



การบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการบำบัดโดยดิน  
Phosphorus Removal from Palm Oil Mill Effluent Using Land Treatment

เปรมยุดา กาญจนจันทร์  
Premyuda Kanjanajan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการบำบัดโดยดิน  
Phosphorus Removal from Palm Oil Mill Effluent Using Land Treatment

เปรมยุดา กาญจนจันทร์  
Premyuda Kanjanajan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการบำบัดโดยดิน

ผู้เขียน นางสาวเปรมยุดา กาญจนจันทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบูลย์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบูลย์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนพล เพ็ญรัตน์)

.....กรรมการ  
(ดร.วิสา คงนคร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม

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

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนไพบูลย์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....  
(นางสาวเปรมยุดา กาญจนจันทร์)  
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวเปรมยุดา กาญจนจันทร์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการบำบัดโดยดิน
ผู้เขียน	นางสาวเปรมยุดา กาญจนจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้วิธีบำบัดโดยดิน (land treatment system) แบบระบบอัตราไหลช้า (slow-rate irrigation) ทำการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางเลือกในการนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดิน และน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยสร้างชุดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และแบ่งการทดลองเป็น 2 รูปแบบการทดลอง คือการทดลองรูปแบบที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากฟอสฟอรัสควบคุมพีเอชที่ 5, 7 และ 9 ที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2, 1 และ 0.5 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ ผลปรากฏว่าที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 2 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ ที่พีเอช 7 เป็นสถานะที่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ประสิทธิภาพสูงสุด การทดลองรูปแบบที่ 2 ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 2 เซนติเมตรต่อสัปดาห์ ที่พีเอช 7 พบว่าดินสามารถลดฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำจาก 1.33 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 91 เมื่อศึกษาลักษณะของดินก่อนการทดลอง และหลังการทดลองพบว่าการใช้น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มรดดินไม่ทำให้เนื้อดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม พีเอชของดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.05 ทำให้ดินมีค่าเหล็กฟอสเฟต และอะลูมิเนียมฟอสเฟต สูงกว่าแคลเซียมฟอสเฟต และมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) มากกว่า 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก จึงกล่าวได้ว่าการบำบัดโดยดินเป็นกระบวนการทางธรรมชาติไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง และเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัส

**Thesis Title** Phosphorus Removal from Palm Oil Mill Effluent Using Land Treatment  
**Author** Miss Premyuda Kanjanajan  
**Major Program** Environmental Engineering  
**Academic Year** 2016

### ABSTRACT

This research aims to study phosphorus removal efficiency from palm oil mill effluent using land treatment by slow-rate irrigation which will be an alternative to reuse palm oil mill effluent using land treatment. Soil samples and palm oil mill effluent from palm oil mill factory were used for this study. This study was conducted in soil column for lab scale with 2 experiments. The first experiment used synthesis wastewater at different pH 5, 7 and 9 with various hydraulic loading rates 3, 2, 1 and 0.5 cm/week, respectively. The result showed that hydraulic loading rate 2 cm/week with pH 7 was optimum condition to remove phosphorus. The second experiment used palm oil mill effluent at hydraulic loading rate 2 cm/week with pH 7. The result showed that soil can remove phosphorus in wastewater. The residual phosphorus was reduced from 1.33 mg/L to 0.12 mg/L (91%). Characteristic of soil before and after experiments showed that there was no change of soil texture. pH 6.05 of soil make the soil valuable of Fe-phosphate and Al-phosphate which was higher than Ca-phosphate and available phosphorus was 25 mg/kg that is suitable for agriculture. Therefore, land treatment is a natural process which is suitable for phosphorus removal.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยเพราะได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์หลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชน์ไพบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ ชี้แนะแนวทาง และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และขอขอบพระคุณ ดร. วัสสา คงนคร สำหรับคำแนะนำในแนวทางทั้งทางวิชาการ และการดำรงชีวิตตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2558 ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คุณอมรรัตน์ หวลกะสิน และคุณเพ็ญนภา ทองประไพ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นอย่างมาก เจ้าหน้าที่ศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติและศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำ และชี้แนะในการวิเคราะห์ค่าต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณครอบครัว พ่อ แม่ ย่า น้อง และญาติๆ ของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดี ให้เสมอ ทั้งคอยช่วยเหลือและสนับสนุนการให้การศึกษาระดับปริญญาโทสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคนสำหรับการให้คำปรึกษา คอยให้กำลังใจตลอดการทำการทดลอง และการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกความช่วยเหลือจากทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงโดยตรง ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด จึงขอกล่าวขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เปรมยุดา กาญจนจันทร์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญกราฟ	(13)
สารบัญภาพ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปาล์มน้ำมัน	4
2.2 อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม	5
2.2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	5
2.2.2 ปริมาณและลักษณะน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	9
2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	11
2.2.4 ปัญหาสิ่งแวดล้อมในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	12
2.3 ระบบบำบัดโดยดิน (land treatment systems)	14
2.3.1 วิธีการบำบัดโดยดิน	15
2.3.2 วัตถุประสงค์ของการบำบัดโดยดิน	22
2.3.3 กลไกการบำบัดโดยดิน	23
2.3.4 คุณลักษณะของดิน	25
2.3.5 วิธีเก็บตัวอย่างดิน	36
2.4 ฟอสฟอรัส (phosphorus)	37
2.4.1 ผลกระทบฟอสฟอรัสต่อแหล่งน้ำ	38
2.4.2 ชนิดและปริมาณฟอสฟอรัสในดิน	39
2.4.3 ฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพของดิน	42
2.4.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสในดิน (P transformation process in soils)	42
2.4.5 การตรึงฟอสฟอรัสในดิน (phosphate retention or fixation in soils)	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงฟอสฟอรัสในดิน	45
2.4.7 แคลเซียมในดิน	48
2.5 ความซึมน้ำของดิน (Permeability)	50
2.6 การดูดซับ (Adsorption)	51
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	52
2.6.2 สมดุลการดูดซับ	53
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	60
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	60
3.2 วัสดุและอุปกรณ์	63
3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน	63
3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ	63
3.2.3 สร้างชุดทดลอง	63
3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์พารามิเตอร์	64
3.3 การเก็บตัวอย่าง	66
3.4 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์	66
3.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	69
4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำ ของการทดลองรูปแบบที่ 1	69
4.1.1 คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	69
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อนการทดลอง	69
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 1	70
4.1.4 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของน้ำออกจากคอลัมน์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	71
4.1.5 ค่า Orthophosphate ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 1	74
4.2 ผลการวิเคราะห์ดิน ของการทดลองรูปแบบที่ 1	77
4.2.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน (soil texture) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	78
4.2.2 วิเคราะห์หาค่าอัตราการซึม (permeability, k) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	78
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินทั้งก่อน และหลังชุดทดลองรูปแบบที่ 1	79
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, และ TP ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	81

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	82
4.3 ผลการวิเคราะห์น้ำ ของการทดลองรูปแบบที่ 2	84
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 2	84
4.3.2 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของน้ำออกจากคอลัมน์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	85
4.3.3 ค่า Orthophosphate ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 2	86
4.4 ผลการวิเคราะห์ดิน ของการทดลองรูปแบบที่ 2	87
4.4.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน (soil texture) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	88
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราการซึม (permeability, k) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	88
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินทั้งก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	89
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, และ TP ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	90
4.4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2	91
4.5 สมดุลฟอสฟอรัสในระบบ	92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	97
5.1 สรุปผลการทดลอง	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก	108
ผู้เขียน	119

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจากหม้อฆ่าเชื้อ เครื่องแยก decanter หรือ separator และบ่อรวบรวมน้ำเสีย	10
ตารางที่ 2.2 คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นโรงงานศึกษา	12
ตารางที่ 2.3 วัตถุประสงค์ของระบบบำบัดโดยดิน	22
ตารางที่ 2.4 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยดิน	25
ตารางที่ 2.5 ระดับการประเมินค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน	31
ตารางที่ 2.6 การแปลความหมายค่า pH ของดิน	33
ตารางที่ 2.7 รูปและปริมาณของอินทรีย์ฟอสเฟตในดิน	40
ตารางที่ 2.8 ปริมาณของอินทรีย์ฟอสเฟตในดินแร่และดินอินทรีย์ ในดินชนิดต่างๆ	41
ตารางที่ 2.9 ระดับการประเมินค่าฟอสฟอรัสในดิน	46
ตารางที่ 2.10 ระดับของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (Available P)	47
ตารางที่ 2.11 การแบ่งชั้นของค่าอัตราการซึม (permeability : ค่า k )	50
ตารางที่ 2.12 ค่าทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึม	51
ตารางที่ 2.13 สมบัติของการดูดซับทางเคมี และทางกายภาพของดิน	52
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	61
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างดิน	61
ตารางที่ 3.3 คอลัมน์ที่ทำการรดน้ำวันละครั้ง (การทดลองรูปแบบที่ 1 รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์)	62
ตารางที่ 3.4 คอลัมน์ที่ทำการรดน้ำวันละครั้ง (การทดลองรูปแบบที่ 2 รดด้วยน้ำทิ้งโรงงาน- สกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราการระบรูทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7)	62
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนการทดลอง	69
ตารางที่ 4.2 ค่า pH ของน้ำที่เข้า-ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	70
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	73
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	77
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เนื้อดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	78
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึมที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	79
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	80
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ของดินก่อน และหลังที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1	81

### สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดิน ก่อน และหลังที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองที่ 1	82
ตารางที่ 4.10 ค่า pH ของน้ำที่เข้า-ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	84
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน ที่รดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลอง รูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	88
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึม ที่รดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	89
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดิน ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	90
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ของดินก่อน และหลังที่รดด้วย น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	91
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	92
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบสมมูล TP ในน้ำทั้งหมด โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และใช้น้ำทิ้ง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	93
ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมมูล TP ในดินทั้งหมด โดยใช้ดินที่ผ่านการรดน้ำเสียสังเคราะห์ และดินที่ผ่านการรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7	94
ตารางที่ ก-1 วันที่เก็บตัวอย่างดิน และน้ำทิ้งจากโรงงานบริษัทเอเชียน้ำมันปาล์ม	111
ตารางที่ ข-1 ค่าเนื้อดิน (soil texture)	113
ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ค่าเหล็ก, อะลูมิเนียม, และแคลเซียม ของน้ำหลังการทดลอง	116

## สารบัญญกราฟ

	หน้า
กราฟที่ 4.1 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 5	71
กราฟที่ 4.2 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 7	72
กราฟที่ 4.3 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 9	73
กราฟที่ 4.4 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 5	75
กราฟที่ 4.5 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 7	75
กราฟที่ 4.6 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 9	76
กราฟที่ 4.7 ค่า TP ของชุดควบคุมที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2	85
กราฟที่ 4.8 ค่า TP ของน้ำทิ้งที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2	86
กราฟที่ 4.9 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2	86
กราฟที่ 4.10 ค่า orthophosphate ของน้ำทิ้งที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2	87
กราฟที่ ค-1 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 5	114
กราฟที่ ค-2 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 7	114
กราฟที่ ค-3 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 9	115
กราฟที่ ค-4 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2	115
กราฟที่ ค-5 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสที่ใช้ในการวิเคราะห์	117
กราฟที่ ค-6 กราฟมาตรฐานของเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์	117

## สารบัญญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สัตส่วนพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันของไทย	5
ภาพที่ 2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบไม่ใช้น้ำ	6
ภาพที่ 2.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำ ที่ใช้เครื่อง decanter	7
ภาพที่ 2.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำ ที่ใช้เครื่อง separator	8
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาวะบรรทุทางชลศาสตร์ของน้ำ ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ	16
ภาพที่ 2.6 Slow Rate System	17
ภาพที่ 2.7 การเดินทางของน้ำเสียระบบ slow-rate system	18
ภาพที่ 2.8 Rapid Infiltration	19
ภาพที่ 2.9 เส้นทางการเดินทางของน้ำเสียระบบไหลซึมเร็ว	20
ภาพที่ 2.10 Overland Flow system	21
ภาพที่ 2.11 เส้นทางการเดินทางของน้ำเสียระบบน้ำไหลนอง	21
ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบของดินโดยปริมาตรที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก	28
ภาพที่ 2.13 สัตส่วนการกระจายตัวของเนื้อดิน (soil textural triangle)	29
ภาพที่ 2.14 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน	37
ภาพที่ 2.15 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับพีเอชต่างๆ	38
ภาพที่ 2.16 วงจรฟอสฟอรัสในดิน (P cycle in soil)	39
ภาพที่ 2.17 ปัจจัยและกระบวนการที่สำคัญต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	48
ภาพที่ 2.18 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน	54
ภาพที่ 2.19 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC	55
ภาพที่ 3.1 ชุดคอลัมน์ทดลอง	63
ภาพที่ 3.2 ชุดทดลอง: รูปด้านหน้าของชุดทดลอง	65
ภาพที่ 3.3 ชุดทดลอง: ด้านตัดขวางอุปกรณ์	65
ภาพที่ 4.1 สมดุลฟอสฟอรัสในระบบ	93
ภาพที่ ก-1 การเก็บตัวอย่างดิน	109
ภาพที่ ก-2 การเก็บตัวอย่างดิน	109
ภาพที่ ก-3 การเตรียมดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง	110
ภาพที่ ก-4 การเตรียมดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง	110
ภาพที่ ก-5 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อใช้ในการทดลอง	111

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ในปัจจุบันปัญหาวิกฤตการณ์ทางพลังงานที่หลายประเทศประสบอยู่ส่งผลกระทบต่อภาวะเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศในระดับมหภาค รัฐบาลได้มีแนวนโยบายในการลดและประหยัดการใช้พลังงานในทุกภาคส่วน การผลิตพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ไบโอดีเซล ก๊าซโซลาร์ และก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ลงทุนต่ำ วิธีการเหล่านี้นอกจากจะได้พลังงานมาใช้แล้วยังเป็นการบำบัดของเสีย ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปด้วยพร้อมๆ กัน ซึ่งปาล์มน้ำมันถือเป็นอีกแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งด้วย และเนื่องจากภาคใต้เองนิยมปลูกปาล์มน้ำมันกันมาก และยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญไม่แพ้ยางพาราและมีพื้นที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมากเป็นอันดับ 3 ของทวีปเอเชีย ปาล์มน้ำมันเป็นไม้ยืนต้น มีอายุยืน ชอบอากาศชุ่มชื้น ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ภาคใต้ และจากข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548-2552 พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.01 ต่อปี ส่วนเนื้อที่ให้ผลมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.03 ต่อปี สำหรับผลผลิตรวมมีอัตราเพิ่มขึ้นมากที่สุดร้อยละ 11.49 ต่อปี และมีผลผลิตเฉลี่ย 2,560 กิโลกรัม/ไร่/ปี ซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.00 ต่อปี มีการผลิตน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 10.96 ต่อปี โดยมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 83 โรงงาน (อุตสาหกรรม พืชไร่พืชสวน และคณะ 2555)

