

รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำเสีย

PHOSPHORUS FORMS IN ALUM SLUDGE COLUMN USED FOR
WASTEWATER TREATMENT

กรณิก ใจเขียว
ขวัญใจ ตระกูลดี
ขวัญชัย พันทุกษ์

โครงการพิเศษงานวิจัยส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำเสีย
PHOSPHORUS FORMS IN ALUM SLUDGE COLUMN USED FOR
WASTEWATER TREATMENT

กรณิกา ใจเขียว
ขวัญใจ ตระกูลดี
ขวัญชัย พันทูกซ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**PHOSPHORUS FORMS IN ALUM SLUDGE COLUMN USED FOR
WASTEWATER TREATMENT**

**KORNIKA JAIKIEW
KWANJAI TRAKOONDEE
KHWANCHAI PHONTHUK**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**


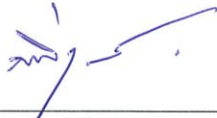

หัวข้อโครงการพิเศษ รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำ
เสีย

PHOSPHORUS FORMS IN ALUM SLUDGE COLUMN USED FOR
WASTEWATER TREATMENT

ชื่อนักศึกษา นางสาวกรณิกา ใจเขียว รหัส 53051144
 นางสาวขวัญใจ ตระกูลดี รหัส 53051160
 นายขวัญชัย พันทุกข์ รหัส 53051161

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2556
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	
อ.กตินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำเสีย
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกรณิกา ใจเขียว นางสาวขวัญใจ ตระกูลดี นายขวัญชัย พันทุกซ์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในคอลัมน์ตะกอนสารส้มหลังจากผ่านการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ชุดการทดลอง 3 ชุดคือ ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ลักษณะของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ สมบัติทางเคมีของดินตะกอนที่ใช้ในการทดลองและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสจากการสกัดแบบลำดับชั้น 6 ขั้นตอน ที่ระดับความลึก 0-5, 11-15, 26-30 ซม. รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่พบประกอบด้วยรูปที่ดูยึดติดแบบหลวมๆ รูปสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่แลกเปลี่ยนไอออนได้และรูปที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ในดิน โดยที่ทั้ง 2 รูปนี้ เป็นรูปที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช ขณะที่อีก 3 รูปจัดอยู่ในกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก ประกอบด้วย รูปที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียม รูปที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมและรูปที่ตกค้างในดิน ผลการศึกษา พบว่า น้ำหลังผ่านคอลัมน์ดินตะกอน ดินตะกอนผสมสารส้มมีค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สำหรับค่าซีโอดี และปริมาณออกซิฟอสเฟตลดลง และเมื่อนำดินตะกอนหลังจากการผ่านการบำบัดน้ำเสียมาวิเคราะห์พบว่า ค่าพีเอชของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม อยู่ในช่วงเป็นกลาง ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับปานกลาง และปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูง และผลการสกัดแบบลำดับชั้นเพื่อบ่งบอกรูปฟอร์มฟอสฟอรัส พบว่า รูปฟอร์มที่พบมากที่สุดที่ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มที่ระดับความลึก 0-5 ซม. คือรูปที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 6.79 mg-P/kg และ 7.01 mg-P/kg ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA ระหว่างดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม พบว่า รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากกับรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความลึก 11-15 ซม.ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

คำสำคัญ : ตะกอนสารส้ม รูปฟอร์มฟอสฟอรัส การสกัดแบบลำดับขั้น

Title	PHOSPHORUS FORMS IN ALUM SLUDGE COLUMN USED FOR WASTEWATER TREATMENT	
Students	Miss Kornika	Jaikiew
	Miss Kwanjai	Trakoondee
	Mr. Khwanchai	Phonthuk
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Asst. Prof. Pitsamai	Chairat-utai

ABSTRACT

This special project intends to study forms of phosphorus retained in alum sludge after treating wastewater. Three types of column were tested ; sand, alum sludge, and alum sludge spike with aluminum sulfate. The factor used in experiments were water characteristics before and after filtrated through the column, chemical property of alum sludge and forms of phosphorus at different depth 0–5,11–15, 26–30 centimeters. The samples were also sequential extraction into 6 forms of phosphorus (P) consisting of loosely-bound, exchangeable inorganic and organic P, microbial tissue P, iron and aluminum-bound P, calcium and magnesium-bound P and residual P. The results show that water after filtrated through alum sludge column had higher pH and conductivity, while COD and orthophosphate were reduced. Analysis result of the alum sludge and alum sludge spike with aluminum sulfate after filtration showed that pH were neutral, Cation exchange capacity were fair and organic matter were high . A major proportion of phosphorus retained in the used alum sludge and alum sludge spike with aluminum sulfate at 0-5 centimeters depth were in forms that are not easily decomposed, the P associated with iron and aluminum-bound P at 6.79 mg-P/kg and 7.01 mg-P/kg respectively. Analytical results using One-Way ANOVA found that the quantity of easily composed and not easily composed phosphorus at the depth of 11-15 cm are significantly different with 95% confidence level.

Keywords : Alum sludge, Phosphorus forms, Sequential extraction

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์

ขอขอบพระคุณ อ.กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ต่างๆในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่การประสานครุหลวง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้ความรู้ และอนุเคราะห์ตะกอนสารส้มสำหรับโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมี เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีตลอดมา

นางสาวกรณิกา ใจเขียว

นางสาวขวัญใจ ตระกูลดี

นายขวัญชัย พันทุกซ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ธาตุฟอสฟอรัสในดิน	4
2.1.1 กำเนิดของฟอสฟอรัสในดิน	4
2.1.2 วงจรฟอสฟอรัสในดิน	4
2.2 รูปของฟอสฟอรัสในดิน	5
2.2.1 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในดิน	5
2.2.2 ฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดิน	6
2.3 การเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสในดิน	7
2.4 การตรึงฟอสฟอรัสในดิน	9
2.4.1 ปฏิกริยาการตรึงฟอสเฟตในดิน	9
2.4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงฟอสฟอรัสในดิน	11
2.5 การสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	16
3.1.1 อุปกรณ์	16
3.1.2 สารเคมี	17
3.2 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	18
3.2.1 การเตรียมน้ำเสีย	18
3.2.2 การเติมน้ำเสียลงคอลัมน์	18
3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย	19
3.3 ศึกษาลักษณะทางเคมีของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารมัสส์	20
3.4 ดินที่ใช้ในการทดลอง	21
3.4.1 แหล่งที่มาของดิน	21
3.5 วิธีการทดลอง	22
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน	22
3.5.2 ลักษณะทางเคมีของดิน	22
3.5.3 การศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนด้วย วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)	22
3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	27
4.1 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์	27
4.2 สมบัติทางเคมีของดินตะกอนที่ใช้ในการทดลอง	29
4.3 ผลการสกัดแบบลำดับขั้น	31
4.3.1 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์	31
4.3.2 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ละลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประ โยชน์ต่อพืช	33
4.3.3 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก ก วิธีการดำเนินงาน	44
ภาคผนวก ข วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction)	59
ภาคผนวก ค ผลการทดลองลักษณะเคมีของดินและน้ำ	64
ภาคผนวก ง ผลการสกัดแบบลำดับขั้น	69
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คอลัมน์ 3 ชุดที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย	19
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย	19
ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลอง 3 ชุดที่ทำการศึกษา	21
ตารางที่ 3.4 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของดิน	22
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์	27
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางเคมีของดินก่อนและหลังผ่านน้ำเสีย	29

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรฟอสฟอรัสในดิน	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาสังเคราะห์กรดไฟติกจากสารไมโออินซิทอล	8
รูปที่ 2.3 การตรึงฟอสฟอรัสที่โครงสร้างของแร่ดินเหนียว	10
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน	20
รูปที่ 3.2 การแบ่งระดับความลึกของคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษา	21
รูปที่ 3.3 วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น	25
รูปที่ 4.1 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดแบบหลวมๆ ที่พบในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	32
รูปที่ 4.2 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็น ประโยชน์ต่อพืชที่พบในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	34
รูปที่ 4.3 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากที่พบ ในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม	36
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากและรูปฟอร์มฟอสฟอรัส ที่สลายตัวได้ง่ายหรือประโยชน์ต่อพืชที่พบในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสม สารส้ม	38

คำย่อและสัญลักษณ์

Abs.	ค่าการดูดกลืนแสง
cm	เซนติเมตร
df	องศาความเป็นอิสระ
g	กรัม
mg	มิลลิกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
meq/দিন 100 กรัม	มิลลิกรัมสมมูลต่อদিন 100 กรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
ms/cm	มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
N	จำนวนตัวอย่าง
N	นอร์มัล
nm	นาโนเมตร
OP	ออโรฟอสเฟต
S.D.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
sig.	ระดับนัยสำคัญ
°C	องศาเซลเซียส
μg	ไมโครกรัม
%	เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
*	ไม่มีผลการทดลอง
-	ต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่องมือสามารถวัดได้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยมีปัญหาการใช้พื้นที่ดินที่เกิดจากการทำเกษตรกรรม อย่างไม่ถูกวิธี และไม่เหมาะสมจนทำให้เกิดการพังทลายของหน้าดิน (Soil erosion) ซึ่งรวมทั้งการสูญเสียธาตุอาหารพืชและอินทรีย์วัตถุในดินด้วย โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับดินและการเจริญเติบโตของพืช ถ้าฟอสฟอรัสในดินมีน้อยจะทำให้ระบบรากพืชไม่เจริญเติบโต ใบจะแก่ ลำต้นแกร็นและไม่ผลิดอกออกผล จะพบได้กับดินที่มีระดับฟอสฟอรัสในดินต่ำหรือถูกตรึงโดยดินจนพืชนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ดินที่ใช้เพาะปลูกโดยทั่วไปมีฟอสฟอรัสอยู่ทั้งหมดประมาณ 0.03-0.22 % ฟอสฟอรัสในดินมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ จากข้อมูลการศึกษาดินบางพื้นที่ในประเทศไทยพบว่า มีประมาณ 65 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินที่อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (ประพิศ, 2536) และในสภาวะธรรมชาติปริมาณฟอสฟอรัสในดินจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุต้นกำเนิดดิน กระบวนการกำเนิดดินและวิวัฒนาการของดิน

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา จะต้องมีขั้นตอนการตกตะกอน (Clarification) เพื่อทำน้ำให้ใส โดยการเติมปูนขาว สารส้ม หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยในการรวมตะกอนและตกตะกอนของอนุภาคของแข็งในน้ำดิบ ลักษณะของดินตะกอนที่ตกลงมา จะมีสารเคมีบางส่วนปนอยู่และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ตะกอนสารส้ม (Alum sludge) ในประเทศไทยมีโรงผลิตน้ำประปาจำนวนมากนั้นหมายถึงจะเกิดของเสียที่เรียกว่าตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาที่จะต้องกำจัดจำนวนมากในปริมาณ 75,000-105,000 กิโลกรัมต่อวันหรือประมาณ 75-105 ตันต่อวัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความต้องการในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น (การประปานครหลวง, 2555) ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะถูกกำจัดโดยนำมาทิ้งที่บ่อกักตะกอน ปล่อยให้ตกตะกอนสะสมจนชั้นขึ้น แล้วจึงใช้เรือสูบน้ำมาที่บ่อดักตะกอน และลานตากตะกอนเพื่อให้ตากตะกอนให้แห้ง ปัญหาที่พบในปัจจุบันนี้คือ พื้นที่ในการจัดการกากตะกอนไม่เพียงพอ ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจ้างรถขุดดินเพื่อพลิกตะกอนให้แห้งเร็วขึ้น (การประปานครหลวง, 2548) รวมถึงการทำดินตะกอนให้แห้งอีกวิธีหนึ่งด้วยเครื่องอัดตะกอน (Filter press) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง (Koppers, 1989) จึงได้มีการนำเอาดินตะกอนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ผลการศึกษาพบว่า ตะกอนสารส้ม สามารถกำจัดไอออนฟอสเฟตในน้ำเสียได้ (ขนิษฐา และคณะ, 2555; อัจจิมา และคณะ, 2556) กระบวนการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปฏิกริยาการแทนที่ (ligand exchange) การ

ตกตะกอนร่วม (coprecipitation) รวมทั้งถูกกำจัดโดยการดูดติดที่ผิว (adsorption) กรดฮิวมิกและอนุภาคดินเหนียว (Yang *et al.*, 2006; Michel *et al.*, 1998)

โครงการวิจัยนี้ เป็นการนำตะกอนสารส้มมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อให้สิ่งสารละลายฟอสเฟตออกจากน้ำเสียและศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอน ดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction) เพื่อทราบรูปฟอร์มที่พืชสามารถดึงไปใช้ได้ เป็นแนวทางในการนำดินตะกอนสารส้มไปใช้ประโยชน์ทางการเพาะปลูกและเกษตรกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางเคมีของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ดินตะกอน ดินตะกอนผสมสารส้ม

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะทางเคมีของดินตะกอนก่อนและหลังผ่านน้ำเสียสังเคราะห์

1.2.3 เพื่อศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 คอลัมน์ดินตะกอนที่ใช้ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ความยาว 60 ซม. (วาดวัน และคณะ, 2556; อัจจิมา และคณะ, 2556) และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำอุระบายน้ำบริเวณหลังหอพักนักศึกษาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) นำมาเติมสารละลายฟอสเฟต และซูโครส เพื่อให้ได้ตัวอย่างน้ำเสียที่มีปริมาณฟอสเฟต 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีโอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำคอลลัมน์แบบเป็นครั้ง

1.3.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำที่ศึกษา ได้แก่ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี และปริมาณออกซิเจนฟอสเฟต

1.3.3 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ศึกษาประกอบด้วย รูปฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed Phosphorus), รูปฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยน ไอออน ได้ (Exchangeable Inorganic Phosphorus ;(EIP) และ Exchangeable Organic Phosphorus ;(EOP)), รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Organic microbial tissue phosphorus ;(Microbial P)), รูปฟอสฟอรัสที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Iron and aluminum bound phosphorus ;(Fe+Al

bound P)), รูปฟอสฟอรัสที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Calcium and magnesium bound phosphorus ;(Ca+Mg bound P)) และรูปฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual phosphorus ;(residual P))

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินตะกอนหลังการบำบัดน้ำเสียที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

1.4.2 สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสที่อาจปนเปื้อนออกมาจากน้ำทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้

1.4.3 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับตะกอนสารส้ม และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนสารส้ม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

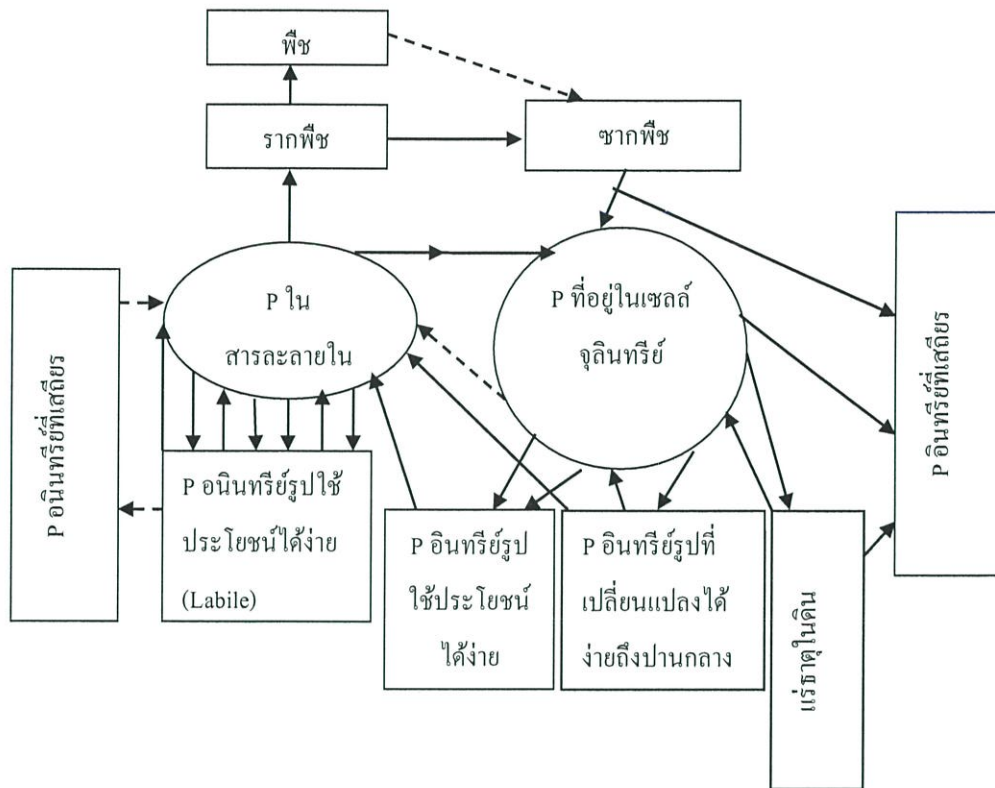
2.1 ธาตุฟอสฟอรัสในดิน

2.1.1 กำเนิดของฟอสฟอรัสในดิน

ธาตุฟอสฟอรัสถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสารอาหารหลัก (macronutrient) ที่จำเป็นต่อพืชและพืชต้องการในปริมาณค่อนข้างสูง ฟอสฟอรัสในดินได้มาจากแร่เอปทาไทต์ (apatite) ซึ่งเป็นแร่ประกอบหินมีสูตรทั่วไปคือ $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaX}_2$ ซึ่ง X อาจเป็น Cl^- , F^- , OH^- หรือ CO_3^{2-} มักพบในรูปแบบ Chloro-, flour-, hydroxyl- และ carbonate-apatite ฟอสฟอรัสที่พบจะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต หากดินมีสภาพเป็นกรดจะอยู่ในรูปอนุโมล H_2PO_4^- และในรูปของ HPO_4^{2-} และพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในดินเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทำให้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำหรือตกตะกอนทำให้พืชไม่สามารถดึงไปใช้ประโยชน์ได้

2.1.2 วงจรฟอสฟอรัสในดิน

วงจรของฟอสฟอรัสในดิน เน้นความสัมพันธ์ของดินพืชและจุลินทรีย์ โดยแบ่งฟอสฟอรัสออกมาเป็นส่วนๆ (pools) ขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มของฟอสฟอรัส ได้แก่ ฟอร์มที่พืชใช้ประโยชน์ได้ (labile inorganic P) ฟอร์มฟอสฟอรัสที่รวมตัวกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมื่อพืชดูดซึมฟอสฟอรัสมาใช้หรือถูกเปลี่ยนเป็นรูปสารอินทรีย์ในเซลล์ของจุลินทรีย์ (organic P) อนินทรีย์ ฟอสฟอรัสจะละลายออกมาเพิ่มเติมเพื่อรักษาสถานะสมดุล ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรฟอสฟอรัสในดิน (Stevenson, 1986; ปัทมา, 2543)

2.2 รูปของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในดินอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆซึ่งสามารถแบ่งได้ (ปัทมา , 2543) ดังนี้

2.2.1 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในดิน (inorganic phosphorus)

1. ฟอสฟอรัสในสารละลายดิน

ฟอสฟอรัสในสารละลายดินจัดได้ว่าเป็นฟอร์มที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันทีหรือละลายน้ำได้ดี ได้แก่ ไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^-) และโมโนไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) ที่อยู่ในสารละลายดินและเกลือฟอสเฟต ซึ่งจะแตกตัวให้อิออนทั้งสองนี้ได้ง่าย ฟอสเฟตไอออนที่อยู่ในสารละลายดินจะง่ายและรวดเร็วต่อการทำปฏิกิริยาดูดตรึงได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง โดยจะทำปฏิกิริยาคัดตะกอนกับเหล็กและอะลูมิเนียมในดินกรดและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการละลายน้ำยากขึ้นในดินด่าง ทำให้สูญเสียความเป็นประโยชน์ต่อพืชไปและการแตกตัวของฟอสเฟตจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดิน กรณีที่ดินมีค่าพีเอชเป็นกลาง จะพบไอออนทั้งสองนี้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่หากดินเป็นกรดอ่อนๆ (pH 6-8) จะพบไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^-) ในสัดส่วนที่สูงกว่า ส่วนในสารละลาย

ของดินต่าง (pH 6.8–7.2) จะพบโมโนไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) สูงกว่าอีกเช่นกัน (มุกดา, 2544)

2. ฟอสฟอรัสรูปที่ถูกดูดซับ (adsorbed P)

ฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับ คือ ไอออนฟอสเฟตที่ถูกนำออกมาจากสารละลายดิน โดยที่ผิวของคอลลอยด์นั้นจะถูกดูดซับ (adsorbed P) เมื่อเวลาผ่านไปจะเคลื่อนที่แทรกเข้าไปใน โครงสร้างส่วนที่เป็นของแข็งของคอลลอยด์ดิน เรียกกระบวนการนี้ว่า การยึดภายในโครงสร้างคอลลอยด์ดิน ปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัส ที่พื้นผิวหรือภายในโครงสร้างไม่สามารถระบุได้ง่าย จึงเรียกรวมกันว่า การดูดซับ (sorption) ปริมาณของฟอสฟอรัสรูปที่ถูกดูดซับในดินขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก (Sorn-srivichai, 1985; ปัทมา, 2544) คือ

1) ความสามารถที่ดินจะดูดซับฟอสฟอรัสความสามารถนี้ขึ้นกับส่วนประกอบของดินที่ทำหน้าที่ดูดซับฟอสฟอรัสได้ ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลักคือ ไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม (hydrated oxide of Fe and Al) ที่เป็นอนุพันธ์และเป็นผลึก แร่อลูมิเนียมซิลิเกตอนุพันธ์ และปริมาณแร่ธาตุ ต่างๆเหล่านี้ในดินจะเป็นตัวกำหนดการดูดซับฟอสฟอรัส

2) ปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่ใส่ลงในดิน สำหรับดินที่มีความสามารถในการดูดซับ ฟอสฟอรัสเท่าๆกัน เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตลงไปเป็นปริมาณมาก ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับจะมากขึ้น แต่การดูดซับดังกล่าวจะทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปไม่เป็นที่ประ โยชน์ต่อพืช และจะอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้อีกครั้งขึ้นอยู่กับสถานะในดิน

3. ฟอสฟอรัสรูปที่ตกตะกอน

ธาตุอลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียมฟอสเฟต เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของฟอสเฟตที่ตกตะกอนในดิน โดยฟอสเฟตจะยึดเกาะที่พื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต เหล็กหรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สารประกอบเหล่านี้สามารถแตกตัวละลายออกมาได้ถ้าฟอสเฟตไอออนในสารละลายของดินลดลงเพื่อรักษาสภาวะสมดุลทางเคมี แต่ในระยะเวลาต่อมาความเป็นประโยชน์ของสารประกอบฟอสเฟตเหล่านี้จะลดลงเนื่องจากสารประกอบดังกล่าวมีผลึกขนาดใหญ่ขึ้นความสามารถในการละลายของฟอสเฟตในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะน้อยลงและเมื่อเกิดการแทรกตัวของเหล็กและอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ระหว่างอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารประกอบฟอสเฟตเกิดการตกตะกอน ทำให้พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ยากขึ้น

2.2.2 ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (organic phosphorus)

สารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัสจะพบมากในดินชั้นบนที่มีการทับถมของเศษซากพืชหรือตะกอนที่ถูกพัดพามาของสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินได้แก่ อินซิทอลฟอสเฟต (inositol phosphates) ซึ่งพบประมาณร้อยละ 30–45 ของอินทรีย์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน กรดนิวคลีอิก (nucleic acids) ซึ่งพบโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 2 ของอินทรีย์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน

ฟอสโฟไลปิด (phospholipids) พบเป็นปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ของอินทรีย์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน และ อินทรีย์ฟอสฟอรัสอื่นๆ (unidentified organic phosphorus) ที่ไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นสารประกอบชนิดใดซึ่งพบเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 62 ของอินทรีย์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน (สมพร, 2556) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอินทรีย์นี้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง แต่ฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่ปรากฏอยู่ในดินนั้นมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากเกิดการสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีการย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์โดยจุลินทรีย์ในจะดินปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สู่ดินได้ 2 รูป คือ ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ มีโมเลกุลเล็กเหมาะต่อการดูดไปใช้ของรากพืช และรูปฟอสเฟตไอออนในสารละลายดิน (Anderson, 1980; มุกดา, 2544)

ปริมาณของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในจะดินแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและส่วนประกอบของดินที่ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์แตกต่างกัน พบฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินพรุ (peats) และดินป่าไม้ที่ยังไม่ถูกรบกวนในปริมาณที่สูง แต่ในดินเขตร้อนบางพื้นที่และดินทุ่งหญ้าแพรรีก็มีฟอสฟอรัสอินทรีย์อยู่มาก ส่วนในดินที่ทำการเกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ย มักมีฟอสฟอรัสอินทรีย์มากกว่าฟอสฟอรัสอินทรีย์ ปริมาณและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของฟอสฟอรัสอินทรีย์ ได้แก่ สารต้นกำเนิดดิน ภูมิอากาศ การระบายน้ำ การทำเกษตรกรรม ค่าพีเอช และความลึกของดิน

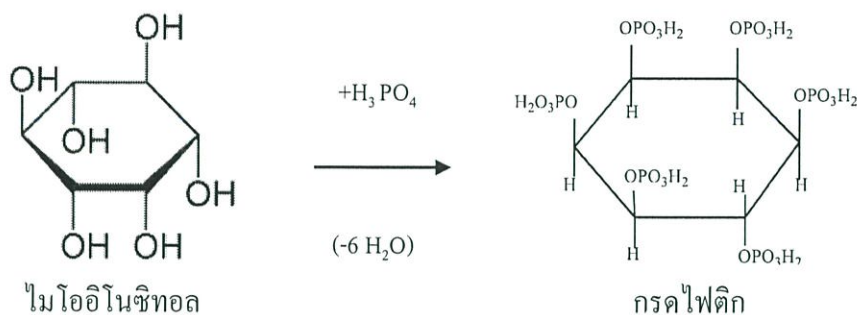
2.3 การเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสในดิน

การเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดินที่เกิดขึ้นได้หลายกระบวนการ (มุกดา, 2544) ดังนี้

1. กระบวนการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัส (mineralization) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปของอินทรีย์ฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่บริเวณรากพืช มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม (Harrison, 1982; มุกดา, 2544) และขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสในดินพืช พืชจะเร่งการดูดใช้ฟอสฟอรัสมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลในการเร่งให้เกิดกิจกรรมการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัสจากดิน (Barber, 1980; มุกดา, 2544) และในธรรมชาติของอินทรีย์ฟอสฟอรัสก็มีส่วนควบคุมการเปลี่ยนรูป โดยกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) จะเปลี่ยนรูปได้ง่ายที่สุด ส่วนไฟติน (phytin) จะเปลี่ยนรูปได้ยากที่สุด

กระบวนการเปลี่ยนรูปอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัส เกิดจากกระบวนการที่จุลินทรีย์หรือพืชผลิตเอนไซม์ออกมาทำการย่อยสลายอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของไฟติน (phytin) ไปอยู่ในรูปออร์โทฟอสเฟต โดยในสภาพดินทั่วไปจะมีจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยฟอสเฟตในรูปไฟเตต (phytate) ได้ เช่น *Bacillus megatarium*. และจุลินทรีย์ที่สร้างเอนไซม์ไฟเตส (phytase) จะสามารถย่อยไฟติก แล้วได้อินซิทอล ฟอสฟอรัส (inositol phosphorus) และฟอสเฟต ในปฏิกิริยา

สังเคราะห์กรดไฟติกจะแปรรูปไม ไออินซิทอล เปลี่ยนไฮดรอกซิลเป็นไดไฮโดรเจนอโรฟอสเฟต ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาสังเคราะห์กรดไฟติกจากสารไม ไออินซิทอล (มุกดา, 2544)

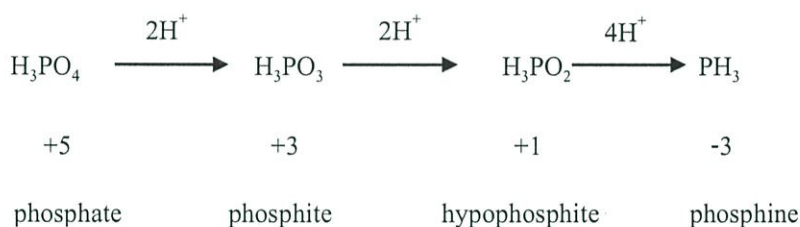
อย่างไรก็ตาม อินทรีย์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปไฟเตต (phytate) มักอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะอิสระจึงยากที่จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ไฟเตส (phytase) ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็นส่วนประกอบในกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์บางชนิด เช่นแบคทีเรียและราหลายชนิดที่สามารถผลิตเอนไซม์ฟอสฟาเทส (phosphatase) ออกมาย่อยนิวคลีโอโปรตีน (nucleoproteins) แล้วปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในรูปของฟอสเฟต เนื่องจากบางส่วนของสารประกอบนิวคลีโอโปรตีน (nucleoproteins) จะถูกเมื่อดินเหนียวดูดซับไว้ได้ง่ายมาก ในสภาวะเช่นนี้กระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟอสเฟตก็ลดลง ส่วนในสภาวะที่เป็นดินกรด สารประกอบไฟตินในสารละลายดินจะรวมตัวกับเหล็กและอลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบธาตุเหล็ก (iron) และอลูมิเนียม ไฟเตส (aluminum phytates) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จึงทนต่อการย่อยสลายได้ง่าย

2. กระบวนการดูดซับฟอสฟอรัส (immobilization of phosphorus) กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินสามารถที่จะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เพื่อเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่พืชดูดซับไปใช้ได้ และบางส่วนจุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ ปริมาณที่จุลินทรีย์จะดูดซับไปใช้นั้นน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์วัตถุหรืออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและฟอสฟอรัส เช่น ที่ช่วง 300:1 หรือมีฟอสฟอรัสต่ำ จะเกิดกระบวนการดึงฟอสฟอรัสจากดินไปใช้ในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์มากกว่าการย่อยสลายให้อินทรีย์ฟอสฟอรัส

3. กระบวนการละลายได้ของสารประกอบฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นอนินทรีย์สาร (solubility of inorganic phosphorus) อนินทรีย์ฟอสฟอรัสมักจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อยมาก สารประกอบที่พบก็มีตั้งแต่ประเภทที่ละลายน้ำได้บ้าง คือ โมโนไดแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งมีอยู่ในสารละลายดินในปริมาณที่น้อยมาก และพวกที่ละลายน้ำได้น้อยมาก คือ ฟลูอออแอปพาไทต์ (fluorapatite) และไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (hydroxyapatite) ในสภาวะที่ดินเป็นกรดจะพบอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่

รวมตัวเป็นสารประกอบของเหล็กและอลูมิเนียมส่วนในดินค้างจะพบในรูปสารประกอบของแคลเซียม จุลินทรีย์ในดินมีบทบาทในการทำให้อินทรีย์ฟอสฟอรัสละลาย โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั้นได้ทำให้เกิดกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์ กรดต่างๆเหล่านี้มีผลไปละลายอินทรีย์ฟอสฟอรัส โดยทำให้ฟอสฟอรัสละลายน้ำได้ง่ายขึ้นและอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน

4. กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันของสารประกอบอนินทรีย์ฟอสฟอรัส (oxidation and reduction of inorganic phosphorus) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สามารถเปลี่ยนเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ได้ตั้งแต่ -3 ถึง +5 โดยเป็นกิจกรรมของจุลินทรีย์บางชนิดที่เพิ่มออกซิเจนให้แก่ phosphite (HPO_3^{2-}) เป็น phosphate (HPO_4^{2-}) ดังสมการ



2.4 การตรึงฟอสฟอรัสในดิน

การตรึงฟอสฟอรัสในดิน เป็นกระบวนการที่เป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ง่ายทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุ ไอออน และสารประกอบต่างๆในดินแล้วกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากและมีประโยชน์ต่อพืชน้อยลง การตรึงฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวกับส่วนประกอบในดิน เช่น ค่าพีเอชของสารประกอบต่างๆในดิน และการเกิดปฏิกิริยาในดิน

2.4.1 ปฏิกิริยาการตรึงฟอสเฟตในดิน

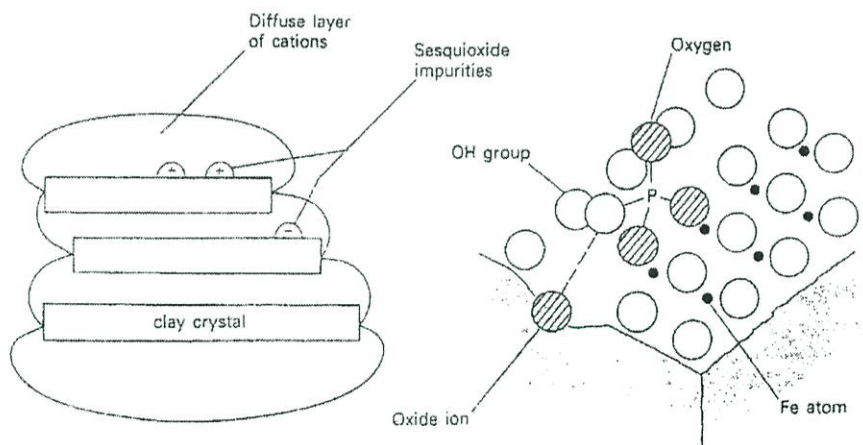
การตรึงฟอสเฟตในดินแบ่งชนิดของปฏิกิริยาได้ 3 ชนิดด้วยกัน (มุกดา, 2544) คือ

1. ปฏิกิริยาการดูดซับที่ผิว (adsorption reaction)

อนุภาคของดินที่มีขนาดเล็กอยู่ในสภาพคอลลอยด์ เช่น พวงแร่นิว อินทรีย์วัตถุและออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมจะมีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่ และไอออนฟอสเฟตก็มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถจะดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเป็นการดูดซับภายนอกด้วยแรงดึงดูดยึดติดกัน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' forces) ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตรวมอัดตัวอยู่รอบๆพื้นผิวของคอลลอยด์เท่านั้น โดยโครงสร้างของคอลลอยด์ไม่เปลี่ยนแปลง

2. การดูดซับด้วยพันธะทางเคมี (chemical adsorption)

ไอออนฟอสเฟตจับกับสารคอลลอยด์ด้วยพันธะเคมี หรือจับตัวกันด้วยแขนของไอออนบวกต่อไอออนลบทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นได้เพราะสารคอลลอยด์เหล่านี้มีไฮดรอกซิล (hydroxyl) และซิลิเกต (silicate) ซึ่งอาจหลุดออกไปเหลือแค่ตำแหน่งที่จะต้องทำให้สมดุลด้วยไอออนลบ ไอออนฟอสเฟตก็อาจเข้ามาอยู่ในตำแหน่งนี้ได้ จึงก่อให้เกิดการจับตัวด้วยพันธะเคมีสภาพของโครงสร้างและผลึกจะคงตัวเป็นรูปร่างที่คงที่ แต่เมื่อไอออนฟอสเฟตเข้ามาแทนที่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือซิลิเกต (silicate) ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่โดยรอบพื้นผิวของแร่ดินเหนียวจะเคลื่อนตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างผลึกต่อผลึกของแร่ดินเหนียวและไอออนฟอสเฟตบางไอออนจะเปลี่ยนจากสภาพที่ถูกดูดซับอยู่เป็นการเข้าแทนที่ไอออนลบของผลึก แล้วไอออนฟอสเฟตจะจับตัวกับแร่ดินเหนียวด้วยพันธะเคมี โครงสร้างของผลึก จะไม่คงที่เพราะไอออนฟอสเฟตกับไอออนที่ถูกแทนที่มีขนาดไม่เท่ากัน เป็นผลให้ผลึกของเคลย์ คอลลอยด์ (clay colloid) ที่มีไอออนฟอสเฟตอยู่ถูกจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้ได้โครงสร้างและรูปร่างผลึกที่คงที่ ไอออนฟอสเฟตจึงถูกจับติดแน่นเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวชนิดใหม่อย่างถาวร ดังนั้น ฟอสเฟตจึงถูกตรึงโดยที่ไม่มีโอกาสหลุดออกมาอยู่ในสารละลายดิน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การตรึงฟอสฟอรัสที่โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (white, 1983; มุกดา, 2544)

อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จึงเรียกจุลินทรีย์นี้ว่า phosphate-dissolving microorganism (ฉวีวรรณ และคณะ, 2535; มุกดา, 2544)

2.5 การสกัดแบบลำดับขั้น

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นการศึกษารูปฟอร์มและปริมาณของฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินซึ่งเป็นการใช้สารละลายที่สามารถสกัดฟอสฟอรัสแต่ละชั้นลำดับและปริมาณฟอสฟอรัสออกมาในแต่ละชั้นสามารถทำนายหรือบ่งชี้ได้ถึงศักยภาพในการเคลื่อนย้ายของฟอสฟอรัสลงสู่ดินและความสามารถที่พืชสามารถดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ได้ นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้เข้าใจถึงเคมีของดินที่สัมพันธ์กันระหว่างฟอสฟอรัสกับชนิดของดินมากยิ่งขึ้นด้วย

การสกัดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกงานวิจัยของ Babatunde และ Zhao (2009) ได้นำเสนอวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น 6 ชั้น มาใช้ศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินตามการใช้สารละลายสกัดที่มีความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ออกมาแต่ละส่วนสามารถทำนายรูปฟอร์มของฟอสฟอรัสที่อยู่ในชั้นดินในดินแต่ละประเภทได้ ดังนั้น การสกัดลำดับขั้นจึงมีความสำคัญในการศึกษาทางสิ่งแวดล้อม โดยมีวิธีการสกัดแบบลำดับ ดังนี้

ขั้นที่ 1 รูปฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ

ฟอสฟอรัสส่วนนี้เป็นรูปที่ละลายน้ำได้ อยู่ในสารละลายดินและเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ทันทีแก่พืช สารสกัดที่นิยมใช้จะเป็นสารในกลุ่มของเกลือของธาตุต่างๆ (neutral salt) และอิเล็กโตรไลต์ที่เป็นกลาง (neutral electrolytes) ฟอสฟอรัสในส่วนที่ละลายน้ำได้อาจเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวของดิน โดยเกลือจะจับฟอสฟอรัสแบบหลวมๆ (van Eck, 1982) โดยใช้ NH_4Cl หรือ KCl (Moore *et al.*, 1994) ในการสกัด เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ง่าย โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ KCl 1M ในการสกัด

ขั้นที่ 2 รูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้

ฟอสฟอรัสส่วนนี้จะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของดินเป็นส่วนที่ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆในสารละลายดิน งานวิจัยนี้ใช้สารละลาย NaHCO_3 0.5 M มาใช้ ซึ่งถูกคิดค้นมาเพื่อใช้กับดินด่างโดยเฉพาะ เพราะ HCO_3^- เข้าแทนที่ฟอสฟอรัส (P) ที่ถูกยึด (adsorbed) ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถช่วยลดการรบกวนจากไอออนแคลเซียมในสารละลายได้

ขั้นที่ 3 ฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน

ฟอสฟอรัสในส่วนนี้ได้จากฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ในดิน โดยเซลล์จุลินทรีย์จะยึดติดบริเวณที่ผิวของดิน โดยงานวิจัยใช้สารละลาย CH_3Cl และสารละลาย NaHCO_3 0.5 M

ขั้นที่ 4 ฟอสฟอรัสที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน

ฟอสฟอรัสส่วนนี้จะถูกยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมที่ผิวหน้าของดิน เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างมีโมเลกุลสลับซับซ้อนอยู่ในรูปที่มีโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยธาตุต่างๆที่จับกันแน่น และละลายน้ำได้ยาก งานวิจัยนี้ใช้สารละลาย NaOH 0.5 M เมื่อดินมีสภาพเป็นกรด ฟอสเฟตจะถูกตรึงโดยแคตไอออนกลุ่มหลักๆ ได้แก่ เหล็ก (Fe^{2+}) อลูมิเนียม (Al^{3+}) และไฮดรอกไซด์ (hydrrous-oxide) ของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส

ขั้นที่ 5 ฟอสฟอรัสที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน

ฟอสฟอรัสส่วนนี้จะถูกยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ผิวหน้าของดินเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างมีโมเลกุลสลับซับซ้อนอยู่ในรูปที่มีโมเลกุลใหญ่ประกอบด้วยธาตุต่างๆที่จับกันแน่น และละลายน้ำได้ยาก งานวิจัยนี้ใช้สารละลาย HCl 0.5 M เมื่อดินมีสภาพเป็นด่าง ฟอสฟอรัสในดินก็จะถูกตรึง ด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

ขั้นที่ 6 ฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual-P)

หลังจากที่สกัดฟอสฟอรัสบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งที่เหลือส่วนใหญ่ยังเป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งจะมีปริมาณฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยอยู่ในรูปของผลึกในส่วนนี้ใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงมากกว่าสารสกัดส่วนอื่นๆ ดังนั้นจึงนำส่วนที่เหลือจากส่วนที่ 5 มาเผาแล้วสกัดต่อด้วยกรด HCl 6 M

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sharpley และ Smith (1985) ได้ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ที่ระดับผิวดิน (0-150 mm) ในดินสภาพเป็นกลาง 3 ตัวอย่างและในดินสภาพด่าง 5 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดหรือความอุดมสมบูรณ์ของฟอสฟอรัสในดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพาะปลูกและใส่ปุ๋ย ตัวอย่างดินที่ใช้เป็นตัวแทนดินที่ใช้ในการทำเกษตรกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอยู่ระหว่าง 200-1,920 mg/kg (ประมาณ 50% ของฟอสฟอรัสอนินทรีย์) และมีการใส่เพิ่มเติม 0-90 kg/ha/yr รูป P ที่ได้จากการสกัด คือ รูปของฟอสฟอรัสอนินทรีย์ประกอบด้วย รูปที่ยึดติดแบบหลวมๆ โดยการสกัดด้วย NH_4Cl 1.0 M รูปไม่ยึดติดแน่นสกัดได้โดยใช้ NH_4F 0.05 M + NaOH 0.1 M รูปที่ยึดติดแน่นสกัดด้วย Citrate dithionite-bicarbonate + NH_4F 0.5 M + NaOH 0.1 M และรูปที่ยึดติดกับแคลเซียมสกัดด้วย HCl 1.0 M (พบในผิวดินที่เป็นด่างเท่านั้น) ส่วนอีกรูปคือ ฟอสฟอรัสอินทรีย์ประกอบด้วย รูปที่แลกเปลี่ยนได้ง่ายสกัดได้โดยใช้ $NaHCO_3$ 0.5 M รูปที่แลกเปลี่ยนได้ง่ายปานกลางสกัดด้วย H_2SO_4 1.0 M + NaOH 0.5

M ปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินสภาพเป็นกลาง มีค่าเท่ากับ 2%, 52% และ 46% ตามลำดับ ผลการศึกษา ยังพบอีกว่า การเพาะปลูกส่งผลให้ฟอสฟอรัสอินทรีย์ในลักษณะไม่ยึดติดแน่นเพิ่มขึ้นและลักษณะที่ยึดติดแน่นลดลง ส่วนในดินที่สภาพต่าง ปริมาณที่พบคือ 7%, 48%, 33% และ 12% ตามลำดับ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในเชิงปริมาณต่อการเพาะปลูก ปริมาณของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใช้และฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุและถูกตรึงให้อยู่ในรูปอินทรีย์ระหว่างการเตรียมดินเพาะปลูกนั้นมีความสัมพันธ์กับดัชนีการดูดซับฟอสฟอรัสในดิน การเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสจากอินทรีย์เป็นอนินทรีย์อาจแปรผกผันกับขนาดอนุภาคที่เกิดจากอินทรีย์วัตถุในดิน

