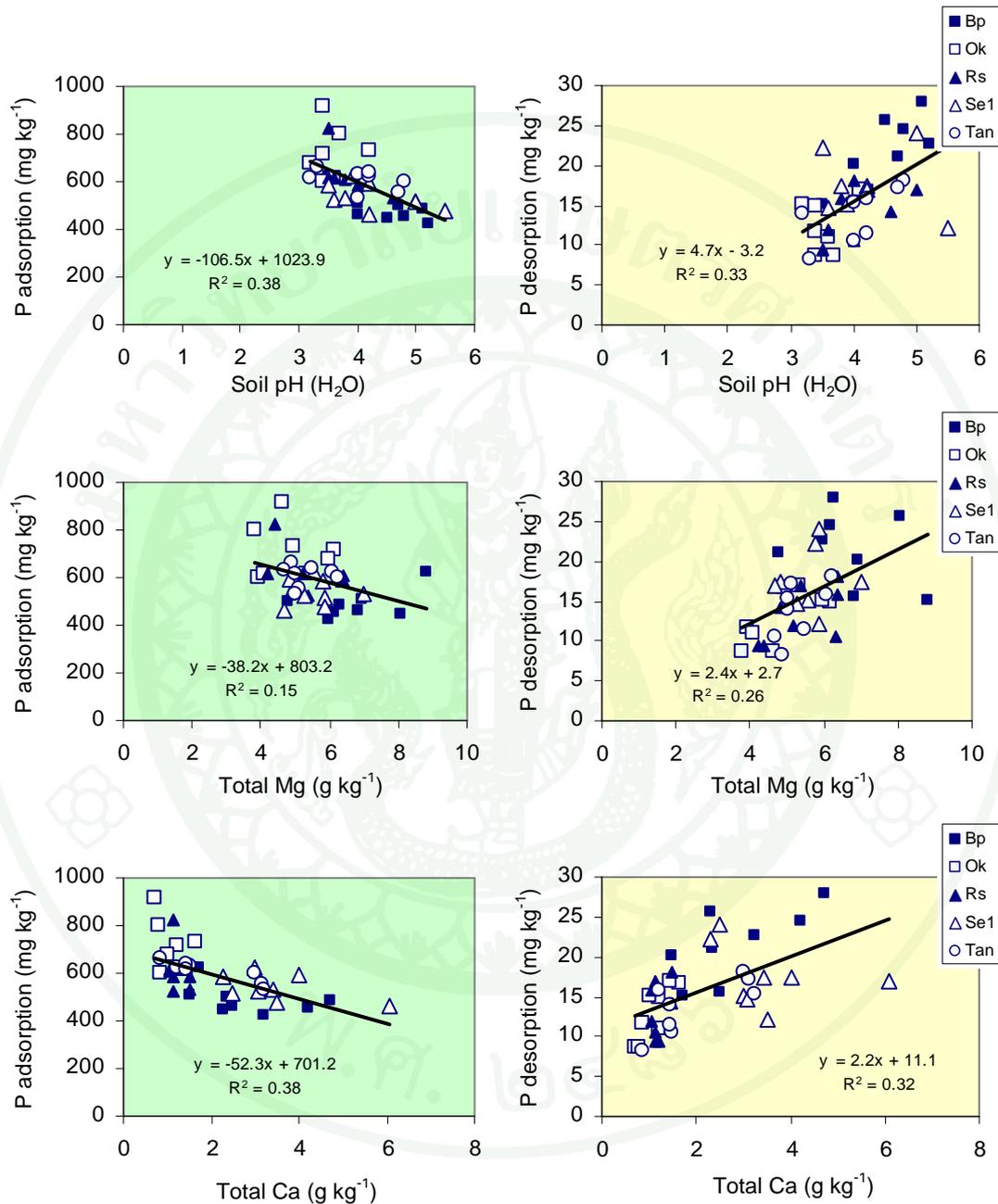
* = significant at $p = 0.05$; ns=not significant

เมื่อพิจารณาในภาพรวม พบว่า การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินจะถูกรควบคุมโดยพีเอชดินที่วัดในน้ำ ปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัส เหล็กออกไซด์ เหล็กอิสระ อะลูมิเนียมออกไซด์ และปริมาณแคลเซียมทั้งหมด แต่ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดในดินจะส่งผลกระทบต่อ การปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเท่านั้น อย่างไรก็ตาม สหสัมพันธ์ที่กำหนดที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำถึงปานกลางแสดงให้เห็นการกระจายของข้อมูลที่ค่อนข้างกว้าง (ตารางที่ 5 และภาพที่ 20)

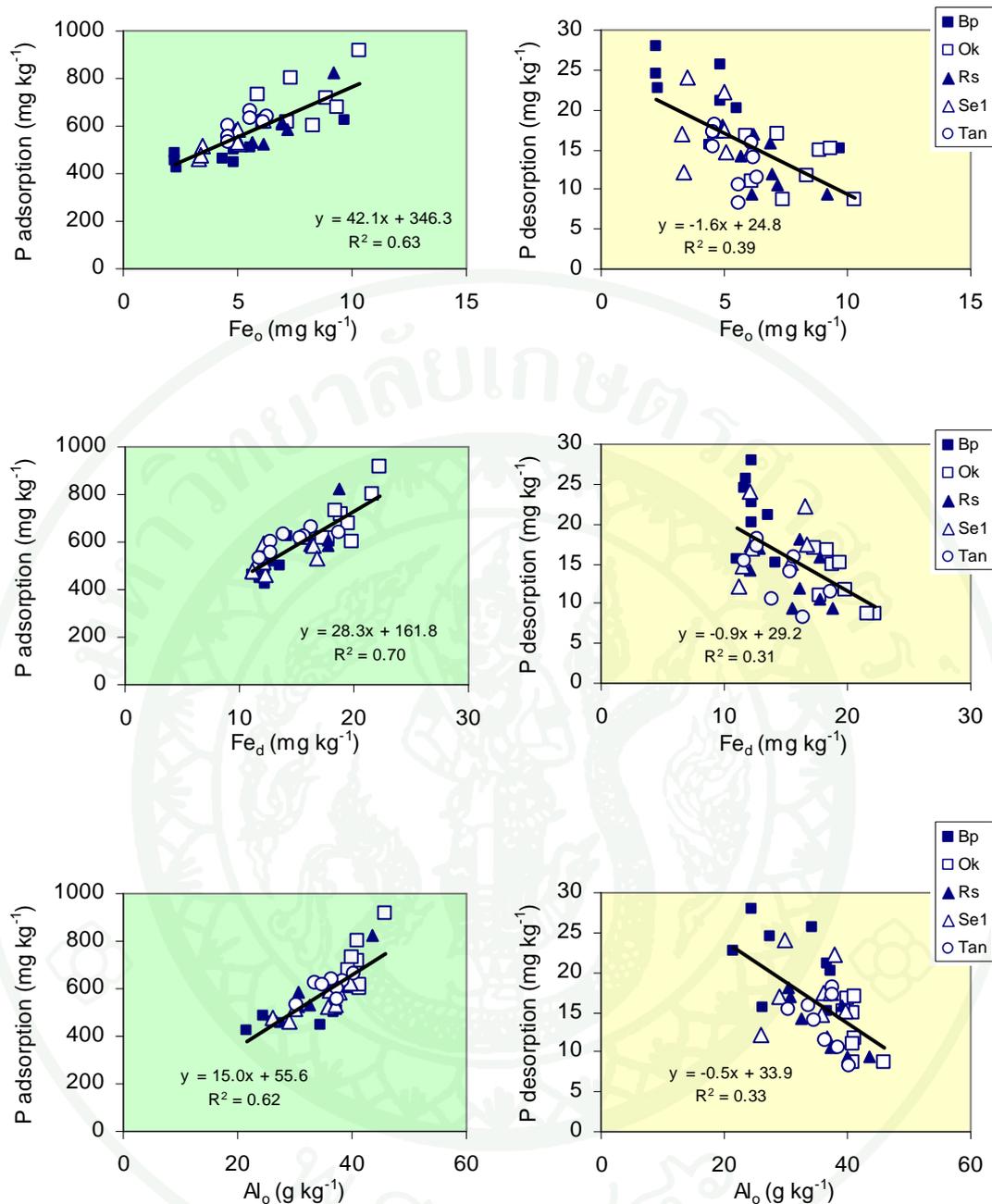
การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเป็ร็ยวจัดที่ทำการศึกษานี้ถูกควบคุมโดยเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กอิสระเป็นสำคัญ เนื่องจากให้ค่าสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติโดยมีค่าอยู่ในพิสัย $r = 0.79^{***} - 0.84^{***}$ และ $r = 0.56^{***} - 0.62^{***}$ สำหรับการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสตามลำดับ (ตารางที่ 5 และภาพที่ 21) ซึ่งสหสัมพันธ์ที่ได้มีทิศทางในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เหล็กออกไซด์ เหล็กอิสระ และอะลูมิเนียมออกไซด์ จะมีสหสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงกับการดูดซับฟอสฟอรัส แต่จะมีสหสัมพันธ์แบบผกผันกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Khalid *et al.* (1977) ที่ได้รายงานถึงความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างปริมาณเหล็กออกไซด์กับปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับภายใต้สภาพน้ำขัง โดยเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์เพิ่มมากขึ้นฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับได้มากขึ้นตาม อย่างไรก็ตาม การดูดซับฟอสเฟตจะไม่เพิ่มขึ้น แม้ปริมาณเหล็กทั้งหมดจะเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม ทั้งนี้ การที่ฟอสเฟตถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการแปรสภาพของสารประกอบเหล็กและอะลูมิเนียมในรูปผลึกเปลี่ยนไปเป็นรูปออกไซด์ที่ทำให้เกิดพันธะกับฟอสเฟต เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Sah and Mikkelsen (1986) ที่รายงานว่า การดูดซับหรือปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินในสภาพการขังน้ำจะมีความสัมพันธ์กับรูปของเหล็ก โดยเฉพาะในรูปออกไซด์เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเหล็กอิสระ จึงทำให้ดูดซับฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ซึ่งรูปของเหล็กในดินนาโดยทั่วไปเป็นอิทธิพลจากพีเอช (Krairapanond *et al.*, 1993; Sanyal *et al.*, 1993; Quang and Dufy, 1995)

เช่นเดียวกันกับ Zhang *et al.* (2003) ที่พบว่าความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินนาส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยการแปรสภาพของจากรูปผลึกไปเป็นรูปออกไซด์ นอกจากนี้การศึกษาของ Khalid *et al.* (1977), Willett *et al.* (1978) และ Shahandeh *et al.* (1994) รายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับกับปริมาณเหล็กออกไซด์และเหล็กอิสระในดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กในรูปออกไซด์และรูปอิสระมีบทบาทสำคัญในการดูดซับฟอสฟอรัส

ในดินน่าน้ำขัง นอกจากนี้ Shahandeh *et al.* (1994) กล่าวว่า การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสวิธีใดก็ตามที่สัมพันธ์กับปริมาณเหล็กออกไซด์ในดิน ถือว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการคาดคะเนความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน



ภาพที่ 20 สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับพีเอช และปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดในดิน (n= 40)