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำ และทางกลิ่นที่สำคัญแหล่งหนึ่ง โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะเด่นคือ ประกอบด้วยมลสารในรูปซีโอไซด์ และซีโอไซด์สูง ลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำทิ้ง (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ 2533) ก่อนที่จะไหลไปรวมกันเป็นแหล่งน้ำทิ้งรวมในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้นมักใช้วิธีทางชีววิทยา ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นอย่างรุนแรง สร้างความเดือดร้อนให้แก่ชุมชนใกล้เคียง ทั้งนี้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดนั้นก็ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ จึงทำการจัดการน้ำเสียโดยนำไปใช้รดสวนปาล์ม ต้นไม้ในโรงงาน และปล่อยให้ระเหยแทนการปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญอีกสาเหตุหนึ่งของการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำ ทั้งนี้ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืชน้ำ สาหร่าย และแพลงก์ตอนของพืช ส่งผลทำให้พืชเหล่านี้มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนหนาแน่น เกิดการแพร่กระจายปกคลุมผิวน้ำ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เป็นปัญหาการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมโทรมหลักของแหล่งน้ำ ทำให้แสงสว่างส่องไม่ผ่านผิวน้ำ มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสเพื่อไม่ให้ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ



การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสามารถทำได้โดยหลากหลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี มักใช้สารเคมีซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่ alum, lime และ ferric chloride สารเคมีเหล่านี้สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่มาก การใช้วิธีบำบัดฟอสฟอรัสโดยดิน จึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สำคัญ

วิธีบำบัดโดยดิน (land treatment systems) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว นอกจากนี้วิธีบำบัดโดยดินยังสามารถใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นที่ 2 (secondary treatment) ได้ ถือเป็นการนำน้ำทิ้งมาหมุนเวียนใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากในน้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณธาตุอาหารค่อนข้างสูง ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารอาหารให้กับพืช และเป็นวิธีการบริหารจัดการที่ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นในปัจจุบันระบบบำบัดในแบบต่างๆ นั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและดูแลรักษายาก และปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ต้องการธาตุอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตสูงในทุกๆ ระยะการเจริญเติบโต เพื่อศึกษาถึงธาตุอาหารต่างๆ ที่อยู่ภายในน้ำเสีย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะ เป็นแนวทางเลือกอีกทางหนึ่งที่จะช่วยลดการทิ้งน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ และยังช่วยลดปริมาณน้ำดีที่จะใช้รดสวนปาล์ม ทั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และผลผลิตภายในสวนปาล์มน้ำมันอีกด้วย วิธีบำบัดโดยดินสามารถแบ่งการบำบัดเป็น 3 ระบบ คือระบบอัตราไหลช้า ระบบอัตราไหลซึมเร็ว และระบบน้ำไหลนอง ในการเลือกใช้ระบบต่างๆ จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และลักษณะดินในพื้นที่ และเลือกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างภาระบรรทุกของน้ำกับชนิดของดินสำหรับการบำบัด (Polprasert 2007) เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เลือกการบำบัดแบบระบบอัตราไหลช้า เพราะระบบนี้ ถือเป็น การเปลี่ยนน้ำเสียให้กลายเป็นน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ (Mousavinezhad 2015)

น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยดินสามารถนำไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมันได้ โดยพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพดีขึ้น มีงานวิจัยหลายเรื่องที่น่าน้ำทิ้งจากโรงงานที่ผ่านการบำบัดโดยดินมาใช้รดสวนปาล์ม เช่น งานวิจัยของ โรสนา กาชอ และคณะ (2555) ที่ศึกษาการบำบัดโดยดินของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมัน โดยพบว่า chemical oxygen demand (COD), total kjeldahl nitrogen (TKN) และ Suspended Solid (SS) และ Sulfate ของดินมีค่าลดลง และจากการศึกษาของ พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ได้ใช้น้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายของโรงงานน้ำยางขั้นที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วไปรดสวนปาล์มน้ำมัน โดยพบว่าค่า COD, TKN และ SS ของดินมีค่าลดลง ที่ผ่านมามีการศึกษากลไกการบำบัดต่างๆที่เกิดขึ้นในดิน ที่มีผลทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดโดยดินมีคุณภาพดีขึ้น และจากการศึกษา กาญจนี ชูทอง (2555) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดิน แบบอัตราไหลช้า (slow rate irrigation) โดยใช้ น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่า ค่า COD, TKN และ TP มีค่าลดลง แต่ยังไม่มียงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดโดยดิน ในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยอัตราการไหลช้า (slow rate irrigation) ที่มุ่งเน้นไปในเรื่องของประสิทธิภาพของฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดโดยดิน ทดสอบดูความสามารถของดิน โดยให้ดินเป็นตัวบำบัดฟอสฟอรัสโดยที่ไม่

ต้องใช้กระบวนการหรือเทคโนโลยีในการบำบัดที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน ให้ดินเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ต่าง ๆ รวมถึงฟอสฟอรัส และน้ำที่บำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ในการรดสวนปาล์มได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสโดยกระบวนการบำบัดโดยดินแบบระบบอัตราไหลช้า (slow rate irrigation) จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์น้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ เพื่อศึกษาคุณสมบัติ น้ำทิ้งก่อนนำมาทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.3.2. วิเคราะห์ดินจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ โดยใช้พื้นที่ของสวนปาล์มที่ไม่ผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินก่อนนำมาทำวิจัย โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.3.3. สร้างชุดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแบบระบบอัตราไหลช้า โดยใช้คอลัมน์ดิน จำนวน 12 ชุด ในการทดลองรูปแบบที่ 1 และ คอลัมน์ดิน 4 ชุด ในการทดลองรูปแบบที่ 2

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. เป็นแนวทางหนึ่งของการหมุนเวียนการใช้ทรัพยากรน้ำ รวมถึงสารอาหารในน้ำทิ้ง โดยการนำน้ำทิ้งนั้นกลับมาใช้ในการเกษตรกรรม และทั้งยังสามารถลดปริมาณน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ด้วย

1.4.2. เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และได้รับผลประโยชน์จากการใช้งาน เช่น สามารถลดการใช้ปุ๋ยแก่สวนปาล์มน้ำมันได้ เพิ่มธาตุอาหารให้แก่ดิน และผลผลิตของพืชได้

1.4.3. ทำให้ทราบถึงแนวทางและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยการบำบัดโดยดิน

## บทที่ 2

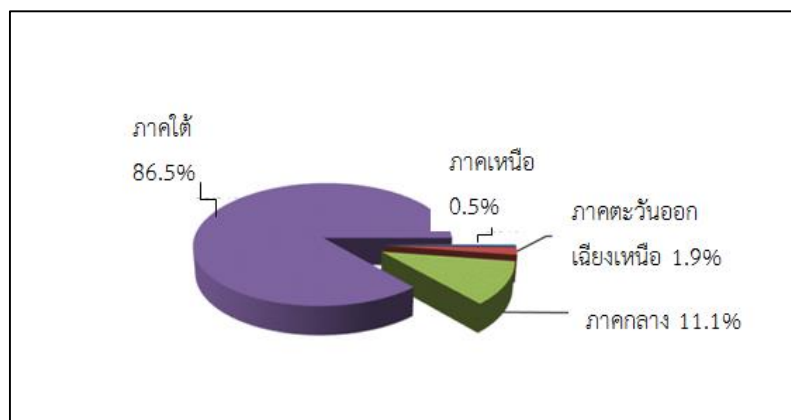
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (oil palm) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิด อยู่ในแถบแอฟริกาตะวันตก จากเซียร์ราลีโอน ไลบีเรีย ไอวอรีโคสต์ กานา และแคเมอรูน ตลอดจนถึงแถบเส้นศูนย์สูตรของสาธารณรัฐคองโกและซาอิร์ ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชตระกูลปาล์มใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นไม้ยืนต้น ให้ผลผลิตตลอดทั้งปี และมีอายุยืนยาว พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันที่เหมาะสมควรมีอากาศชุ่มชื้น และมีฝนตกชุก ทำให้ปาล์มน้ำมันเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถปลูกได้ประมาณ 43 ประเทศทั่วโลกเท่านั้น (ศูนย์ศึกษาการค้ำระหว่างประเทศ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 2556) และทำให้ประเทศในอาเซียน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มาเลเซียและอินโดนีเซีย กลายเป็นแหล่งผลิตปาล์มน้ำมันหลักของโลก โดยประเทศไทยก็เป็นหนึ่งในประเทศที่อยู่บริเวณที่เหมาะสมสำหรับปลูกปาล์มน้ำมัน

สำหรับจุดกำเนิดของการปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทย มีการสันนิษฐานว่าในปี พ.ศ. 2480 พระยาประดิพัทธ์ภูบาลเป็นผู้นำเข้ามาจากประเทศมาเลเซีย โดยเป็นปาล์มน้ำมันพันธุ์ เทเนอรา ต่อมาหม่อมเจ้าอมรสมานลักษณ์ ได้ขยายพันธุ์ไปปลูกเพื่อการค้าที่ตำบลบ้านปริก อำเภอสระเดา จังหวัดสงขลา ปาล์มน้ำมัน จึงได้ขยายพื้นที่การปลูกอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแห่งแรกของประเทศไทยขึ้น ในปี พ.ศ. 2515 และถือเป็นพระมหากรุณาธิคุณอย่างสูงสำหรับประชาชนคนไทยที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ภูมิพลอดุลยเดช มีพระกระแสรับสั่งเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2526 กับพันเอกวีระ วรรณสุข หัวหน้าโครงการพัฒนา คลองหอยโข่งและคลองจำไหล ณ ตำบลทักขิณราชนิเวศน์ โดยทรงมีพระประสงค์ให้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดำเนินโครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็ก ก่อนที่ปาล์มน้ำมันจะถูกบรรจุอยู่ในแผนพัฒนา ประเทศต่อไป (ศูนย์ศึกษาการค้ำระหว่างประเทศ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 2556)

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากอินโดนีเซียและ มาเลเซีย ซึ่งทั้งสองประเทศ เป็นประเทศที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันรายใหญ่ของโลก มีสัดส่วนรวมกันคิดเป็น ร้อยละ 60 ของพื้นที่ปลูกปาล์มทั้งหมดของโลก ขณะที่ไทยมีสัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกที่ให้ผลผลิตได้เพียงร้อยละ 3.81 และภาคใต้เป็นภาคที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดในประเทศ คิดเป็นร้อยละ 86.5 รองลงมาคือ ภาคกลาง ร้อยละ 11.1 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ มีสัดส่วนร้อยละ 1.9 และ 0.5 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (พวงเพชร อึ้งวิศิษฏ์วงศ์ 2559)



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันของไทย  
ที่มา : พวงเพชร อึ้งวิศิษฏ์วงศ์ (2559)

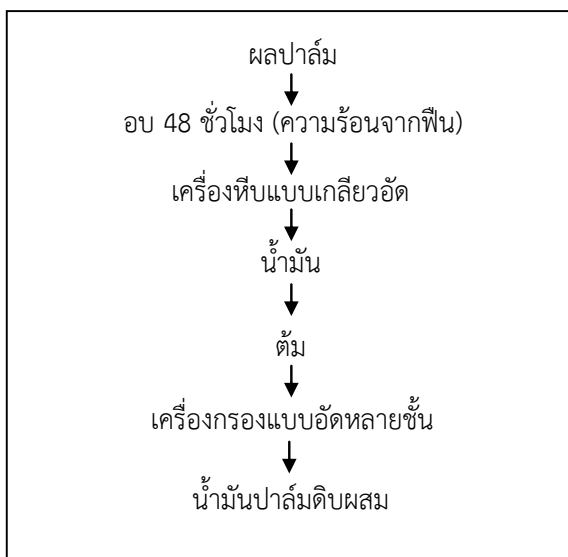
## 2.2 อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้นบริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย นิยมปลูกกันมากในพื้นที่จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล และตรัง ผลผลิตของปาล์มน้ำมันจะถูกแปรรูปเป็นน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งจะผ่านกรรมวิธีการกลั่นเพื่อให้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ นำไปใช้กับอุตสาหกรรมอาหารพวก นมข้นหวาน บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป น้ำมันพืช เป็นต้น เนื่องจากการปลูกปาล์ม น้ำมันมีผลตอบแทนดี จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่การเพาะปลูก แนวโน้มการผลิตจึงสูงขึ้นทุกปี

### 2.2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

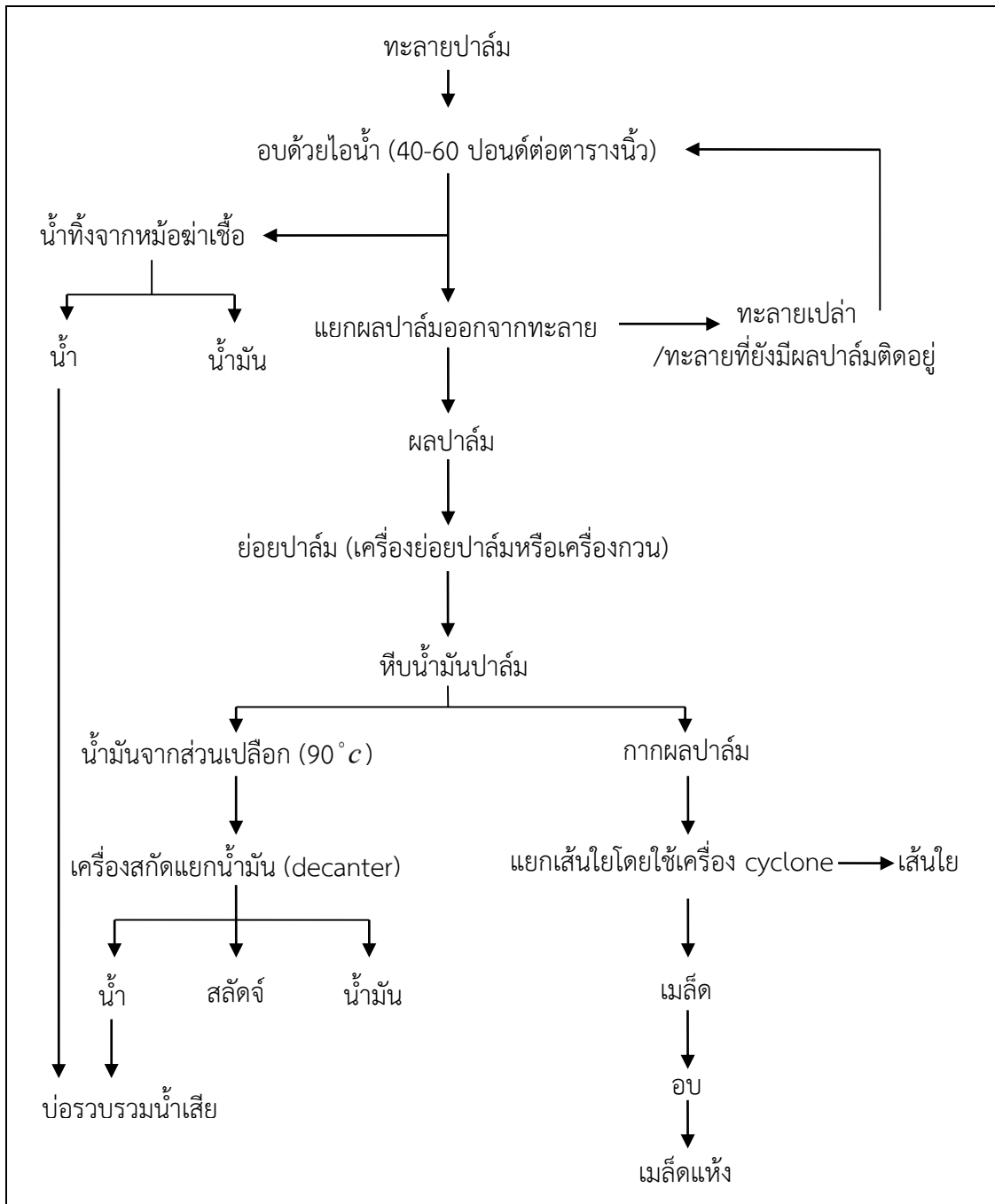
กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