Kathleen (1992) ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (SEDEX) เพื่อคัดแยกตะกอนที่มีฟอสฟอรัส 5 รูปฟอร์มด้วยกัน คือ 1) ฟอสฟอรัสอิสระ 2) ฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ 3) ฟอสฟอรัสที่จับกับไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต ในรูป authigenic carbonate fluorapatite + biogenic apatite + CaCO_3 -associated 4) ฟอสฟอรัสที่จับกับหินตะกอน และ 5) ฟอสฟอรัสที่จับกับสารอินทรีย์ จากการทดลอง พบว่า สามารถแยกฟอสฟอรัสได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์และกลุ่มฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับผลึกคาร์บอเนต ฟลูออราพาไทต์ (CFAP) ซึ่งหมายถึง การแยกผลึก CFAP จากผลึกหินตะกอนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปหรือเกิดจากกระบวนการที่มีความร้อนสูง

X.H. Zhao และ Y.Q. Zhao (2008) ได้ศึกษาการคายซับฟอสฟอรัสจากตะกอนสารส้มที่อิ่มตัวด้วยฟอสฟอรัส ซึ่งตะกอนสารส้มนี้ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำที่จำลองขึ้น ในการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับโดยใช้สาร 2 ชนิดคือ กรด (HCl , HNO_3 และ H_2SO_4) และเบส (NaOH และ KOH) ผลการทดลองพบว่าทั้งกรดและเบสสามารถสกัดฟอสฟอรัสได้โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H^+ หรือ OH^- เป็นหลัก ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดหรือเบสแต่อย่างใด เมื่อพิจารณาถึงด้านค่าใช้จ่าย และความปลอดภัยแล้ว กรด H_2SO_4 จะมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารสกัดที่ดีที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 10s UV-vis ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860 ประเทศเบลเยียม
3. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860 ประเทศเบลเยียม
4. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท SUNYO
5. เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker)
6. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AUX220 ประเทศญี่ปุ่น
7. ตู้อบ (Drying Oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น B-169
9. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ยี่ห้อ Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องดูดความชื้น (Desiccator) พร้อมสารดูดความชื้น
11. บล็อกฮีทเตอร์ (Block heater)
12. ตะแกรงร่อน ขนาด 10 เมช
13. กระจายกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ไมโครเมตร
14. แผ่นกรองรูพรุน (Syringe filter) ขนาด 0.45 ไมครอน
15. เซลล์พลาสติกชนิดที่มีด้านใส 2 ด้าน
16. ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง
17. เทอร์โมมิเตอร์
18. เครื่องแก้วและอุปกรณ์พลาสติกสำหรับห้องปฏิบัติการ

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต ($C_{12}H_{18}N_2H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
4. ไอรอน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Ajax Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4) \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
8. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
11. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein indicator) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. แอนติโมนีโพแทสเซียมพทาเทรต ($K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 1/2 H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Unilab ประเทศฟิลิปปินส์
15. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศสหรัฐอเมริกา
16. แอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
17. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4 (Anhydrous)) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
18. แอมโมเนียมอะซิเตต (CH_3COONH_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
19. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

20. แอมโมเนียมออกซาลेट ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
21. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
22. กรดบอริก (H_3BO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
23. ไฮโดรคลอริก (Conc.HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
24. อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
25. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น (Conc. H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
26. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
27. โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
28. คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
29. น้ำตาลทรายขาว ยี่ห้อ มิตรผล

3.2 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสีย

เก็บน้ำเสียจากคูระบายน้ำบริเวณหลังหอพักนักศึกษาศาสนาบันเทศโน โลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง (grab sampling) กำหนดจุดเก็บ 1 จุดที่พิกัด 13.729967 °N 100.773565 °E โดยเก็บครั้งละ 20 ลิตร ทำการเติมสารละลายฟอสเฟต และสารละลายซูโครส เพื่อให้ น้ำเสียมีความเข้มข้นฟอสเฟต 25 mg/L และซีไอดี 300 mg/L สำหรับใช้ในการทดลอง

3.2.2 การเติมน้ำเสียลงคอลัมน์

สำหรับคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นคอลัมน์ที่ใช้ในการกำจัดไอออนฟอสเฟตในน้ำเสีย ชุมชนทำการเติมน้ำเสียผ่านคอลัมน์เป็นระยะเวลา 71 วัน โดยวาดวัน อัจจิมาและคณะ, 2556 และทางกลุ่มของผู้วิจัยได้นำคอลัมน์ดังกล่าวมาทำการทดลองต่อ โดยคอลัมน์ที่ 1 คือ คอลัมน์ทราย คอลัมน์ที่ 2 และ 3 คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม จะเติมน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟต ทุกๆวัน เป็นระยะเวลา 66 วัน จากนั้นเก็บน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชุดคอลัมน์ 3 ชุดที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย

ชุดการทดลอง		รายละเอียด
1	คอลัมน์ทราย	เติมน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟตทุกวัน
2	คอลัมน์ดินตะกอน	เติมน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟตทุกวัน
3	คอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม	เติมน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟตทุกวัน

3.2.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสีย

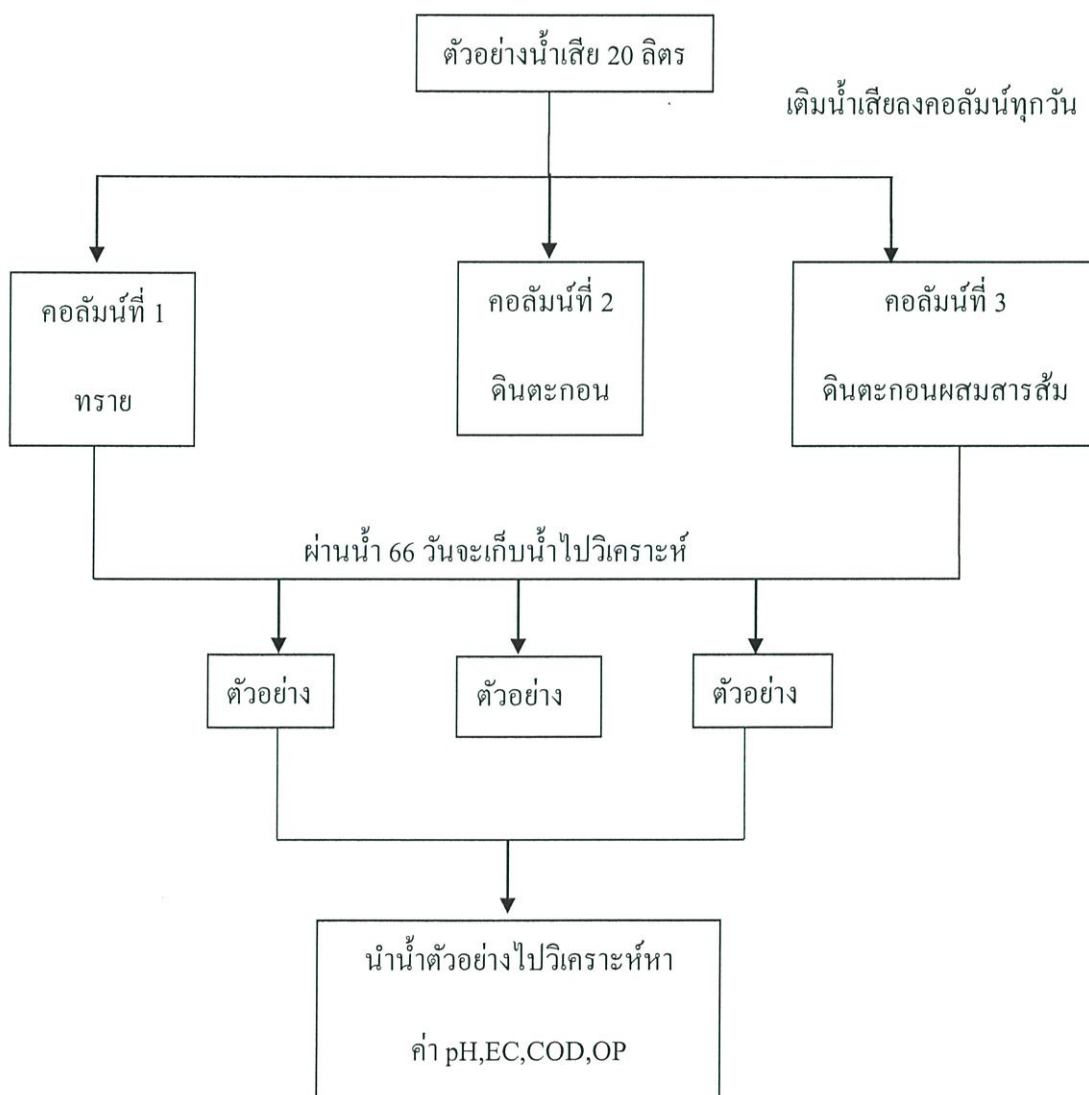
น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ถึงสมบัติบางประการ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำการทดลองและเพื่อใช้ในการศึกษาปริมาณ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พีเอช (Potential of Hydrogen ion)	เครื่องวัดพีเอช
2. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า
3. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	รีฟลักซ์แบบปิดและไทเทรต (5220 C;AWWA, 2012)
4. ปริมาณออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate)	เทียบสีกับกรดแอสคอบิกหาปริมาณด้วยเครื่อง UV(AWWA, 2012)

3.3 ศึกษาลักษณะทางเคมีของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ในการทดลองจะปล่อยน้ำเสียเข้าคอลัมน์แบบเป็นครั้ง (batch) หลังจากการผ่านน้ำทุกๆวัน เป็นเวลารวม 66 วัน จากนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนเข้า และออกจากคอลัมน์ เพื่อนำไปวัดพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี และปริมาณออกซิเจนละลาย เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 3.1 แสดงวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงาน

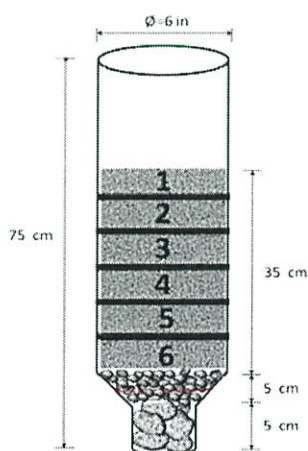
3.4 ดินที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 แหล่งที่มาของดิน

การทดลองนี้เพื่อศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม จึงได้นำโคลัมน์ที่ผ่านการเติมน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟต คือโคลัมน์ที่ 1 โคลัมน์ทราย โคลัมน์ที่ 2 โคลัมน์ดินตะกอน และโคลัมน์ที่ 3 โคลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม นำดินนี้มาใช้ในการศึกษา ดังตารางที่ 3.3 โดยแบ่งชุดดินในการศึกษา ทำการผ่าแบ่งโคลัมน์ออกเป็น 6 ส่วนในแนวตั้ง ทำการเก็บดินแต่ละส่วนด้วยความลึกห่างกัน 5 ซม. เลือกส่วนที่ 1, 3 และ 6 ที่ระดับความลึก 0-5, 11-15 และ 26-30 ซม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.2 เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะของดินและนำมาทำการสกัดแบบลำดับขั้นเพื่อวิเคราะห์รูปฟอร์มฟอสฟอรัส

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลอง 3 ชุดที่ทำการศึกษา

ชุดการทดลอง		รายละเอียด
1	ทราย	โคลัมน์ทรายที่ผ่านน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟต
2	ดินตะกอน	โคลัมน์ดินตะกอนที่ผ่านน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟต
3	ดินตะกอนผสมสารส้ม	โคลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มที่ผ่านน้ำเสียที่ผสมสารละลายฟอสเฟต



ส่วนโคลัมน์	ระดับความลึก (ซม.)	ทำการศึกษา
1	0 - 5	✓
2	6 - 10	
3	11 - 15	✓
4	16 - 20	
5	21 - 25	
6	26 - 30	✓

รูปที่ 3.2 การแบ่งระดับความลึกของโคลัมน์ที่ใช้ในการศึกษา

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน

นำดินเกลี่ยให้กระจายทั่วทั้งภาชนะที่รองพลาสติกไว้และนำมาตากจนแห้ง จากนั้นสุ่มตัวอย่างดินทั้ง 3 ชุด นำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการทดลอง

3.5.2 ลักษณะทางเคมีของดิน

ลักษณะทางเคมีของดินที่จะทำการตรวจวิเคราะห์ คือ ความชื้น พีเอช ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของดิน

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
1. ความชื้น (%)	กราวิเมตริก
2. พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
3. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน	Ammonium saturation method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
4. ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	Walkley and Black Method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

3.5.3 การศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction) (Babatunde *et al.*, 2009) ดังรูปที่ 3.3

ขั้นที่ 1 ฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)

- 1) นำตัวอย่างดินมา 0.25 กรัม เติม KCl 1 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชม. แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ขั้นที่ 2 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (Exchangeable Inorganic Phosphorus ;(EIP) และ Exchangeable Organic Phosphorus ;(EOP))

- 1) นำตัวอย่างดินมา 2.5 กรัม เติม NaHCO_3 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ขั้นที่ 3 ฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P)

- 1) นำตัวอย่างดินมา 2.5 กรัม เติม CHCl_3 2 มิลลิลิตร และ NaHCO_3 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
- 6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 4 ฟอสฟอรัสที่ติดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Fe + Al bound P)

- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติม NaOH 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 17 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
- 6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 5 ฟอสฟอรัสที่ติดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)

- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่4 มาเติม HCl 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

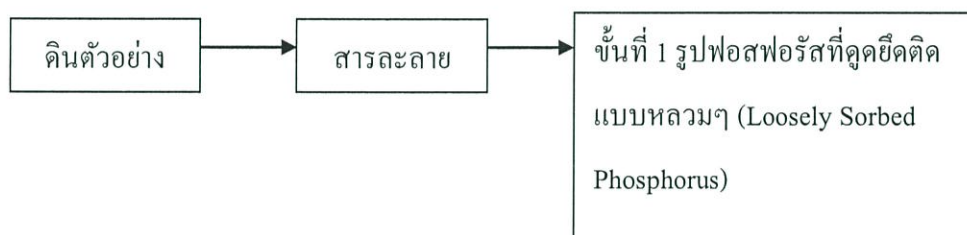
6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 6 ฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)

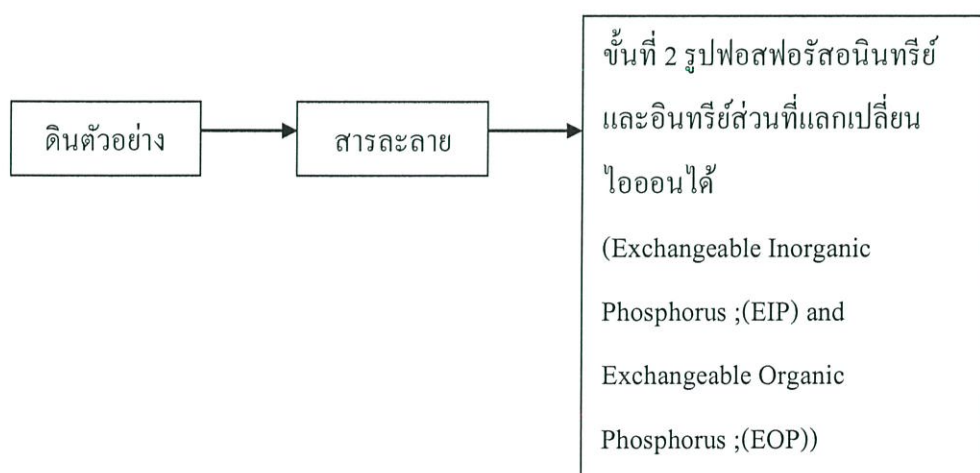
- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่ 5 มาเผาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เติม 6 M HCl 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแมนซ์ โดยใช้สโปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

3.5.3 การศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction) (Babatunde *et al.*, 2009) ดังรูปที่ 3.3 (ต่อ)

KCl 1 M 50 ml , เขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง 2 ชม.

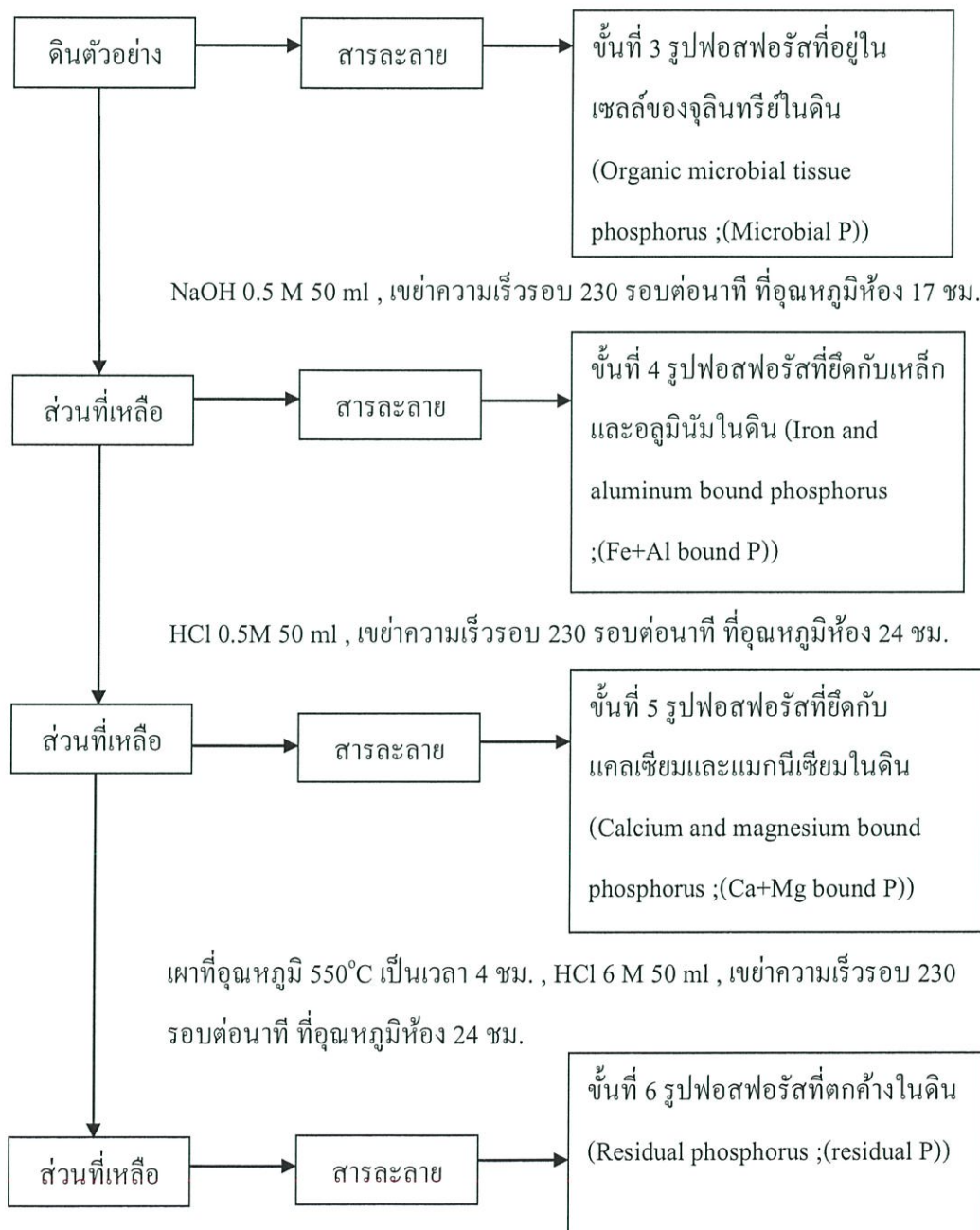


NaHCO₃ 0.5 M 50 ml , เขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง 16 ชม.



3.5.3 การศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction) (Babatunde *et al.*, 2009) ดังรูปที่ 3.3 (ต่อ)

CHCl_3 , 2 ml , เติม NaHCO_3 0.5 M 50 ml , เวลาความเร็วยรอบ 230 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิห้อง 16 ชม.