ภาพที่ 21 สหสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสกับเหล็กออกไซด์ (Fe₀), เหล็กอิสระ (Fe_d) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₀) (n= 40)

นอกจากนี้แคลเซียมและแมกนีเซียมในดินมีสหสัมพันธ์กับการดูดซับฟอสฟอรัสและปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินที่ทำการศึกษาย่างมีนัยสำคัญทางสถิติยิ่ง โดยจะมีสหสัมพันธ์แบบผกผันกับการดูดซับฟอสฟอรัส แต่จะมีสหสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ตารางที่ 5 และภาพที่ 20) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้โดยปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีแนวโน้มต่ำกว่า แต่มีแนวโน้มในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสูง

กว่า ทั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของดินเปรี้ยวจัดในดินประเทศมาเลเซียที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 2.97-3.36 โดยการใส่ปุ๋ยในอัตรา 1 ตันต่อเฮกตาร์ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลงร้อยละ 3.1-13.1 แต่เมื่อมีการใส่ปุ๋ยมากกว่า 2 ตันต่อเฮกตาร์กลับส่งผลให้มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูง เนื่องจากฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับโดยแคลเซียม เกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟต (Ogunwale and Shamshuddi, 1999)

นอกจากนี้เมื่อมีการใส่ปุ๋ย พีเอชของดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กิจกรรมของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมลดลง ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับไว้จึงถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้น (Shahandeh *et al.*, 1994) แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีการใส่ปุ๋ยในปริมาณมากเกินไป ฟอสฟอรัสในสารละลายดินจะถูกดูดซับเกิดการตกตะกอนเป็นแร่ฟิสิกซ์ของ Ca-P หรือถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของ CaCO_3 (Havlin *et al.*, 2005) ส่งผลให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง ซึ่งการศึกษาของ Curtin and Syers (2001) พบว่าการใส่ปุ๋ยในดินกรดที่มีพีเอชอยู่ในพิสัย 5.1-5.5 โดยเมื่อพีเอชดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ของดินจะลดลง 3-7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

อย่างไรก็ตามในการศึกษารุ่นนี้ พบว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินนั้นจะมีสหสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับแมกนีเซียมมากกว่าแคลเซียม ซึ่งปุ๋ยที่นิยมใช้ในประเทศไทยเพื่อเพิ่มพีเอชของดินนั้นเป็นสารประกอบของแคลเซียม เช่น หินปูน (CaCO_3) ปูนขาว (Ca(OH)_2) มากกว่าปุ๋ยที่เป็นสารประกอบของแมกนีเซียมและแคลเซียม เช่น โดโลไมต์ (นคร, 2523; Panichapong, 1982; Prabuddham, 1982) จึงน่าที่จะเป็นเหตุผลที่ทำให้การปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างนั้นสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดเพียงเล็กน้อย

เมื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้จากการหาสหสัมพันธ์มาทำการประเมินหาการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยใช้การวิเคราะห์ multiple regression ดังแสดงในตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ พบว่าสมบัติดินที่จะสามารถใช้ทำนายการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน คือ เหล็กอิสระ ทำให้ได้สมการ “P adsorption = $161.78 + 0.64\text{Fe}_d$ ” ที่มีสหสัมพันธ์การกำหนดเท่ากับ 0.84 และเมื่อเพิ่มอะลูมิเนียมมาตรฐาน จะทำให้ความแม่นยำของสมการเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสหสัมพันธ์การกำหนดเพิ่มขึ้นเป็น 0.90 และสมการที่ใช้ในการประเมินจะเปลี่ยนไปเป็น “P adsorption = $-71.25 + 0.46\text{Fe}_d + 0.38\text{Al}_o$ ”

ตารางที่ 6 สมการที่ใช้ทำนายการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน

Step	Regression equation	R ²
P adsorption		
1	$161.78 + 0.64Fe_d$	0.84**
2	$-71.25 + 0.46Fe_d + 0.38Al_o$	0.90**
P desorption		
1	$12.16 + 0.64Total\ P$	0.64**
2	$2.45 + 0.56Total\ P + 0.40Total\ Mg$	0.75**
3	$3.81 + 0.35Total\ P + 0.47Total\ Mg - 0.42Fe_o$	0.83**

Significant at $p < 0.01$ ** (n=40)

สำหรับในกรณีของการปลดปล่อยฟอสฟอรัส พบว่าเมื่อใช้ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินทำให้ได้ สมการ “P desorption = 12.16 + 0.64Total P” ที่ใช้ในการทำนายแต่มีค่าสหสัมพันธ์การกำหนดค่อนข้างต่ำ ($R^2 = 0.64$) แต่เมื่อเพิ่มสมบัติดินอื่น ๆ ได้แก่ เหล็ก สังกะสี และแมกนีเซียม ทั้งหมดเข้ามาประเมินรวม จะทำให้สหสัมพันธ์กำหนดของสมการมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 และ 0.83 ตามลำดับ และทำให้สมการที่ใช้ในการประเมินเปลี่ยนแปลงไปเป็น “P desorption = 2.45 + 0.56Total P + 0.40Total Mg” และ “P desorption = 3.81 + 0.35Total P + 0.47Total Mg - 0.42Fe_o” ตามลำดับ

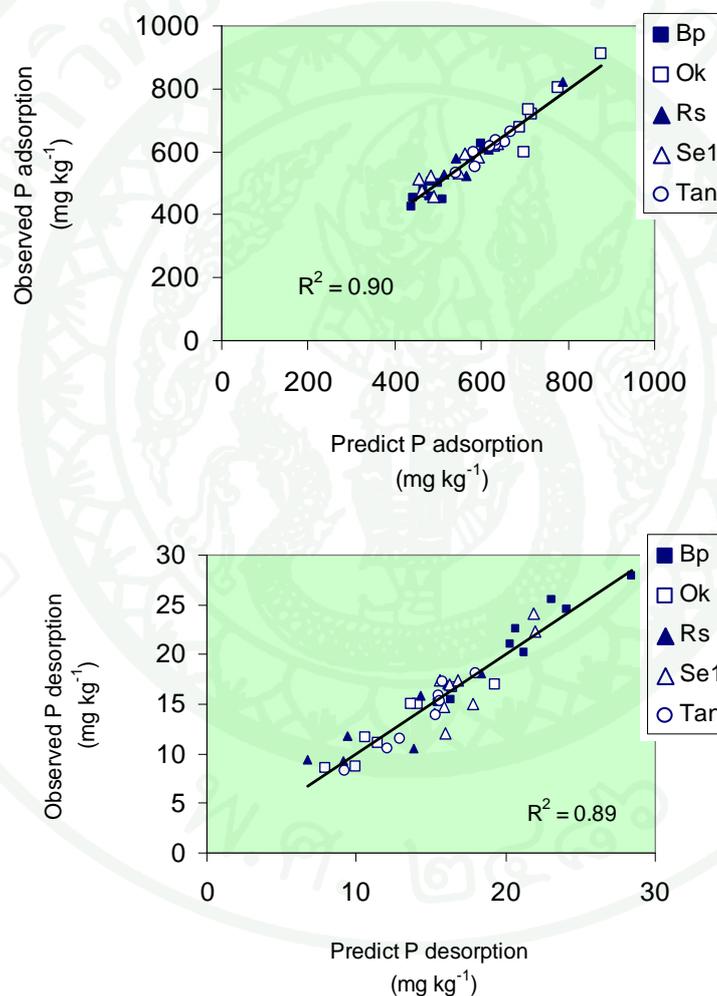
ดังนั้นสมการที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการทำนายการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินที่ทำการศึกษา ได้แก่

$$P\ adsorption = -71.25 + 0.46Fe_d + 0.38Al_o \quad (R^2 = 0.90^{**})$$

$$P\ desorption = 3.81 + 0.35Total\ P + 0.47Total\ Mg - 0.42Fe_o \quad (R^2 = 0.83^{**})$$

ซึ่งให้ความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 90 และ 83 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) และมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 และ 11 ตามลำดับ (ภาพที่ 22) อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ใช้ในการทำนายการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน พบว่าปริมาณเหล็กอิสระและอะลูมิเนียมอิสระมีสหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน ในขณะที่การปลดปล่อยฟอสฟอรัสมิ

สหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับแมกนีเซียมทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด แต่มีสหสัมพันธ์ผกผันกับเหล็กสัณฐาน ดังนั้นการประเมินการดูดซับของดินเปรี้ยวจัดที่ทำการศึกษานี้ สามารถใช้เพียงปริมาณเหล็กอิสระและปริมาณอะลูมิเนียมสัณฐานก็จะสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของดินได้อย่างแม่นยำ แต่ในกรณีของการปลดปล่อยจะต้องใช้ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณเหล็กสัณฐาน มาใช้ร่วมกันในการทำนายและความแม่นยำของสมการที่ได้ยิ่งต่ำกว่าในกรณีของการดูดซับฟอสฟอรัส



ภาพที่ 22 การดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ได้จากสมการที่ใช้ในการทำนายเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จริง (n= 40)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีพีเอชสนามของดินบนอยู่ในพิสัย 5.0-8.5 ซึ่งสูงกว่าดินเปรี้ยวจัด แต่สมบัติส่วนใหญ่ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างยังคงไม่เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในชั้นดินล่าง โดยมีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายแข็งถึงดินเหนียว แต่ดินยังเป็นกรดรุนแรงมากถึงกรดจัด เมื่อพิจารณาจากพีเอชที่วัดในน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นกรดที่สกัดได้ที่มีค่าสูงและอัตราร้อยละความอิ่มตัวเบสที่ต่ำ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินอยู่ในระดับสูงปานกลางถึงสูง สอดคล้องกับองค์ประกอบเชิงแร่ที่มีสมกไทต์เป็นแร่เด่น ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ในพิสัย 0.1-2.7 กรัมต่อกิโลกรัม ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในดินอยู่ในรูปฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Fe-P > Al-P > Ca-P) และรูปที่เป็นประโยชน์พบอยู่ในปริมาณต่ำ