(1) กระบวนการสกัดแบบไม่ใช้น้ำ ใช้ความร้อนในการอบปาล์มได้จากฟืน ใช้เวลาในการอบประมาณ 48 ชั่วโมง แล้วผลปาล์มจะถูกส่งไปยังเครื่องหีบแบบเกลียวอัด (screw press) น้ำมันที่ได้ถูกทำให้ร้อนและผ่านเข้าเครื่องกรองแบบอัดหลายชั้น (filter press) เพื่อขจัดสิ่งเจือปนออก ได้น้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันกระเทย คือน้ำมันผสมทั้งจากส่วนเปลือกและเมล็ดใน ซึ่งคุณภาพจะด้อยกว่าน้ำมันจากส่วนเปลือกเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.2 วิธีนี้เหมาะกับโรงงานขนาดเล็กที่ใช้เงินลงทุนต่ำ มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน วัสดุเหลือทิ้งของโรงงานประเภทนี้มีเพียงอย่างเดียว คือ กากปาล์มที่ออกจากเครื่องหีบ และไม่มีน้ำเสียเกิดขึ้นเลย (พูนสุข ประเสริฐสุธรรม และคณะ 2533)

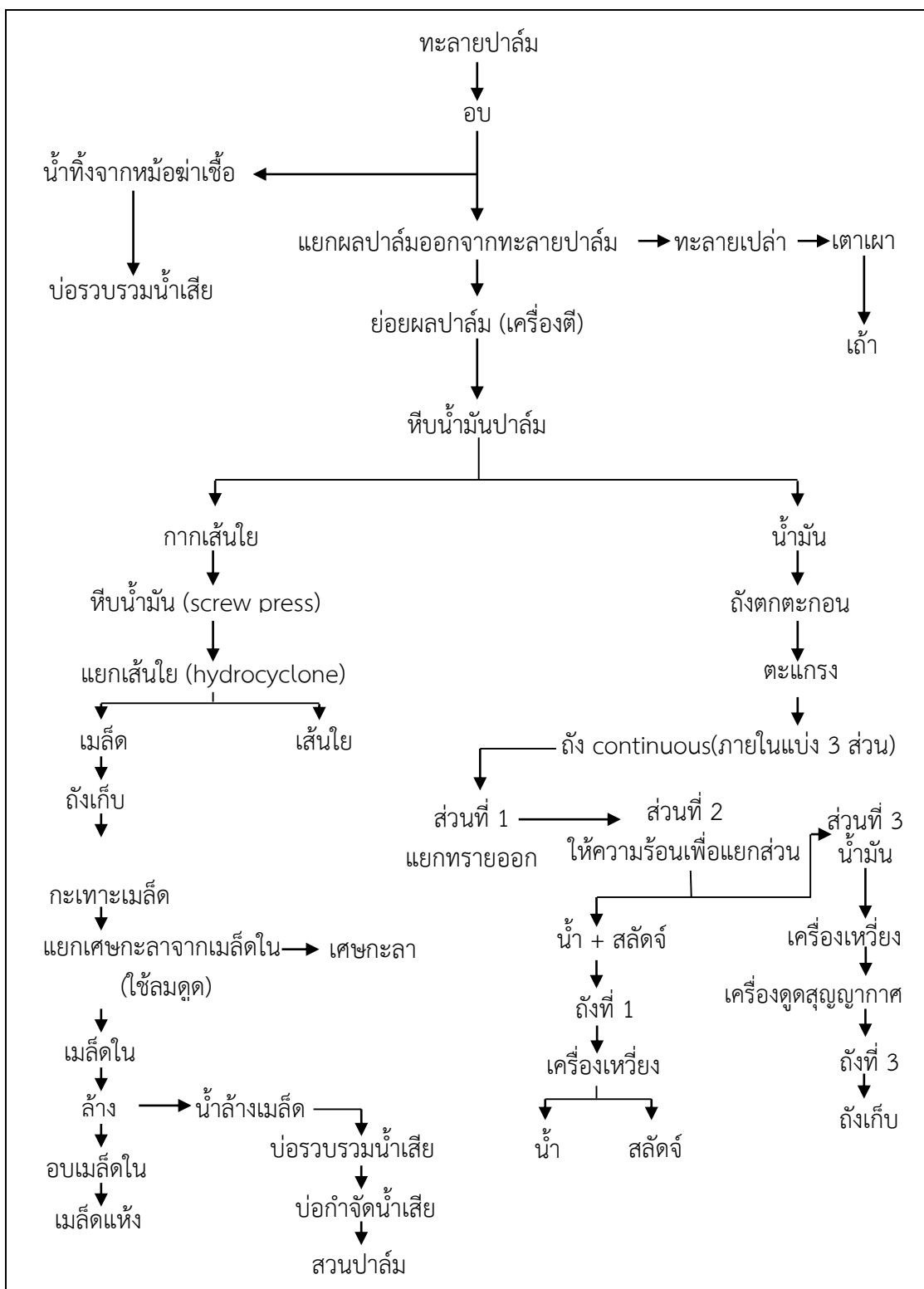


ภาพที่ 2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบไม่ใช้น้ำ  
ที่มา : พูนสุข ประเสริฐสรุพร และคณะ (2533)

(2) กระบวนการสกัดแบบใช้น้ำหรือกระบวนการสกัดแบบมาตรฐาน กระบวนการสกัดแบบนี้เป็นที่นิยมกว่าแบบแรกเพราะได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีกว่า แบ่งย่อยได้เป็น 2 ลักษณะ คือ แบบที่ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมันที่เรียกว่า decanter ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และแบบที่ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมันที่เรียกว่า separator ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ใช้ในโรงงานขนาดใหญ่และขนาดกลาง แต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสูง ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตเริ่มจากการอบทะลายปาล์มสดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 40-60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ประมาณ 40-60 นาที การอบทะลายปาล์มสดช่วยให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลายปาล์มง่ายขึ้น จากนั้นส่งทะลายปาล์มที่อบแล้วไปเครื่องแยกผลปาล์ม แล้วส่งต่อเข้าเครื่องย่อยผลปาล์ม ขณะย่อยมีการเติมน้ำเล็กน้อย จากนั้นป้อนเข้าเครื่องหีบแบบอัดเกลียว (screw press) น้ำมันที่ได้จะถูกนำเข้าสู่เครื่อง decanter ซึ่งจะแยกน้ำมันออกจากน้ำ เส้นใย และสิ่งเจือปน (พูนสุข ประเสริฐสรุพร และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล 2554; อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และคณะ 2553) ส่วนแบบที่ใช้เครื่อง separator ใช้วิธีการให้ความร้อนเพื่อให้น้ำมันลอยตัวแล้วแยกออกมา และใช้เครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากสลัดจ์ แต่ในปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่ใช้การสกัดน้ำมันปาล์มแบบ decanter (พูนสุข ประเสริฐสรุพร และคณะ 2533)



ภาพที่ 2.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำ ที่ใช้เครื่อง decanter  
ที่มา : พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533)



ภาพที่ 2.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำ ที่ใช้เครื่อง separator  
ที่มา : พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533)

## 2.2.2 ปริมาณและลักษณะน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทั้งหมดเกิดจากน้ำที่ใช้ในระหว่างกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมาจาก 5 ขั้นตอน (จุฑารัตน์ หนูสุข 2546) คือ

(1) น้ำจากการนึ่งปาล์ม เป็นน้ำทิ้งจากการอบทะเลลายปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำส่วนนี้จะมีน้ำมันอยู่แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชัน โดยทั่วไปการอบทะเลลายปาล์ม 25 ตัน จะมีน้ำนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2-3 ลูกบาศก์เมตร (ลบ.ม.)

(2) น้ำทิ้งจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน น้ำทิ้งส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุดและเป็นน้ำทิ้งที่มีของแข็งแขวนลอยมาก กรณีที่ใช้เครื่อง decanter ในการแยกน้ำทิ้งจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.35 ลบ.ม.ต่อตันทะเลลายปาล์มสด และในกรณีที่ใช้ separator จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.65 ลบ.ม.ต่อตันทะเลลายปาล์มสด

(3) น้ำทิ้งจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เช่น เครื่องแยกกรวดทราย ใช้ น้ำล้างประมาณ 0.05-0.1 ลบ.ม. เครื่องแยกน้ำ และกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน มีน้ำเสียเกิดขึ้นครั้งละ 0.2-0.5 ลบ.ม. และเครื่องแยกเหวี่ยงความสูงต้องทำการล้างทุก 20 - 30 นาที ใช้ น้ำในการล้างครั้งละ 0.05-0.06 ลบ.ม.

(4) น้ำจากการหล่อเย็นหม้อกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย เป็นน้ำทิ้งที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมากและยังสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่จะมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

(5) น้ำสลัดจ์จากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge) มีน้ำทิ้งเกิดขึ้นประมาณ 0.03-0.15 ลบ.ม.ต่อตันทะเลลายปาล์มสด

จากแหล่งที่มาน้ำทิ้งต่างๆทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้น น้ำทิ้งส่วนใหญ่มาจาก 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 น้ำจากการนึ่งปาล์ม หรือน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ (sterilizer condenser) และขั้นตอนที่ 2 น้ำทิ้งจากเครื่อง decanter หรือเครื่อง separator โดยน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อมีประมาณ 20 ลิตรต่อตันทะเลลายปาล์ม ปริมาณน้ำทิ้งคิดเป็น 2.5 - 3 เท่าของปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้ (พูนสุข ประเสริฐสรพร และคณะ 2533) น้ำทิ้งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบใช้น้ำ โดยน้ำทิ้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งมีปริมาณ 1-1.3 ลบ.ม.ต่อตันทะเลลายปาล์มสด คิดเป็นร้อยละ 50-79 ของปริมาณน้ำทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์มที่เกิดขึ้น (พูนสุข ประเสริฐสรพร และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล 2554) น้ำเสียส่วนใหญ่มาจาก น้ำนึ่งปาล์มหรือน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ (sterilizer- condensate) มีอัตราการเกิดน้ำเสียประมาณ 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลลายปาล์มสด และน้ำทิ้งจากเครื่อง decanter หรือเครื่อง separator ซึ่งมีอัตราการเกิดน้ำเสียระหว่าง 0.48-0.74 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลลายปาล์มสด (ธนารักษ์ พงษ์ภคตรา 2543) ทั้งนี้ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความแตกต่างกันขึ้นกับกรรมวิธีในการผลิต และกิจกรรมต่างๆ ที่ทำให้เกิดน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อ น้ำเสียจากเครื่องแยก decanter หรือเครื่อง separator ก่อนที่จะไหลไปรวมกันที่บ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจากหม้อฆ่าเชื้อ เครื่องแยก decanter หรือ separator และบ่อรวบรวมน้ำเสีย

พารามิเตอร์	ลักษณะน้ำเสีย		
	หม้อฆ่าเชื้อ	เครื่องแยก decanter หรือ separator	บ่อรวบรวมน้ำเสีย
Color	Brown	Brown-Blackish Brown	Dark Brown
pH	4.84-5.35	4.16-5.35	4.05-4.62
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	22,800-41,985	21,000-68,550	54,750-60,000
TCOD (mg/L)	45,360-80,146	38,246-105,955	80,523-115,934
Volatile Acid (mg/L as acetic acid)	998-7,125	535-1,828	3,100-5,800
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	37.5-1,576	48-86.5	68-200
Grease (mg/L)	20.9-1,103	4.7-1,130	16-2,500
Total solid (mg/L)	26,367-76,733	25,634-118,570	49,453-88,508
Volatile solid (mg/L)	24,415-67,635	23,056-108,590	42,063-81,872
Suspended solid (mg/L)	6,100-26,000	2,900-40,000	18,500-52,000
Ammonia nitrogen (mg/L)	7.7-66.3	22.8-61.6	27-61
Organic nitrogen (mg/L)	22.4-1,287	518.5-1,352	551-1,172

ที่มา : พูนสุข ประเสริฐสรทรัพย์ และคณะ (2553) อ้างอิงใน สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ (2550)

### 2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการ รายละเอียดดังนี้ คือ

(1) กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ จะอาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกด้วยตะแกรง การตกตะกอน และการกรอง เป็นต้น

(2) กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี อาศัยคุณสมบัติเฉพาะของสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก และการฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

(3) กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ อาศัยจุลชีพที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศและได้จุลชีพเพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ activated sludge, stabilization pond, aerated lagoon เป็นต้น

(4) กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพเคมี อาศัยทั้งทางกายภาพและเคมีรวมกัน ใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ 2539)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำเหล่านั้นก่อนจะปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ สำหรับระบบบำบัดที่นิยมใช้กับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยมักใช้การบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้บ่อผึ่ง เพราะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ง่ายที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่ต่ำ (Wong 1980) แต่มีข้อเสียคือ ต้องการใช้พื้นที่มาก และก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นอย่างรุนแรง จึงก่อให้เกิดความรำคาญแก่ชุมชนข้างเคียง (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ 2550) แต่น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดนั้นก็ยังไม่สามารถผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ จึงนำไปใช้รดสวนปาล์ม ต้นไม้ในโรงงาน และปล่อยให้ระเหยแทนการปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่สามารถระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงได้ จึงต้องทำการปรับสภาพน้ำทิ้งแล้วนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในพื้นที่รอบโรงงาน หรือในพื้นที่ที่ได้รับการยินยอมเท่านั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2560) จากการศึกษาของ กาญจนี ชูทอง (2556) ที่ศึกษาคุณสมบัติของน้ำทิ้งดังกล่าว โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของบริษัท เอเชียน น้ำมันปาล์ม อ.อ่าวลึก จ.กระบี่ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นโรงงานศึกษา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์	ค่าเฉลี่ย	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง*
pH	8.18-9.08	8.57	5.5-9.0
SS (mg/L)	6-306	91	50
COD (mg/L)	157-894	441	120
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	2.3-117	54	20
TKN (mg/L)	2.80-54.04	19.46	100
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.14-26.04	7.78	-
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	0.25-7.29	2.21	-
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	7.63-32.79	21.50	-
TP (mg/L)	0.95-6.44	2.33	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	641-2,843	1,937	-

ที่มา : \*ดัดแปลงจาก [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1)  
อ้างอิงใน ภาณูจณี ชูทอง (2556)  
หมายเหตุ : - ไม่ได้กำหนด

แม้ว่ากรมควบคุมมลพิษไม่มีการกำหนดค่าฟอสฟอรัสจากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ตาม แต่ในมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อย ได้กำหนดฟอสฟอรัสรวมไม่เกิน 0.4 mg/L มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ได้กำหนดค่าฟอสฟอรัสรวมไม่เกิน 0.5 mg/L และมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ได้กำหนดฟอสฟอรัสรวมไม่เกิน 2.0 mg/L (กรมควบคุมมลพิษ 2548) จะเห็นได้ว่าปริมาณฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีค่าเกินมาตรฐาน จึงไม่สามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ การนำน้ำที่ได้จากการบำบัดไปรดสวนปาล์ม หรือรดน้ำต้นไม้ทำให้เกิดประโยชน์ต่อพืช การใช้ดินในการบำบัดน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้