รูปที่ 3.3 วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงผลในรูปค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ความแตกต่างของตัวอย่างดินตะกอนกับดินตะกอนผสมสารส้ม จะวิเคราะห์ด้วย ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม SPSS v. 20.00

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ โดยคอลัมน์ดินที่ใช้ประกอบด้วยคอลัมน์ทราย คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งวาดวัน อัจจิมา และคณะ(2556) ทำการผ่านน้ำเสียมาเป็นเวลา 71 วัน ผู้วิจัยนำคอลัมน์ทั้งหมด มาเติมน้ำเสีย ทุกๆวันเป็นเวลา 66 วัน หลังจากนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนเข้าและออกจากคอลัมน์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำ หลังจากนั้นจะปล่อยให้คอลัมน์ทั้ง 3 แห่ง เพื่อนำดินออกจากคอลัมน์ จากนั้นจะทำการสูมตัวอย่างดินในแต่ละช่วงความลึก ได้แก่ ที่ 0-5 ,11-15 และ26-30 เซนติเมตร และนำดินมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอนด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

4.1 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์

ลักษณะทางเคมีของน้ำที่ศึกษาได้แก่ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี และปริมาณอโรฟอสเฟต ผลดังตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์

พารามิเตอร์	น้ำก่อนผ่าน คอลัมน์	น้ำหลังผ่านคอลัมน์		
		ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสม สารส้ม
พีเอช	7.30 ± 0.02	8.05 ± 0.02	8.32 ± 0.03	8.33 ± 0.01
ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)	0.71 ± 0.05	1.45 ± 0.04	0.84 ± 0.01	0.84 ± 0.01
ซีโอดี (mgO ₂ /L)	138.67 ± 9.24	122.67 ± 18.48	106.67 ± 18.48	58.67 ± 48.88
ปริมาณอโร ฟอสเฟต (mg/L)	8.336 ± 0.31	1.355 ± 0.02	0.017 ± 0.00	0.005 ± 0.00

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชพบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดในแต่ละคอลัมน์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น จาก 7.30 เป็น 8.05, 8.32 และ 8.33 ตามลำดับ ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากตะกอนสารส้มซึ่งอยู่ในคอลัมน์จะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ออกมา ทำให้ค่าพีเอชน้ำหลังผ่านคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับค่าการนำไฟฟ้า น้ำหลังผ่านทรายจะมีค่าสูงกว่าคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม โดยมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.71 mS/cm เป็น 1.45, 0.84 และ 0.84 mS/cm ตามลำดับ เนื่องจากการเติมน้ำเสียลงไป น้ำจะไปชะไอออนต่างๆในดินตะกอนออกมา ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต (อัจจิมา และคณะ, 2556) โดยคอลัมน์ทรายน้ำไหลผ่านได้ดี ทำให้ปริมาณ ไอออนต่างๆถูกชะออกมามากกว่าคอลัมน์อื่นๆ

ปริมาณซีโอดีหลังผ่านการกำจัดในคอลัมน์มีค่าลดลง จาก 138.67 mgO_2/L เป็น 122.67, 106.67 และ 58.67 mgO_2/L ตามลำดับ จะสังเกตว่าปริมาณซีโอดีของคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มน้อยกว่าคอลัมน์ทราย อาจเกิดจากการผ่านน้ำเสียเข้าคอลัมน์แต่ละครั้งมีโอกาที่สารอินทรีย์จะสะสมอยู่ในคอลัมน์ ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำผ่านเข้าไปในคอลัมน์ หากมีระยะเวลาที่มากพอ จึงมีโอกาสเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Yang *et al.*, 2011) ซึ่งจากการทดลองพบว่าระยะเวลาสัมผัสของคอลัมน์ทรายสั้นกว่าระยะเวลาสัมผัสของคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งอาจไม่มากพอที่จะทำให้เกิดกิจกรรมทางชีวภาพ ทำให้ปริมาณซีโอดีของคอลัมน์ทรายหลังผ่านคอลัมน์มากกว่าคอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม

ปริมาณของฟอสเฟตในน้ำเสียก่อนผ่านคอลัมน์พบปริมาณฟอสเฟตเท่ากับ 8.336 mg/L ซึ่งหลังผ่านการบำบัดพบว่า ปริมาณฟอสเฟตในคอลัมน์ทรายเท่ากับ 1.355 mg/L ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มมีค่าเท่ากับ 0.017, 0.005 mg/L ตามลำดับ โดยที่ในคอลัมน์ทรายน้ำจะไหลผ่านได้เร็ว ทำให้อาจมีการจับตัวของฟอสฟอรัสแบบหลวมๆ ในขณะที่คอลัมน์ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม พบว่าไอออนฟอสเฟต นอกจากจะถูกจับอยู่ที่อนุภาคของดินแล้ว ยังอาจจะจับกับตะกอนสารส้มซึ่งอยู่ในคอลัมน์อย่างแข็งแรงหรืออาจจะฟอร์มตัวอยู่ในรูปต่างๆภายในคอลัมน์ (อัจจิมา และคณะ, 2556)

4.2 สมบัติทางเคมีของดินตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียภายในคอลัมน์ ได้นำมาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางเคมีของดินก่อนและหลังผ่านน้ำเสีย

ลักษณะทางเคมีของดิน	ทราย		ดินตะกอน		ดินตะกอนผสม สารส้ม	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1. ความชื้น (%)	0.0446 ± 0.01		0.0507 ± 0.01		0.0653 ± 0.01	
2. ค่าพีเอช ดิน:น้ำ (1:5)	9.13 ± 0.04	8.62 ± 0.37	6.74 ± 0.03	6.98 ± 0.05	6.72 ± 0.05	6.87 ± 0.17
3. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุ บวก (meq /100 g -soil) หรือ CEC	0.63 ± 0.00	0.98 ± 0.12	14.22 ± 0.12	17.16 ± 0.12	17.73 ± 0.12	19.27 ± 0.12
4. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%)	0.18 ± 0.00	0.36 ± 0.00	2.00 ± 0.03	2.48 ± 0.02	2.29 ± 0.03	2.60 ± 0.00
5. ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	0.31 ± 0.00	0.62 ± 0.00	3.44 ± 0.05	4.27 ± 0.04	3.96 ± 0.06	4.49 ± 0.00

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของดินก่อนและหลังผ่านน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้ คือ

1. พีเอชของดิน ทั้ง 3 ชุดการทดลองทั้งก่อนและหลัง โดยอัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:5 พบว่า ทรายเท่ากับ 9.13 ± 0.04 , 8.62 ± 0.37 อยู่ในระดับต่างจัดมาก ต่างจัด ดินตะกอนเท่ากับ 6.74 ± 0.03 , 6.98 ± 0.05 อยู่ในระดับกลางทั้งก่อนและหลัง และดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 6.72 ± 0.05 , 6.87 ± 0.17 อยู่ในระดับกลางทั้งก่อนและหลัง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) การที่พีเอชของทรายหลังผ่านน้ำเสียลดลง เกิดจากไอออนที่มีความเป็นเบสหรือแร่ธาตุที่ดูดติดที่ผิวหุดูดออก ซึ่งสอดคล้องกับพีเอชน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับพีเอชของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากไอออนซัลเฟต คลอไรด์ ถูกชะละลายออกมา (ผลการทดลองของอัจจิมาและคณะ, 2556)

2. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินทั้ง 3 ชุดการทดลองทั้งก่อนและหลัง พบว่า ทรายเท่ากับ 0.63 ± 0.00 , 0.98 ± 0.12 meq/100 g-soil อยู่ในระดับต่ำมากทั้งก่อนและหลัง ดินตะกอนเท่ากับ 14.22 ± 0.12 , 17.16 ± 0.1 meq/100 g-soil อยู่ในระดับต่ำ ปานกลาง และดิน

ตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 17.73 ± 0.12 , 19.27 ± 0.12 meq/100 g-soil อยู่ในระดับปานกลางทั้งก่อนและหลัง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) การที่คอลลิม์ทรายมีค่า CEC น้อยกว่าคอลลิม์ดินตะกอนเนื่องจากทรายเป็นพวก SiO_2 โครงสร้างผนังกร่างตาข่าย ทำให้โครงสร้างเสถียร ไม่ค่อยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายใดๆ แต่ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะว่าทรายมีดินหรือสิ่งปนเปื้อนอยู่บ้าง ดินตะกอนผสมสารส้มจะมีค่า CEC สูงมากกว่าดินตะกอน เนื่องจากที่ผิวของอนุภาคดินจะดูดซับไอออนต่างๆ ไว้ (นิวัติ, 2557) การที่เติมอลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ลงไปทำให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้น ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจึงสูงกว่าดินตะกอน

3. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ซึ่งวัดจากร้อยละของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ทั้ง 3 ชุดการทดลองทั้งก่อนและหลัง พบว่า ทรายเท่ากับ 0.31 ± 0.00 , 0.62 ± 0.00 อยู่ในระดับอินทรีย์วัตถุต่ำมาก , ต่ำ ดินตะกอนเท่ากับ 3.44 ± 0.05 , 4.27 ± 0.04 อยู่ในระดับอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง , สูง และดินตะกอนผสมสารส้มเท่ากับ 3.96 ± 0.06 , 4.49 ± 0.00 อยู่ในระดับอินทรีย์วัตถุสูงทั้งก่อนและหลัง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียที่ถูกเติมเข้าคอลลิม์ทุกๆวัน ซึ่งอินทรีย์คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบางส่วนมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนผิวหน้าดิน อาจจะเป็นจุลินทรีย์ที่มีชีวิตหรือที่ตายแล้วรวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ขึ้นและจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียที่ได้ถูกดูดซับเข้าไปอยู่ในดิน ขณะที่คอลลิม์ทรายนั้นระยะเวลาสัมผัสของคอลลิม์ทรายนั้นกว่าระยะเวลาสัมผัสของดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งอาจไม่มากพอที่จะทำให้เกิดกิจกรรมทางชีวภาพ ทำให้อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุต่ำกว่าคอลลิม์อื่นๆ

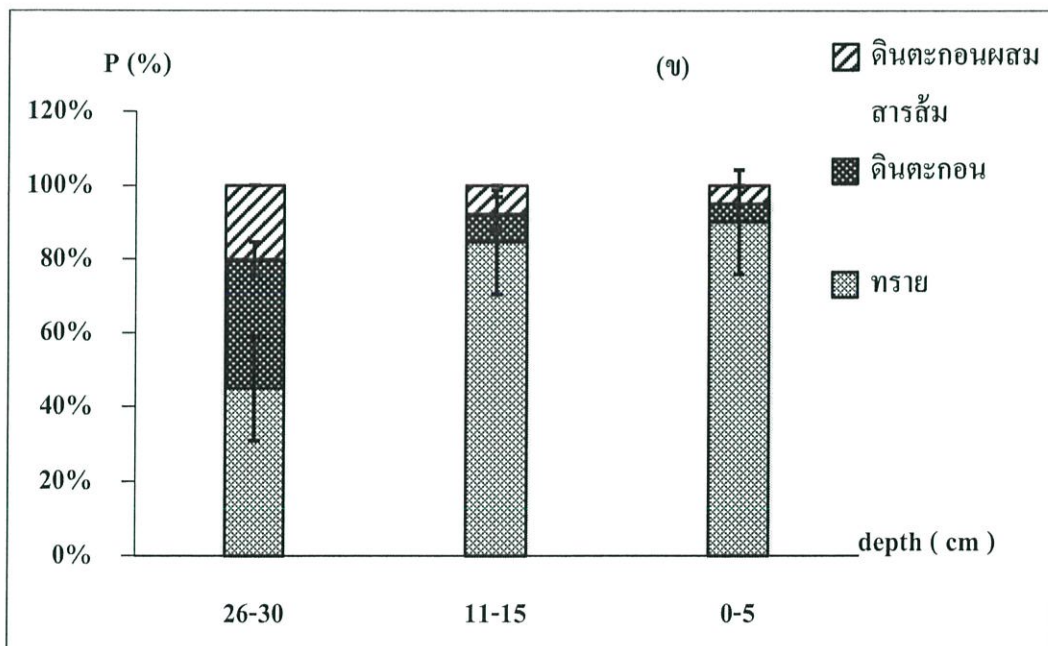
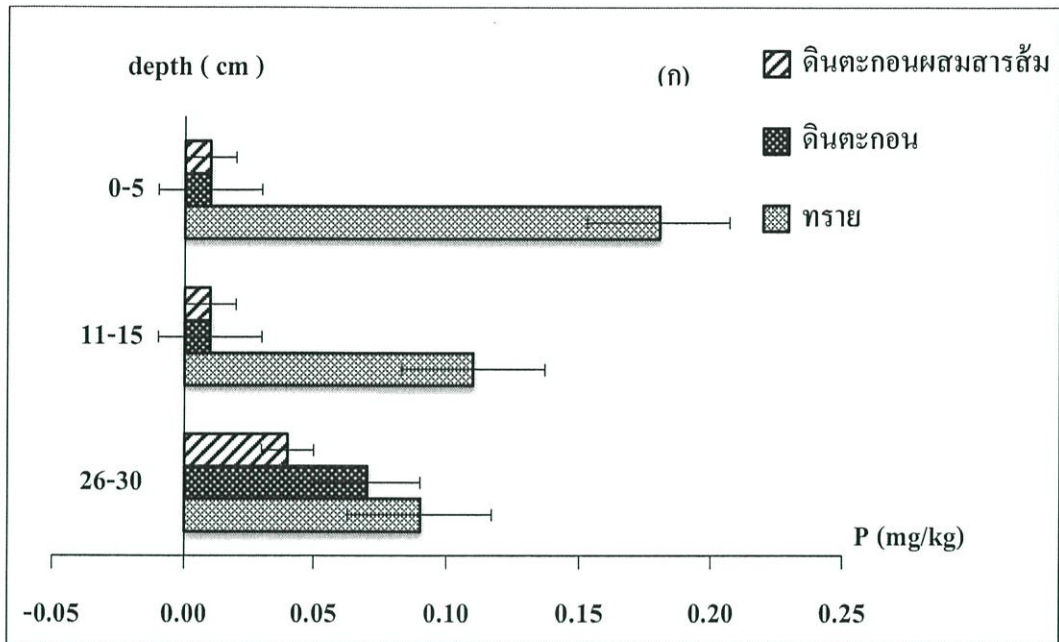
4.3 ผลการสกัดแบบลำดับขั้น

ในการทำการวิเคราะห์รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น จะแบ่งวิธีการสกัดออกเป็น 6 ลำดับขั้นตอน ดังนี้ คือ

- ขั้นที่ 1 รูปฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)
- ขั้นที่ 2 รูปฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (EIP , EOP)
- ขั้นที่ 3 รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P)
- ขั้นที่ 4 รูปฟอสฟอรัสที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Fe + Al bound P)
- ขั้นที่ 5 รูปฟอสฟอรัสที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)
- ขั้นที่ 6 รูปฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)

4.3.1 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย KCl (KCl extractable)

ผลการสกัดฟอสฟอรัสด้วย KCl 1 M ในดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มพบน้อยมาก โดยทรายมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ เท่ากับ 0.18, 0.11, 0.09 mg-P/kg ที่ระดับความลึกตามลำดับ ดินตะกอน 0.07, 0.01, 0.01 mg-P/kg และดินตะกอนผสมสารส้ม 0.04, 0.01, 0.01mg-P/kg อาจเกิดจากขนาดของอนุภาคทรายและปริมาณอินทรีย์วัตถุรวมทั้งธาตุอื่นๆ ที่สะสมในดิน ทรายน้อยกว่าดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม ฟอสฟอรัสที่ยึดติดที่ผิวจึงหลุดออกได้ง่าย จึงทำให้พบรูปฟอร์มนี้ในดินทรายสูงกว่าดินอื่นๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA พบว่า ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความลึก 0-5,11-15 และ 26-30 ซม. มีปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดที่ผิวแบบหลวมๆแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความลึก 0-5,11-15 ขณะที่ความลึก 26-30 ซม. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ภาคผนวก จ)

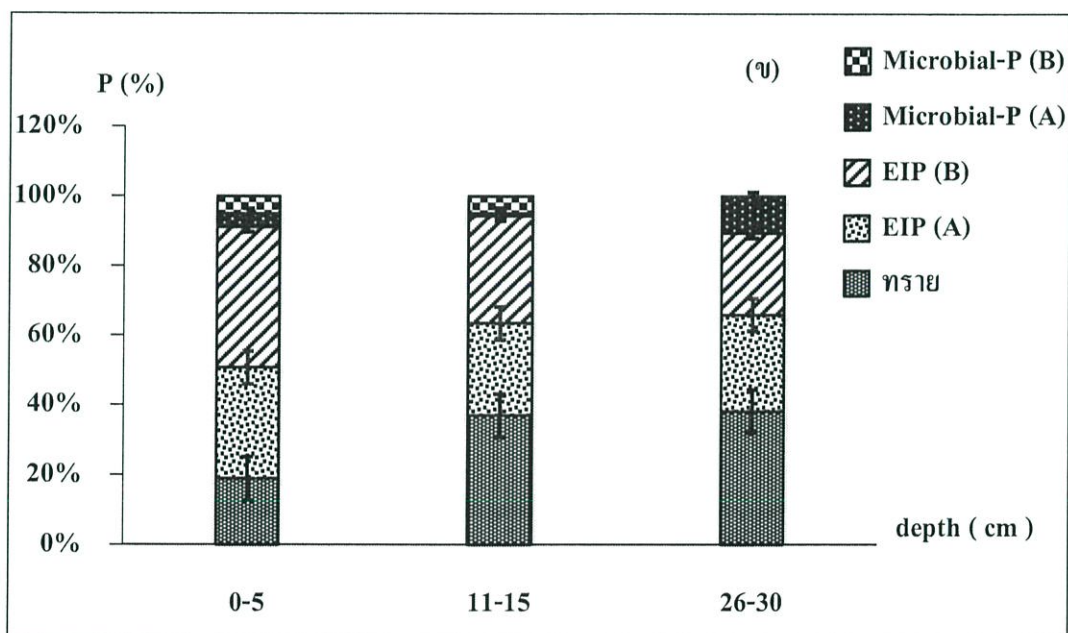
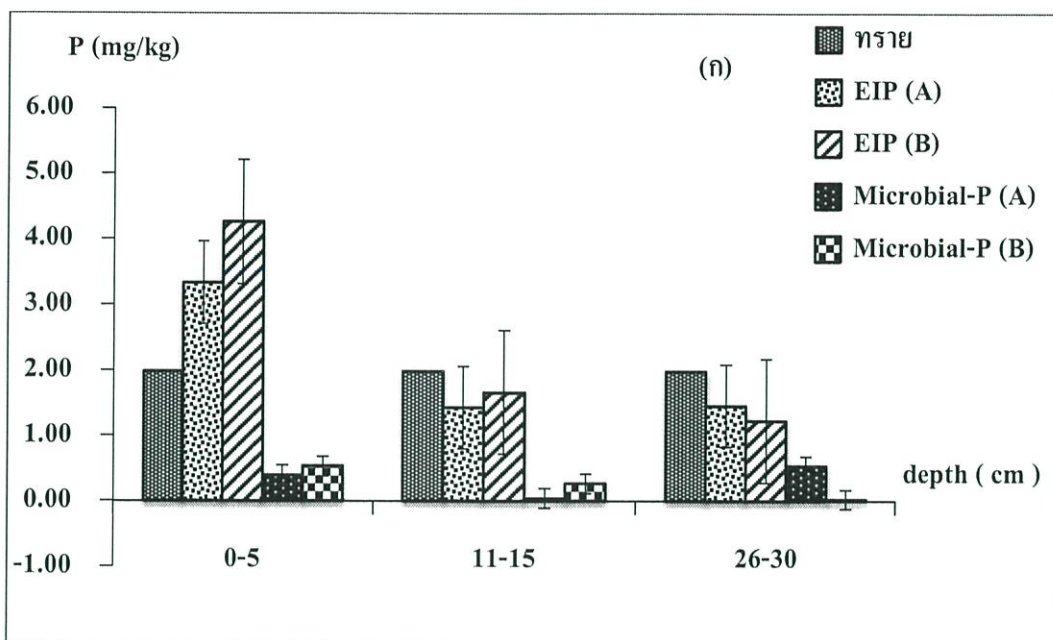


รูปที่ 4.1 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดแบบหลวมๆ ที่พบในทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม (ภาคผนวก ง)

4.3.2 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช (Phosphorus forms that are readily cycled or available to plants)

จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงให้เห็นถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชที่ความลึกต่างๆ กลุ่มนี้ประกอบด้วยฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (EIP) และฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Microbial P) จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ EIP (B) ส่วนใหญ่สูงสุดที่พื้นผิวนวดของดินตะกอนผสมสารส้ม รองลงมาคือดินตะกอน EIP (A) และปริมาณของ EIP จะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณของ EIP (B) จะลดลง 4.26-1.22 mg-P/kg ที่ช่วงความลึก 0-5 และ 26-30 ซม. ตามลำดับ ส่วนปริมาณของ EIP (A) จะลดลง 3.33-1.43 mg-P/kg ที่ช่วงความลึก 0-5 และ 11-15 ซม. ตามลำดับ ส่วนฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Microbial P) จะพบน้อยมากเนื่องจากจุลินทรีย์ในน้ำเสียที่เติมเข้าสู่คอลัมน์ จะเกิดการจับตัวเป็นเมือกบางๆ ในชั้นผิวด้านบน เมื่อเกิดการชะจะทำให้จุลินทรีย์หลุดออกไปกับน้ำ