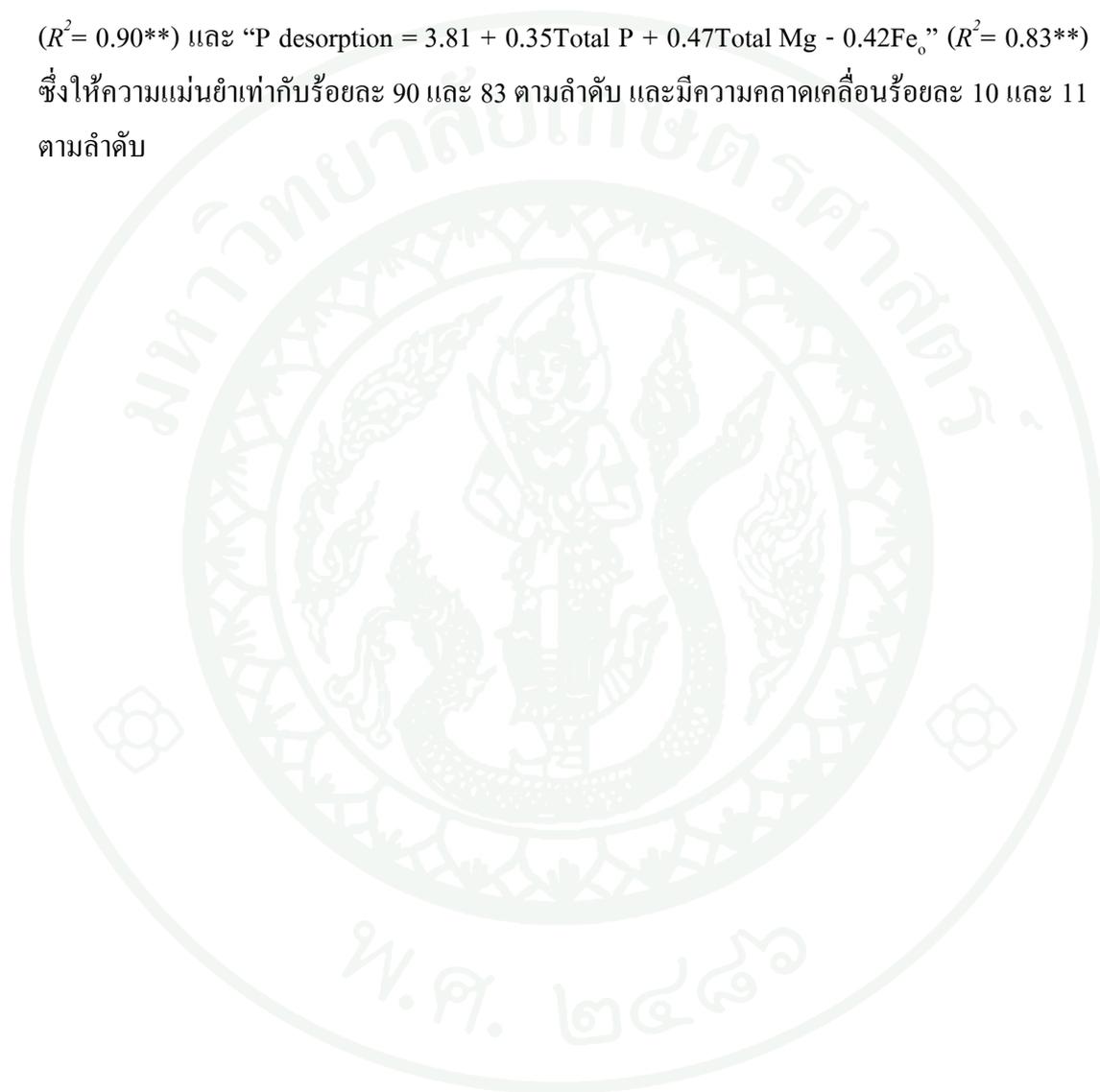
ปริมาณการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินมีสหสัมพันธ์กันแบบผกผันกันอย่างมาก มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุดจะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาต่ำที่สุด รองลงมาคือชุดดินรังสิต ชุดดินชัยบุรี ชุดดินเสนา และชุดดินบางน้ำเปรี้ยว ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างมีแนวโน้มต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัด และดินบนจะมีปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่าดินล่างในทุกบริเวณ นอกจากนี้ดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสสูงมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายดินที่ 0.2 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตรสูงกว่าดินที่มีการดูดซับฟอสฟอรัสต่ำกว่า

พีเอชที่วัดในน้ำมีสหสัมพันธ์ทั้งในเชิงเส้นตรงและผกผันกับสมบัติส่วนใหญ่ของดิน โดยเฉพาะปริมาณเหล็กออกไซด์ เหล็กอิสระ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดิน

การดูดซับฟอสฟอรัสมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในรูปต่าง ๆ โดยเฉพาะในรูปอิสระและออกไซด์ รวมทั้งอะลูมิเนียมออกไซด์ และมีสหสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในดิน สำหรับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะมีสหสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับสภาพการนำไฟฟ้าของดิน ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน แมกนีเซียมทั้งหมด และแคลเซียมทั้งหมดในดิน แต่มีสหสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณ

ปริมาณเหล็กออกไซด์ และเหล็กอิสระ แสดงให้เห็นว่าการใส่ปูนมีแนวโน้มที่จะช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัสของดิน ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยเพิ่มการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินได้

สมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายปริมาณการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง ได้แก่ “P adsorption = $-71.25 + 0.46Fe_d + 0.38Al_0$ ” ($R^2 = 0.90^{**}$) และ “P desorption = $3.81 + 0.35\text{Total P} + 0.47\text{Total Mg} - 0.42Fe_0$ ” ($R^2 = 0.83^{**}$) ซึ่งให้ความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 90 และ 83 ตามลำดับ และมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 และ 11 ตามลำดับ



ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติของดินพบว่า การใส่ปุ๋ยยังคงมีความจำเป็นในพื้นที่นี้ เนื่องจากดินยังคงมีความเป็นกรดรุนแรง และการใส่ปุ๋ยนอกจากจะเพิ่มพีเอชของดินแล้วยังช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัส ทำให้ลดการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในพื้นที่ได้

และการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำข้อมูลจากการศึกษาใช้คาดคะเนการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ โดยใช้ลักษณะและอัตราการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างประเมินอัตราปุ๋ยที่ใช้ในการปลูกข้าว และเพื่อพัฒนาการให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่มีประสิทธิภาพซึ่งตรงกับสมบัติดินและลักษณะของการดูดซับและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของดินเหล่านี้มากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กองสำรวจดิน. 2515. **แผนที่ดินจังหวัดปทุมธานี นนทบุรี นครหลวงกรุงเทพ ชนบุรี สมุทรสาคร และสมุทรปราการ** มาตรฐาน 1:100,000. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กองสำรวจดิน. 2519ก. **แผนที่ดินจังหวัดชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง และพระนครศรีอยุธยา** มาตรฐาน 1:100,000. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กองสำรวจดิน. 2519ข. **แผนที่ดินจังหวัดนครนายก** มาตรฐาน 1:100,000. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กองสำรวจดิน. 2523. **คู่มือการจำแนกความเหมาะสมของที่ดินสำหรับพืชเศรษฐกิจ**. เอกสารวิชาการเล่มที่ 28. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นคร ถาวรวงศ์ และ เขียน อภิชนธิวงศ์. 2523. การทดลองเปรียบเทียบอัตราปุ๋ยนชนิดต่าง ๆ ในการแก้ดินเปรี้ยว, น. 150-155. **รายงานการประชุมวิชาการกองบริการที่ดิน ครั้งที่ 1, 12-14 มีนาคม 2523**, เชียงใหม่.
- นงคราญ กาญจนประเสริฐ. 2529. **การศึกษาลักษณะวินิจฉัยที่สำคัญในพัฒนาการของดินและศักยภาพของดินอันดับแอลฟีซอลส์และอินเซปติซอลส์บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นงกั๊ก หงษ์ธนต์. 2550. **การศึกษาการดูดซับและการคาดคะเนคำแนะนำปุ๋ยฟอสฟอรัสในดินนา** น้ำ ชังโดยใช้สมการความต้องการฟอสฟอรัสโปรแกรม PDSS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- นิตยา สุ่มังคะ โยธิน. 2532. การเปลี่ยนรูปของอนินทรีย์ฟอสฟอรัส และความเป็นประโยชน์ต่อข้าว ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัมฤทธิ์ ภูรุ่งเรือง. 2544. ความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อข้าวเจ้าหอมสุพรรณบุรีที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดและดินเนื้อปูน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อัญชลี สุทธิประการ. 2534. แร่ในดิน เล่มที่ 2. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เอิบ เขียวรัตน์. 2534. ดินของประเทศไทย. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เอิบ เขียวรัตน์. 2548. การสำรวจดิน. พิมพ์ครั้งที่ 2 ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Andriessse W. and M.E.F. van Mensvoort. 2006. Acid sulfate soils: distribution and extent, pp. 14–19. In R. Lal., ed. **Encyclopedia of Soil Science**. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Angela, A.J. 1982. X-ray fluorescence spectrometry, pp. 85-121. In A.L. Page, ed. **Methods of Soil Analysis. Part II: Chemical and Microbiological Properties**. 2nd ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. Agron. Nc., Madison, Wisconsin, USA.
- Arulandoo, X. and K.S. Pheng. 1981. Management of acid sulphate soils in the Muda irrigation scheme, Kedah, Peninsular Malaysia, pp. 195-212. **Proc. Int. Symp. on Acid Sulphate Soils**. Bangkok, Thailand.
- Attanandana, T. 1982. **Fertility Problems of Acid Sulfate Soils of Thailand**. Ph.D. Thesis, Kyoto University, Kyoto, Japan.

- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1984. Rock phosphate utilization on acid sulfate soils of Thailand, pp. 280-291. **International Seminar on Ecology and Management of Problem Soils in Asia**. Bangkok, Thailand.
- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1986. Acid sulfate soils : Their characteristics, genesis, amelioration and utilization. **Tonon Ajia Kenkyu (Southeast Asian Studies)** 24: 154-180.
- Barrow, N.J. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils, pp. 330–360. *In* F.E. Khasawneh, E.C. Sample, E.J. Kamprath., eds. **The Role of Phosphorus in Agriculture**. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Bhattacharyya, T., P. Chandran, S.K. Ray, C. Mandal, D.K. Pal, M.V. Venugopalan, S.L. Durge, P. Srivastava, P.N. Dubey, G.K. Kamble, R.P. Sharma, S.P. Wani, T.J. Rego, P. Pathak, V. Ramesh, M.C. Manna and K.L. Sahrawat. 2007. **Physical and Chemical Properties of Selected Benchmark Spots for Carbon Sequestration Studies in Semi-arid Tropics of India**. Global Theme on Agroecosystems Report No. 35, Patancheru 502324, Andhra Pradesh, India.
- Buol., R.J. Southard., R.C. Graham and P.A. McDaniel. 2003. **Soil Genesis and Classification**. 5th ed. Iowa State Press, A Blackwell Pub. Co., Ames.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2008. **The Nature and Properties of Soils**. 14th ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Bray, R.A. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soil. **Soil Sci.** 59: 39-45.
- Brikeland, P.W. 1974. **Pedology, Weathering and Geomorphological Research**. Oxford Univ. Press, New York.

- Brindley, G.W. and G. Brown. 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification, pp. 305-359. *In* G.W. Brindley and G. Brown, eds. **Crystal Structure of Clay Mineral and Their X-ray Identification**. Mineralogical Society Monograph. No. 5. Spottiswoode Ballantyne Ltd., London.
- Brinkman, R. and L. J. Pons. 1973. Recognition and prediction of acid sulfate soil condition. pp. 169-203. *In* H. Dost., ed. **Acid Sulfate Soils Proceedings International Symposium. ILRI**. 18. Vol. 1. Wageningen, Netherlands
- Brinkman, R., Ve Nguyen Bao, Tin Tran Kim, Hau Do Phuoc and M.E.F. Van Mensvoort. 1993. Sulphidic materials in the western Mekong Delta, Vietnam. **Catena** 3: 317-331.
- Burton, E.D., R.T. Bush and L.A. Sullivan. 2006. Reduced inorganic sulfur speciation in drain sediments from acid-sulfate soil landscapes. **Environ. Sci. Technol.** 40: 888-893.
- Calvert, C.S., S.W. Buol and S.B. Weed. 1980. Mineralogical characteristics and transformation of a vertical rock saprolite-soil sequence in the North Carolina piedmont. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 44: 1096-1103.
- Chang, S.C., and M.L Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Sci.** 84: 133-144.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, pp. 891-901. *In* C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties**. Agron. No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- Chien, S. H., N. K. Savant., U. Mokwanye. 1982. Effect of temperature on phosphate sorption and desorption in two acid soils. **Soil Sci.** 133: 160-166.
- Chittleborough, D.J., P.H. Walker and J.M. Oades. 1984. Textural differentiation in Chronosequences from Eastern Australia, I. Description, chemical properties and micromorphologies of soils. **Geoderma** 32: 181-202.