#### 2.2.4 ปัญหาสิ่งแวดล้อมในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ทั้งทางน้ำ อากาศ รวมถึงไปถึงสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว รายละเอียด ดังนี้

(1) มลพิษทางน้ำ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาจาก 2 แหล่งใหญ่ คือ หม้อนึ่ง และเครื่อง decanter หรือเครื่อง separator จากผล

การศึกษาของ Chavalparit (2006) พบว่ามีอัตราการเกิดน้ำเสียประมาณ 0.15–1.03 ลูกบาศก์เมตร ต่อตันทะเลสาบปาล์มสด นอกจากนี้ วารี ช้วนรักษธรรม (2548) กล่าวว่าในขั้นตอนกระบวนการผลิต จำเป็นต้องใช้น้ำและพลังงานในการขับเคลื่อนเครื่องจักรค่อนข้างมาก ทำให้เกิดน้ำเสีย โดยเฉพาะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการนึ่งผลปาล์ม และการแยกน้ำออกจากน้ำมัน เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกในรูปของไขมัน น้ำมัน และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มาก หากโรงงานไม่มีการบำบัดความสกปรกในน้ำเสียเหล่านี้ หรือไม่มีการจัดการของเสียที่ดีพอก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและสิ่งแวดล้อมได้ รวมทั้งก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน ผลจากการสำรวจพบว่า ร้อยละ 44 ของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีน้ำเสียเกิดขึ้นระหว่าง 100–300 ลบ.ม.ต่อวัน และร้อยละ 40 มีน้ำเสียเกิดขึ้นระหว่าง 400–600 ลบ.ม.ต่อวัน โรงงานทุกโรงงาน (ร้อยละ 100) มีระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อธรรมชาติ ร้อยละ 60 ของโรงงาน มีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบก๊าซ นอกจากนี้พบว่าโรงงานร้อยละ 4 มีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการรดบนดิน โดยพบว่าไม่มีโรงงานสกัดปาล์ม น้ำมันที่มีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่ง ซึ่งสอดคล้องรายงานของ สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 11 (2543) ที่ได้ศึกษาถึงการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมสกัดปาล์มน้ำมันในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและกระบี่ พบว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันได้แก่ปัญหาน้ำเสีย พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียหรือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสกัดปาล์มน้ำมันแบบมาตรฐานในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและกระบี่ที่มีการใช้งานจะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีการใช้ระบบบำบัดแบบธรรมชาติหรือบ่อปรับเสถียรโดยไม่มีบ่อเติมอากาศ และอีกกลุ่มเป็นกลุ่มที่มีการใช้ระบบบำบัดแบบธรรมชาติแต่มีบ่อเติมอากาศ และน้ำหลังจากการบำบัดแล้วได้ทำการสูบน้ำไปใช้รดสวนปาล์มเพื่อใช้รดสวนปาล์ม ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าโรงงานร้อยละ 24 มีการกักเก็บน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ และโรงงานร้อยละ 84 ระบุว่ามีการสูบน้ำหลังบำบัดเพื่อใช้ประโยชน์ในสวนปาล์ม โดยมีโรงงานเหล่านี้คิดเป็นร้อยละ 90 ที่มีการใช้น้ำเสียหลังการบำบัดแล้วในสัดส่วนร้อยละ 90–100 ของน้ำเสียทั้งหมดที่สูบน้ำไปใช้ในสวนปาล์ม สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียพบว่าส่วนใหญ่จะกำจัด BOD และ COD ได้ในช่วงร้อยละ 95–99.9 แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า ทางโรงงานยังขาดแคลนผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย และการติดตามประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ไม่ได้ดำเนินการอย่างประจำ และเกิดปัญหาด้านกลิ่นเหม็นตามมา

## (2) มลพิษอากาศ ได้แก่

1.) กลิ่น ปัญหาเรื่องกลิ่นจากโรงงานน้ำมันปาล์มนับว่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่น เช่น โรงงานน้ำตาล ชน ฯลฯ กลิ่นที่เกิดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ กลิ่นจากระบบบำบัดน้ำเสียในบริเวณบ่อไร้อากาศ และบ่อเติมอากาศ (กลิ่นจากแอมโมเนีย) และจากบริเวณที่เป็นจุดพักของทะเลสาบปาล์มเปล่า ซึ่งหากไม่มีการดำเนินการให้สภาพของสุขาภิบาลโรงงานที่ดีจะทำให้เกิดการเน่าของทะเลสาบปาล์มและทำให้เกิดกลิ่นขึ้นได้ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 11 2543)

2.) ฝุ่นและควัน โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานมักจะประสบปัญหา มลพิษทางอากาศ ซึ่งอยู่ในรูปของฝุ่นละอองและควัน ทั้งนี้มีจุดกำเนิดมาจากการเผาไหม้/หม้อไอน้ำ และในกระบวนการผลิตในโรงงานซึ่งเป็นฝุ่นจากใบปาล์ม สอดคล้องกับ สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 11

(2543) ได้ศึกษาถึงการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมสกัดปาล์มน้ำมันในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและกระบี่ พบว่า ปัญหาด้านฝุ่นควัน โรงงานมักประสบปัญหานี้ด้วยมีจุดกำเนิดมาจากการเผาไหม้ในเตาเผา/หม้อไอน้ำ และในกระบวนการผลิตภายในโรงงานซึ่งเป็นฝุ่นจากใยปาล์มส่วนควันที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นควันดำหรือควันขาว ซึ่งเป็นอนุภาคของน้ำมันหรือไอน้ำ

3.) มลพิษทางเสียง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทั้ง 2 กลุ่มเป็นโรงงานที่ต้องใช้เครื่องจักรในการผลิต สาเหตุเกิดจากหลายจุดภายในโรงงาน โดยพบว่ากลุ่มโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีการผลิตแบบแห้งจะมีค่าระดับความดังของเสียงต่ำกว่าแหล่งกำเนิดเสียงเกิดบริเวณสกัดน้ำมันปาล์ม แต่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบเปียกพบว่ามีระดับเสียงในหลายตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ เครื่องจักรที่ทำงานในบริเวณเครื่องกะเทาะแยกเมล็ด รวมถึงบริเวณหม้อไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 11 2543)

(3) สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1.) ของเสียจากกระบวนการเฉพาะ (specific waste) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นเฉพาะโรงงาน เช่น ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม กากสลัดจ์ ถ้ำเบาหรือฝุ่นจากการเผาเส้นใยและกะลาปาล์มในหม้อไอน้ำ และถ้ำหนัก จัดเป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตราย

2.) ของเสียจากกระบวนการสนับสนุน (common waste) คือ ของเสียทั่วไปส่วนใหญ่แล้วสามารถเกิดขึ้นได้ในโรงงานทุกประเภท เช่น ภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้แล้ว ผ้าหรือวัสดุปนเปื้อน น้ำมันเครื่องใช้แล้ว เป็นต้น

### 2.3 ระบบบำบัดโดยดิน (land treatment systems)

การใช้ดินในการบำบัดน้ำเสียมีการพัฒนาและปฏิบัติมาหลายปีแล้ว เป็นการใช้ดินในการบำบัดน้ำเสียและสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ โดยดินจะเป็นตัวดูดซับมลสารไว้ และเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน การใช้น้ำเสียดพืชเกษตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดโดยดิน โดยดินและพืชจะเป็นตัวกรองในการดูดซับสารพิษและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยผ่านกระบวนการบำบัดทางธรรมชาติ ในกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา ซึ่งเกิดขึ้นภายในดิน พืชและน้ำสามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การใช้น้ำรดพืชเกษตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดโดยดิน รวมถึงการรีไซเคิลน้ำ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ และการใช้ซ้ำ ซึ่งมีกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง กระบวนการจะเกิดขึ้นด้านบนและภายในดิน ดินจะย่อยสลายของเสียและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดินเพราะ มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบอินทรีย์และสารอาหาร ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรได้ (Cabrera *et al.* 1996) การบำบัดวิธีนี้จะควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาง่าย ใช้พลังงานต่ำ เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ต้องใช้พื้นที่มากในการดำเนินการ เหมาะกับลักษณะน้ำเสียที่มีแร่ธาตุอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่พืช แต่ถ้าน้ำเสียที่มีสารพิษปนเปื้อน ต้องคำนึงถึงปริมาณและชนิดของสารพิษด้วย

ในประเทศอินเดียมีการใช้ระบบบำบัดโดยดินอย่างแพร่หลาย ที่พบบ่อยจะเป็นการใช้น้ำเสียจากฟาร์ม ระบบบำบัดโดยดินนี้จะเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพด้านต้นทุนการก่อสร้างและ

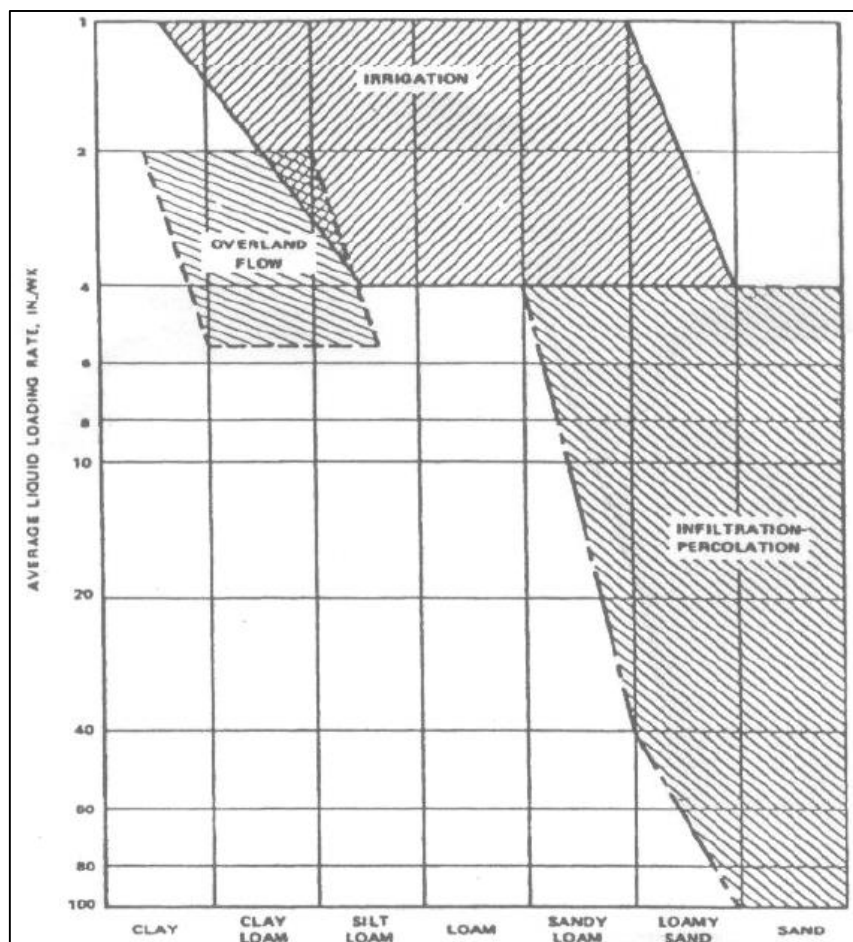
การเดินระบบ เพราะใช้ค่าใช้จ่ายน้อย ดังนั้นจึงมักถูกนำไปใช้ในชุมชนขนาดเล็กและพื้นที่ชนบท (Crites and Tchobanoglous 1998)

นอกจากการบำบัดโดยดินจะบำบัดน้ำเสียแล้ว ผลพลอยได้จากกระบวนการนี้ยังเป็นการเพิ่มรายได้จากการขายพืชผลทางการเกษตร เป็นการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างคุ้มค่า โดยเฉพาะในฤดูแล้งที่มีน้ำน้อยสามารถใช้น้ำเสียมารดแปลงเกษตร ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และใช้พลังงานน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น ระบบตะกอนเร่ง ระบบโปรยกรอง ระบบสระเติมอากาศ เป็นต้น ลดการใช้ปุ๋ยเคมี ตลอดจนยังเป็นการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่ปลูกต้นไม้และเป็นการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน (เกสซ์ชรัตน์ กชกรจารุงพงศ์ 2550; เสนีย์ กาญจนวงศ์ และคณะ 2545; Thongnuekhang and Puetpaiboon 2004)

### 2.3.1 วิธีการบำบัดโดยดิน

การประยุกต์ใช้ดินเพื่อการบำบัด มี 2 วัตถุประสงค์หลัก คือ กำจัดของเสีย และการรีไซเคิลองค์ประกอบของของเสีย ระบบบำบัดโดยดินของน้ำเสียแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ (1) แบบอัตราไหลช้า (slow rate irrigation) (2) แบบน้ำไหลนอง (overland flow) หรือ infiltration percolate หรือ soil aquifer treatment และ (3) แบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration) (Kidder 1976; Pound *et al.* 1983; Pescod 1992; Ronald *et al.* 2006) โดยความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาวะบรรทุกของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.5

เช่นเดียวกับ พัทธ สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ที่กล่าวว่าการบำบัดโดยดิน จะแบ่งการบำบัดเป็น 3 ระบบ คือระบบอัตราไหลช้า ระบบอัตราไหลซึมเร็ว และระบบน้ำไหลนอง ในการเลือกใช้ระบบต่างๆจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และลักษณะดินในพื้นที่ และเลือกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างภาวะบรรทุกของน้ำกับชนิดของดินสำหรับการบำบัด (Polprasert 2007)



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ

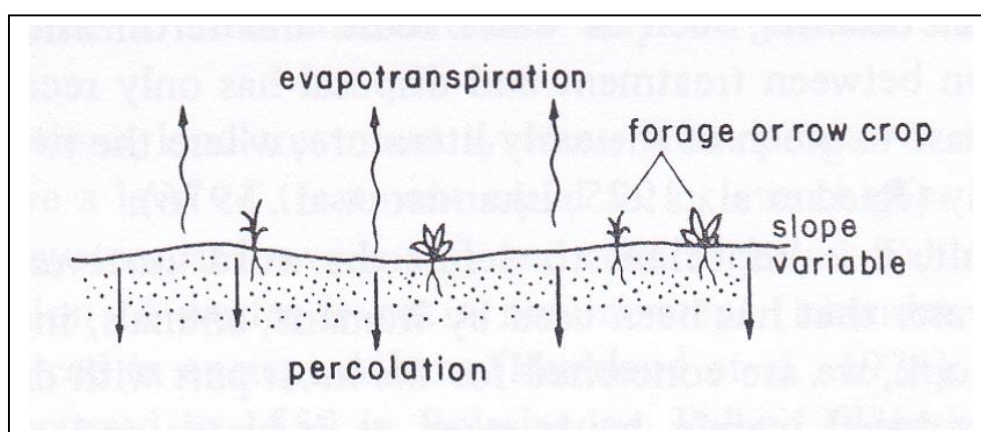
ที่มา: U.S.EPA (1981) อ้างอิงใน Polprasert (1989)

(1) การบำบัดโดยดินแบบอัตราไหลช้า (slow rate system)