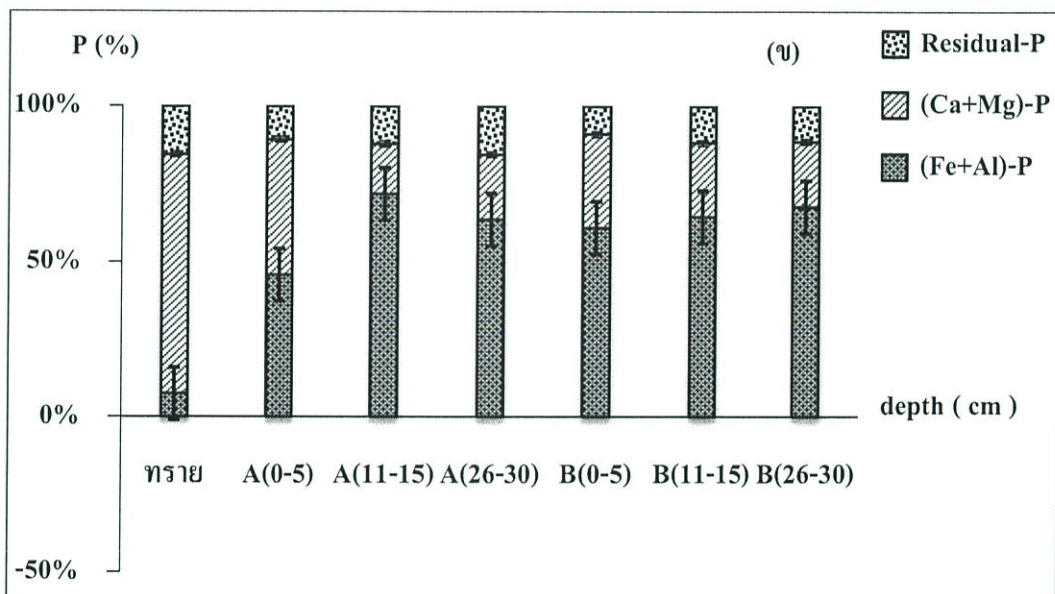
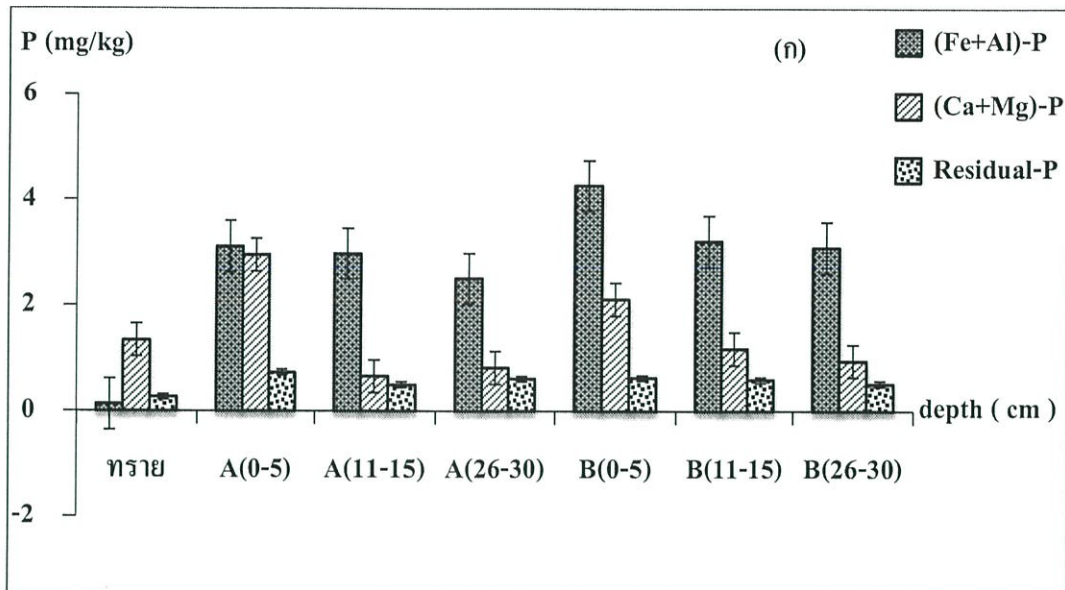
จากรูปที่ 4.2 (ข) แสดงให้เห็นถึงสัดส่วน(%) EIP (B) ที่สูง เนื่องจากอนุภาคของดินตะกอนผสมสารส้มมีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อเติมน้ำเสียลงสู่คอลัมน์ ไอออนฟอสเฟตสามารถเข้าไปแทนที่ไอออนต่างๆด้วยปฏิกิริยาแทนที่ และตกตะกอน เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA พบว่า ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความลึก 0-5, 11-15 และ 26-30 ซม. มีปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความลึก 11-15 ขณะที่ความลึก 0-5, 26-30 ซม. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.2 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชที่พบในทราย ดินตะกอน (A) และดินตะกอนผสมสารส้ม (B) (ภาคผนวก ง)

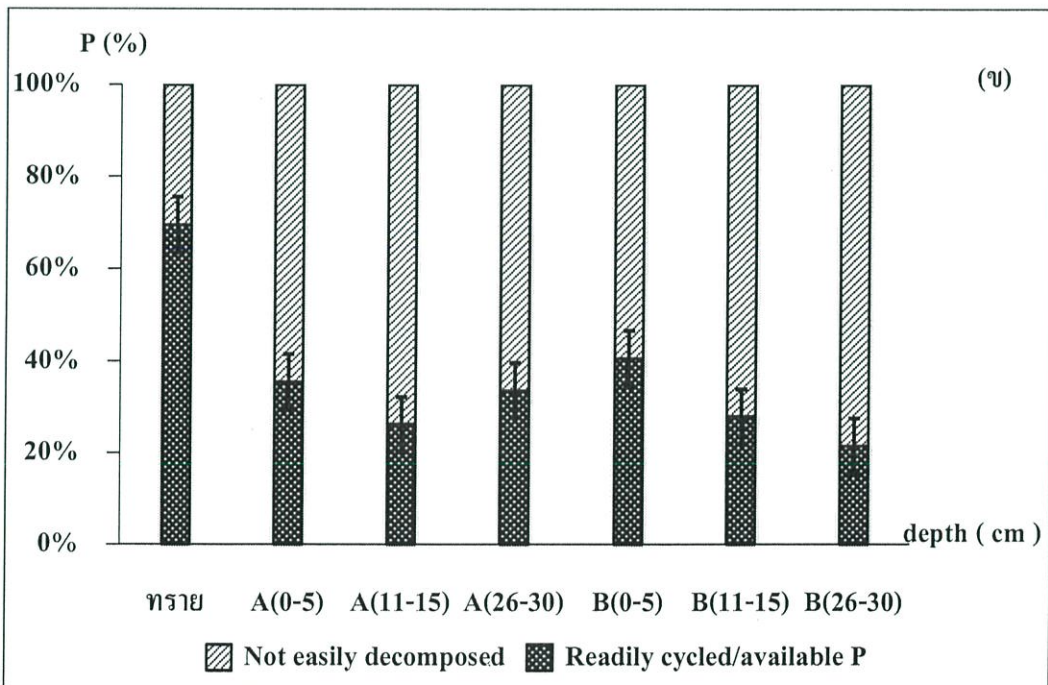
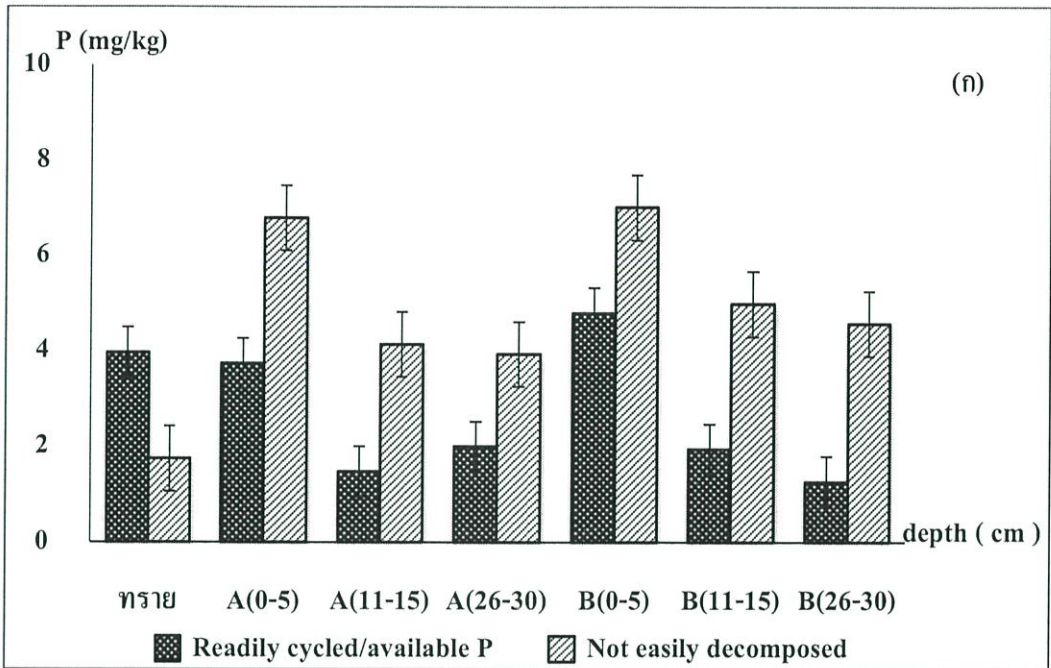
4.3.3 รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก (Phosphorus forms that are not easily decomposed)

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การสกัดในแต่ละรูปฟอร์มของฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช ประกอบด้วย รูปที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน; (Fe + Al bound); รูปที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน; (Ca + Mg bound) และรูปที่ตกค้างในดิน ; (residual forms) พบว่าในดินตะกอนผสมสารส้ม (B) จะพบในรูป Fe + Al มากที่สุดเท่ากับ 3.09-4.27 mg-P/kg รองลงมาก็คือรูป Ca + Mg เท่ากับ 0.95-2.11 mg-P/kg และในรูปที่ตกค้างในดิน เท่ากับ 0.52-0.63 mg-P/kg ส่วนใหญ่จะพบรูปฟอร์มทั้งสามนี้บริเวณพื้นผิว ที่ระดับความลึก 0-5 ซม. และจะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น ส่วนในดินตะกอน (A) จะพบในรูป Fe + Al มากที่สุดเท่ากับ 2.50-3.11 mg-P/kg รองลงมาก็คือรูป Ca + Mg เท่ากับ 0.66-2.95 mg-P/kg และในรูปที่ตกค้างในดินเท่ากับ 0.50-0.73 mg-P/kg และจะพบรูปฟอร์มทั้งสามนี้บริเวณพื้นผิว หรือที่ระดับความลึก 0-5 ซม. เช่นเดียวกับคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้มส่วนใหญ่ประกอบด้วยอลูมิเนียมรองลงมาก็คือแคลเซียม (X.H.Zhan,YQ.Zhao,2009) ซึ่งจะส่งผลให้พบรูปที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมมากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA พบว่า รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความลึก 11-15 ซม. มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ระดับความลึก 0-5 และ 26-30 ซม. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.3 ปริมาณ (ก) และสัดส่วน (%) (ข) รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก ที่พบในทราย ดินตะกอน (A) และดินตะกอนผสมสารส้ม (B) (ภาคผนวก ง)

จากรูปที่ 4.4 ทำการเปรียบเทียบรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช (รูปที่อินทรีย์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ; EIP และรูปที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ในดิน; Microbial-P) และรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก (รูปที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน; Fe + Al bound , รูปที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน ; Ca + Mg bound และรูปที่ตกค้างในดิน; residual forms) พบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่ย่อยสลายได้ยากในดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม มีค่าเท่ากับ 6.79 mg-P/kg และ 7.01 mg-P/kg สูงกว่ารูปฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชทั้งในดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (5.32 mg-P/kg และ 5.76 mg-P/kg) โดยปริมาณฟอสฟอรัสในดินตะกอนผสมสารส้มมีปริมาณมากกว่าในดินตะกอน โดยพบมากที่ระดับความลึก 0-5 ซม. และจะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำดินจากระดับนี้ไปใช้ในการปลูกพืชได้ โดยพืชสามารถดึงฟอสฟอรัสในส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA พบว่า รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก ในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ที่ความลึก 11-15 ซม. มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ระดับความลึก 0-5 และ 26-30 ซม. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช ที่พบในทราย ดินตะกอน (A) และดินตะกอนผสมสารส้ม(B) (ภาคผนวก ง)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะน้ำก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ โดยคอลัมน์ดินที่ใช้ประกอบด้วยคอลัมน์ทราย คอลัมน์ดินตะกอน และคอลัมน์ดินตะกอนผสมสารส้ม ซึ่งวาดวัน อัจจิมา และคณะ (2556) ทำการผ่านน้ำเสียมาเป็นเวลา 71 วัน ผู้วิจัยนำคอลัมน์ดินตะกอนมาเติมน้ำเสียทุกวันเป็นเวลา 66 วัน หลังจากนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนเข้าและออกจากคอลัมน์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำ หลังจากนั้นจะปล่อยให้คอลัมน์ทั้ง 3 แห่ง เพื่อนำดินออกจากคอลัมน์ จากนั้นจะทำการสุ่มตัวอย่างดินในแต่ละช่วงความลึก ได้แก่ ที่ 0-5 ,11-15 และ 26-30 เซนติเมตรและนำดินมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินตะกอน ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น 6 ขั้นตอน ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

ลักษณะของน้ำหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนสารส้ม สรุปได้ดังนี้ ค่าพีเอชเท่ากับ 8.05, 8.32 , 8.33 ค่าการนำไฟฟ้า 1.45 , 0.84 , 0.84 mS/cm , ซีโอดี 122.67, 106.67, 58.67 mgO₂/L และปริมาณอโรฟอสเฟต 1.355 ,0.017 , 0.005 mg/L ตามลำดับ

ลักษณะทางเคมีของดินหลังผ่านน้ำเสีย สรุปได้ดังนี้ ค่าพีเอช (1:5 น้ำ) ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม เท่ากับ 7.72 , 6.66 , 6.58 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 0.98 , 17.16 , 19.27 มิลลิกรัมสมมูลต่อน้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม และปริมาณอินทรีย์วัตถุ 0.62 , 4.27 , 4.49 (%) ตามลำดับ

จากการศึกษารูปฟอร์มฟอสฟอรัสของดินตะกอน โดยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น พบว่า รูปฟอร์มฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปฟอร์มที่ย่อยสลายได้ยาก ในทางกลับกันรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชจะพบได้น้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ One-Way ANOVA ระหว่าง ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม พบว่า รูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากและรูปฟอร์มของฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความลึก 11-15 ซม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการที่จะทำให้สารเคมีที่ใช้สกัดทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีกับไอออนที่ยึดกับดินเพื่อให้หลุดออกมาได้ดี ควรใช้เครื่องเขย่าในแนวตั้ง (vertical shaker)
2. ควรทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ และปริมาณไอออนต่างๆ เช่น อลูมิเนียม แคลเซียม ของดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม
3. ศึกษาการนำดินตะกอนที่ผ่านน้ำเสียแล้วไปใช้ประโยชน์ในการปลูกพืช

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 51 หน้า.
- กรรณิกา สิริสิงห์. 2549. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สารมวลชน. 370 หน้า.
- การประปานครหลวง. 2548. “เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนดินที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา”. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=434&filename=index (วันที่ค้นข้อมูล: 1 กุมภาพันธ์ 2557).
- การประปานครหลวง. 2555. “กรรมวิธีผลิตน้ำประปา”. [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/main.php?filename=treat_water (วันที่ค้นข้อมูล: 1 กุมภาพันธ์ 2557).
- ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวิโรจน์, เสียงแจ้ว พิริยพจนต์, พิทยากร ลิ้มทอง และวรรณลดา สุนนทพงษ์ศักดิ์. อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุต่อปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน. ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, 2535. หน้า 24-35.
- ชัยยศ ตั้งสถิตสกุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร: โครงการตำราเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 1-21.
- นิวัติ อนงค์รักษ์. 2557. “ปฐพีศาสตร์ทั่วไป (General soil)”. [Online]. Available: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Ms89VIxoHOQJ:mis.agri.cmu.ac.th/course/course_lecture_download.asp%3FCourseNO%3D361201%26CID%3D1108+&cd=3&hl=th&ct=clnk&gl=th (วันที่ค้นข้อมูล: 10 กุมภาพันธ์ 2557).
- ปัทมา วิทยากร. 2543. เอกสารการสอนความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. ขอนแก่น: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 423 หน้า.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 344 หน้า.
- สมพร คนยงค์. 2557. “ความสมบูรณ์ของดิน”. [Online]. Available: <http://courseware.rmutl.ac.th/courses/53/unit502.htm> (วันที่ค้นข้อมูล: 5 กุมภาพันธ์ 2557).

- วาดวัน สิงหพงษ์, วิษะวานี บุญคุ้มและอภิรักษ์ โฮจัน, 2556. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียชุมชนด้วย
ตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์. โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชา
เคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง. 63 หน้า.
- อัจจิมา ทวีกุล, อาภากร ฉัตรเทียนชัยและอารียา โมหมัดตาเฮด, 2556. การบำบัดไอออนฟอสเฟตใน
น้ำเสียด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์. โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง. 65 หน้า.
- Anderson, G., 1980. **Assessing Organic phosphorus in soil.** In F.E.Khasawneh(ed.).The role of
phosphorus in agriculture.ASA-CSSA-SSSA. Madison Wise. 411-431.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. **Standard Methods for examination of water and wastewater.**
22nd Edition.USA: American Public Health Association
- Babatunde, A.O., Zhao Y.Q., 2009. Forms, patterns and extractability of phosphorus retained in
alum sludge used. as substrate in laboratory-scale constructed wetland system. **Chemical
Engineering Journal.** 152. 8–13
- Barber, S.A., 1980. **Soil-plant interactions in phosphorus nutrition of plants.** In F.E. khasaeneh
E.C. sampleand E.J.kampreth.(eds.)The role of phosphorus in agriculture.ASA-CSSA-
SSSA, Madison, Wise. 591-615.
- Harrison, A.F., 1982. **Labile organic phosphorus Mineralization in relationship to soil
properties.** Soil Biol. Biochem.14. 343-351.
- Kardos, L.T., 1964. **Soil Fixation of plant nutrients.** Chapter 9 in Chemistry of the soil. Edited by
F.E. Bear. Van Nostrand Reinhold Can., New York.
- Koppers, H.M.M. 1989. **Sludge Disposal.** Nieuwegein, Holland: KIWA-Keuringsinstituut voor
Waterleidingartikelen.
- Kathleen C. Ruttenberg, 1992. Development of a sequential extraction method for different forms
of phosphorus in marine sediments. **Limnol Oceanogr.** 37(7). 1460-1482
- Moore, P.A., Jr. and J.P. Reddy. 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments
of Lake Okeechobee, Florida. **Journal of Environmental Quality.** 23. 955-964
- Sharpley, A.N., Smith, S.J., 1985. Fractionation of Inorganic and Organic phosphorus in Virgin
and Cultivated Soil. **Soil Science Society of America Journal.** 49(1). 127-130

- Sorn-srivichai, P. 1985. **An evaluation of water extraction as a soil-testing procedure for phosphate**. Ph.D. thesis. Massey University, 270 pages.
- Stevenson, F.J. 1986. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. John Wiley and Sons, New York. 380 pages.
- Van Eck, G.T.M.,1982. Form of phosphorus in particulate matter from the Hollands Diep/Haringvliet,the Netherlands. **Hydrobiologia**. 91. 655-681.
- White, R.E., 1983. **Introduction to the Principles and Practice of soil Science**. London: Blackwell Scientific Publications. 198 pages .
- Yang, Y., Zhao, Y.Q., Babatunde, A.O., Wang,L., Ren, Y.X.,han, Y. 2006. "Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge". **Separation and Purification Technology**. 51. 193-200.
- Yang, Y., Zhao, Y. Q., Wang, S. P., Guo, X. C., Ren, Y. X., Wang, L., Wang, X. C. 2011.A promising approach of reject water treatment using a tidal flow constructed wetland system employing alum sludge as main substrate. **Water Science & Technology**. 63(10). 2367-2373.
- Zhao, X.H., Zhao, Y.Q., 2009. Investigation of phosphorus desorption from P-saturated alum sludge used as a substrate in constructed wetland. **Separation and Purification Technology**. 66. 71-75.

ภาคผนวก ก

วิธีการดำเนินงาน

ก-1 วิธีการเตรียมน้ำเสีย

นำน้ำเสียปริมาตร 20 L นำมาเติมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.4371 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาตร 500 mL และสารละลายซูโครส (น้ำตาลทราย) เข้มข้น 3.1093 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ปริมาตร 167 mL จะได้ตัวอย่างน้ำเสียที่มีปริมาณฟอสเฟต 25 mg/L และมีค่าซีไอดี 300 mg/L สำหรับใช้ในการทดลอง

ก-2 วิธีการวิเคราะห์น้ำ

ก-2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

1. เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องพีเอช มิเตอร์ (pH meter)
2. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 ml หรือขนาด 100 ml
3. กระจกถักน้ำ

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน pH 7.0 (Standard buffer Solution)
2. สารละลายมาตรฐาน pH 4.0 (Standard buffer Solution)

3. วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องวัดพีเอช เพื่ออุ่นเครื่องก่อนวัดประมาณ 5-10 นาที
2. Calibrate ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่คาดว่าได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่จะวัด แต่เครื่องวัดพีเอชบางยี่ห้อ เช่น WTW จะกำหนดสารละลายบัฟเฟอร์ไว้คือ พีเอช 4.0 และ 7.0 ในขณะที่เครื่องวัดพีเอชบางยี่ห้อ เช่น DENVER สามารถเลือกสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต้องการ ทำได้โดยเทสารละลายลงบีกเกอร์ จุ่มหัววัดลงไปนในสารละลาย แล้วทำตามขั้นตอนที่แนะนำสำหรับเครื่องวัดพีเอชแต่ละยี่ห้อ ขณะ Calibrate ควรแกว่งหัววัดเบาๆ
3. ล้างหัววัดด้วยน้ำกลั่น และซับให้แห้งก่อนวัดพีเอชทุกครั้ง
4. เทตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดลงบีกเกอร์ แล้วทำการวัดโดยแกว่งหัววัดเบาๆ
5. เมื่อค่าพีเอชหยุดนิ่งประมาณ 10 วินาที อ่านค่าที่วัดได้
6. ทำความสะอาดหัววัดแล้วเก็บให้เรียบร้อย

ก-2.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Electrical Conductivity Bridge
2. Specific Conductance Cell

2. สารเคมี

Standard Potassium Chloride Solution 0.01 N ละลาย 0.7456 g ของ Anhydrous Potassium Chloride (อบที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นใน Desiccator) ด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น ปรับสารละลายให้อยู่ที่อุณหภูมิ 25 °C จะวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ 1.4118 dS m^{-1}

3. วิธีการทดลอง

1. ต่อ Specific Conductance Cell กับ Electrical Conductivity Bridge เพื่อให้ครบวงจร อุณหภูมิเครื่องประมาณ 30 นาที ตรวจสอบ cell ด้วยน้ำยา Standard Potassium Chloride Solution 0.01 N ที่ $25 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ค่าเท่ากับ 1.4118 dS m^{-1} แสดงว่าเครื่องถูกต้องและใช้งานได้

2. วัดค่า EC จากตัวอย่างน้ำ โดยการจุ่ม electrode ลงในน้ำตัวอย่าง

ก-2.3 การวิเคราะห์หาซีโอไซด์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titration Method)

(5220 C; AWWA, 2012)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยโบโรซิลิเกต (Borosilicate culture tube) ขนาด 16×100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene; TFE)

2. บล็อกฮีตเตอร์ (Block heater) หรือตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ $150 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution 0.1 นอร์มัล)

นำ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต

ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO_4) 22 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย

3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

ละลาย (1, 10-phenanthroline monohydrate $C_{12}H_{18}N_2H_2O$) 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล

ต้องนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งก่อนใช้ โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตารางที่ ก-1 ลงในหลอดแก้วที่ต้องการโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็น เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

ตารางที่ ก.-1 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดหลอดย่อย สลายน	ปริมาตรน้ำ (มล.)	ปริมาตรสารละลาย โพแทสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลายน (มล.)	สารละลาย กรดซัลฟูริก (มล.)	ปริมาตรรวม (มล.)
หลอดแก้ว 16 x 100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0
หลอดมาตรฐาน 10 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5

3. วิธีการทดลอง

- ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟูริก 20 % ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- หลอดแก้วที่ใช้หาซีโอดีหลายขนาด การเลือกใช้ขึ้นกับค่าซีโอดีที่มีในตัวอย่างน้ำในกรณีค่าซีโอดีสูง ใช้ตัวอย่างน้ำในปริมาณน้อยจึงใช้หลอดแก้วขนาดเล็ก (16 x 100 มิลลิเมตร) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุด ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำมากๆ มักจะมีค่าผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างน้ำน้อยเกินไป

3. เมื่อเลือกขนาดหลอดแก้วแล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 6 มิลลิลิตร โดยเติมตัวอย่างน้ำลงหลอดแก้วแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต โดยปิเปต 3 มิลลิลิตร สำหรับย่อยสารละลาย ค่อยเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก 7 มิลลิลิตร ให้เกิดชั้นกรดอยู่ในแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี

4. นำหลอดแก้วใส่ลงในบล็อกรีเอคเตอร์หรือตู้อบที่อบ 150 °C แล้วอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมงทิ้งไว้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำหลอดแก้ววางลงในขวด

ข้อควรระวัง : ควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนขณะกลับหลอดแก้วไปมา และควรผสมสารละลายให้เข้ากันก่อนให้ความร้อนเพื่อป้องกันการระเบิด

5. เปิดฝาหลอดแก้วใส่แท่งแม่เหล็กกวนขนาดเล็กที่หุ้ม TFE แล้วเติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด คนอย่างรวดเร็วบนเครื่องกวนแม่เหล็กแล้วไทเทรตกับ FAS 0.05 นอร์มัลจนกระทั่งเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลแดง หรือทดสอบสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปกรวยก็ได้เพื่อความสะดวกในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด

6. ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้งโดยใช้สารเคมีและน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำ

4. การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี (มก.O}_2\text{/ล.)} = \frac{(B-S) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

เมื่อ B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลนด์ (มล.)

S = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

ก-2.4 การวิเคราะห์ไอออนฟอสเฟต (Phosphate) (กรรณิการ์, 2549: 317)

การวิเคราะห์หาฟอสฟอรัสแบ่งได้เป็น 2 ตอน คือ

1. เปลี่ยนฟอสฟอรัสในรูปที่สนใจจะหาให้ไปอยู่ในรูปอโรฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำได้
2. การหาค่าอโรฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำด้วยวิธี colorimetric วิธี Ascorbic acid method ใช้สำหรับวิเคราะห์น้ำเสียที่ฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.01-6 mg/L

Sulfuric acid-nitric acid digestion

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Digestion rack มีที่ให้ความร้อนและดูดควันออก
2. Micro-kjeldahl flasks

2. สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
2. กรดไนตริกเข้มข้น
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ในน้ำ
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล

3. วิธีการทดลอง

1. นำน้ำตัวอย่างมา 30 mL ใส่ใน Micro-kjeldahl flasks เติม Conc. H_2SO_4 1 mL และ conc. HNO_3 5 mL
2. ย่อยตัวอย่างจนได้ปริมาตร 1 mL แล้วย่อยต่อจนกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีสีเพื่อได้ HNO_3
3. ทำให้เย็น เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 mL และฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ค่อยๆเติม NaOH 1 N จนได้สีชมพูอ่อน เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 mL

การหาค่าปริมาณอโซฟอสเฟตโดยวิธี Ascorbic acid method

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) พร้อมด้วย infrared phototube สำหรับใช้ที่ 880 nm โดยใช้ light path 0.5 เซนติเมตร หรือยาวกว่านี้

2. สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล
เติม conc. H_2SO_4 70 mL ลงในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 mL
2. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต
ละลาย 1.3715 กรัม $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 1/2 H_2O$ ในน้ำกลั่น 200 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 mL เก็บในขวด
3. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต
ละลาย 20 กรัม $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ในน้ำกลั่น 500 mL เก็บในขวดพลาสติกที่ 4°C
4. แอสคอร์บิกแอซิด 0.1 โมลาร์
ละลาย 1.76 กรัม แอสคอร์บิกแอซิดในน้ำกลั่น 100 mL สารละลายนี้จะอยู่ตัวประมาณ 1 สัปดาห์ ถ้าเก็บไว้ที่ 4°C
5. น้ำยารวม
ผสมน้ำยาเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 mL น้ำยารวม ดังนี้ 50 mL 5 นอร์มอล H_2SO_4 5 mL สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาทเรต 15 mL สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต และ 30 mL กรดแอสคอร์บิก ตั้งน้ำยาเหล่านี้ทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องจึงจะผสมกันถ้ามีความขุ่น

เกิดขึ้นในน้ำยารวมหลังจากเติมแอนติโมนีโปแทสเซียมทาเทรตหรือแอมโมเนียมโมลิบเดต ให้เขย่าน้ำยาเคมีรวมนี้แล้วตั้งทิ้งไว้ 2-3 นาที จนกระทั่งความขุ่นหายไป จึงจะเติมน้ำยาเคมีอื่นต่อไป น้ำยารวมนี้อยู่ตัวได้ 4 ชั่วโมง

6. สารละลายสต็อกฟอสเฟต

ละลาย 219.5 mg ของ KH_2PO_4 (anhydrous) เติมน้ำกลั่นจนครบ 1000 mL 1 mL ของสารละลายนี้เท่ากับ 50.0 $\mu\text{g PO}_4\text{-P}$

7. สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

นำสารละลายสต็อกมา 50.0 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL 1 mL = 2.5 $\mu\text{g PO}_4\text{-P}$

3. วิธีการทดลอง

1. เตรียมกราฟมาตรฐาน เตรียมอนุกรมของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0, 2, 6, 10, 16 และ 24 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดที่กำหนด เขย่าให้เข้ากัน จะได้อนุกรมของฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 15, 25, 40 และ 60 μg หรือ 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.2 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ

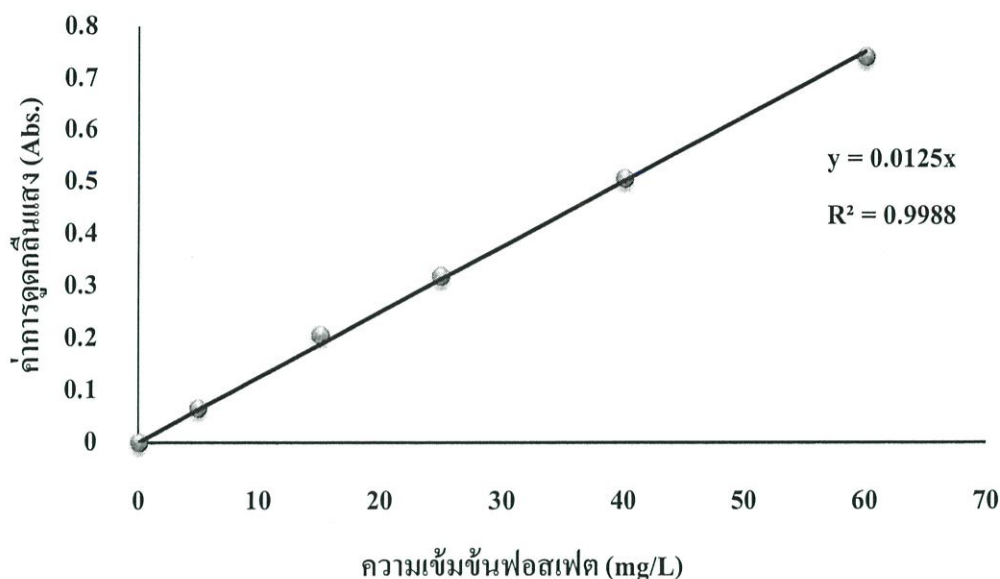
2. การเตรียมตัวอย่าง ปิเปตตัวอย่าง 50.0 mL ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 125 mL เติมนิโตรลฟอสฟอรัส 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้หยด 5 $\text{N H}_2\text{SO}_4$ ลงไปที่ละหยดจนกระทั่งสีแดงหายไป เติมน้ำยารวม 8.0 mL เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที เพื่อให้เกิดสี แล้วอ่านค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 nm

3. การทำ correction สำหรับสีหรือความขุ่น สีของน้ำธรรมชาติไม่ขัดขวางการหาที่ wavelength สูง ในกรณีที่น้ำขุ่นหรือมีสีมาก ให้ทำแบลนค์ โดยเติมน้ำยาเคมีทุกอย่างยกเว้นแอสคอร์บิกเอซิดและแอนติโมนีโปแทสเซียมทาเทรต ลงในตัวอย่าง หักค่าแอมซอร์บแนนซ์ของแบลนค์จากค่าแอมซอร์บแนนซ์ของตัวอย่างทุกอัน

4. วิธีการคำนวณ

$$\text{ฟอสเฟต (mg/L)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (\mu\text{g})}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

5. กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ก-3 วิธีการวิเคราะห์ดิน

ก-3.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture content)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้อบ (Drying Oven)
2. เครื่องดูดความชื้น (Desiccator)
3. ถ้วยทนไฟ (Crucible) พร้อมฝา

2. วิธีการทดลอง

1. ชั่งกระจกนาฬิกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 5 g ลงบนกระจกนาฬิกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105–110°C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชม. ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาปริมาณความชื้น (%)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักเปียก}} \right) \times 100$$

6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

ก-3.2 การวัดค่าพีเอช (pH) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)
2. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 ml หรือขนาด 100 ml
3. กระจกน็อคน้ำ

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน pH 7.0 (Standard buffer Solution)
2. สารละลายมาตรฐาน pH 4.0 (Standard buffer Solution)

3. วิธีการทดลอง

การวัด pH ในน้ำ อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1:5 (w/w)

ชั่งดิน 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์พลาสติกเติมน้ำกลั่น 50 มล. คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วเป็นระยะๆ ให้บ่อยครั้งในระยะ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาที จึงวัด pH ของดินในส่วนที่เป็นน้ำใสด้วย pH meter หรือใช้ช้อนตวงตักดินและตวงน้ำแทนการชั่งดิน เพื่อวัด pH (1:5, v/v) ก็ได้

ข้อเสนอแนะ

1. การวัด pH ของสารละลายดินด้วย pH meter ต้องคำนึงถึง สัดส่วนของดินต่อน้ำ การมีเกลือต่างๆ ละลายอยู่ในสารละลายดิน

2. CO₂ ในอากาศมีผลกระทบต่อ การวัด pH ของดินในน้ำได้ เพราะ CO₂ ในอากาศสามารถละลายในน้ำ กรณีที่เป็นงานที่ต้องการความถูกต้องมากเป็นพิเศษ ต้องป้องกันด้วยการปิด beaker ที่ใช้ผสมตัวอย่างดินกับน้ำไว้ก่อนการวัด

3. ก่อนวัดค่า pH ของสารละลายดิน จะต้องเตรียมเครื่อง pH meter ให้พร้อมที่จะทำงานเสียก่อน โดยการวัด Standard buffer solution 7.0 และ 4.0 ปรับเครื่องอ่านค่า pH เป็น 7.0 และ 4.0

4. ในกรณีที่ดินเป็นด่างสูง คือมี pH สูงกว่า 7.5 ให้ใช้ Standard buffer solution 7.0 และ 10.0

5. เครื่อง pH meter ที่ใช้งานเสร็จแล้ว ควร Stand by ไว้ ไม่ควรปิดเครื่องเลย และ electrode ควรแช่อยู่ในสารละลายตามคำแนะนำของวิธีการใช้ electrode แต่ละยี่ห้อแต่ละรุ่น

6. สารละลายที่ใช้เติมใน electrode ควรซื้อตามคำแนะนำของบริษัทที่ขาย electrode เนื่องจากแต่ละยี่ห้อแต่ละรุ่นใช้สารละลายที่เติมไม่เหมือนกัน

ตารางที่ ก.-2 แสดงการแปลความหมายค่า pH ของดินในน้ำ

ระดับ	ช่วง pH water, 1:5
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 – 4.4
กรดจัดมาก	4.5 – 5.0
กรดจัด	5.1 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

ก-3.3 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (Cation Exchange Capacity, C.E.C.) โดยวิธี Ammonium saturation method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดชมพู (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มล.
2. ขวดกรอง (Filtering flask) ขนาด 500 มล.
3. ขวดกลั่น (Kjeldahl flask) ขนาด 800 มล.
4. ขวดพลาสติกทนกรดทนด่างขนาด 10 และ 20 ลิตร
5. กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5
7. เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
8. เครื่องกลั่น (Distillation apparatus)
9. บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มล.
10. เครื่องกวน (Magnetic stirrer)

2. สารเคมี

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate, NH_4OAc) 1M pH 7.0
2. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) 1 M pH 7.0
3. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 M
4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10 % acidified
5. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) 95 %
6. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3 %
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
8. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) 1 %
9. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) 0.10 M
10. สารละลายกรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M
11. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M
12. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %
13. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate)

วิธีเตรียมน้ำยาเคมี

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate, NH_4OAc) 1M pH 7.0
เตรียม โดยใส่น้ำกลั่นประมาณ 16 ลิตรในขวดพลาสติกทนกรดขนาด 20 ลิตร เติมกรดกลacial อะซิติก (glacial acetic acid, 99.5 %) 1,136 มล. และสารละลายแอมโมเนีย (NH_3 solution, NH_4OH , 25 %) 1,500 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปให้มีปริมาตรประมาณ 19 ลิตร ผสมน้ำยาทั้งสองให้เข้ากัน ปรับ pH ของน้ำยาให้เป็น pH 7.0 โดยใช้สารละลายแอมโมเนียหรือกรดกลacial อะซิติก แล้วจึงปรับปริมาตรให้เป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
2. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) 1 M pH 7.0
ละลาย NH_4Cl 1 กิโลกรัม ในน้ำกลั่น 18 ลิตร ปรับ pH เป็น 7.0 ด้วย NH_3 solution หรือ กรด HCl แล้วจึงเติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 19 ลิตร
3. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 M pH 7.0
ตวง 2.5 ลิตร. NH_4Cl 1 M (สารละลายข้อ 2) ใส่น้ำกลั่น 7 ลิตร แล้วปรับ pH เป็น 7.0 แล้วจึงปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10 % acidified
เตรียมโดยละลาย NaCl 2 กิโลกรัม ในน้ำกลั่น 18 ลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 8.35 มล. คนให้ละลาย แล้วทำให้เป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

5. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3 %
ค่อยๆ ละลายกรดบอริก 600 กรัม ในน้ำกลั่นอุณหภูมิประมาณ $50 - 60^\circ C$ จนกรดบอริกละลายหมด จึงปรับปริมาตรทั้งหมดเป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
6. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
ละลายโบรโมครีซอลกรีน (bromocresol green) 0.22 กรัม และเมทิลเรด (methyl red) 0.075 กรัม ใน 95 % เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 96 มล. ที่ใส่ 3.5 มล. ของ 0.1 M NaOH ไว้แล้ว
7. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) 1 %
ละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มล.
8. สารละลายกรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M
เจือจางกรดเกลือเข้มข้น 82.7 มล. ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตร
9. สารละลาย $AgNO_3$ 0.1 M
ละลายซิลเวอร์ไนเตรท 1.7 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มล. เก็บสารละลายนี้ในขวดสีชา
10. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M
ละลาย NaOH 40 กรัม ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
11. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %
ละลาย NaOH 4 กิโลกรัม ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
12. การ Standardization NaOH ด้วยโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (potassium hydrogen phthalate)

ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP, $[C_6H_4(COOK)COOH]$, น้ำหนักกรัมสมมูล 204.23 กรัม) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ $105^\circ C$ ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.4 กรัม บันทึกรน้ำหนัก KHP ใสในขวดชมพูขนาด 125 มล. เติมน้ำกลั่นประมาณ 20 มล. เขย่าจนละลายหมดจึงไปไตเตรทกับสารละลาย 0.1 M NaOH ที่เตรียมไว้ในข้อ 8 โดยเติม 1 % phenolphthalein 2-3 หยด ไตเตรทจนสารละลายเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูซึ่งเป็นจุดยุติ (end point) คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

$$\text{Normality ของ NaOH} = \frac{\text{น.น. เป็นกรัมของโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต} \times 1000}{\text{น้ำหนักกรัมสมมูลของกรด KHP} \times \text{ปริมาตรของ NaOH}}$$

3. วิธีการทดลอง

1. ชั่งดิน 5 กรัม ใสใน ขวดชมพู ขนาด 125 มล. เติมน้ำกลั่น 1 M pH 7.0 NH_4OAc 50 มล. เขย่าให้เข้ากันดี ทิ้งไว้ค้างคืน

2. นำมากรองโดยใช้กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ต่อเข้ากับขวดกรอง ใช้กระดาษกรอง Whatman No. 5 จำนวน 1 แผ่น (หรือใช้ No. 42 จำนวน 1 แผ่น หรือ No. 1 จำนวน 2 แผ่น แทนกันได้) ล้างตัวอย่างดินด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 ทีละน้อย หลาย ๆ ครั้ง จนได้ปริมาตรเกือบ 100 มล. นำสารละลายที่กรองได้นี้ถ่ายใส่ Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มล. เก็บไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ exchangeable cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ และ K^+ ต่อไป

3. ล้างตัวอย่างดินในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ 2 ต่อด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 อีก 5 ครั้งๆ ละ ประมาณ 20 มล.

4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย 1 M NH_4Cl pH 7.0 5 ครั้งๆ ละ ประมาณ 20 มล.

5. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย 0.25 M NH_4Cl pH 7.0 ประมาณ 20 มล. 1 ครั้ง

6. ล้างด้วย ethyl alcohol 95 % อีก 5 - 6 ครั้งๆ ละ ประมาณ 20 มล. ทุกครั้งที่ล้างใช้กระบอกฉีด ฉีดล้างตัวอย่างดินที่อาจติดค้างอยู่ที่ปาก buchner funnel ให้ลงไปรวมอยู่ในกรวยให้หมด สารละลายที่ได้จากข้อ 3 - ข้อ 6 เททิ้งไป (การล้างด้วย alcohol เพื่อล้างแอมโมเนียมส่วนเกินที่ดินไม่ได้แลกเปลี่ยนออกให้หมด ซึ่งทดสอบได้จากปริมาณคลอไรด์ไม่มีหลงเหลืออยู่ในดินโดยหยดสารละลาย AgNO_3 0.1 M 1-2 หยด ลงในสารละลายที่กรองรับมาจาก buchner funnel โดยตรงยังไม่ได้หยดลงสู่ขวดกรอง ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่ายังมีแอมโมเนียมไม่หมด ต้องล้างตัวอย่างดินด้วย ethyl alcohol 95 % ต่อไปอีก แล้วทดสอบคลอไรด์ใหม่ดังที่กล่าวมาแล้ว จนไม่มีตะกอนสีขาวนั้นแสดงว่าล้างแอมโมเนียมหมดแล้ว)

7. เปลี่ยนขวดกรองใหม่สำหรับรองรับสารละลายใหม่ ล้างตัวอย่างดินที่ยังอยู่ในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ 6 ด้วย acidified NaCl 10 % แต่แต่ละครั้งที่ล้างให้ใส่สารละลาย NaCl ให้ท่วมตัวอย่างดิน จนกระทั่งได้สารละลายที่กรองได้ (leachate) ประมาณ 300-350 มล.

8. ถ่ายสารละลายที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น ล้างขวดกรองด้วยน้ำกลั่นและเทน้ำที่ล้างรวมลงไปขวดกลั่น

9. นำขวดกลั่นไปกลั่น โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไปในขวดกลั่นให้มากเกินพอ (ประมาณ 30 มล.) โดยมีสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3% ประมาณ 30 มล. ใส่ในขวดชมพู ขนาด 500 มล. คอยรองรับสารละลายที่กลั่นออกมาได้ และในสารละลายกรดบอริกนี้ใส่อินดิเคเตอร์ผสมประมาณ 5 หยด ใช้เวลากลั่น ประมาณ 40 - 45 นาที หรือจนกลั่นได้สารละลายประมาณ 250-275 มล.

10. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดชมพูที่รองรับไปไตเตรทกับสารละลายกรดเกลือ 0.1 N จุดยุติคือสีของอินดิเคเตอร์ในสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรของกรดเกลือที่ใช้ไตเตรท แล้วนำมาคำนวณค่า CEC

11. นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ที่ใช้ล้างดินมากลั่นเป็น Blank โดยทำเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

4. การคำนวณ

$$\text{CEC (cmol}_e\text{/kg)} = \frac{(\text{T} - \text{B}) \times \text{N} \times 100 \times \text{AD} / \text{OD}}{\text{Sample wt. (gm.)}}$$

- เมื่อ T = ปริมาตรกรดเกลือที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่างดิน
 B = ปริมาตรกรดเกลือที่ใช้ไตเตรทกับ Blank
 N = ความเข้มข้นของกรดเกลือมีหน่วยเป็นนอร์มัลลิตี (normality)
 AD/OD = อัตราส่วนน้ำหนักดินกับดินอบแห้ง (airdried / oven - dried ratio)

คำแนะนำ

ในการล้างดินแต่ละครั้งให้ค่อย ๆ ล้างสังเกตน้ำยาที่ผ่านกรวยอย่าให้ผ่านออกเร็วมาก โดยการควบคุมเปิดระบบสูญญากาศให้น้ำยาค่อย ๆ หยด ก่อนจะล้างดินครั้งต่อไปต้องรอให้น้ำยาในการล้างครั้งแรกไหลผ่านหมดไปก่อน และขณะล้างดินด้วยเอทิลแอลกอฮอล์อย่าทิ้งให้ตัวอย่างดินแห้ง เพราะถ้าดินแห้งในการล้างครั้งต่อไป ตัวอย่างดินอาจจะร่วงลงไปอยู่ในขวดกรองที่รองรับได้

ตารางที่ ก.-3 ระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน

ระดับ	ช่วง pH water, 1:5
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 – 4.4
กรดจัดมาก	4.5 – 5.0
กรดจัด	5.1 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

ก-3.4 การวิเคราะห์หาอินทรียวัตถุของดินโดยวิธี Walkley Black modified acid-dichromate digestion, FeSO₄ titration method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มล.
2. Dispenser ขนาด 10 และ 20 มล.
3. กระบอกตวง ขนาด 100 มล.
4. บิวเรตขนาด 50 มล.
5. เครื่องกวน (magnetic stirrer)

2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) 1.0 N
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H₂SO₄)
3. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate) 0.5 N
4. สารละลายออร์โทฟีแนนโทรีน อินดิเคเตอร์

วิธีเตรียมน้ำยาเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) 1.0 N
ละลาย K₂Cr₂O₇ (A.R grade ออบที่ 105 °C 24 ชั่วโมง) 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำสารละลายให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
2. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 N
ละลาย Fe (NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O 196.1 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มล. ที่มีกรด H₂SO₄ เข้มข้นอยู่ 20 มล. แล้วทำให้เป็นสารละลาย 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บไว้ในขวดสีน้ำตาล
3. สารละลายออร์โทฟีแนนโทรีน อินดิเคเตอร์
ละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO₄·7H₂O) 0.7 กรัม และออร์โทฟีแนนโทรีน 1.48 กรัม ในน้ำกลั่น และทำให้มีปริมาตร 100 มล.