- Cook, F. J., W. Hicks, E.A. Gardner, G.D. Carlin and D. W. Froggat. 2000. Export of acidity in drainage water from acid sulphate soils. **Marine Pollution Bulletin**. 41: 319-326.
- Couto, W. 1988. The fertility capability classification system, pp. 207-213. **First Training Workshop on Site Selection and Characterization**. IBSRAM Technical Notes No. 1, Bangkok.
- Curtin, D. and J.K. Syers. 2001. Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 65: 147-152.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis, pp. 545-567. In C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- Dent, D.L. 1986. **Acid sulphate soils : A Baseline for Reserch and Development ILRI Publ. No. 39**. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands.
- Dent, D.L. and M.E.F. van Mensvoort. 1993. Acid sulfate soils, pp. 391-402. **Symposium on Acid Sulphate Soils Publ, No. 53**. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands .
- Dent, D.L. and L.J. Pons. 1995. A world perspective on acid sulphate soils. **Geoderma** 67: 263-276.
- Diatta, J.B., Z.W. Kocialkowski and W. Grzebisz. 2006. Evaluation of potassium quantity intensity parameters of selected polish agricultural soils. **Electronic Journal of Polish Agricultural Universities** 9: 45-60.
- Ece, O.I., F. Coban, N. Gungor and F. Suner. 1999. Clay mineralogy and occurrence of ferrian smectites between serpentinite saprolites and basalts in Biga Peninsula, Northwest Turkey. **Clays Clay Miner.** 47: 241-251.

- Eiumnoh, A. 1984. Application of soil taxonomy to fertility capability classification of problem soils in the S.E. Coast of Thailand, pp. 169-190. *In* **Ecology and Management of Problem Soils in Asia**. FFTC Book Series No. 27. Taipei, Taiwan.
- Fageria, N.K., R.J. Wright and V.C. Baligar. 1988. Rice cultivar evaluation for phosphorus use efficiency. **Plant Soil** 111:105-109.
- Fitzpatrick, R.W., R.H. Merry, J. Williams, I. White, G. Bowman and G. Taylor. 1998. Acid Sulfate Soil Assessment: Coastal, Inland and Minespoil Conditions. **National Land and Water Resources Audit Methods Paper**. Australia.
- Fox, R.L., and E.J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirement of soils. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 34: 902-907.
- Frossard, F.M., M. Brossard and A. Metherell. 1995. Reactions controlling the cycling of P in soils., pp. 107-137. *In* H. Tiessen, ed. **Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles and Management**. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Furquim, S.A.C., R.C. Graham, L. Barbiero, J.P.d. Queiroz and V. Valles. 2008. Mineralogy and genesis of smectites in an alkaline-saline environment of pantanal wetland, Brazil. **Clays Clay Miner.** 56: 579-595.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.M. Tisdale and W.L. Nelson. 2005. **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**. 7th ed. Pearson Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Haynes, R.J. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils A critical review. **Plant Soil** 68: 289-308.

- He, J.Z., A. De Cristofaro and A. Violante. 1999. Comparison of adsorption of phosphate, tartrate, and oxalate on hydroxy aluminum montmorillonite complexes. **Clays Clay Miner.** 47: 226-233.
- Hodges, S.C. and L.W. Zelazny. 1980. Determination of noncrystalline soil components by weight difference after selective dissolution. **Clays Clay Miner.** 28: 35-42.
- Holford, I.C.R. and W.H. Patrick. 1979. Effect of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 48: 292-297.
- Husson, O., P. H. Verburg, Mai Thanh Phung, M.E.F. Van Mensvoort. 2000. Spatial variability of acid sulphate soils in the Plain of Reeds, Mekongdelta, Vietnam. **Geoderma** 97: 1-19.
- Islam, A.K.M.S., D.G. Edwards and C.J. Asher. 1980. pH optima for Crop growth results of a flowing solution culture experiment With six species. **Plant Soil** 54: 339-357.
- Iyamuremye, F., R.P. Dick and J. Baham. 1996. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption. **Soil Sci.** 7:426-435.
- Karim, M.I. and W.A. Adams. 1984. Relationships between sesquioxides, kaolinite, and phosphate sorption in catena of Oxisols in Malawi. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 48: 406-409.
- Kawaguchi, K. and K. Kyuma. 1969. **Lowland rice soils in Thailand.** Report on research in Southeast Asia, Natural Science Series No. 4. The center of Southeast Asian Studies, Kyoto Uni., Kyoto, Japan.
- Kevie, W. van der and B. Yenmanas. 1972. **Detailed reconnaissance soil survey of Southern Central Plain area.** Soil Survey Report no. 89. Department of Land Development, Bangkok.

- Khalid, R.A., W.H. Patrick and R.D. Delaune. 1977. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 41: 305-310.
- Khare, N., D. Hesterberg and S.L. Wang. 2004. XANES determination of adsorbed phosphate distribution between ferrihydrite and boehmite in mixtures. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 68:460-469.
- Kheoruenromne, I. 1989. The fertility capability soil classification system: applications and interpretation for crop production planning, pp. 235-249. **Asialand Workshop on the Establishment of Soil Management Experiments on Sloping Lands.** IBSRAM Technical Notes No. 3, Bangkok.
- Khresat, S.A. 2007. A mineral and morphological characterization of shrink-swell soil of the northern plain of Jordan. **American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.** 2: 417-422.
- Kilmer, V.J. and L.T. Alexander. 1949. Method of making mechanical analysis of soils. **Soil Sci.** 68: 15-24.
- Krairapanond, A., A. Jugsuginda and W.H. Jr. Patrick. 1993. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand: effect of uncontrolled and controlled soil redox potential (Eh) and pH. **Plant Soil** 157: 227-237.
- Krauskopf, K.B. 1972. Geochemistry of micronutrients, pp. 7-40. In J.J. Mortvedt, P.M. Giordano and W.L. Lindsay., eds. **Micronutrients in Agriculture.** Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Kyuma, K. 2004. **Paddy soil science.** Kyoto University Press and Trans Pacific Press, Kyoto, Japan.
- Land Classification Division and FAO Project Staff. 1973. **Soil Interpretation Handbook for Thailand.** Dept. of Land Development, Ministry of Agri. and Coop., Bangkok.

- Litaor, M.I., O. Reichmann, A. Haim, K. Auerswald, and M. Shenker. 2005. Sorption Characteristics of Phosphorus in Peat Soils of a Semiarid Altered Wetland. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 69:1658–1665.
- McGechan, M.B. and D.R. Lewis. 2002. Sorption of phosphorus by soil, Part 1: Principles, equations and models. **Biosystems Engineering** 82: 1–24.
- McKeague, J.A. 1967. An evaluation of 0.1 M pyrophosphate and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in podzols and some other soils. **Can. J. Soil Sci.** 46: 13-22.
- McKeague, J.A. and J.H. Day. 1966. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. **Can. J. Soil Sci.** 46: 13-22.
- Meena, S., P. Senthilvalavan, M. Malarkodi and R.K. Kaleeswari. 2007. Residual effect of phosphorus from organic manures in sunflower-assessment using radio tracer technique. **Res. J. Agric. Biol. Sci.** 3: 377-379.
- Mehra, O. and P. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays in a dithionite-citratebicarbonate system buffered with sodium. **Clays Clay Miner.** 7: 317-321.
- Minh, L.Q., T.P. Tuong, H.W.G. Booltink, M.E.F. van Mensvoort and J. Bouma. 1998. Soil and water table management effects on aluminum dynamics in an acid sulphate soil in Vietnam. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 68: 255–262.
- Moorman, F.R. 1963. Acid sulfate soils (cat clay) of the tropics. **Soil Sci.** 95: 271–275.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chem. Acta.** 27: 31-36.

- National Soil Survey Center. 1996. **Soil Survey Laboratory Methods Manual**. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 3.0. Natural Conservation Service, USDA.
- Norrish, K. and J.T. Hutton. 1969. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. **Geochim. Cosmichim. Acta.** 33: 431-453.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim and A. Sofyan. 2008. Dominant soil characteristics influencing available potassium on smectite soils. **Indonesian J. Agric.** 1: 121-131.
- Ogunwale, J.A. and J. Shamshuddi. 1999. Phosphorus sorption by acid sulfate soils of Peninsular Malaysia. **J. Trop. Agric. Sci.** 22: 33-43.
- Ozanne, P.G. and T.C. Shaw. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. **Aust. J. Agr. Res.** 18: 601-612.
- Pant, H.K.. and K.R. Reddy. 2001. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions. **J. Environ. Qual.** 30: 1474–1480.
- Panichapong, S. 1982. Distribution, characteristics and utilization of problem soils in Thailand. **The Proceedings of the Symposium on Distribution, Characteristics and Utilization of Problem Soils.** Tsukuba, Japan.
- Peech, M. 1945. Determinations of exchangeable cations and exchange capacity of soils rapid micromethods utilizing centrifuge and spectrophotometer. **Soil Sci.** 59: 25-28.
- Peech, M. 1965. Exchange acidity, pp. 905-913. In C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties.** 2nd edn. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc. Madison, Wisconsin.

- Peterson, G.W., and R.B. Corey. 1966. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 30: 563-565.
- Pons, L.J. and W. Van der Kevie. 1969. **Acid Sulfate Soils in Thailand: Studies on the Morphology Genesis and Agriculture Potential of Soil with Cat-Clay.** Soil Survey Report. No. 81. Land Development Dept., Bangkok, Thailand.
- Prabuddham, P. 1982. Improvement and fertilization of acid sulfate soil in Thailand, pp. 1808-1812. *In Proceedings of the Symposium on Distribution, Characteristics and Utilization of Problem Soils.* Tsukuba, Japan.
- Qi-fan, W. 1981. On the genesis, characteristics and utilization of the acid sulfate paddy soil in China, pp. 439-443. *In* Institute of Soil Science, Academia Sinica. **Proceedings of Symposium on Paddy Soil.** Beijing, China.
- Quang, Vo Dinh and J.E. Dufey. 1995. Effect of temperature and flooding on phosphate sorption in an acid sulphate soil from Vietnam European. **Soil Sci.** 46: 641-647.
- Rayment, G.E. and F.R. Higginson. 1992. Soil pH, pp. 17-24. *In Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods.* Australia.
- Reddy, K.R., M.R. Overcash and P.W. Westerman. 1980. Phosphorus adsorption-desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal wastes. **J. Environ. Qual.** 9: 86-92.
- Richards, L.A. 1954. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils.** U.S. Salinity Laboratory, U.S. Dept. Agr. Hbk.
- Roy, A.C. and S.K. De Datta. 1985. Phosphorus sorption isotherms for evaluating phosphorus requirement of wetland rice soils. **Plant Soil** 86: 185-196.