กระบวนการ slow rate เป็นหนึ่งเทคนิคของระบบบำบัดโดยดิน ซึ่งมีมานานและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในศตวรรษที่ 16 ได้พัฒนามาจากน้ำทิ้งจากฟาร์มในทวีปยุโรป และเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับการยอมรับจากประเทศอังกฤษในปี 1860 (Jewell and Seabrook 1979) ในปี 1880 อเมริกาได้เริ่มเก็บข้อมูลและพบว่า ในปี 1899 มีน้ำเสีย 143 แห่งที่ใช้ระบบบำบัดแบบ slow rate ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่พบบ่อยในช่วงนั้น (Raffer 1899) และระบบนี้ได้ถูกค้นพบอีกครั้งในกลางปี 1960 ที่ Penn State (Scopper and Kardos 1973) ในปี 1970 U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA) และ U.S. Crop of Engineers ได้มีการร่วมมือกันลงทุนเพื่อวิจัยและพัฒนากระบวนการบำบัดโดยดิน (Pound and Crites 1973; Reed 1972) และในปลายปี 1970 ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบระยะยาวของระบบบำบัดแบบ slow-rate (Ronald *et al.* 2006)

โดยกระบวนการที่ใช้การรดน้ำสำหรับเกษตรกรรมซึ่งมีการปลูกพืชร่วมด้วย อาจใช้วิธีการกระจายน้ำเสียตามร่องน้ำทั่วบริเวณหรือวิธีการฉีดพ่นกระจายน้ำให้เป็นฝอย (sprinkler system) การบำบัดอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการระเหยออกไป ถูกดูดซับด้วยพืชและไหลซึมลงใต้ดิน ระบบนี้ลักษณะดินต้องเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ดี วิธีนี้สามารถรับน้ำได้ในอัตรา 0.6-6.0 m/year โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 1.3-10.0 cm/week และมีความลาดของพื้นที่ที่ต่ำ (U.S. EPA 1981) ระบบนี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนการใช้น้ำผลผลิตของพืชและการเปลี่ยนน้ำเสียให้เป็นน้ำใช้สำหรับการเกษตรในฤดูแล้งซึ่งเป็นการอนุรักษ์น้ำ ระบบนี้มีความปลอดภัยการกำจัดมลสารสูง ต้องการพื้นที่กว้าง และการกระจายของมลสารในน้ำเสียนั้นมีผลต่อดินและพืชน้อยมาก

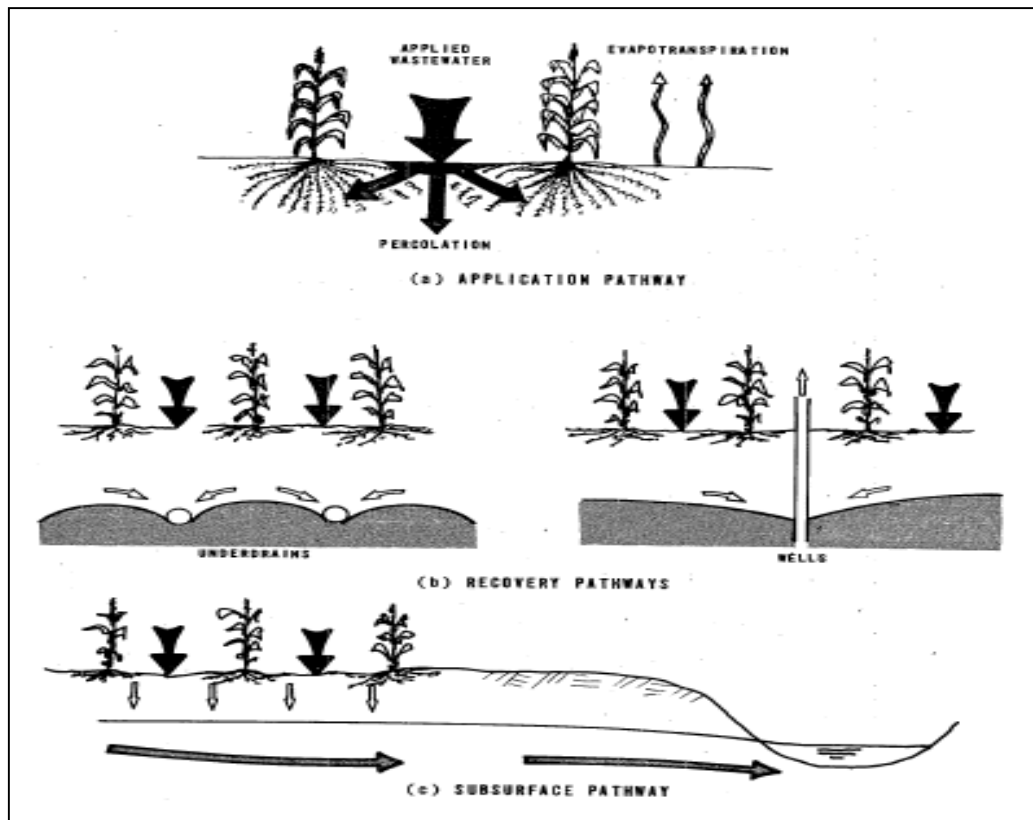
พืชและดินจะถูกนำมาใช้กับน้ำเสียในอัตราที่ช้าเพื่อหลีกเลี่ยงการไหลบ่าของน้ำเสียและเป็นการบำบัดร่วมกันระหว่างพืชและจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน น้ำเสียส่วนหนึ่งจะไหลผ่านดินลงไปได้ดินเป็นน้ำใต้ดิน บางส่วนจะถูกนำไปใช้โดยพืช ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และ ภาพที่ 2.7 แสดงถึงระบบและการเดินทางของน้ำเสีย ระบบถือว่ามีศักยภาพในการบำบัดสูงเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติทั้งหมด



ภาพที่ 2.6 slow rate system

ที่มา : Isakandar (1981)





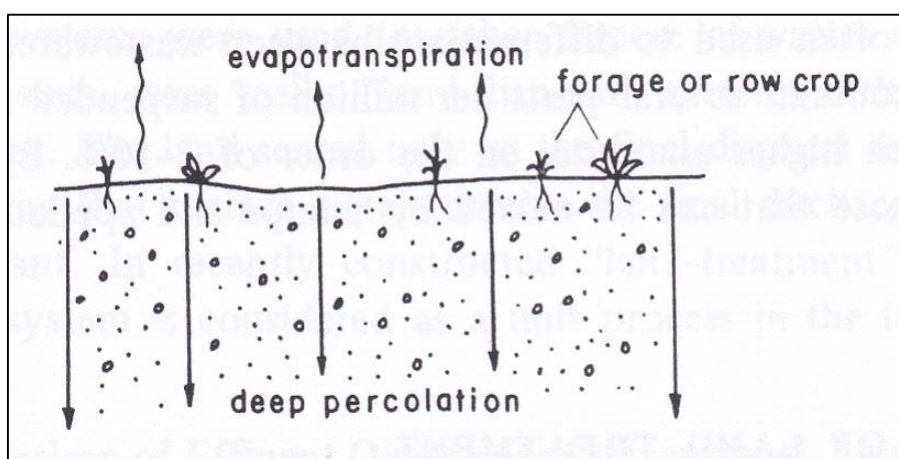
ภาพที่ 2.7 การเดินทางของน้ำเสียระบบ slow rate system  
ที่มา : U.S.EPA (1981)

การบำบัดโดยดินแบบอัตราไหลช้า มีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว สามารถนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในทางเกษตรกรรม โดยเปลี่ยนน้ำเสียให้กลายเป็นน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ (Mousavinezhad 2015) กลไกการกรองและการดูดซับจะเป็นกลไกเริ่มต้นในการบำบัด ซึ่งการกรองเป็นกลไกหลักในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ส่วนสารตกค้างและของแข็งที่เหลือจากกระบวนการบำบัดจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของดิน การกำจัดไนโตรเจนส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมโดยพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่ปลูกและการเจริญเติบโตของพืชด้วย เนื่องจากพืชสามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในน้ำเสียได้ การปล่อยน้ำเสียลงสู่ดินที่มีการปลูกพืชอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดการบำบัดและให้พืชเจริญเติบโต เมื่อน้ำเสียผ่านชั้นดินจะเกิดกระบวนการบำบัดทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ได้แก่ การกรองและการดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ การออกซิเดชันทางชีวภาพ จะเป็นกลไกการบำบัดขั้นสุดท้าย และการนำสารอาหารในน้ำเสียไปใช้ในการบำบัดสารตกค้างและของแข็งที่เหลือจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของดิน ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปสารละลายและกระบวนการตรึงไนโตรเจนในดินจะทำการดูดซับและการตกตะกอนทางเคมี โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีการบำบัดโดยดินแบบอัตราไหลช้า มีค่าสูง ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Jenkins and Palazza 1981)

## (2) การบำบัดโดยดินแบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration)

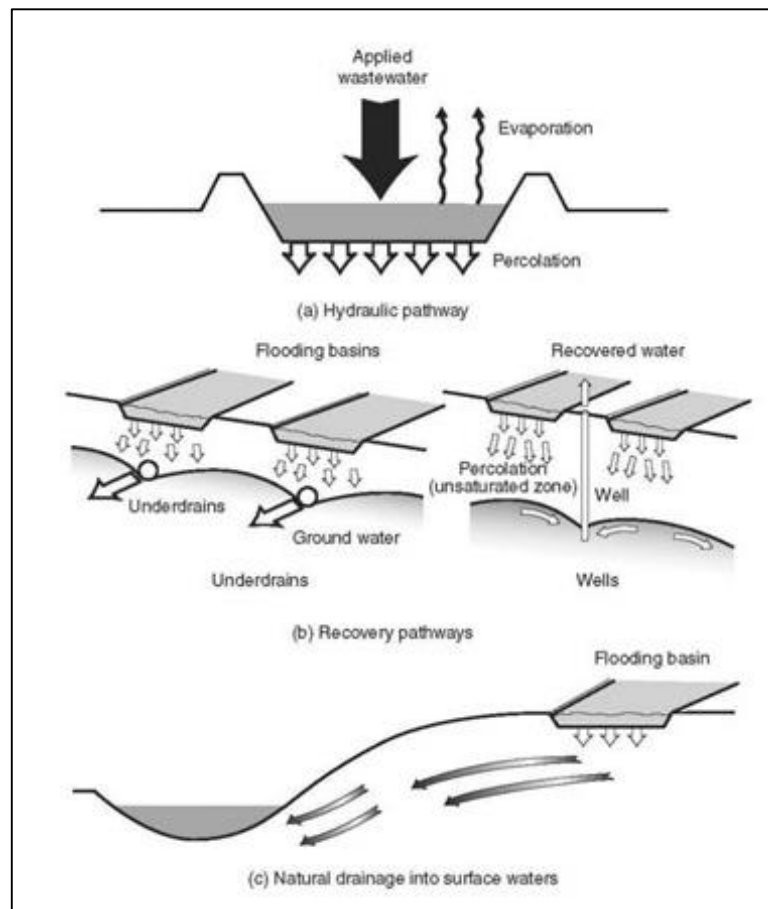
เป็นการใช้อัตราการรดที่สูงที่สุดในระบบบำบัดโดยดิน โดยจะกระจายน้ำเสียลงบนผิวดินและจะถูกบำบัดผ่านชั้นดิน ซึ่งน้ำเสียจะแทรกซึมเข้าไปในดิน สามารถไหลซึมผ่านดินไปยังชั้นน้ำใต้ดิน และน้ำที่บำบัดแล้วนี้จะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน กระบวนการนี้ใช้การบำบัดทางกายภาพ เคมีและฟิสิกส์ต่อเนื่องกัน มักจะใช้กับดินที่มีค่าการซึมผ่านปานกลางและสูง เช่น ทราย ทรายร่วน ระบบนี้ไม่นิยมใช้พืชเพราะอัตราการระบรทุกสูง ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมน้ำไนโตรเจนของพืช แต่ในบางกรณีจะมีการปลูกหญ้าหรือวัชพืช หรือปลูกพืชเพื่อรักษาหน้าดิน กระบวนการทางกายภาพและการกรองเกิดขึ้นที่ผิวดิน การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซึมเกิดขึ้นขณะที่น้ำซึมผ่านชั้นดิน กระบวนการทั้งหมดนี้สุดท้ายแล้วจะทำให้น้ำเสียที่บำบัดไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ การกรองน้ำเสียของระบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration) จะมีมากกว่าระบบอัตราไหลช้า วิธีนี้สามารถรับน้ำเสียได้ในอัตรา 6 - 125 m/year โดยปกติจะปล่อยน้ำเสียในอัตรา 10 - 240 cm/week และควรมีความลาดของพื้นที่ต่ำ (U.S. EPA 1981) ระบบนี้มีศักยภาพการกำจัดมลสารต่ำ การกรองน้ำเสียของระบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration) จะมากกว่าระบบอัตราไหลช้า (slow rate system) (U.S. EPA 1981; Ronald *et al.* 2006)

ระบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration) สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย, บีโอดี และฟิโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้เกือบสมบูรณ์ ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันของน้ำเสียจะเกิดสมบูรณ์เมื่อวงจรของภาระบรทุกได้ถูกใช้อย่างสมบูรณ์และระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียโดยทั่วไปแล้วระบบนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 50 และสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 70-90 ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน นอกจากนี้การกำจัดยังเกี่ยวข้องกับเวลาของน้ำเสียที่อยู่ในดิน ระยะทาง สภาพภูมิอากาศ และองค์ประกอบอื่นๆ (U.S. EPA 1981) ระบบบำบัดโดยดินแบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration) และเส้นทางการเดินทางของน้ำเสียในระบบนี้แสดงในภาพที่ 2.8 และ ภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.8 rapid infiltration

ที่มา : Isakandar (1981)



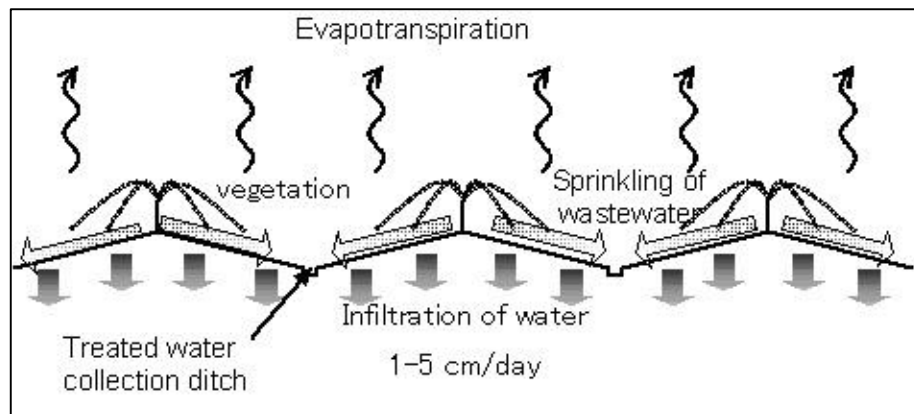
ภาพที่ 2.9 เส้นทางการเดินทางของน้ำเสียระบบไหลซึมเร็ว  
ที่มา : U.S. EPA (1981)