3. วิธีการทดลอง

1. ชั่งดิน 1 กรัม ใส่ขวดชมพู่ ขนาด 250 มล. (ปริมาณตัวอย่างดินอาจลดลงได้ตามความเหมาะสมถ้าดินนั้นมีปริมาณอินทรียวัตถุสูง สังเกตได้จากสีของดิน ถ้าเป็นดินสีดำหรือ สีน้ำตาลเข้ม ต้องชั่งดินให้ลดลง แต่ถ้ากรณีเป็นดินทรายก็ต้องเพิ่มปริมาณดินให้มากขึ้นกว่าเดิม)

2. เติม สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) 1.0 N 10 มล. โดยใช้ Dispenser

3. เติม H₂SO₄ เข้มข้น 20 มล. โดยใช้ Dispenser พยายามให้กรดไหลลงข้าง ๆ ขวดให้ชะล้างตัวอย่างลงไปอยู่ในขวดให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดดินเกาะติดอยู่ตามข้างขวด เขย่าเบา ๆ ให้ตัวอย่างเข้ากันดีเป็นเวลาประมาณ 1 นาที

4. ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง
5. เติมน้ำกลั่น 50 มล. แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
6. หยดอินดิเคเตอร์ออร์โทฟีแนนโทรอลีน 5 หยด
7. ไตเตรทด้วยสารละลาย FAS 0.5 N ที่จุด end point สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
8. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนี่ 6

4. การคำนวณ

$$\% \text{ อินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon, O.C.)} = \frac{10 \times (B-S) \times 100 \times 3 \times 100 \times N}{B \times 77 \times 1000 \times W}$$

$$\% \text{ อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, O.M.)} = \frac{10 \times (B-S) \times 100 \times 100 \times 3 \times 100 \times N}{B \times 77 \times 58 \times 1000 \times W}$$

$$\text{หรือ } \% \text{ OM} = \% \text{ O.C.} \times 1.724$$

เมื่อ B = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (มล.)

S = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (มล.)

W = น้ำหนักดินที่ใช้ (กรัม)

N = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$ (ในกรณีที่มีความเข้มข้นไม่ใช่ 1.0 N) (หน่วย normality)

ภาคผนวก ข

วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

ข-1 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในการสกัดแบบลำดับขั้น

วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด Total phosphorus (TP)

1. ปิเปิดตัวอย่างมา 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติม conc.H₂SO₄ 1 มิลลิลิตร และ conc.HNO₃ 5 มิลลิลิตร

2. ย่อยตัวอย่างจนได้ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วทำให้เย็น เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ค่อยๆเติม NaOH 1 N จนได้สีชมพู เทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3. ปิเปิดตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้หยด H₂SO₄ 5 N ลงไปที่ละหยดจนกระทั่งสีแดงหายไป

4. เติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที เพื่อให้เกิดสี แล้วอ่านค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สโปกโทโรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

วิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต Orthophosphate (OP)

1. ปิเปิดตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ถ้าได้สีแดงให้หยด H₂SO₄ 5 N ลงไปที่ละหยดจนกระทั่งสีแดงหายไป

2. เติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที เพื่อให้เกิดสี แล้วอ่านค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สโปกโทโรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2 ขั้นตอนการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

ข-2.1 ขั้นที่ 1 ฟอสฟอรัสที่ดูดยึดติดแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)

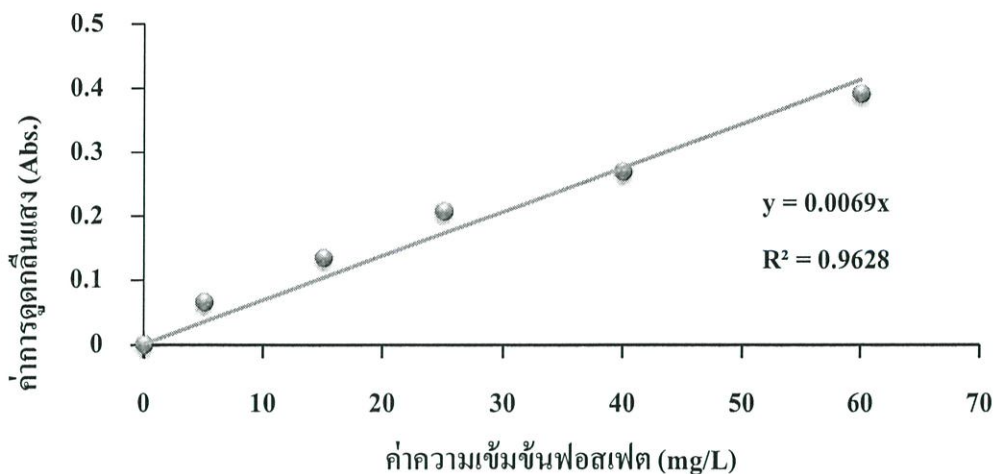
1) นำตัวอย่างดินมา 0.25 กรัม เติม KCl 1 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท

2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชม. แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนในนาน 5 นาที

3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring

4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)

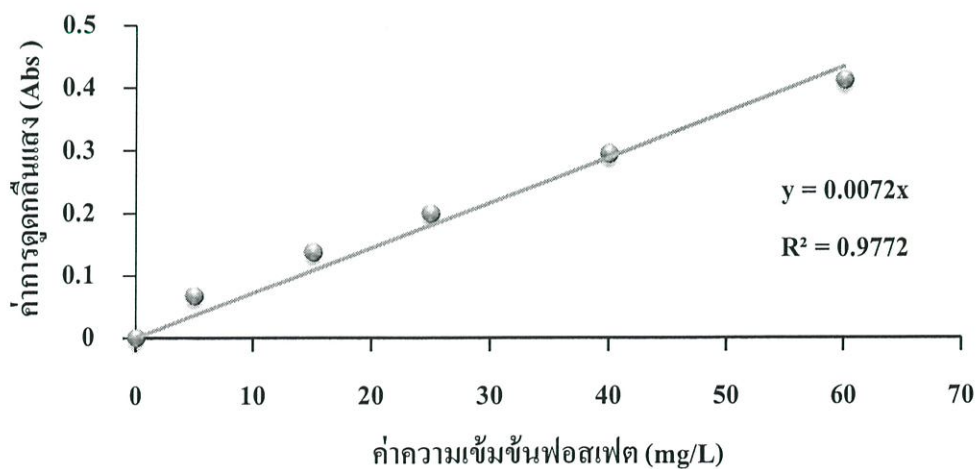
5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สโปกโทโรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร



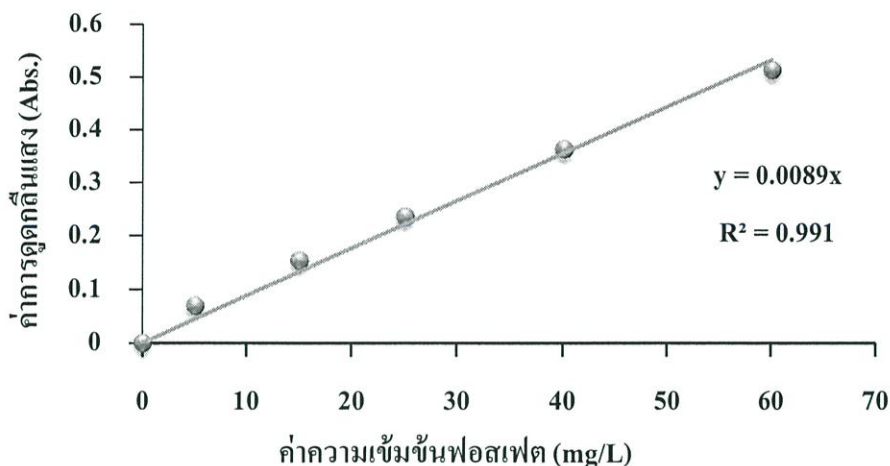
รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟตที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2.2 ขั้นที่ 2 ฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ออนได (Exchangeable Inorganic Phosphorus (EIP) และ Exchangeable Organic Phosphorus (EOP))

- 1) นำตัวอย่างดินมา 2.5 กรัม เติม NaHCO_3 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณอโรฟอสเฟต (OP) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร



รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต OP ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร



รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต TP ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2.3 ชั้นที่ 3 ฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P)

1) นำตัวอย่างดินมา 2.5 กรัม เติม CHCl_3 2 มิลลิลิตร และ NaHCO_3 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท

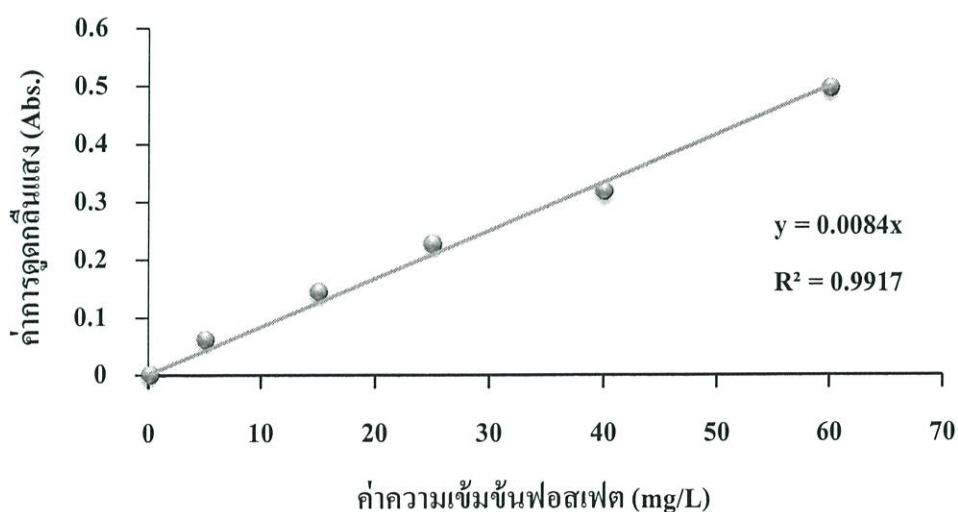
2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที

3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring

4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

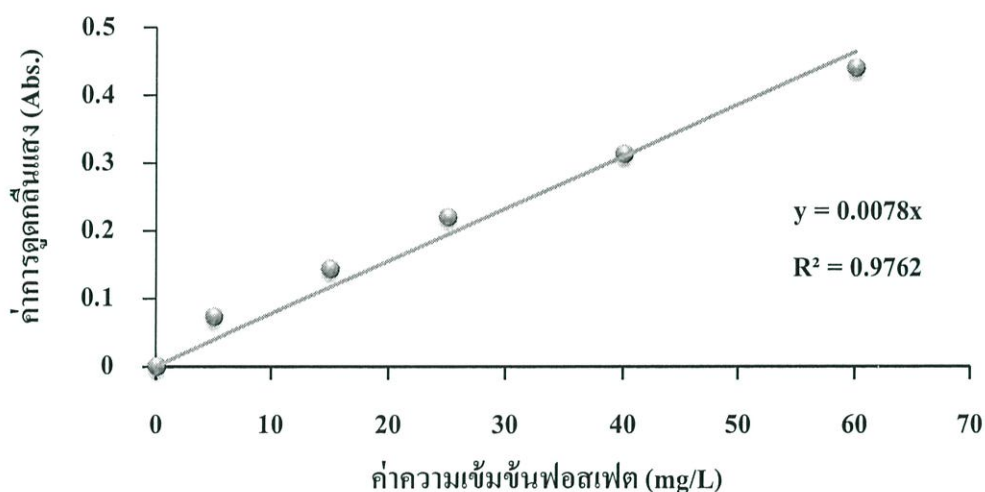
6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป



รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต TP ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2.4 ขั้นที่ 4 ฟอสฟอรัสที่ยึดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Fe + Al-bound P)

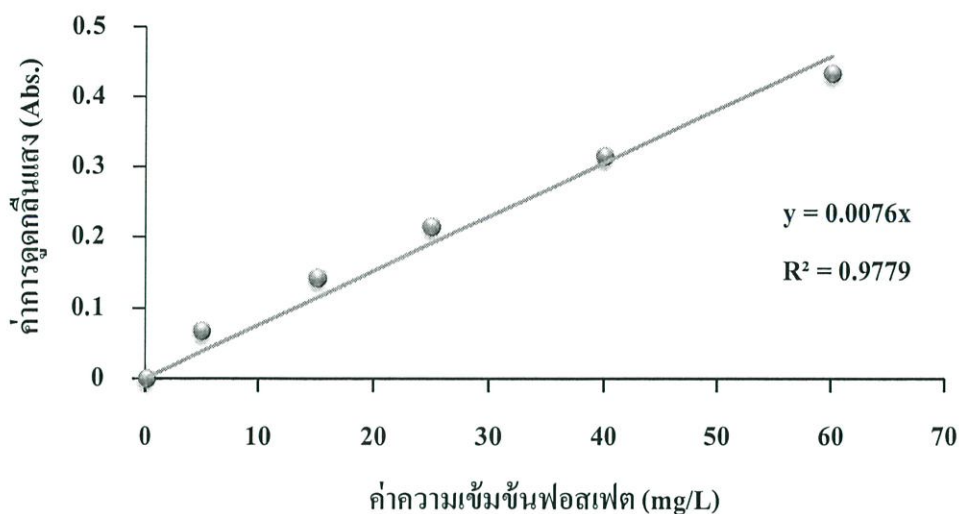
- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติม NaOH 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 17 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
- 6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2.5 ขั้นที่ 5 ฟอสฟอรัสที่ยึดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)

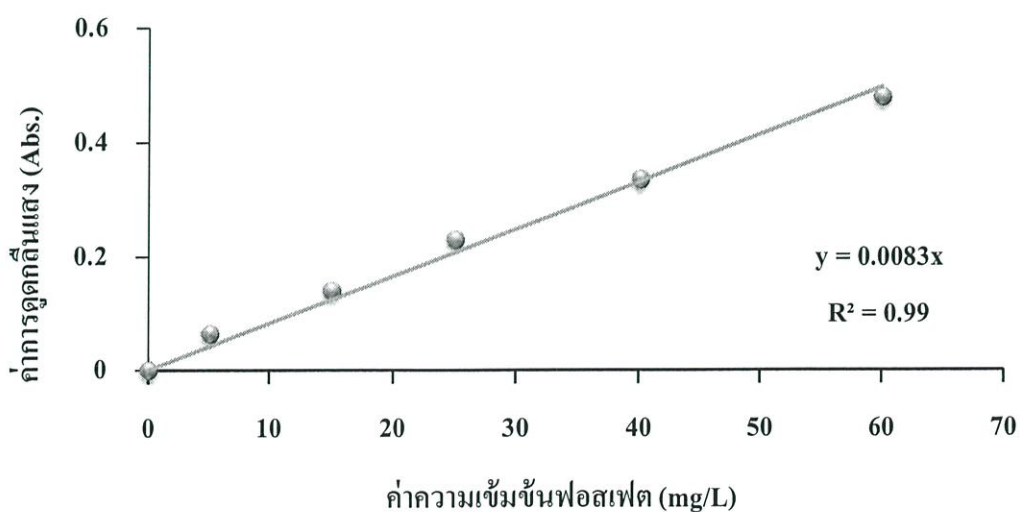
- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่ 4 มาเติม HCl 0.5 M 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4.) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต (OP)
- 5) วัดค่าแอมซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
- 6) นำตะกอนที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป



รูปที่ ข-6 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ข-2.6 ขั้นที่ 6 ฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)

- 1) นำตะกอนที่เหลือจากขั้นที่ 5 มาเผาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์ เติม 6 M HCl 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติกปิดฝาให้สนิท
- 2) นำไปเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
- 3) นำไปกรองด้วย syring filter ขนาด 0.45 ไมครอน โดยใช้ syring
- 4) นำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)
- 5) วัดค่าแอบซอร์บแนนซ์ โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร



รูปที่ ข-7 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองลักษณะเคมีของดินและน้ำ

ตาราง ก-1 ค่าพีเอชของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ครั้งที่	ค่าพีเอชก่อนผ่าน คอลัมน์	ค่าพีเอชหลังผ่านคอลัมน์		
		ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
1	7.31	8.04	8.34	8.33
2	7.27	8.07	8.29	8.33
3	7.31	8.04	8.33	8.34
เฉลี่ย	7.30±0.02	8.05±0.02	8.32±0.03	8.33±0.01

ตาราง ก-2 ค่าการนำไฟฟ้าของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ครั้งที่	ค่าการนำไฟฟ้า ก่อนผ่านคอลัมน์ (mS/cm)	ค่าการนำไฟฟ้าหลังผ่านคอลัมน์ (mS/cm)		
		ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
1	0.70	1.50	0.85	0.84
2	0.67	1.44	0.83	0.83
3	0.76	1.42	0.85	0.84
เฉลี่ย	0.71±0.05	1.45±0.04	0.84±0.01	0.84±0.01

ตาราง ก-3 ปริมาณซีโอดีของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ครั้งที่	ปริมาณซีโอดี ก่อนผ่าน คอลัมน์ (mgO ₂ /L)	ปริมาณซีโอดีหลังผ่านคอลัมน์ (mgO ₂ /L)		
		ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสม สารส้ม
1	144.00	112.00	128.00	112.00
2	128.00	144.00	96.00	48.00
3	144.00	112.00	96.00	16.00
เฉลี่ย	138.67±9.24	122.67±18.48	106.67±18.48	58.67±48.88

ตาราง ก-4 ปริมาณอโรฟอสเฟตของคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ครั้งที่	ปริมาณอโรฟอสเฟตก่อนผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ปริมาณอโรฟอสเฟตหลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)		
		ทราย	ดินตะกอน	ดินตะกอนผสมสารส้ม
1	8.136	1.328	0.019	-
2	8.184	1.328	0.013	0.006
3	8.688	1.368	0.019	0.010
เฉลี่ย	8.336±0.31	1.355±0.02	0.017±0.00	0.005±0.00

หมายเหตุ : ต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่องมือสามารถวัดได้

ตาราง ก-5 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินก่อนผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	% ความชื้น			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.0440	0.0519	0.0379	0.0446	0.01
ดินตะกอน	0.0400	0.0600	0.0520	0.0507	0.01
ดินตะกอนผสมสารส้ม	0.0759	0.0659	0.0540	0.0653	0.01

ตาราง ก-6 ค่าพีเอชของดินก่อนผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

อัตราส่วน ดิน : น้ำ	ค่าพีเอชของดินก่อน (1 : 5)			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	9.17	9.10	9.12	9.13	0.04
ดินตะกอน	6.77	6.72	6.74	6.74	0.03
ดินตะกอนผสมสารส้ม	6.67	6.72	6.76	6.72	0.05

ตาราง ก-7 ค่าพีเอชของดินหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=27)

อัตราส่วน ดิน : น้ำ		ค่าพีเอชของดินหลัง (1 : 5)				เฉลี่ย	S.D.
		1	2	3			
ทราย	0 - 5 ชม.	8.22	8.17	8.19	8.19	8.62	0.37
	11 15 ชม.	8.80	8.83	8.82	8.82		
	26 - 30 ชม.	8.90	8.85	8.77	8.84		
ดินตะกอน	0 - 5 ชม.	7.11	7.00	6.97	7.03	6.98	0.05
	11 15 ชม.	6.90	6.93	6.95	6.93		
	26 - 30 ชม.	6.99	6.97	6.96	6.97		
ดินตะกอนผสม สารส้ม	0 - 5 ชม.	7.00	7.02	7.00	7.01	6.87	0.17
	11 15 ชม.	6.72	6.67	6.65	6.68		
	26 - 30 ชม.	6.91	6.93	6.97	6.94		

ตาราง ก-8 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินก่อนผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100 g-soil) ดินก่อน			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.63	0.63	0.63	0.63	0.00
ดินตะกอน	14.29	14.29	14.08	14.22	0.12
ดินตะกอนผสมสารส้ม	17.66	17.66	17.87	17.73	0.12

ตาราง ก-9 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100 g-soil) ดินหลัง			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.84	1.05	1.05	0.98	0.12
ดินตะกอน	17.23	17.23	17.02	17.16	0.12
ดินตะกอนผสมสารส้ม	19.34	19.34	19.13	19.27	0.12

ตาราง ก-10 ปริมาณสารอินทรีย์ในดินก่อนผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	%OC ดินก่อน			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00
ดินตะกอน	2.03	1.97	2.00	2.00	0.03
ดินตะกอนผสมสารส้ม	2.31	2.26	2.31	2.29	0.03