- Sanchez, P.A. 1976. **Properties and management of Soils in the Tropics**. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Sanchez, P.A., W. Cauto and S.W. Buol. 1982. The fertility capability soil classification system: interpretation, applicability and modification. **Geoderma** 27: 283-309
- Sanchez., C.A. Palm and S.W. Buol. 2003. Fertility capability soil classification : a tool to help assess soil quality in the tropics. **Geoderma** 114: 157-185.
- Sah, R.N. and D.S. Mikkelsen. 1986a. Effects of anaerobic decomposition of organic matter on sorption and transformations of phosphate in drained Soils: 1. Effects on phosphate sorption. **Soil Sci.** 142: 267-274.
- Sah, R. N. and D. S. Mikkelsen. 1986b. Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphorus in soil II. Effects on P sorption. **Plant Soil** 95: 173-181.
- Sah, R.N. and D.S. Mikkelsen. 1989. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effect on phosphate sorption. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53: 1718-1722.
- Samadi, A. 2003. Predicting phosphorus fertilizer requirement using sorption isotherms in selected calcareous soils of Western Azarbaijarn province, Iran. **Communications in Soil Science and Plant analysis** 34: 2885-2899.
- Sanyal, S.K., S.K. De Datta and P.Y. Chan. 1993. Phosphate adsorption and desorption behaviour of some acidic soils of South and Southeast Asia. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 937-945.
- Schulte, E.E. and K.A. Kelling. 1999. **Soil and Applied Manganese**. University of Wisconsin Extension Publication A2526.

- Seiksepour, M., M. Rashidi and B.G. Khabbaz. 2008. Prediction of soil available phosphorus based on soil organic carbon. **Am.-Euras. J. Agric. Environ. Sci.** 4: 189-193.
- Shahandeh, H., L.R. Hossner and F.T. Turner. 2003. Phosphorus relationships to manganese and iron in rice soils. **Soil Sci.** 168: 489-500.
- Sims, J.T. and G.M. Pierzynski. 2005. Chemistry of phosphorus in soils, pp 151–192. *In*: M.A. Tabatabai and D.L. Sparks, eds. **Chemical Processes in Soils.** Soil Science Society of America Book Series, no.8. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Smillie, G.W. and J.K. Syers. 1972. Calcium chloride formation during extraction of calcareous soil with fluoride: II. Implications to the Bray-1 test. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 36:25-30.
- Soil Survey Division Staff. 1993. **Soil Survey Manual.** U.S. Department of Agriculture. Handbook No. 18, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Soil Survey Staff. 2006. **Keys to Soil Taxonomy.** 10th edn. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Sree Ramalu, U.S., P.F. Pratt and AL. Page. 1967. Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineralogical composition. **Soil Sci. Soc. Am. J** 31: 193-196.
- Stevenson, F.J. 1986. **Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients.** John Willey and Sons. New York.
- Tadano, T. and S. Yoshida. 1978. **Soils and Rice.** Int. Rice res. Inst., Los Banos, Laguna, Phillipines.
- Tanada, A. and S.A. Navasero. 1966. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. **Soil Sci. Plant Nutr.** 12: 158-164.

- Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity, pp. 475-490. *In* J.M. Bigham, ed. **Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods**. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Thompson, L.M. and F.R. Troeh. 1978. **Soil and Soil Fertility**. 4th ed. McGraw-Hill Inc., New York.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton and J.L. Havlin. 1993. **Soil Fertility and Fertilizers**. 5th edn. New York: MacMillan Publishing Company.
- Toor, G.S., G.S. Bahl and A.C. Vig. 1997. Pattern of phosphorus availability in different soils as assessed by different adsorption equations. **J. Indian Soc. Soil Sci.** 45: 719-723.
- Torrent, J. 1987. Rapid and slow phosphate sorption by Mediterranean soils: Effect of iron oxides. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 50: 78-82.
- van Breemen, N. 1976. **Genesis and Solution Chemistry of Acid Sulfate Soils in Thailand**. Center for Agricultural Research Report, Thailand.
- van Breemen, N. 1980. Acid sulphate soils, pp. 53-57. *In* **Land Reclamation and Water Management**. ILRI Publ. 27, Wageningen.
- van Breemen, N. 1982. Genesis, morphology, and classification of acid sulfate soils in coastal plains, pp. 95-108. *In* J.A. Kittrick, D.S. Fanning and L.R. Hossner, Eds. **Acid Sulfate Weathering**, vol. 10. SSSA Special Publication, Madison, Wisconsin, USA.
- van Breemen, N. 1993. Environmental aspects of acid sulphate soils, pp. 391-402. *In* D.L. Dent and M.E.F. van Mensvoort, Editors, Selected Papers on the Ho Chi Minh City, **International Institute for Land Reclamation and Symposium on Acid Sulphate Soils**. Publ. No. 53 Improvement, Wageningen, Netherlands.

- van Breemen, N. and K. Harmsen. 1975. Translocation of Iron in Acid sulfate soils. : Soil morphology and the chemistry and mineralogy of Iron in a Chronosequence of acid sulfate soils. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 39: 1140-1148.
- van Breemen, N. and L.J. Pons. 1978. Acid sulfate soils and rice, pp. 739-761. *In* **Soil and Rice**. The International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.
- Van der Kevie, W. 1972. Morphology, genesis, occurrence and agricultural potential of acid sulfate soils in Central Thailand. **Thai J. Agr. Sci.** 5: 165-182.
- Van Mensvoort, M.E.F. and Le Quang Tri. 1988. Morphology and genesis of actual acid sulphate soils without jarosite in the Ha Tien Plain, Mekong Delta, Vietnam. *In* H. Dost, ed., **The Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils**. Dakar, Senegal, January 1986. International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication No. 44: 11-15. Wageningen, the Netherlands.
- Van Mensvoort, M.E.F., D.V. Ni and J. van der Schans. 1991. Improvement of acid sulphate soils by leaching with salt or brackish water., pp. 219-224. *In* P. Deturck and F.N. Ponnampereuma, eds. **Rice Production on Acid Sulphate Soils of the Tropics**. Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka.
- Violante, A., C. Colombo and A. Buondonna. 1991. Competitive adsorption of phosphate and oxalate by aluminum oxide. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 55: 65-70.
- Violante, A., L. Gianfreda. 1993 Competition in adsorption between phosphate and oxalate on an aluminum hydroxide montmorillonite complex. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 1235-1241.
- Violante, A. and L. Gianfreda. 1995. Adsorption of phosphate on variable charge minerals: Competitive effects of organic ligands., pp. 27-36. *In*: P.M. Huang, J. Berthelin, J.M.

Bollag, W.B. McGill, A.L. Page, eds. **Environmental Impact of Soil Component Interactions.** CRC Lewis Publisher, Boca Raton, FL.

Violante, A., M. Pigna, M. Ricciardella and L. Gianfreda. 2002. Adsorption of phosphate on variable charge minerals and soils as affected by organic and inorganic ligands. **Soil Sci.** 28: 279-285.

Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter: a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37: 29-35.

Wallance, S. and U. Anderson. 1984. Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots. **Agron. J.** 76:5-8.

Whittig, L.D. and W.R. Allardice. 1986. X-ray diffraction technique, pp. 671-698. In A. Klute, eds. **Methods of Soil Analysis. Part I: Chemical and Microbiological Properties.** 2nd edn. Agronomy No. 9. Amer. Soc. Agron. Inc, Madison, WI.

Wilson, M.J. 1987. Soil smectites and related interstratified minerals: recent developments, pp. 67-173. In L.G Denver, H.V. Schultz, Olphen and E.A. Mumpton, eds. **Proceedings of the International Clay Conference.** Clay Mineral Society, Bloomington, Indiana.

Wiryakitnateekul, W., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, R.J. Gilkes. 2005. Extractable iron and aluminum predict the P sorption capacity of Thai soils. **Aust. J. Soil Res.** 43: 757-766.

Wiswapipat, W., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Gilkes, R.J., 2009. Phosphate sorption and desorption by Thai upland soils. **Geoderma** 153: 408-415.

Yampracha, S. 2006. **Dissolution and Availability of Rock Phosphates for Rice Cultivation in Acid Sulfate Soils of Thailand.** Ph.D. Thesis, Kasetsart University.

Yoshida, S. 1981. **Fundamentals of Rice Crop Science**. Int. Rice Res Inst., Los Banos Laguna, Phillipines.

Zhang, Y., X. Lin and W. Werner. 2003. The effect of soil flooding on the transformation of Fe oxides and the adsorption/desorption behavior of phosphate. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 166: 68-75.





ตารางผนวกที่ 1 บริเวณเก็บตัวอย่างดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างที่ใช้ในการศึกษา

Soil series	UTM coordination	Elevation (m MSL)	Location	Date of sampling
Tan	47P 0690057 1553201	19	สถานีพัฒนาที่ดินเขต 1 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Tan1	47P 0689929 1553038	21	สถานีพัฒนาที่ดินเขต 1 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Tan2	47P 0704382 1568353	68	คลอง 13 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Tan3	47P 0718937 1562223	nd	คลอง 16 จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Rs	47P 0702176 1568143	65	คลอง 12 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Rs1	47P0706623 1559561	67	คลอง 14 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Rs2	47P 0705215 1559504	84	คลอง 14 จังหวัดปทุมธานี	11 ส.ค. 52
Rs3	47P 0712037 1557153	26	คลอง 16 จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Se	47P 0663432 1557503	20	อ. เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	7 พ.ย. 52
Se1	47P 0664624 1573170	19	อ. เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	12 พ.ย. 52
Se2	47P 0665343 1577409	nd	อ. บางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	12 พ.ย. 52
Se3	47P 0649676 1581480	nd	อ. เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	12 พ.ย. 52
Ok	47P 0697148 1573331	nd	อ.หนองเสือ จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Ok1	47P 0696994 1573696	nd	อ.หนองเสือ จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Ok2	47P 0694969 1568280	nd	อ.หนองเสือ จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Ok3	47P 0694972 1568258	nd	อ.หนองเสือ จังหวัดปทุมธานี	7 พ.ย. 52
Bp	47P 0702220 1535541	nd	เขตหนองจอก กทม.	7 พ.ย. 52
Bp1	47P 0702233 1535494	nd	เขตหนองจอก กทม.	7 พ.ย. 52
Bp2	47P 0701853 1537032	nd	เขตหนองจอก กทม.	7 พ.ย. 52
Bp3	47P 0701741 1538879	nd	เขตหนองจอก กทม.	7 พ.ย. 52