### (3) การบำบัดโดยดินแบบน้ำไหลนอง (overland flow system)

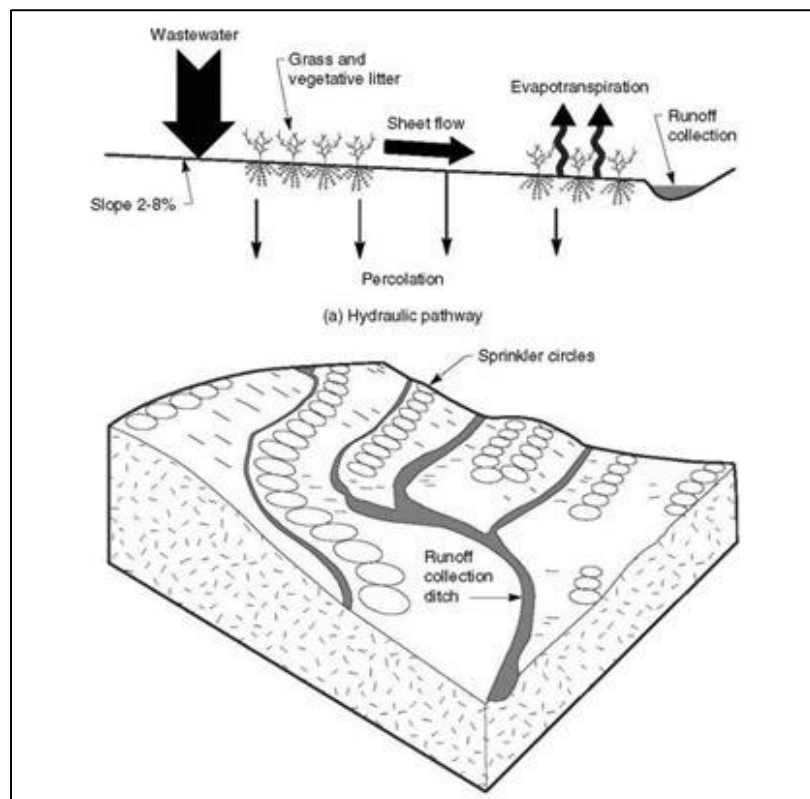
การบำบัดโดยดินแบบน้ำไหลนอง ถูกพัฒนาให้มีคุณสมบัติไหลซึมผ่านชั้นดินอย่างช้าๆเหมือนไหลผ่านดินเหนียว การบำบัดที่เกิดขึ้นของระบบ คือ น้ำเสียจะไหลลงผ่านพืชและดินลงมาตามความลาดชันอย่างราบเรียบ ซึ่งความลาดชันจะอยู่ในช่วงร้อยละ 2-8 ของระดับ น้ำที่ถูกบำบัดแล้วจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ด้านล่างของความลาดชัน ระบบน้ำไหลนอง (overland flow) จะไม่ยอมให้น้ำไหลผ่านชั้นดินหรือยอมให้ไหลผ่านน้อย กลไกการบำบัดส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างที่น้ำไหลผ่านพืชที่มีการเพาะปลูกไว้ เช่น การตกตะกอน การกรองหญ้า ปฏิกิริยาชีวเคมีและการดูดซับ สามารถรับน้ำได้ในอัตรา 3-20 m/year โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 6-40 cm/week (U.S. EPA 1981) ระบบนี้มักถูกออกแบบให้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สองหรือขั้นที่สาม ซึ่งขึ้นกับความต้องการของผู้ออกแบบ เพราะระบบน้ำไหลนอง (overland flow) มีค่าก่อสร้างต่ำ เดินระบบง่าย เวลาพักกักน้อย และใช้พลังงานน้อย

การออกซิเดชันทางชีวภาพ การตกตะกอน และการกรองเป็นกลไกการบำบัดขั้นพื้นฐานสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอย ส่วนการกำจัดไนโตรเจนจะใช้หลายวิธี

ร่วมกันทั้งการดูดไปใช้ของพืช ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน และการระเหยของแอมโมเนีย ระบบนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 70 - 90 ในการกำจัดฟอสฟอรัสกระบวนการหลักที่ใช้คือกระบวนการดูดซับ และการตกตะกอน สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ประมาณร้อยละ 50-70 ระบบน้ำไหลนอง (overland flow) และการเดินทางของน้ำเสียดังแสดงในภาพที่ 2.10 และ ภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 overland flow system  
ที่มา : Fujikawa (2011)



ภาพที่ 2.11 เส้นทางการเดินทางของน้ำเสียระบบน้ำไหลนอง  
ที่มา : U.S. EPA (1981)

### 2.3.2 วัตถุประสงค์ของการบำบัดโดยดิน

ในแต่ละรูปแบบของการบำบัดโดยดิน มีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างต่างกัน ขึ้นอยู่กับ การนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมและลักษณะพื้นที่ โดยวัตถุประสงค์ของระบบบำบัดโดยดิน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วัตถุประสงค์ของระบบบำบัดโดยดิน

การบำบัดโดยดิน	วัตถุประสงค์
ระบบอัตราไหลช้า (slow rate irrigation)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. บำบัดน้ำเสีย</li> <li>2. การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในทางเกษตรแทนการปล่อยทิ้ง และเป็นการอนุรักษ์น้ำ</li> <li>3. การใช้ประโยชน์จากสารอาหารในน้ำเสียให้กับพืช</li> <li>4. เป็นผลทางเศรษฐกิจในการใช้น้ำที่มีสารอาหารมาหมุนเวียนรดน้ำ</li> <li>5. การรักษาและการขยายของแนวพื้นที่สีเขียว</li> </ol>
ระบบไหลซึมเร็ว (rapid infiltration)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การบำบัดน้ำเสียเป็นวัตถุประสงค์หลัก</li> <li>2. การเติมน้ำใต้ดิน (groundwater recharge)</li> <li>3. การฟื้นฟูน้ำที่บำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่</li> <li>4. การเติมน้ำผิวดิน(การปล่อยทิ้ง)</li> <li>5. การเก็บกักน้ำบำบัดไว้ใต้พื้นที่เพาะปลูก เพื่อนำกลับมาใช้ในระยะเวลาเพาะปลูกต่อไป</li> </ol>
ระบบน้ำไหลนอง (overland flow)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประยุกต์ให้เกิดการบำบัดขั้นที่สองหรือขั้นที่สาม</li> <li>2. เพิ่มคุณภาพน้ำที่เกิดจากการบำบัดขั้นที่สอง</li> <li>3. เพื่อผลิตหญ้าอาหารสัตว์</li> <li>4. เพื่อการอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว</li> <li>5. สามารถกำจัดไนโตรเจน บีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้สูง</li> </ol>

ดัดแปลงมาจาก : เกสส์ชรัตน์ กชกรจารุงศ์ (2550) และ U.S.EPA (1981)

การเลือกใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียบนดิน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัดและ ชนิดของดินที่ใช้ (Pescod 1992 อ้างอิงใน เกสส์ชรัตน์ กชกรจารุงศ์ 2550) โดยต้องมีความสัมพันธ์ ระหว่างชนิดของดินและอัตราการระบรทุกของน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ

### 2.3.3 กลไกการบำบัดโดยดิน

องค์ประกอบของกลไกที่สำคัญมี 4 ส่วน คือ พีช ชั้นดิน จุลินทรีย์และน้ำ โดยมีกลไกการบำบัดดังนี้ (Metcalf and Eddy 2004 อ้างอิงใน พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ 2555)

(1) พีช มีหน้าที่สำคัญคือ สร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมให้กับจุลินทรีย์ ลำต้นและใบช่วยให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอน และช่วยชะลอความเร็วของอัตราการไหลของน้ำให้ช้าลงด้วย นอกจากนี้ยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ พีชจะสามารถนำก๊าซในบรรยากาศรวมทั้งออกซิเจนลงไปสู่ราก (รากฝอย) บริเวณรากฝอยเป็นบริเวณที่มีออกซิเจน ส่วนบริเวณที่อยู่ไกลออกไปจะมีสภาพไร้ออกซิเจน บริเวณที่อยู่ระหว่างบริเวณที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนเป็นบริเวณที่มีความสำคัญโดยที่บริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงธาตุต่างๆ

(2) ชั้นดิน ประกอบด้วย ดิน กรวด และทราย นอกจากจะเป็นที่อยู่ของพีชแล้วยังเป็นแหล่งอาหารของพีชและเป็นพื้นที่สำหรับประจุสารเชิงซ้อน สารประกอบต่างๆ มาทำปฏิกิริยากัน ดินเป็นส่วนที่รากพืชยึดเกาะ ช่องว่างของอนุภาคดินทำหน้าที่เหมือนตัวกรอง เมื่อน้ำที่ผ่านระบบบำบัดโดยดินอนุภาคของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำทั้งหมดจะถูกดักจับไว้บริเวณผิวดิน

(3) น้ำ น้ำเสียที่ไหลผ่านด้านบนและในชั้นดิน จะนำพาก๊าซและสารอินทรีย์ต่างๆมา ให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ และยังช่วยในการเจริญเติบโตของพีช โดยพีชสามารถดูดซับสารอาหารได้ง่ายขึ้น และช่วยสร้างสภาวะที่เหมาะสมทางชีวเคมีของจุลินทรีย์รวมทั้งพีชอีกด้วย

(4) จุลินทรีย์ ได้แก่ พวกแบคทีเรีย สาหร่าย รา โปรโตซัว จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อใช้สำหรับเป็นอาหารและพลังงานในการดำเนินชีวิต โดยหน้าที่ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน คือ

1.) การย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป COD และ SS สูง เมื่อรดลงไปบนดินจะถูกสิ่งมีชีวิตในดินย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ ฮิวมัส และสารอาหารพีช พีชได้รับประโยชน์โดยตรงจากสารอาหารที่เกิดขึ้น เช่น ไนเตรต แอมโมเนียม ฟอสเฟต และซัลเฟต เป็นต้น โดยน้ำที่ผ่านระบบบำบัดโดยดินจะมีสารอินทรีย์ลดลงซึ่งฮิวมัสจะช่วยให้การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ช่วยให้อนุภาคดินจับตัวกันเป็นเม็ดดิน ทำให้ดินมีช่องว่างมากขึ้น การซึมซับน้ำและการระบายอากาศดีขึ้น

2.) การตรึงไนโตรเจน จุลินทรีย์ในดินบางชนิดสามารถเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีทั้งชนิดที่ตรึงไนโตรเจนได้เมื่อต้องอาศัยร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น และที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้โดยอิสระ โดยกระบวนการทางเคมี โดยขั้นแรกก๊าซไนโตรเจนจะถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนีย และมีเอนไซม์ไนโตรจิเนสเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับกรดอินทรีย์ได้เป็นกรดอะมิโน และเปลี่ยนเป็นโปรตีนต่อไป เมื่อจุลินทรีย์เหล่านี้ตายและถูกย่อยสลาย สารประกอบไนโตรเจนภายในเซลล์ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นสารอาหารพีช ทำให้ไนโตรเจนในน้ำทิ้งลดลง (พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ 2555) โดยหน้าที่ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน พบว่าเชื้อรา มีความสามารถในการย่อยหินฟอสเฟตได้ประมาณ 1-30% และมีความสามารถในการละลายสารประกอบฟอสเฟตได้ คือเชื้อราไมคอร์ไรซา (mycorrhiza fungi) ซึ่งเป็นราที่อาศัยอยู่กับรากพืช และช่วยให้พืชดูดซับธาตุฟอสฟอรัสจากดินให้กับพืชอาศัยได้มากกว่าเดิม (จิราภรณ์ อินทสาร และคณะ 2556)

กลไกในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดโดยดินมีกลไกรวมกัน 3 แบบ คือ กลไกทางกายภาพ กลไกทางเคมี และกลไกทางชีวภาพ ดังตารางที่ 2.4

โดยกลไกการบำบัดทางกายภาพ (physical mechanism) ประกอบไปด้วยการตกตะกอน (sedimentation) การกรอง (filtration) การดูดซับ (adsorption) และการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเสีย (volatilisation)

ส่วนกลไกการบำบัดทางเคมี (chemical mechanism) ประกอบไปด้วยการรวมตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ (precipitation) การดูดซับสารอาหาร (adsorption) การย่อยสลาย (decomposition) หรือการเปลี่ยนแปลงของสารที่ไม่เสถียร

และกลไกการบำบัดทางชีวภาพ (biological mechanism) ประกอบไปด้วยการเผาผลาญของแบคทีเรีย (bacterial metabolism) และการสลายตัวไปตามธรรมชาติ (natural die-off) (Vymazak *et al.* 1998) ซึ่งจากกระบวนการบำบัดเพื่อลดสารปนเปื้อนต่างๆทำให้เกิดผลกระทบที่อยู่ในรูปของแข็งที่สามารถตกตะกอนได้ (settle solids), คอลลอยด์ (colloidal solids), โลหะหนัก (heavy metals), สารอินทรีย์ที่เหลื้ออยู่ (refractory organics), แบคทีเรียและไวรัส (bacterial and viruses)

ซึ่งผลกระทบเหล่านี้เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการบำบัด (primary effect), ผลกระทบที่เกิดทางอ้อม (secondary effect) และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการบำบัดสารปนเปื้อนตัวอื่น (incidental effect)

โดยในงานวิจัยที่ศึกษา เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่มีความสนใจเฉพาะประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นเฉพาะในดิน โดยไม่มีพีชมาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.4 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยดิน

mechanism	contaminant affect*								description
	SS	CS	BOD	N	P	HM	RO	B&V	
<b>physical</b> -การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง -การกรอง -การดูดซับ -การระเหยของแอมโมเนีย	P	P	I	I	I	I	I	I	- การตกตะกอนของแข็งตามแรงโน้มถ่วง - การกรองอนุภาค - แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค - การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเสีย
<b>chemical</b> -การฟอร์มตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ -การดูดซับ -การย่อยสลาย					P	P			- การฟอร์มตัวของสารประกอบไม่ละลายน้ำ - การดูดซับสารอาหาร - การย่อยสลายหรือการเปลี่ยนแปลงของสารที่ไม่เสถียร เช่น การออกซิชั่นและการรีดักชัน
<b>biological</b> -การเผาผลาญของแบคทีเรีย -การสลายตัวไปตามธรรมชาติ		P	P	P			P	P	- บำบัดสารแขวนลอยในรูปของคอลลอยด์และสารอินทรีย์ละลายน้ำ - การสลายตัวตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตในสภาพที่ไม่เหมาะสม

\*SS=settled solids, CS=colloidal solids, HM=heavy metals, RO=refractory organics, B&V=bacterial and viruses, P=primary effect (ผลกระทบโดยตรง), S= secondary effect (ผลกระทบขั้นที่2), I=incidental effect (ผลกระทบที่เกิดจากการกำจัดสารปนเปื้อนอื่น)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Stowell *et al.* (1981) อ้างอิงใน Vymazal *et al.* (1998)

### 2.3.4 คุณลักษณะของดิน

ดินเป็นวัตถุตามธรรมชาติที่เกิดจากการผุพังสลายตัวของหินและแร่ต่างๆ ผสมรวมกับอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์สารต่างๆ ที่ได้มาจากการสลายตัวของเศษซากพืชและสัตว์และแร่ธาตุ



ต่างๆ จนเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะร่วนไม่เกาะกันแข็งเป็นก้อนเดียวกัน เกิดขึ้นปกคลุมพื้นผิวโลกอยู่เป็นชั้นบางๆ และเป็นที่ยึดเหนี่ยวของลำต้นพืชสำหรับการเจริญเติบโต โดยรากของพืชจะเติบโตชอนไชแพร่กระจายลงไปดินอย่างกว้างขวางทั้งแนวลึกและแนวราบ ดินที่ร่วนซุยและมีชั้นดินลึกพืชสามารถยึดเกาะและมีความแข็งแรงสูง รากของพืชจะเจริญเติบโตและสามารถเกาะยึดดิน ต้านทานต่อลมพายุไม่ทำให้ต้นพืชล้มหรือถอนโคนได้ และยังเป็นแหล่งให้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากในดินมีอินทรีย์วัตถุ และแร่ธาตุต่างๆ ในรูปแบบที่รากพืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย เป็นแหล่งที่เก็บกักน้ำหรือความชื้นให้อยู่ในรูปที่รากพืชสามารถดึงดูดได้ง่าย เพื่อนำไปหล่อเลี้ยงลำต้นและสร้างการเจริญเติบโต (เพ็ญนภา ทองประไพ 2555)