ตาราง ก-11 ปริมาณสารอินทรีย์ในดินหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	%OC ดินหลัง			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
ดินตะกอน	2.49	2.45	2.49	2.48	0.02
ดินตะกอนผสมสารส้ม	2.60	2.60	2.60	2.60	0.00

ตาราง ก-12 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสม
สารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	%OM ดินก่อน			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.30	0.31	0.31	0.31	0.00
ดินตะกอน	3.50	3.39	3.44	3.44	0.05
ดินตะกอนผสมสารส้ม	3.99	3.89	3.99	3.96	0.06

ตาราง ก-13 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินหลังผ่านคอลัมน์ทราย ดินตะกอนและดินตะกอนผสม
สารส้ม (N=9)

ตัวอย่างดิน	%OM ดินหลัง			เฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ทราย	0.62	0.62	0.62	0.62	0.00
ดินตะกอน	4.29	4.23	4.29	4.27	0.04
ดินตะกอนผสมสารส้ม	4.48	4.49	4.48	4.49	0.00

ภาคผนวก ง
ผลการสกัดแบบลำดับขั้น

ตาราง ง-1 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น

รูปฟอร์ม ของ ฟอสฟอรัส	ระดับความลึก		ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน
1.รูปฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)	ทราย	0 - 5 ซม.	1	*	*	*	$y = 0.0069x$
			2	0.5068	50	0.201	
			3	0.5081	50	0.150	
			เฉลี่ย	0.5075	50	0.177	
			S.D			0.04	
		11-15 ซม.	1	0.5062	50	0.106	
			2	0.5040	50	0.105	
			3	0.5026	50	0.105	
			เฉลี่ย	0.5043	50	0.105	
			S.D			0.00	
		26 - 30 ซม.	1	0.5037	50	0.086	
			2	0.5087	50	0.085	
			3	0.5020	50	0.090	
			เฉลี่ย	0.5048	50	0.088	
			S.D			0.00	

หมายเหตุ : * ไม่มีผลการทดลอง, Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-1 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์ม ของ ฟอสฟอรัส	ระดับความลึก		ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน
1.รูปฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	0.5036	50	0.071	$y = 0.0069x$
			2	0.5015	50	0.069	
			3	0.5039	50	0.064	
			เฉลี่ย	0.5030	50	0.069	
			S.D			0.00	
		11-15 ซม.	1	0.5057	50	0.007	
			2	0.5066	50	0.009	
			3	0.5055	50	0.009	
			เฉลี่ย	0.5059	50	0.009	
			S.D			0.00	
		26 - 30 ซม.	1	0.5047	50	0.007	
			2	*	*	*	
			3	0.5030	50	0.007	
			เฉลี่ย	0.5039	50	0.007	
			S.D			0.00	

หมายเหตุ : * ไม่มีผลการทดลอง , Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-1 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์ม ของ ฟอสฟอรัส	ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
1.รูปฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ (Loosely Sorbed P)	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	0.5073	50	0.035	y = 0.0069x
			2	0.5073	50	0.035	
			3	0.5046	50	0.044	
			เฉลี่ย	0.5064	50	0.038	
			S.D			0.00	
		11-15 ซม.	1	*	*	*	
			2	0.5060	50	0.006	
			3	0.5051	50	0.006	
			เฉลี่ย	0.5056	50	0.006	
			S.D			0.00	
		26 - 30 ซม.	1	*	*	*	
			2	0.5081	50	0.007	
			3	0.5035	50	0.006	
			เฉลี่ย	0.5058	50	0.007	
			S.D			0.00	

หมายเหตุ : * ไม่มีผลการทดลอง, Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น

รูปฟอร์ม ของ ฟอสฟอรัส	ระดับความลึก		ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน
2.รูปลูกอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยน ไอออนได้	ทราย	0 - 5 ซม.	1	2.5053	42.20	1.967	y = 0.0072x
			2	2.5065	40.50	2.145	
			3	2.5059	42.00	1.908	
			เฉลี่ย	2.5059	41.57	2.005	
			S.D			0.12	
		11-15 ซม.	1	2.5034	41.20	1.913	
			2	2.5052	40.20	1.958	
			3	2.5042	40.50	1.988	
			เฉลี่ย	2.5043	40.63	1.953	
			S.D			0.04	
		26 - 30 ซม.	1	2.5083	42.20	2.039	
			2	2.5036	40.50	1.993	
			3	2.5065	39.80	1.777	
			เฉลี่ย	2.5061	40.10	1.974	
			S.D			0.14	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
2.รูปฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ออนได้	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	2.5021	40.00	3.514	y = 0.0072x
			2	2.5013	35.40	3.526	
			3	2.5029	38.50	2.963	
			เฉลี่ย	2.5021	37.97	3.331	
			S.D			0.32	
		11-15 ซม.	1	2.5030	40.40	1.334	
			2	2.5049	39.30	1.387	
			3	2.5057	39.80	1.570	
			เฉลี่ย	2.5045	39.83	1.430	
			S.D			0.12	
		26 - 30 ซม.	1	2.5021	38.30	1.496	
			2	2.5042	40.00	1.471	
			3	2.5033	37.60	1.402	
			เฉลี่ย	2.5032	38.63	1.456	
			S.D			0.05	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
2.รูปฟอสฟอรัสอินทรีย์และอินทรีย์ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ออนได้	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	2.5042	39.60	4.309	y = 0.0072x
			2	2.5042	40.30	4.206	
			3	2.5059	39.30	4.205	
			เฉลี่ย	2.5048	39.73	4.258	
			S.D			0.06	
		11-15 ซม.	1	2.5049	40.00	1.585	
			2	2.5052	37.20	1.882	
			3	2.5016	39.30	1.531	
			เฉลี่ย	2.5039	38.83	1.663	
			S.D			0.19	
		26 - 30 ซม.	1	2.5047	30.80	0.992	
			2	2.5054	38.30	1.08	
			3	2.5031	22.60	1.787	
			เฉลี่ย	2.5044	30.57	1.224	
			S.D			0.44	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น

รูปฟอร์ม ของ ฟอสฟอรัส	ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPa	ทราย	0 - 5 ซม.	1	2.5015	30.00	0.834	y=0.0089x
			2	2.5012	30.00	0.798	
			3	2.5156	30.00	0.837	
			เฉลี่ย	2.5061	30.00	0.824	
			S.D			0.02	
		11-15 ซม.	1	2.5060	30.00	0.510	
			2	2.5087	30.00	0.479	
			3	2.5001	30.00	0.407	
			เฉลี่ย	2.5049	30.00	0.465	
			S.D			0.05	
		26 - 30 ซม.	1	2.5061	30.00	0.456	
			2	2.5091	30.00	0.397	
			3	2.5024	30.00	0.432	
			เฉลี่ย	2.5059	30.00	0.428	
			S.D			0.03	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น(ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPa	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	2.5087	30.00	1.706	$y = 0.0089x$
			2	2.5093	30.00	1.600	
			3	2.5104	30.00	1.517	
			เฉลี่ย	2.5095	30.00	1.607	
			S.D			0.09	
		11-15 ซม.	1	2.5036	30.00	0.435	
			2	2.5079	30.00	0.387	
			3	2.5061	30.00	0.399	
			เฉลี่ย	2.5059	30.00	0.407	
			S.D			0.02	
		26 - 30 ซม.	1	2.5124	30.00	0.383	
			2	2.5092	30.00	0.375	
			3	2.5043	30.00	0.359	
			เฉลี่ย	2.5086	30.00	0.373	
			S.D			0.01	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น(ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPa	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	2.5049	30.00	1.932	y = 0.0089x
			2	2.5028	30.00	2.058	
			3	2.5033	30.00	2.474	
			เฉลี่ย	2.5037	30.00	2.155	
			S.D			0.28	
		11-15 ซม.	1	2.5064	30.00	0.350	
			2	2.5060	30.00	0.376	
			3	2.5004	30.00	0.364	
			เฉลี่ย	2.5043	30.00	1.663	
			S.D			0.01	
		26 - 30 ซม.	1	2.5011	30.00	0.572	
			2	2.5035	30.00	0.579	
			3	2.5017	30.00	0.584	
			เฉลี่ย	2.5021	30.00	0.579	
			S.D			0.01	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPb	ทราย	0 - 5 ซม.	1	2.5034	30.00	1.083	$y = 0.0084x$
			2	2.5032	30.00	1.386	
			3	2.5047	30.00	1.236	
			เฉลี่ย	2.5038	30.00	1.236	
			S.D			0.00	
		11-15 ซม.	1	2.5013	30.00	0.662	
			2	2.5016	30.00	0.638	
			3	2.5034	30.00	0.670	
			เฉลี่ย	2.5021	30.00	0.657	
			S.D			0.02	
		26 - 30 ซม.	1	2.5028	30.00	0.619	
			2	2.5030	30.00	0.582	
			3	2.5004	30.00	0.539	
			เฉลี่ย	2.5021	30.00	0.579	
			S.D			0.04	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น(ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPb	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	2.5025	30.00	2.142	$y = 0.0084x$
			2	2.5010	30.00	2.129	
			3	2.5044	30.00	1.737	
			เฉลี่ย	2.5026	30.00	2.003	
			S.D			0.23	
		11-15 ซม.	1	2.5044	30.00	0.496	
			2	2.5037	30.00	0.469	
			3	2.5010	30.00	0.531	
			เฉลี่ย	2.5030	30.00	0.449	
			S.D			0.03	
		26 - 30 ซม.	1	2.5009	30.00	0.812	
			2	2.5047	30.00	0.995	
			3	2.5023	30.00	0.920	
			เฉลี่ย	2.5042	30.00	0.909	
			S.D			0.09	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น(ต่อ)

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
3.รูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน (Microbial P) TPb	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	2.5039	30.00	2.880	y = 0.0084x
			2	2.5023	30.00	2.708	
			3	2.5016	30.00	2.469	
			เฉลี่ย	2.5026	30.00	2.687	
			S.D			0.21	
		11-15 ซม.	1	2.5010	30.00	0.603	
			2	2.5019	30.00	0.617	
			3	2.5012	30.00	0.665	
			เฉลี่ย	2.5014	30.00	0.627	
			S.D			0.03	
		26 - 30 ซม.	1	2.5048	30.00	0.611	
			2	2.5016	30.00	0.595	
			3	2.5009	30.00	0.595	
			เฉลี่ย	2.5024	30.00	0.601	
			S.D			0.01	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
4.รูปฟอสฟอรัสที่ติดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน	ทราย	0 - 5 ซม.	1	0.9980	35.00	0.239	y = 0.0078x
			2	0.9450	41.60	0.136	
			3	0.9482	42.80	0.136	
			เฉลี่ย	0.9637	39.80	0.166	
			S.D			0.06	
		11-15 ซม.	1	0.7880	42.40	0.101	
			2	0.8175	41.50	0.100	
			3	0.8159	41.90	0.098	
			เฉลี่ย	0.8071	41.93	0.099	
			S.D			0.00	
		26 - 30 ซม.	1	1.0258	32.40	0.145	
			2	1.0081	40.00	0.131	
			3	0.9899	43.20	0.119	
			เฉลี่ย	1.0079	38.53	0.13	
			S.D			0.01	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส	ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน	
4.รูปฟอสฟอรัสที่ติดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Fe + Al bound P)	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	1.2585	41.10	3.154	y = 0.0078x
			2	1.2623	42.40	3.048	
			3	1.3845	42.40	3.124	
			เฉลี่ย	1.3018	41.97	3.109	
			S.D			0.05	
		11-15 ซม.	1	1.1597	40.50	3.137	
			2	1.2301	42.10	2.912	
			3	1.2935	42.00	2.866	
			เฉลี่ย	1.2278	41.53	2.969	
			S.D			0.15	
		26 - 30 ซม.	1	1.2519	42.20	1.827	
			2	1.4549	41.30	2.747	
			3	1.1537	40.10	2.952	
			เฉลี่ย	1.2868	41.20	2.500	
			S.D			0.60	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
4.รูปฟอสฟอรัสที่สกัดกับเหล็กและอลูมิเนียมในดิน (Fe + Al bound P)	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	1.0042	26.00	6.812	y = 0.0078x
			2	1.0566	41.70	3.622	
			3	0.9848	41.00	3.303	
			เฉลี่ย	1.0152	36.23	4.265	
			S.D			1.94	
		11-15 ซม.	1	1.0804	42.00	3.193	
			2	1.0625	42.60	3.146	
			3	1.0196	40.90	3.302	
			เฉลี่ย	1.0542	41.83	3.213	
			S.D			0.08	
		26 - 30 ซม.	1	0.9201	39.60	3.221	
			2	0.9690	41.70	3.073	
			3	0.9554	42.00	2.987	
			เฉลี่ย	0.9482	41.10	3.091	
			S.D			0.12	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
5.รูปฟอสฟอรัสที่ติดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)	ทราย	0 - 5 ซม.	1	0.8725	43.10	0.499	$y = 0.0076x$
			2	0.3184	43.80	0.402	
			3	0.6489	43.20	0.541	
			เฉลี่ย	0.6133	43.37	0.480	
			S.D			0.07	
		11-15 ซม.	1	0.8685	44.90	0.548	
			2	0.4784	45.70	0.548	
			3	1.0138	45.60	0.571	
			เฉลี่ย	0.7869	45.40	0.556	
			S.D			0.01	
		26 - 30 ซม.	1	0.3810	45.10	0.339	
			2	0.3863	45.50	0.275	
			3	0.5280	45.90	0.299	
			เฉลี่ย	0.4318	45.50	0.304	
			S.D			0.03	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
5.รูปฟอสฟอรัสที่ติดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	0.9640	38.40	2.968	y = 0.0076x
			2	0.6463	42.10	2.733	
			3	0.5432	40.00	3.148	
			เฉลี่ย	0.7178	40.17	2.947	
			S.D			0.21	
		11-15 ซม.	1	0.5857	45.20	0.642	
			2	0.8837	45.50	0.657	
			3	0.5492	45.70	0.691	
			เฉลี่ย	0.6729	45.47	0.663	
			S.D			0.03	
		26 - 30 ซม.	1	0.8768	41.10	0.792	
			2	1.1376	41.50	0.777	
			3	0.7443	40.90	0.875	
			เฉลี่ย	0.9196	41.17	0.815	
			S.D			0.05	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
5.รูปฟอสฟอรัสที่สกัดกับแคลเซียมและแมกนีเซียมในดิน (Ca + Mg bound P)	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	1.1014	41.10	2.466	y = 0.0076x
			2	0.7815	41.50	1.874	
			3	0.4208	41.60	1.991	
			เฉลี่ย	0.7679	41.40	2.108	
			S.D			0.31	
		11-15 ซม.	1	0.6958	41.20	1.207	
			2	0.5037	43.50	1.087	
			3	0.9792	43.30	1.241	
			เฉลี่ย	0.7263	42.67	1.178	
			S.D			0.08	
		26 - 30 ซม.	1	0.6224	43.90	0.913	
			2	0.5603	43.60	1.006	
			3	0.5860	43.80	0.946	
			เฉลี่ย	0.5836	43.77	0.954	
			S.D			0.05	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
6. รูปฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)	ทราย	0 - 5 ซม.	1	0.4294	30.00	0.257	y = 0.0083x
			2	0.4293	30.00	0.243	
			3	0.4216	30.00	0.274	
			เฉลี่ย	0.4268	30.00	0.258	
			S.D			0.02	
		11-15 ซม.	1	0.5632	30.00	0.402	
			2	0.5665	30.00	0.416	
			3	0.5618	30.00	0.372	
			เฉลี่ย	0.5635	30.00	0.366	
			S.D			0.02	
		26 - 30 ซม.	1	0.2513	30.00	0.240	
			2	0.2514	30.00	0.223	
			3	0.2527	30.00	0.220	
			เฉลี่ย	0.2518	30.00	0.228	
			S.D			0.01	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของฟอสฟอรัส		ระดับความลึก	ครั้งที่	น้ำหนักดิน(g)	ปริมาตรสารละลาย (ml)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/kg-soil)	กราฟมาตรฐาน
6. รูปฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)	ดินตะกอน	0 - 5 ซม.	1	0.3349	30.00	0.798	y = 0.0083x
			2	0.3321	30.00	0.696	
			3	0.3337	30.00	0.683	
			เฉลี่ย	0.3336	30.00	0.727	
			S.D			0.06	
		11-15 ซม.	1	0.2847	30.00	0.531	
			2	0.2817	30.00	0.483	
			3	0.2857	30.00	0.480	
			เฉลี่ย	0.284	30.00	0.498	
			S.D			0.03	
		26 - 30 ซม.	1	0.4617	30.00	0.585	
			2	0.4661	30.00	0.612	
			3	0.4672	30.00	0.636	
			เฉลี่ย	0.465	30.00	0.611	
			S.D			0.03	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับชั้น (ต่อ)

รูปฟอร์มของ ฟอสฟอรัส	ระดับ ความลึก	ครั้งที่	น้ำหนัก ดิน(g)	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความ เข้มข้น ของ ฟอสฟอรัส (mg/kg- soil)	กราฟ มาตรฐาน	
6. รูปฟอสฟอรัสที่ตกค้างในดิน (Residual P)	ดินตะกอนผสมสารส้ม	0 - 5 ซม.	1	0.3554	30	0.619	y = 0.0083x
			2	0.3518	30	0.625	
			3	0.3586	30	0.646	
			เฉลี่ย	0.3553	30	0.63	
			S.D			0.01	
		11-15 ซม.	1	0.438	30	0.588	
			2	0.434	30	0.585	
			3	0.4313	30	0.595	
			เฉลี่ย	0.4344	30	0.589	
			S.D			0.01	
		26 - 30 ซม.	1	0.3336	30	0.514	
			2	0.3309	30	0.514	
			3	0.3193	30	0.571	
			เฉลี่ย	0.3297	30	0.523	
			S.D			0.03	

Y=Abs. , X = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ลิตร)

ตาราง ง-7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

รูปฟอร์มฟอสฟอรัส (mg/kg)	ดินทราย			ดินตะกอน			ดินตะกอนผสมสารส้ม		
	0-5 ซม.	11-15 ซม.	26-30 ซม.	0-5 ซม.	11-15 ซม.	26-30 ซม.	0-5 ซม.	11-15 ซม.	26-30 ซม.
KCl extractable P	0.177	0.105	0.088	0.069	0.009	0.007	0.038	0.006	0.007
Labile Pi	2.005	1.953	1.974	3.331	1.430	1.456	4.258	1.663	1.224
TP (a)	0.824	0.465	0.428	1.607	0.407	0.373	2.155	0.364	0.579
TP (b)	1.236	0.657	0.579	2.003	0.449	0.909	2.687	0.627	0.601
Labile Po	-0.769	-1.296	-1.395	-1.328	-0.981	-0.547	-1.571	-1.036	-0.623
Microbial - P	0.412	0.192	0.151	0.396	0.042	0.536	0.532	0.263	0.022
Fe+Al-bound P	0.166	0.099	0.130	3.109	2.969	2.500	4.265	3.213	3.091
Humic/Fulvic - P	-0.222	-0.220	-0.076	-2.220	-0.165	-0.204	-1.478	-0.589	-0.431
Ca+Mg-bound P (Pi)	0.480	0.556	0.304	2.947	0.663	0.815	2.108	1.178	0.954
Non-Labile Pi (TP)	0.258	0.336	0.228	0.727	0.498	0.611	0.630	0.589	0.523

หมายเหตุ : Labile Po = TPb - Labile Pi

Microbial = TPb - TPa

Humic/Fulv-P = TP - Pi

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ จ-1 ปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ดูดซับแบบหลวมๆ ที่พบในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยสถิติ One-Way ANOVA

		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
LooselysorbedP1	Between Groups	.001	1	.001	67.500	.001
	Within Groups	.000	4	.000		
	Total	.001	5			
LooselysorbedP2	Between Groups	.000	1	.000	12.250	.025
	Within Groups	.000	4	.000		
	Total	.000	5			
LooselysorbedP3	Between Groups	.000	1	.000	1.000	.374
	Within Groups	.000	4	.000		
	Total	.000	5			

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05

ตารางที่ จ-2 ปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช ที่พบในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยสถิติ One-Way ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Readilycycledoravailabletoplants1	Between Groups	1.690	1	1.690	6.648	.061
	Within Groups	1.017	4	.254		
	Total	2.706	5			
Readilycycledoravailabletoplants2	Between Groups	.251	1	.251	9.411	.037
	Within Groups	.107	4	.027		
	Total	.358	5			
Readilycycledoravailabletoplants3	Between Groups	.703	1	.703	7.462	.052
	Within Groups	.377	4	.094		
	Total	1.080	5			

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05

ตารางที่ จ.3 ปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยาก ที่พบในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยสถิติ One-Way ANOVA

		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Noteasilydecomposed1	Between Groups	.430	1	.430	.170	.701
	Within Groups	10.125	4	2.531		
	Total	10.555	5			
Noteasilydecomposed2	Between Groups	1.080	1	1.080	43.894	.003
	Within Groups	.098	4	.025		
	Total	1.178	5			
Noteasilydecomposed3	Between Groups	.107	1	.107	6.540	.063
	Within Groups	.065	4	.016		
	Total	.172	5			

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05

ตารางที่ จ-4 เปรียบเทียบปริมาณรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่ย่อยสลายได้ยากและรูปฟอร์มฟอสฟอรัสที่สลายตัวได้ง่ายหรือเป็นประโยชน์ต่อพืช ที่พบในดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ด้วยสถิติ One-Way ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Noteasilydecomposedand Readilycycledoravailabletoplant1	Between Groups	3.832	1	3.832	1.054	.363
	Within Groups	14.540	4	3.635		
	Total	18.372	5			
Noteasilydecomposedand Readilycycledoravailabletoplant2	Between Groups	2.371	1	2.371	242.513	.000
	Within Groups	.039	4	.010		
	Total	2.410	5			
Noteasilydecomposedand Readilycycledoravailabletoplant3	Between Groups	.262	1	.262	3.784	.124
	Within Groups	.277	4	.069		
	Total	.538	5			

หมายเหตุ : กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ เท่ากับ 0.05