หมายเหตุ nd = not determined

ตารางผนวกที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคดินและชั้นเนื้อดินของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Soil series	Depth (cm)	Particle size distribution (USDA grading)			Textural class
		Sand (-----g kg ⁻¹ -----)	Silt	Clay	
Acid sulfate soils					
Se	0-30	94	266	640	Clay
	30-60	99	221	680	Clay
Tan	0-30	35	397	568	Clay
	30-60	99	381	520	Clay
Bp	0-30	74	314	612	Clay
	30-60	29	267	704	Clay
Rs	0-30	69	331	600	Clay
	30-60	99	341	560	Clay
Ok	0-30	73	324	604	Clay
	30-60	62	338	600	Clay
Acid sulfate soils with residual lime					
Se1	0-30	97	263	640	Clay
	30-60	100	380	520	Silty clay
Se2	0-30	47	393	560	Clay
	30-60	56	304	640	Clay
Se3	0-30	43	357	600	Clay
	30-60	94	427	480	Silty clay
Tan1	0-30	41	379	580	Clay
	30-60	30	350	620	Clay
Tan2	0-30	63	377	560	Clay
	30-60	30	418	552	Silty clay
Tan3	0-30	84	396	520	Silty clay
	30-60	31	333	636	Clay
Bp1	0-30	75	337	588	Clay
	30-60	79	298	624	Clay
Bp2	0-30	49	331	620	Clay
	30-60	97	271	632	Clay
Bp3	0-30	45	335	620	Clay
	30-60	21	271	708	Clay
Rs1	0-30	30	210	760	Clay
	30-60	25	295	680	Clay
Rs2	0-30	66	254	680	Clay
	30-60	37	283	680	Clay
Rs3	0-30	53	307	640	Clay
	30-60	20	260	720	Clay
Ok1	0-30	91	289	620	Clay
	30-60	69	327	604	Clay
Ok2	0-30	59	309	632	Clay
	30-60	94	290	616	Clay
Ok3	0-30	81	307	612	Clay
	30-60	24	320	656	Clay

ตารางผนวกที่ 3 สมบัติทางเคมีของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Soil series	Depth (cm)	pH			OM (g kg ⁻¹)	Available (-mg kg ⁻¹)		Extractable bases (-----cmol _c kg ⁻¹)				Sum base	Extr acidity	CEC		ECe dS m ⁻¹	BS (%)
		Field	H ₂ O	KCl		P	K	Ca	Mg	K	Na			by sum	NH ₄ OAc		
Acid sulfate soils																	
Se	0-30	4.5	4.2	3.5	39.0	9.8	91	13.5	7.7	0.5	2.2	23.8	26	49.8	20.0	2.5	31.4
	30-60	4.5	3.9	3.4	6.5	2.6	73	9.4	6.1	0.4	2.4	18.2	37	55.2	21.5	3.0	19.8
Tan	0-30	4.5	4.0	3.2	22.9	2.1	110	7.0	6.5	0.6	2.6	16.7	33	49.7	17.0	1.9	20.2
	30-60	4.5	3.3	2.9	12.3	1.0	233	4.7	3.7	1.2	3.2	12.8	35	47.8	20.0	3.2	15.5
Bp	0-30	4.5	4.0	3.6	40.6	19.6	344	18.3	10.6	1.8	3.5	34.1	39	73.1	19.5	3.0	30.4
	30-60	4.0	3.5	3.0	7.3	10.2	330	7.9	15.3	1.7	1.6	26.4	31	57.4	19.0	3.1	29.9
Rs	0-30	4.0	3.5	2.6	27.0	5.6	94	6.1	3.0	0.5	3.1	12.7	35	47.7	19.5	2.2	15.4
	30-60	4.0	3.5	2.6	10.5	2.1	171	6.4	4.5	0.9	3.2	14.9	33	47.9	19.0	2.8	18.4
Ok	0-30	4.5	3.7	3.5	36.8	3.0	160	3.5	2.7	0.8	2.5	9.5	35	44.5	23.0	2.7	12.0
	30-60	4.0	3.4	3.2	15.1	2.1	132	3.8	3.4	0.7	2.9	10.7	33	43.7	24.5	3.9	14.0
Acid sulfate soils with residual lime																	
Se1	0-30	7.0	4.2	3.2	45.8	8.5	80	11.9	2.6	0.4	2.6	17.5	30	47.5	27.5	2.4	22.6
	30-60	4.0	3.6	3.1	3.4	4.3	117	13.3	1.9	0.6	2.2	18.0	39	57.0	17.5	2.9	18.7
Se2	0-30	6.6	5.0	4.4	22.5	7.7	126	14.8	5.1	0.6	2.5	23.0	37	60.0	20.0	1.6	23.7
	30-60	4.5	3.5	3.1	3.4	1.7	149	12.6	3.9	0.8	3.0	20.2	27	47.2	23.0	1.8	27.2
Se3	0-30	8.0	5.5	4.0	45.5	5.1	161	16.0	8.4	0.8	2.2	27.4	25	52.4	23.0	2.3	35.4
	30-60	4.5	3.8	3.5	3.4	3.4	128	19.1	8.5	0.7	2.4	30.6	37	67.6	21.0	2.5	29.3
Tan1	0-30	6.5	4.8	3.5	25.4	6.0	316	8.5	5.4	1.6	2.1	17.6	23	40.6	23.5	2.4	27.7
	30-60	4.0	4.2	3.1	18.6	3.6	317	7.6	6.1	1.6	2.8	18.1	36	54.1	31.5	2.8	20.1
Tan2	0-30	7.0	4.7	3.4	22.3	23.9	393	12.8	5.2	2.0	1.8	21.8	37	58.8	21.5	1.3	22.8
	30-60	4.5	4.2	2.8	12.3	16.6	451	9.0	4.8	2.3	2.0	18.2	25	43.2	18.0	1.5	26.6
Tan3	0-30	7.0	4.0	3.2	20.8	9.4	231	6.5	4.5	1.2	2.9	15.1	30	45.1	19.5	2.6	20.1
	30-60	4.0	3.2	2.8	13.4	5.8	160	4.1	4.6	0.8	3.4	12.8	31	43.8	18.0	2.7	17.2

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Soil series	Depth (cm)	pH			OM (g kg ⁻¹)	Available		Extractable bases				Sum base (cmol _c kg ⁻¹)	Extr acidity	CEC		ECe (dS m ⁻¹)	BS (%)
		Field	H ₂ O	KCl		P	K	Ca	Mg	K	Na			by sum	NH ₄ OAc		
Acid sulfate soils with residual lime																	
Bp1	0-30	5.0	4.8	3.4	45.8	10.2	249	14.6	10.2	1.3	1.7	27.8	26	53.8	24.5	0.8	34.9
	30-60	4.5	4.0	3.3	7.8	2.9	189	6.0	11.6	1.0	2.3	20.8	31	51.8	25.5	1.2	25.1
Bp2	0-30	8.5	5.1	4.2	47.6	10.2	332	7.6	9.7	1.7	2.3	21.3	39	60.3	23.0	1.2	21.4
	30-60	4.5	4.7	3.7	27.4	5.3	265	6.6	3.1	1.4	2.9	13.9	29	42.9	20.5	1.8	19.4
Bp3	0-30	6.5	5.2	4.5	40.4	9.6	234	10.5	7.8	1.2	2.9	22.3	23	45.3	25.5	2.4	32.7
	30-60	4.5	4.5	3.5	11.6	3.3	260	6.6	13.1	1.3	2.5	23.5	30	53.5	17.0	2.6	28.2
Rs1	0-30	6.0	4.0	2.8	24.0	5.1	207	7.8	8.7	1.1	3.6	21.1	29	50.1	24.5	3.1	26.7
	30-60	4.5	3.8	2.7	5.1	2.1	186	5.6	10.1	1.0	2.4	19.1	22	41.1	25.5	3.1	30.3
Rs2	0-30	6.0	4.6	3.5	27.3	6.8	182	12.5	5.4	0.9	2.8	21.7	35	56.7	22.0	2.2	23.7
	30-60	4.5	3.6	3.0	9.4	3.0	164	7.1	5.1	0.8	2.8	15.8	33	48.8	14.0	2.7	19.3
Rs3	0-30	7.0	5.0	4.4	44.0	5.3	133	16.9	6.0	0.7	2.9	26.5	30	56.5	25.5	2.4	30.6
	30-60	4.0	4.0	3.5	2.0	5.1	182	6.4	8.1	0.9	3.0	18.4	30	48.4	20.5	2.5	23.5
Ok1	0-30	5.0	3.6	3.5	21.8	3.6	177	5.3	2.6	0.9	2.2	11.0	33	44.0	24.5	2.2	14.3
	30-60	4.0	3.4	3.0	17.5	2.6	196	7.6	2.4	1.0	2.9	13.9	35	48.9	22.0	2.6	16.5
Ok2	0-30	4.5	4.2	3.4	47.6	24.7	623	14.8	6.0	3.2	3.5	27.5	45	72.5	25.0	2.2	23.4
	30-60	4.0	3.4	3.2	9.3	14.1	313	6.6	10.2	1.6	3.2	21.6	39	60.6	20.0	2.5	21.7
Ok3	0-30	5.5	4.1	3.0	27.3	9.4	181	14.4	7.8	0.9	2.9	26.0	48	74.0	22.5	2.4	21.3
	30-60	4.0	3.2	2.9	4.8	7.7	263	13.3	7.9	1.4	2.6	25.1	37	62.1	24.5	3.2	25.3