#### 2.3.4.1 โครงสร้างของดิน

โครงสร้างของดินเกิดจาก อนุภาคของดินจัดเรียงกันและเชื่อมยึดกันเป็นเม็ดดินและเม็ดดินจะมีการเชื่อมโยงกันระหว่างเม็ดดิน โดยโครงสร้างจะต้องประกอบด้วยลักษณะสำคัญครบ 2 ประการคือ มีการจัดเรียงตัวแล้วเชื่อมยึดติดกันเกิดเป็นเม็ดดิน และเม็ดดินที่เกิดขึ้นต้องมีรูปร่างคล้ายคลึงกัน สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโครงสร้างดิน เช่น สารอินทรีย์บางชนิดในดิน อนุภาคดินเหนียว อินทรีย์วัตถุ จุลินทรีย์ เป็นต้น หน้าที่และความสำคัญของโครงสร้างของดิน คือ เป็นที่สำหรับการระบายน้ำหรือการเคลื่อนที่ของน้ำภายในดิน ระหว่างโครงสร้างนั้นจะมีช่องว่าง ยกเว้นดินที่มีโครงสร้างทึบ ซึ่งมีช่องว่างน้อย หรือเล็กมากจนสังเกตได้ยาก ช่องว่างเหล่านั้นเป็นที่จำกัดสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำ เป็นที่สำหรับการเคลื่อนที่ของอากาศ ถ้ามีช่องว่างที่น้ำยังไม่เต็ม อากาศก็จะเข้าไปแทนที่ได้ การปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืช การแลกเปลี่ยนประจุธาตุอาหารเพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้ได้ ดินช่วยในการการเจริญเติบโตของพืช การยึดเหนี่ยวของต้นพืช การชอนของรากพืช ถ้าดินมีโครงสร้างที่ดีการชอนของรากพืชจะได้ลึกและกว้าง การยึดเหนี่ยวของลำต้นของพืชจะดีขึ้น ทั้งนี้ย่อมหมายถึง รากพืชสามารถเสาะหาอาหารธาตุได้ดีด้วย

#### 2.3.4.2 สีของดิน (soil color)

สีดิน เป็นสมบัติของดินที่มองเห็นได้ชัดเจน สีของดิน มีหลายสีส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสีดำ น้ำตาลแดง เหลือง เหลืองแดง เหลืองเทา หรือสีเทา การสังเกตสีของดิน ทำให้สามารถประเมินสมบัติทางกายภาพและเคมีบางอย่างของดินได้ เช่น สภาพการระบายน้ำ ของดิน ระดับน้ำใต้ดิน หรือความอุดมสมบูรณ์ของดิน

1.) ดินสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ ดินมีอินทรีย์วัตถุในดินมาก หรือเป็นดินที่เกิดจากการผุพังสลายตัวของหิน-แร่ ที่มีสีเข้ม เช่น หินภูเขาไฟพวกบะซอลต์แกบโบร ดินสีนี้มักมีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื่องจากมีอินทรีย์วัตถุมาก

2.) ดินสีขาวหรือสีเทาอ่อน อาจเกิดจากวัตถุต้นกำเนิดของดินที่มาจากหินที่มีสีจาง หรือเป็นทรายมาก เช่น เกิดจากการสะสมของปูน (lime) หรือยิปซัม (gypsum) หรือเกลือชนิดต่างๆ มักเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีการระบายน้ำดี

3.) ดินสีเหลืองหรือสีแดง เป็นดินที่มีอัตราการผุพังสลายตัวสูง เนื่องจากมีพวกออกไซด์ของเหล็กเคลือบผิวอนุภาคมาก มักเกิดในบริเวณที่สูงตามเนินเขาหรือที่ราบไหล่เขา มีการระบายน้ำ ดีถึงดีมากถ้าดินมีการระบายน้ำ ในหน้าตัดดีส่วนใหญ่จะมีสี แดงแต่ถ้าการระบายน้ำไม่ดีเท่ากรณีแรกดินจะมีสีเหลือง

4.) ดินสีเทาปนน้ำเงิน เป็นดินที่อยู่ในบริเวณมีน้ำขังตลอด มีการระบายน้ำไม่เพียงพอ ทำให้สารประกอบของเหล็กอยู่ในรูปที่มีสีเทา

5.) ดินสีประ หรือดินที่มีหลายสีผสมกัน เป็นดินที่อยู่ในสภาพที่มีน้ำขัง สลับกับสภาพที่ดินแห้งโดยทั่วไปมักปรากฏเป็นจุดประสี เหลืองหรือสีแดงบนพื้นที่สีเทา เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบของเหล็ก ที่จะแสดงสีเทาเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีน้ำขัง (ขาดออกซิเจน) และเปลี่ยนรูปเป็นสารที่ให้สีแดงเมื่ออยู่ในสภาวะดินแห้ง (มีออกซิเจนมาก)

### 2.3.4.3 องค์ประกอบของดิน

โดยทั่วไป ดินประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วนใหญ่ คือ (อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ 2548; ยงยุทธ โอสภสกา และคณะ 2541) ดังแสดงในภาพที่ 2.12

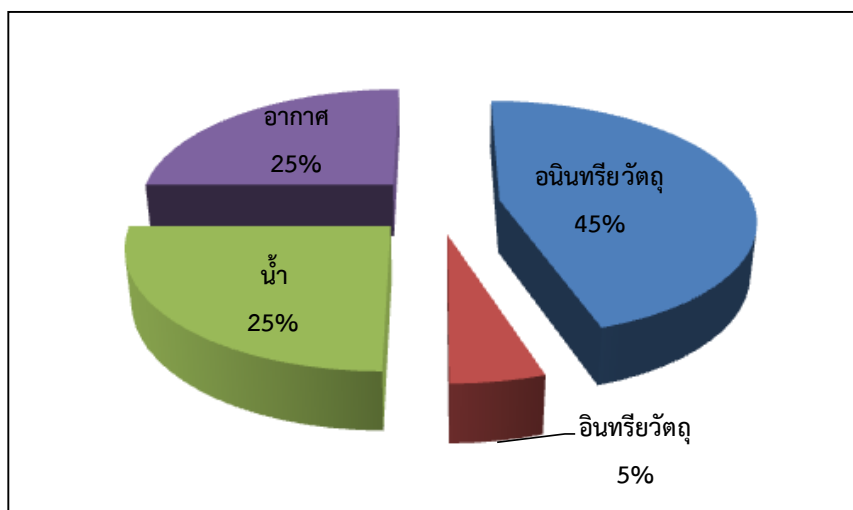
1.) อนินทรีย์วัตถุ (mineral matter) เป็นส่วนที่เกิดจากชิ้นเล็กชิ้นน้อยของแร่และหินต่าง ๆ สลายตัวโดยทางเคมี ทางฟิสิกส์ และทางชีวเคมี มีปริมาณในดินประมาณร้อยละ 45 ประโยชน์ของอนินทรีย์วัตถุที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น เป็นแหล่งธาตุอาหารที่สำคัญ ควบคุมลักษณะของเนื้อดิน ความหยاب ความละเอียดของดิน และเป็นส่วนสำคัญในการเกิดขบวนการทางเคมีต่าง ๆ ในดิน ยิ่งดินชนิดที่มีขนาดเล็กมากเท่าไรปฏิกิริยาเคมีจะมีมากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และเป็นพื้นผิวที่มีประจุเพราะมีอนุภาคเล็กมาก โดยเฉพาะส่วนที่เป็นอนุภาคขนาดดินเหนียว เนื่องจากขนาดของอนุภาคเล็กจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ประกอบกับที่ผิวสัมผัสจะมีประจุ

2.) อินทรีย์วัตถุ (organic matter) ได้แก่ส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังหรือการสลายตัวของเศษเหลือของพืชและสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดิน มีปริมาณประมาณร้อยละ 5 มีความสำคัญกับการเจริญเติบโตของพืชและการใช้ประโยชน์ของจุลินทรีย์ คือเป็นแหล่งของธาตุอาหารแก่พืชและจุลินทรีย์ โดยเฉพาะไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน (C) ของจุลินทรีย์ ส่งเสริมสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยให้ดินร่วนซุย ระบายน้ำระบายอากาศได้ดี และช่วยในการอุ้มน้ำ ระบายน้ำและอากาศได้ดีขึ้น

3.) น้ำ พบอยู่ในช่องระหว่างเม็ดดิน (aggregate) หรืออนุภาคดิน (particle) ที่เรียกช่องหรือที่ว่างนี้ว่า pore space ปริมาณน้ำในดินประมาณร้อยละ 25 ถ้าน้ำในดินมีปริมาณน้อยลงแรงยึดเหนี่ยวของดินที่มีต่อน้ำจะมากขึ้น น้ำในดินช่วยละลายธาตุอาหารพืช และเป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารเหล่านั้นมาสู่รากพืชจึงมักเรียกน้ำในดินว่าสารละลายดิน (soil solution) โดยน้ำในอนุภาคดินพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด เนื่องจากเมื่อมีน้ำปริมาณน้อยแรงยึดเหนี่ยวของดินจะเพิ่มขึ้น ซึ่งพืชไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของดินได้ ถ้าหากว่าน้ำในดินมีปริมาณมากพืชจะสามารถนำน้ำในดินไปใช้ประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย ซึ่งปริมาณน้ำหรือความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของเนื้อดิน

4.) อากาศ ที่ว่างในดินระหว่างก้อนดินหรืออนุภาคดินนั้นนอกจากมีน้ำแล้วยังมีอากาศอยู่ด้วย ปริมาณอากาศในดินประมาณร้อยละ 25 โดยอากาศในดินที่พบคือ แก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศในดินมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่มีอยู่ในดินเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศในการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ และอากาศยังมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรสภาพของธาตุต่าง ๆ ในดิน รากพืชจำเป็นต้องใช้อากาศในการหายใจ

และดึงดูน้ำและธาตุอาหารเพื่อให้ได้พลังงานในการดูน้ำและธาตุอาหาร ตลอดจนใช้ในกิจกรรมทางชีวเคมีต่าง ๆ



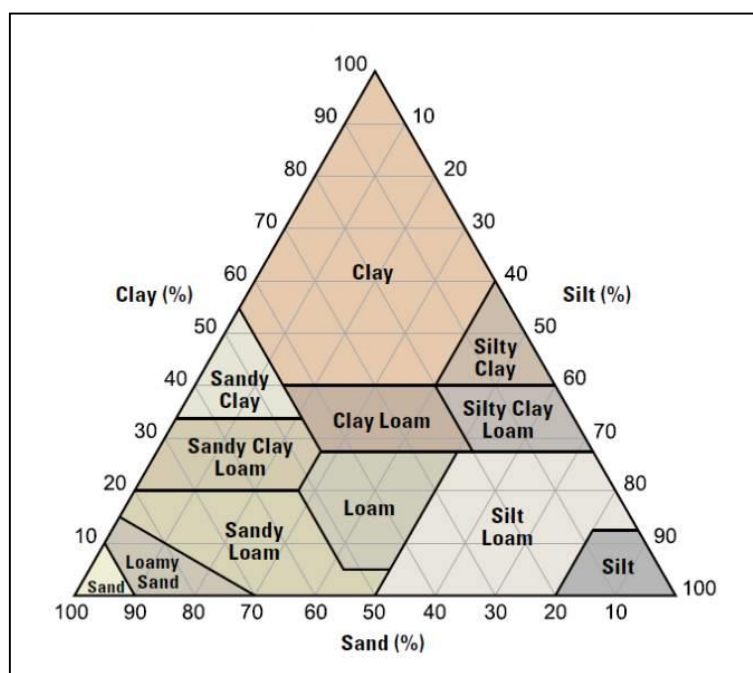
ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบของดินโดยปริมาตรที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก  
ที่มา : ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ (2541)

#### 2.3.4.4 สมบัติทางกายภาพของดิน

ลักษณะทางกายภาพของดินสามารถสังเกตได้จากภายนอกโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบภายในทางเคมี เช่น เนื้อดิน โครงสร้างดิน สีของดิน ความพรุนของดิน นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึงพฤติกรรมที่ดินแสดงออกมาภายนอกอนุภาคของดินด้วย เช่น การดูยึดน้ำ การระบายน้ำระบายอากาศ การดูดและคายความร้อน การเกาะกันของอนุภาคดิน การเกาะกันของอนุภาคดินและอนุภาคอื่น เป็นต้น (อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ 2548)

1.) เนื้อดิน หมายถึง องค์ประกอบเชิงกายภาพของดิน โดยดินในแต่ละที่จะมีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากดินประกอบขึ้นจากของอนุภาคตะกอนหลายขนาด อนุภาคที่ใหญ่ที่สุดคืออนุภาคทราย (sand) อนุภาคขนาดรองลงมาคืออนุภาคทรายแป้ง (silt) และอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดคืออนุภาคดินเหนียว (clay) ดินแต่ละเขตที่มีความแตกต่างกันทางด้านธรณีวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศจะมีสัดส่วนผสมของอนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาดต่างกัน เป็นผลให้เกิดเนื้อดินหลายชนิด และเนื่องจากสัดส่วนผสมของกลุ่มอนุภาคที่วิเคราะห์จริงจากตัวอย่างดินที่มีสมบัติคล้ายกัน อาจแตกต่างกันได้ นักวิทยาศาสตร์ทางดินจึงจัดเนื้อดินเป็นกลุ่มประเภท (textural classes) ซึ่งมีด้วยกัน 12 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 2.13 เนื้อดินที่ถูกจัดให้อยู่ในประเภทเดียวกัน ถึงแม้จะมีความผันแปรของสัดส่วนผสมของอนุภาค 3 ชนิด แต่จะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่คล้ายกัน (ยงยุทธ โอสถสกา และคณะ 2541)

ความหยาบหรือความละเอียดของเนื้อดิน พิจารณาจากขนาดของชิ้นส่วนเดี่ยวที่เป็นอนินทรีย์สารที่ประกอบกันขึ้นเป็นเนื้อดิน เนื้อดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก โดยจะมีผลทางอ้อม คือ เนื้อดินจะเป็นปัจจัยควบคุมปัจจัยอื่นๆของดิน เช่น การอุ้มน้ำ การระบายน้ำ การดูดยึดธาตุอาหารในดิน เป็นต้น การจำแนกดินช่วยให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของดินประเภทต่างๆ ได้แก่ ความสามารถในการกักเก็บน้ำ และการถ่ายเทพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมและวิศวกรรม เป็นต้น



ภาพที่ 2.13 สัดส่วนการกระจายตัวของเนื้อดิน (soil textural triangle)  
ที่มา : Patent Science and Technology (2016)

แต่ละมุมของไดอะแกรมสามเหลี่ยมประกอบด้วยประเภทของเนื้อดินที่แสดงลักษณะเด่นของแต่ละกลุ่มตามขนาดของอนุภาค