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสที่สกัดได้ในรูปออสตรอน อีสระ และ สารอินทรีย์เชิงซ้อนของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Soil series	Depth (cm)	Fe _o	Fe _d	Fe _p	Fe _o /Fe _d	Al _o	Al _d	Al _p	Al _o /Al _d	Mn _o	Mn _d	Mn _p
		(------g kg ⁻¹ -----)				(------g kg ⁻¹ -----)				(------g kg ⁻¹ -----)		
Acid sulfate soils												
Se	0-30	4.6	12.2	2.2	0.38	36.1	1.3	4.5	27.8	0.04	0.08	0.05
	30-60	6.1	15.4	3.2	0.40	39.7	1.4	3.8	28.3	0.07	0.07	0.04
Tan	0-30	5.6	13.8	1.6	0.40	38.4	1.4	1.2	27.4	0.13	0.07	0.03
	30-60	5.6	16.4	1.2	0.34	40.3	1.3	2.3	31.0	0.09	0.06	0.02
Bp	0-30	4.4	11.1	5.1	0.39	26.1	1.5	1.6	17.4	0.51	0.09	0.07
	30-60	9.7	14.2	5.0	0.68	36.7	1.6	3.6	22.9	0.04	0.11	0.07
Rs	0-30	6.2	15.5	5.2	0.40	40.0	1.4	3.8	28.6	0.45	0.05	0.09
	30-60	9.2	18.7	4.3	0.49	43.6	1.2	4.4	36.3	0.50	0.05	0.07
Ok	0-30	7.4	21.6	6.4	0.34	40.9	1.4	3.9	29.2	0.58	0.07	0.05
	30-60	10.3	22.2	5.6	0.46	45.9	1.1	3.8	41.7	0.02	0.09	0.10
Acid sulfate soils with residual lime												
Se1	0-30	3.3	12.3	3.4	0.27	28.9	1.6	4.1	18.1	0.12	0.04	0.04
	30-60	5.1	11.6	1.1	0.44	35.7	1.2	4.2	29.7	0.23	0.04	0.08
Se2	0-30	3.5	12.2	0.4	0.29	29.9	0.9	3.7	33.3	0.33	0.05	0.03
	30-60	5.0	16.5	2.2	0.30	37.8	0.7	3.1	54.0	0.31	0.12	0.12
Se3	0-30	3.4	11.2	3.1	0.30	26.1	0.8	3.4	32.6	0.56	0.04	0.07
	30-60	5.0	16.7	2.5	0.30	37.2	1.2	4.2	31.0	0.45	0.05	0.06
Tan1	0-30	4.6	12.7	1.8	0.36	37.5	0.3	3.1	125.0	0.18	0.09	0.06
	30-60	6.1	15.7	0.8	0.39	33.7	1.6	4.9	21.0	0.03	0.08	0.07
Tan2	0-30	4.6	12.7	1.3	0.36	37.6	0.9	2.4	41.7	0.12	0.09	0.09
	30-60	6.3	18.7	1.2	0.34	36.4	0.8	3.4	45.5	0.05	0.07	0.07
Tan3	0-30	4.6	11.7	2.3	0.39	30.3	1.5	6.3	20.2	0.23	0.06	0.05
	30-60	6.2	15.3	0.9	0.40	34.7	0.8	7.2	43.4	0.04	0.07	0.04
Bp1	0-30	2.3	11.7	1.2	0.19	27.5	1.5	3.4	18.3	0.04	0.07	0.07
	30-60	5.6	12.3	6.1	0.45	37.5	1.1	4.2	34.0	0.04	0.06	0.04
Bp2	0-30	2.3	12.3	4.9	0.19	24.5	0.9	1.8	27.2	0.49	0.13	0.12
	30-60	4.8	13.5	3.1	0.36	36.7	1.6	3.1	22.9	0.03	0.07	0.09
Bp3	0-30	2.3	12.3	5.6	0.19	21.5	1.5	1.7	14.3	0.05	0.11	0.12
	30-60	4.8	11.9	2.2	0.41	34.4	1.1	2.3	31.3	0.02	0.03	0.03
Rs1	0-30	4.9	16.1	5.1	0.31	30.6	1.4	3.5	21.8	0.52	0.03	0.12
	30-60	6.9	17.8	5.1	0.39	39.2	0.9	3.4	43.5	0.49	0.12	0.09
Rs2	0-30	5.7	12.2	2.6	0.47	32.5	1.5	1.6	21.7	0.33	0.12	0.12
	30-60	7.0	16.1	4.2	0.43	36.7	1.1	1.8	33.4	0.05	0.09	0.09
Rs3	0-30	6.2	12.8	1.4	0.48	30.6	1.3	1.5	23.5	0.45	0.13	0.12
	30-60	7.2	17.8	6.1	0.40	37.2	1.4	1.4	26.6	0.09	0.11	0.13
Ok1	0-30	6.1	17.7	1.6	0.34	41.0	1.2	5.1	34.2	0.45	0.09	0.06
	30-60	8.3	19.8	6.8	0.42	41.1	1.0	4.7	41.1	0.04	0.07	0.12
Ok2	0-30	5.9	18.4	1.8	0.32	40.0	1.0	3.6	40.0	0.64	0.08	0.04
	30-60	8.9	18.8	6.1	0.47	40.9	1.4	4.7	29.2	0.03	0.06	0.11
Ok3	0-30	7.2	17.3	2.2	0.41	41.2	1.5	4.9	27.5	0.72	0.08	0.07
	30-60	9.4	19.4	2.3	0.48	39.5	1.6	4.9	24.7	0.05	0.06	0.11

หมายเหตุ Extractable of ammonium oxalate Fe, Al and Mn as indicated by Fe_o, Al_o and Mn_o,
dithionite-citrate-bicarbonate Fe, Al and Mn as indicated by Fe_d, Al_d and Mn_d and
sodium pyrophosphate Fe, Al and Mn as indicated by Fe_p, Al_p and Mn_p

ตารางผนวกที่ 5 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ของดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้าง

Soil series	Depth (cm)	Inorganic P		
		Fe-P	Al-P	Ca-P
(-----mg kg ⁻¹ -----)				
Acid sulfate soils				
Se	0-30	24.5	2.8	0.18
	30-60	18.9	4.3	0.18
Tan	0-30	13.3	2.2	0.18
	30-60	14.0	2.2	0.18
Bp	0-30	13.3	2.3	0.18
	30-60	24.3	3.5	0.18
Rs	0-30	18.9	2.8	0.18
	30-60	7.0	1.5	1.28
Ok	0-30	18.5	2.8	0.18
	30-60	6.4	2.4	0.18
Acid sulfate soils with residual lime				
Se1	0-30	23.6	2.5	0.18
	30-60	14.8	4.2	0.18
Se2	0-30	15.4	4.8	0.18
	30-60	27.5	4.3	0.18
Se3	0-30	17.2	2.7	0.18
	30-60	19.4	5.2	0.18
Tan1	0-30	17.8	2.8	0.98
	30-60	14.9	3.0	0.18
Tan2	0-30	32.1	2.8	0.18
	30-60	34.0	2.2	0.18
Tan3	0-30	19.8	2.7	3.41
	30-60	14.5	2.7	0.18
Bp1	0-30	18.8	2.4	0.18
	30-60	31.4	3.5	0.18
Bp2	0-30	32.5	2.7	0.18
	30-60	32.3	3.4	0.18
Bp3	0-30	19.8	2.2	0.18
	30-60	27.9	4.4	0.18
Rs1	0-30	13.8	2.5	0.18
	30-60	11.1	1.4	1.12
Rs2	0-30	27.5	5.8	0.18
	30-60	8.9	1.0	0.18
Rs3	0-30	19.4	2.7	0.18
	30-60	10.7	1.7	0.18
Ok1	0-30	18.9	2.5	0.18
	30-60	7.6	1.7	0.18
Ok2	0-30	34.3	2.7	0.18
	30-60	110.6	1.7	0.18
Ok3	0-30	16.1	2.8	0.18
	30-60	9.4	1.0	0.18

ตารางผนวกที่ 6 Phosphorus buffer capacity ของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด

Soils series	Depth (cm)	Sorbed P at equilibrium solution P concentration		
		P 0.1 mg L ⁻¹	P 0.2 mg L ⁻¹	P 0.4 mg L ⁻¹
(-----mg kg ⁻¹ -----)				
Acid sulfate soils				
Se	0-30	236	311	410
	30-60	250	329	435
Tan	0-30	317	390	480
	30-60	332	409	504
Bp	0-30	183	241	318
	30-60	197	279	395
Rs	0-30	308	379	466
	30-60	261	369	521
Ok	0-30	507	582	669
	30-60	575	661	759
Acid sulfate soils with residual lime				
Se1	0-30	230	283	348
	30-60	263	324	399
Se2	0-30	257	317	390
	30-60	233	307	405
Se3	0-30	301	346	397
	30-60	211	279	368
Tan1	0-30	300	370	455
	30-60	313	385	474
Tan2	0-30	277	341	420
	30-60	319	392	483
Tan3	0-30	335	385	442
	30-60	309	380	468
Bp1	0-30	228	280	345
	30-60	253	311	383
Bp2	0-30	194	256	338
	30-60	198	262	345
Bp3	0-30	169	223	295
	30-60	141	199	282
Rs1	0-30	292	359	442
	30-60	305	376	463
Rs2	0-30	333	383	440
	30-60	246	325	428
Rs3	0-30	329	378	435
	30-60	293	361	444
Ok1	0-30	490	525	563
	30-60	300	370	455
Ok2	0-30	462	531	609
	30-60	360	443	545
Ok3	0-30	389	447	514
	30-60	427	491	564

ตารางผนวกที่ 7 สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินเปรี้ยวจัดที่มีปูนตกค้างและดินเปรี้ยวจัด

Variable	Correlations N=40																																																			
	pH Field	H2O	KCl	OM	Avai P	Avai K	Ext Ca	Ext Mg	Ext K	Ext Na	EA	CEC	EC	Sand	Silt	Clay	P adsor	P Desor	Feo	Fed	Fep	Alo	Ald	Alp	Si	Al	Fe	Ti	Na	Mg	K	Ca	P	S	Mn	Cu	Zn	Fe-P	Al-P													
pH Field	1.00																																																			
H2O	0.76	1.00																																																		
KCl	0.61	0.78	1.00																																																	
OM	0.60	0.64	0.54	1.00																																																
Avai P	0.22	0.27	0.15	0.40	1.00																																															
Avai K	0.03	0.17	0.01	0.17	0.74	1.00																																														
Ext Ca	0.31	0.42	0.41	0.35	0.42	0.07	1.00																																													
Ext Mg	0.02	0.20	0.13	-0.03	0.19	0.26	0.16	1.00																																												
Ext K	0.03	0.17	0.00	0.17	0.74	1.00	0.07	0.26	1.00																																											
Ext Na	-0.19	-0.30	-0.17	0.04	-0.01	0.02	-0.11	-0.23	0.02	1.00																																										
EA	-0.14	-0.26	-0.07	-0.01	0.28	0.18	0.20	-0.09	0.18	0.29	1.00																																									
CEC	0.25	0.25	0.20	0.34	-0.01	0.10	0.12	0.00	0.10	-0.01	-0.08	1.00																																								
EC	-0.38	-0.54	-0.34	-0.33	-0.31	-0.21	-0.22	-0.05	-0.21	0.38	0.08	-0.03	1.00																																							
Sand	-0.05	-0.16	-0.01	0.11	-0.01	-0.25	0.13	-0.37	-0.25	0.05	0.31	-0.03	-0.04	1.00																																						
Silt	0.12	0.09	0.05	-0.04	0.10	0.14	0.15	-0.26	0.14	-0.20	0.04	-0.15	-0.22	0.01	1.00																																					
Clay	-0.09	-0.00	-0.04	-0.02	-0.09	-0.01	-0.19	0.39	-0.01	0.16	-0.18	0.15	0.21	-0.47	-0.89	1.00																																				
P adsor	-0.50	-0.61	-0.49	-0.31	-0.12	0.06	-0.45	-0.29	0.06	0.24	0.26	-0.03	0.47	0.05	0.04	-0.06	1.00																																			
P Desor	0.42	0.57	0.51	0.26	0.18	0.34	0.43	0.18	-0.23	-0.11	0.21	-0.51	-0.11	-0.11	-0.11	-0.64	1.00																																			
Feo	-0.64	-0.71	-0.55	-0.55	-0.19	-0.01	-0.39	-0.04	-0.01	0.18	0.25	-0.13	0.57	-0.07	-0.16	0.18	0.79	-0.62	1.00																																	
Fed	-0.55	-0.64	-0.48	-0.38	-0.17	0.07	-0.40	-0.27	0.07	0.28	0.22	0.08	0.41	-0.04	-0.04	0.05	0.84	-0.56	0.76	1.00																																
Fep	-0.16	-0.22	-0.07	-0.05	-0.13	-0.10	-0.37	0.23	-0.10	0.21	-0.05	0.05	0.25	-0.00	-0.40	0.36	0.19	-0.18	0.34	0.33	1.00																															
Alo	-0.66	-0.70	-0.61	-0.57	-0.24	-0.06	-0.41	-0.29	-0.06	0.07	0.28	-0.16	0.32	0.20	-0.02	-0.07	0.79	-0.57	0.78	0.74	0.10	1.00																														
Ald	-0.20	-0.15	-0.05	0.10	-0.01	-0.16	0.03	0.13	-0.16	0.19	0.25	0.11	0.23	0.26	-0.35	0.19	-0.06	-0.11	0.13	-0.03	0.18	-0.10	1.00																													
Alp	-0.24	-0.45	-0.42	-0.22	-0.08	-0.11	-0.18	-0.21	-0.11	0.04	0.13	0.12	0.19	0.26	0.10	-0.21	0.28	-0.15	0.27	0.27	-0.13	0.30	0.00	1.00																												
Si	0.14	0.22	0.10	0.23	0.07	-0.07	-0.14	0.20	-0.07	-0.09	-0.26	0.04	-0.34	-0.03	-0.06	0.07	-0.11	0.15	-0.21	-0.33	0.02	-0.19	0.02	-0.14	1.00																											
Al	0.16	0.10	0.04	0.06	0.04	0.01	0.27	0.06	0.01	-0.15	0.02	0.38	0.04	-0.03	-0.03	0.04	-0.22	0.24	-0.12	-0.06	-0.01	-0.18	-0.05	0.46	-0.37	1.00																										
Fe	-0.34	-0.50	-0.37	-0.32	-0.28	-0.10	-0.44	-0.23	-0.10	0.27	0.09	-0.10	0.51	0.03	-0.27	0.22	0.63	-0.47	0.62	0.60	0.40	0.55	-0.04	0.09	-0.43	-0.11	1.00																									
Ti	-0.14	-0.17	-0.40	-0.20	-0.07	-0.01	-0.16	-0.19	-0.01	-0.05	-0.08	-0.11	0.08	-0.16	0.32	-0.21	0.20	-0.35	0.11	0.09	-0.34	0.23	-0.24	0.30	0.12	0.02	-0.05	1.00																								
Na	-0.21	-0.20	-0.00	-0.39	-0.10	0.06	0.06	0.48	0.06	-0.01	0.09	-0.01	0.08	-0.38	-0.01	0.18	-0.03	0.37	0.16	0.12	0.14	0.01	-0.18	-0.07	-0.13	0.10	0.06	-0.24	1.00																							
Mg	0.01	0.18	0.14	-0.23	0.10	0.26	0.20	0.87	0.26	-0.27	-0.15	-0.00	0.00	-0.43	-0.13	0.31	-0.39	0.51	-0.10	-0.32	0.08	-0.33	-0.01	-0.20	0.01	0.21	-0.26	-0.16	0.58	1.00																						
K	-0.05	-0.07	-0.08	-0.19	0.08	0.14	0.12	0.33	0.14	-0.01	0.08	-0.12	0.48	-0.39	-0.09	0.26	0.07	0.12	0.15	0.10	-0.08	-0.06	0.02	-0.07	-0.30	0.05	0.19	-0.06	0.43	0.44	1.00																					
Ca	0.58	0.53	0.41	0.46	0.25	-0.07	0.44	0.09	-0.07	-0.39	-0.18	0.11	-0.38	0.27	0.06	-0.18	-0.62	0.56	-0.75	-0.66	-0.20	-0.62	-0.02	-0.05	0.21	0.28	-0.48	-0.18	-0.15	0.16	0.05	1.00																				
P	0.66	0.68	0.54	0.54	0.17	0.15	0.20	0.26	0.15	-0.17	-0.17	0.18	-0.49	-0.14	0.01	0.06	-0.59	0.64	-0.67	-0.54	0.01	-0.76	-0.05	-0.39	0.25	-0.09	-0.40	-0.31	0.01	0.21	-0.01	0.53	1.00																			
S	-0.35	-0.45	-0.20	-0.27	0.00	0.02	-0.27	-0.06	0.02	0.26	0.25	0.02	0.36	0.06	-0.07	0.03	0.64	-0.38	0.67	0.67	0.39	0.50	0.11	0.20	-0.07	-0.15	0.45	-0.20	0.23	-0.16	0.18	-0.44	-0.40	1.00																		
Mn	0.41	0.51	0.40	0.25	0.29	0.28	-0.00	0.43	0.28	-0.19	-0.30	0.07	-0.25	-0.42	-0.19	0.35	-0.32	0.42	-0.32	-0.30	0.10	-0.46	-0.09	-0.41	0.35	-0.21	-0.30	-0.06	0.05	0.34	0.17	0.28	0.62	-0.18	1.00																	
Cu	-0.00	-0.09	-0.20	-0.00	0.22	0.32	-0.06	0.03	0.32	-0.00	0.13	0.01	-0.20	-0.07	0.08	-0.04	0.25	-0.18	0.10	0.21	-0.00	0.22	-0.25	-0.09	-0.16	-0.15	0.37	0.12	-0.04	-0.06	-0.19	-0.21	-0.17	-0.01	-0.12	1.00																
Zn	0.10	0.20	0.14	0.18	0.07	0.18	0.02	0.07	-0.06	-0.06	0.22	-0.17	-0.08	0.07	-0.02	-0.21	0.16	-0.20	-0.03	0.02	-0.22	0.06	-0.20	-0.25	0.00	0.02	-0.22	0.02	0.11	0.11	0.11	0.28	-0.16	0.07	0.19	1.00																
Fe-P	0.31	0.45	0.28	0.30	0.45	0.44	0.18	0.13	0.44	-0.31	-0.05	0.08	-0.63	0.06	-0.05	0.02	-0.38	0.50	-0.46	-0.39	-0.24	-0.24	-0.14	-0.17	0.09	0.14	-0.41	-0.14	-0.20	0.16	-0.34	0.39	0.37	-0.46	0.28	0.18	0.08	1.00														
Al-P	0.11	0.24	0.29	-0.07	-0.10	-0.18	0.32	0.03	-0.18	-0.21	0.14	-0.04	-0.20	0.21	0.00	-0.09	-0.33	0.37	-0.32	-0.39	-0.32	-0.13	-0.05	-0.03	-0.08	0.29	-0.32	-0.04	-0.01	0.23	-0.12	0.27	0.10	-0.37	-0.15																	

ตารางผนวกที่ 8 การแบ่งกลุ่มของเนื้อดิน (เอิบ, 2548; Soil Survey Division Staff, 1993)

คำเรียกทั่วไป	ลักษณะเนื้อดิน	ชั้นเนื้อดินต่าง ๆ (texture classes)
ดินทราย (sandy soils)	เนื้อหยาบ (coarse textured)	ได้แก่ ทรายชนิดต่าง ๆ (ทรายหยาบ ทรายละเอียด ทรายละเอียดมาก) ทรายปนดินร่วน ชนิดต่าง ๆ (ทรายหยาบปนดินร่วน ทรายปนดินร่วน ทรายละเอียดปนดินร่วน และทรายละเอียดมากปนดินร่วน)
ดินร่วน (loamy soils)	เนื้อดินหยาบปานกลาง (moderately coarse-textured)	ดินร่วนปนทรายหยาบ ดินร่วนปนทราย ดินร่วนปนทรายละเอียด
	เนื้อปานกลาง (moderately fine-textured)	ดินร่วนปนทรายละเอียดมาก ดินร่วน ดินร่วนปนทรายแป้ง และทรายแป้ง
	เนื้อละเอียดปานกลาง (moderately fine-textured)	ดินร่วนเหนียว ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
ดินเหนียว (clayey soils)	เนื้อละเอียด (fine textured)	ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทราย แป้งและดินเหนียว

ตารางผนวกที่ 9 ข้อกำหนดที่ใช้ในการประเมินระดับสมบัติทางเคมี (นงคราญ, 2529; เอิบ, 2548; Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973; Soil Survey Division Staff, 1999

1. พีเอชของดิน (Soil pH), (ดิน : น้ำ = 1:1)

Rating	Range
Ultra acid	< 3.5
Extremely acid	3.5-4.4
Very strongly acid	4.5-5.0
Strongly acid	5.1-5.5
Moderately acid	5.6-6.0
Slightly acid	6.1-6.5
Neutral	6.6-7.3
Slightly alkaline	7.4-7.8
Moderately alkaline	7.9-8.4
Strongly alkaline	8.5-9.0
Very strongly alkaline	> 9.0

2. อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) (% organic carbon × 1.724)

Rating	Range (g kg ⁻¹)
Very low	< 5
Low	5-10
Moderately low	10-15
Moderately	15-25
Moderately high	25-35
High	35-45
Very high	> 45

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

3. ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total nitrogen)

Rating	Range (g kg ⁻¹)
Very low	< 1.0
Low	1.0-2.0
Moderate	2.0-5.0
High	5.0-7.5
Very high	> 7.5

4. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) (Bray II)

Rating	Range (mg kg ⁻¹)
Very low	< 3
Low	3-6
Moderately low	6-10
Moderately	10-15
Moderately high	15-25
High	25-45
Very high	> 45

5. ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available K) (1 M NH₄OAc at pH 2.0)

Rating	Range (mg kg ⁻¹)
Very low	< 30
Low	30-60
Moderate	60-90
High	90-120
Very high	> 120

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

6. เบสรวมที่สกัดได้ (Extractable bases) (1 M NH_4OAc at pH 2.0)

Rating	Range ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)				
	Extr. Ca	Extr. Mg	Extr. K	Extr. Na	Sum bases
Very low	< 2.0	< 0.3	< 0.2	< 0.1	< 2.6
Low	2-5	0.3-1.0	0.2-0.3	0.1-0.3	2.6-6.6
Moderate	5-10	1.0-3.0	0.3-0.6	0.3-0.7	6.6-14.3
High	10-20	3.0-8.0	0.6-1.2	0.7-2.0	14.3-31.2
Very high	> 20	> 8.0	> 1.2	> 2.0	> 31.2

7. ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)

Rating	Range ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)
Very low	<3
Low	3-5
Moderately low	5-10
Moderate	10-15
Moderately high	15-20
High	20-30
Very high	>30

8. อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส (Base saturation)

Rating	Range (%)
Low	<35
Moderate	35-75
High	>75

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

9. สภาพกรดที่สกัดได้ Extractable acidity (BaCl₂)

Rating	Range (cmol _c kg ⁻¹)
Very low	<1.0
Low	1.0-2.0
Moderate	2.0-5.0
Moderately high	5.0-10.0
High	10.0-20.0
Very high	>20.0

ตารางผนวกที่ 10 การคาดคะเนระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน (กองสำรวจดิน, 2523)

Soil fertility rating	OM (g kg ⁻¹)	Avail. P (mg kg ⁻¹)	Avail. K (mg kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	BS (%)
Low	< 15 (1)	< 10 (1)	< 60 (1)	< 10 (1)	< 35 (1)
Medium	15-35 (2)	10-20 (2)	60-90 (2)	10-20 (2)	35-75 (2)
High	> 35 (3)	> 20 (3)	> 90 (3)	> 20 (3)	> 75 (3)

หมายเหตุ วิธีประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินใช้วิธีการให้คะแนน (ตัวเลขคะแนนอยู่ในวงเล็บในตาราง) โดยคะแนนรวมเท่ากับ 7 หรือน้อยกว่า ดินมีระดับความอุดมสมบูรณ์ต่ำ คะแนนรวมอยู่ระหว่าง 8-12 ดินมีระดับความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง คะแนนรวมมากกว่าหรือเท่ากับ 13 ดินมีระดับความอุดมสมบูรณ์สูง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวจิตติรัตน์ ชูชาติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	6 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เกษตรศาสตร์) คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-