- มุมบนเป็นประเภทดินเหนียว (clay) เป็นกลุ่มที่มีอนุภาคที่เล็กที่สุดมีเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลน้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตร
- มุมล่างซ้ายเป็นประเภทดินทราย (sand) เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลระหว่าง 0.02-2.00 มิลลิเมตร
- มุมล่างขวาเป็นประเภทดินทรายแป้ง (silt) เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลระหว่าง 0.002-0.02 มิลลิเมตร

เช่น ดินทรายร่วน ประกอบด้วยอนุภาคของทรายร้อยละ 80 อนุภาคของทรายแป้งร้อยละ 10 และอนุภาคของดินเหนียวร้อยละ 10 โดยที่ดินร่วน ประกอบด้วยอนุภาคของทรายร้อยละ 40 อนุภาคของทรายแป้งร้อยละ 40 และอนุภาคของดินเหนียวร้อยละ 20 และดิน

เหนียว ประกอบด้วยอนุภาคของทรายร้อยละ 20 อนุภาคของทรายแป้งร้อยละ 20 และอนุภาคของดินเหนียวร้อยละ 60

ในการใช้งานดินเชิงปฏิบัติสำหรับเพาะปลูกโดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องทราบเนื้อดินที่แน่นอน เกษตรกรอาจจำแนกเนื้อดินออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

(1) กลุ่มดินเนื้อละเอียด (fine-textured soils) เป็นดินที่มีอนุภาคดินเหนียวปริมาณมาก ดินกลุ่มนี้สามารถอุ้มน้ำได้มาก ระบายน้ำและอากาศได้ยาก มีความอุดมสมบูรณ์สูง เมื่อเปียกจะเหนียวเหนอะหนะ เมื่อแห้งจะจับตัวเป็นก้อนแข็ง เนื้อดินที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินเหนียว (clay), ดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) ดินเหนียวปนทราย (sandy clay) ดินร่วนเหนียว (clay loam) และดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay loam)

(2) กลุ่มดินเนื้อปานกลาง (medium-textured soils) ดินกลุ่มนี้มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารและอุ้มน้ำได้ดีพอสมควร ความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง เหมาะแก่การเพาะปลูกมากที่สุด เนื้อดินที่อยู่ในกลุ่มนี้ ดินร่วนเหนียวปนทราย (sand clay loam) ดินร่วน (loam) ดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) และดินทรายแป้ง (silt)

(3) กลุ่มดินเนื้อหยาบ (coarse-textured soils) เป็นดินที่มีอนุภาคทรายปริมาณมาก ดินกลุ่มนี้ดูดซับธาตุอาหารได้น้อย มีอนุภาคขนาดใหญ่เมื่อจัดเรียงตัวกันทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่จึงทำให้การระบายน้ำและอากาศดีเกินไป ส่งผลเสียในการชะละลายสารอาหารที่พืชลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ง่าย

ความสำคัญของเนื้อดิน มีดังนี้

- เนื้อดินเป็นตัวการในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity: CEC) บ่งบอกถึงความจุในการดูดซับหรือแลกเปลี่ยนธาตุอาหารได้มากหรือน้อย เช่น ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูง จะมีความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดีกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวต่ำ เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวจะมีพื้นที่ในการดูดประจุบวกหรือธาตุอาหารได้มากกว่า

- เนื้อดินช่วยบอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดินเนื้อหยาบจะมีระดับธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

- เนื้อดินช่วยบอกถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ดินเนื้อหยาบจะมีความต้านทานน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

- เนื้อดินช่วยบอกให้ทราบถึงสภาพการถ่ายเทอากาศในดิน เช่น ดินทรายจะมีการถ่ายเทอากาศในดินกว่าดินเหนียว

- เนื้อดินช่วยบอกให้ทราบถึงปริมาณความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ดินทรายจะมีความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยกว่าดินเหนียวและดินร่วน

#### 2.3.4.5 สมบัติทางเคมีของดิน

สมบัติทางเคมีของดิน เป็นสมบัติที่เกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของดิน ตลอดจนปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในดิน องค์ประกอบที่จะแสดงสมบัติหรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของดินเป็นส่วนที่มีขนาดเล็กมากซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายดินที่เรียกว่าคอลลอยด์ดิน (soil colloid) สำหรับการนำดินมาใช้ในการเพาะปลูกในส่วนของสมบัติทางเคมีจะรวมไปถึงธาตุต่าง ๆ ที่เป็นอาหารของพืชด้วย ซึ่งเดิมเป็นองค์ประกอบของหินและแร่ต่าง ๆ รวมทั้งอินทรีย์วัตถุที่เป็นวัตถุให้

กำเนิดดิน และเมื่อสลายตัวผงฟุ้งกลายเป็นดินธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปต่าง ๆ ทั้งในรูปที่เป็นประโยชน์และไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช

#### 1.) คอลลอยด์ดิน

เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายดิน เป็นส่วนสำคัญที่เกิดปฏิกิริยาหรือแสดงกิจกรรมทางเคมีของดิน เนื่องจากคอลลอยด์ดินมีขนาดเล็กมากจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและมีประจุ ขนาดของอนุภาคคอลลอยด์เล็กกว่า 0.001 มิลลิเมตร (1 ไมโครเมตร) โดยทั่วไปมีขนาดเล็กถึง 0.2–0.5 ไมโครเมตร คอลลอยด์ดินแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อนินทรีย์คอลลอยด์ (inorganic colloid) และอินทรีย์คอลลอยด์ (organic colloid) อนินทรีย์คอลลอยด์ประกอบด้วย แร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) ไฮดรอลูมินัม (hydrated aluminum) และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และอลูมินัม (iron and aluminum hydroxide) ส่วนอินทรีย์คอลลอยด์คือส่วนที่ได้จากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ที่เรียกว่าฮิวมัส ที่ผิวของคอลลอยด์จะเต็มไปด้วยประจุทั้งบวกและลบ แต่ส่วนใหญ่จะมีประจุสุทธิเป็นลบ

#### 2.) ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

เป็นค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (cation exchange capacity: CEC) หรือปริมาณไอออนบวกที่ดินดูดซับไว้ได้ ซึ่งไอออนบวกนี้สามารถแลกเปลี่ยนได้กับไอออนบวกอื่นๆในสารละลายดิน และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนที่สามารถยึดติดไอออนบวกเอาไว้ได้คือ คอลลอยด์ดิน เนื่องจากโดยปกติที่ผิวของคอลลอยด์ดินมีประจุลบเป็นจำนวนมาก ดังนั้นดินจะมีค่า CEC มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณคอลลอยด์ต่างๆในดินนั้นๆ ไอออนบวกที่ทำการตรวจวัดคือ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) และ โซเดียม (Na) ซึ่งถือว่าไอออนบวกเหล่านี้ถูกดูดซับโดยคอลลอยด์ดินอยู่เป็นสัดส่วนมากเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนบวกชนิดอื่น ดินที่มีค่า CEC สูงมีโอกาสสูญเสียธาตุอาหารในการชะละลายน้อยกว่าดินที่มีค่า CEC ต่ำ เนื่องจากไอออนบวกต่างๆถูกยึดโดยคอลลอยด์ดินได้มากกว่า (อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ 2548) โดยระดับการประเมินค่า CEC ของดิน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ระดับการประเมินค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน

ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cmol/kg)	ระดับ
> 30	สูงมาก
20 – 30	สูง
15 – 20	สูงปานกลาง
10 – 15	ปานกลาง
5 – 10	ต่ำปานกลาง
3 – 5	ต่ำ
< 3	ต่ำมาก

ที่มา : Land Classification Division and FAO Project Staff (1973) อ้างอิงใน igitiny พงศ์-พิริยะกิจ (2546)

### 3.) ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

ความเป็นกรดเป็นด่างของดินขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในดิน มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเป็นตัวควบคุมการละลายธาตุอาหารในดินออกมาอยู่ในสารละลายหรือน้ำในดิน ถ้าดินมีสภาพเป็นกรดหรือเบส ธาตุอาหารในดินอาจจะละลายออกมาได้น้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช หรือในทางตรงกันข้ามธาตุอาหารบางชนิดอาจจะละลายออกมามากเกินไปจนเป็นพิษต่อพืชได้ พืชแต่ละชนิดชอบที่จะเจริญเติบโตในดินที่มีช่วง pH ต่างๆ กัน พืชทั่วไปมักจะเจริญเติบโตในช่วง pH 6-7 ซึ่งเป็นช่วงที่ธาตุอาหารพืชต่างๆ มีความเป็นประโยชน์สูงกว่าช่วง pH อื่น โดยทั่วไปดินในเขตร้อนชื้นมีแนวโน้มเป็นกรด เนื่องจากในสภาพที่มีฝนตกมาก ให้อำนาจให้เกิดการชะละลาย (leaching) ไอออนประจุบวกที่เป็นต่าง เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  และ  $\text{Na}^+$  ออกไปจากดิน โดยไอออนเหล่านี้ถูกแทนที่ด้วย  $\text{H}^+$  ได้มากกว่าเขตที่มีฝนตกน้อย และการใช้พื้นที่ทำการเกษตรจะเร่งให้ดินเกิดความเป็นกรดเร็วขึ้น (เพ็ญญา ทองประไพ 2555)

- ดินที่มีความเป็นกรด หมายถึงดินที่มีคุณสมบัติคล้ายกรดอ่อน (weak acid) มากกว่ากรดแก่ มีค่า pH น้อยกว่า 7 เนื่องจากดินจะมีสารที่แสดงความเป็นกรด  $\text{H}^+$  ส่วนหนึ่งอยู่ในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นส่วนใหญ่ยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคดิน โดยจะถูกดูดยึดโดยคอลลอยด์ดิน  $\text{H}^+$  ส่วนที่อยู่ภายใต้อำนาจการดูดยึดของคอลลอยด์ดินเรียกว่า ความเป็นกรดแฝง (potential acidity) และส่วนที่ละลายอยู่ในสารละลายดินเรียกว่า ความเป็นกรดจริง (active acidity) ซึ่งส่วนที่เป็นกรดจริงเป็น  $\text{H}^+$  ที่สามารถตรวจวัดได้โดยการวัด pH ดินทั่ว ๆ ไป ความเป็นกรดของดินเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ และการหายใจของรากพืชเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสของสารประกอบอลูมิเนียม เกิดจากขบวนการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุซึ่งก่อให้เกิดกรดอินทรีย์ และกรดอนินทรีย์ เกิดจากการใช้ปุ๋ยเคมีที่ให้ผลตกค้างเป็นกรด เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินที่ตกตะกอนทับถมจากตะกอนน้ำกร่อย มีสารประกอบไพไรต์ (pyrite;  $\text{FeS}_2$ ) สูง และเมื่อสารประกอบไพไรต์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดดินเปรี้ยวจัดหรือดินกรดจัด เกิดจากวัตถุกำเนิดดินซึ่งเป็นหินที่มีสมบัติเป็นกรด (acid rock) เช่น หินแกรนิต และหินโรโอไลต์ เมื่อพัฒนาเป็นดินก็จะทำให้ดินนั้นมีสมบัติเป็นกรด

- ดินที่มีความเป็นกลาง เป็นดินที่มีค่า pH เท่ากับ 7 หมายความว่าเมื่อนำดินไปละลายน้ำแล้วมี  $\text{OH}^-$  เท่ากันกับ  $\text{H}^+$  พอดี เป็นดินที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

- ดินที่มีความเป็นด่าง เป็นดินที่มีค่า pH มากกว่า 7 หมายความว่าเมื่อนำดินไปละลายน้ำแล้วมี  $\text{OH}^-$  มากกว่า  $\text{H}^+$  สำหรับความเป็นด่างของดินเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการสลายตัวฟุ้งของหิน และแร่ที่มีสมบัติเป็นด่าง เกิดจากการใส่ปุ๋ยมากเกินไป (over liming) และการใช้น้ำชลประทานที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบสูง ในเขตแห้งแล้งดินมีการสะสมของเกลือเนื่องจากประจุบวกที่เป็นต่างที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสลายตัวฟุ้งอยู่กับที่ (weathering) ของหิน และแร่ไม่ได้ถูกชะล้างไปไหน ยังคงสะสมอยู่ในดิน เนื่องจากมีฝนตกน้อย ทำให้ดินเป็นด่าง

ความเป็นกรด-ด่าง แต่ละชั้นบอกถึงลักษณะดินต้นกำเนิด สารเคมีที่อยู่ในฝนหรือน้ำที่ไหลลงสู่ดิน การจัดการดิน และกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดิน (พืช สัตว์ และจุลินทรีย์) เช่นเดียวกับ pH ของน้ำ pH ของดินวัดโดยใช้ค่าลือก pH ของดินเป็นตัวบ่งชี้สมบัติทางเคมีของดินและธาตุอาหารในดิน กิจกรรมของสารเคมีในดินส่งผลต่อ pH พืชแต่ละชนิดก็จะขึ้นได้ในดินที่มี pH ต่างกัน เกษตรกรจึงมักจะใส่สารลงไปดินเพื่อเปลี่ยนค่า pH ให้เหมาะกับชนิดของพืชที่จะปลูก pH ของดินยังมีผลต่อ pH ของน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำอื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียง ดังเช่น แม่น้ำ หรือทะเลสาบ สามารถประเมินความรุนแรงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน ได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การแปลความหมายค่า pH ของดิน

ค่า pH	การแปลความหมาย
<4.0	เป็นกรดจัดมาก
4.0-5.0	เป็นกรดจัด
5.0-6.0	เป็นกรดปานกลาง
6.0-7.0	เป็นกรดอ่อน
7.0-8.0	เป็นด่างอ่อน
8.0-9.0	เป็นด่างปานกลาง
>9.0	เป็นด่างจัดมาก

ที่มา : ดัดแปลงจาก อภิรตี อิมเอิบ (2534) และคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

#### 4.) ความเค็มของดิน

ความเค็มของดินเกิดจากเกลือที่สะสมในดิน โดยส่วนมากเกลือจะเป็นพวกคาร์บอเนต และโบคาร์บอเนตของแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างที่มีการสลายตัวผู้พังของหิน และแร่ เมื่อมีฝนตกโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) จะถูกละลายไปคงเหลือแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นจำนวนมาก ทำให้ดินมีปฏิกิริยาเป็นกลางถึงด่าง ในสภาพที่มีฝนตกน้อย มีการระเหยของน้ำมากมักจะทำให้เกิดการสะสมของเกลือจนเป็นอันตรายต่อพืชทั่วไป แต่ในกรณีที่ไม่ค่อยมีฝนตกเช่น เขตทะเลทรายเกิดการสะสมของเกลือคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม และถ้ามีโซเดียมคาร์บอเนตเหลืออยู่ในดิน ทำให้ pH ของดินสูงมาก (pH>8) (อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ 2548)

#### 5.) ความอิ่มตัวของเบสที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน

ค่าความอิ่มตัวของเบสที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน (% base saturation: % BS) เป็นค่าประจุบวกหรือไอออนบวกที่ทำให้ดินเป็นด่างได้ คือค่าเปอร์เซ็นต์ของผลรวมของไอออนบวกที่ทำให้ดินเป็นด่างทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ ไอออนของโซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เมื่อเปรียบเทียบกับค่าไอออนบวกทั้งหมดของดิน ค่าความอิ่มตัวของเบสที่แลกเปลี่ยน



ได้ของดินบอกให้ทราบว่า สารละลายดินประกอบไปด้วยไอออนที่ทำให้ดินเป็นต่างมากหรือน้อย เนื่องจากค่าความอึดตัวของเบสที่แลกเปลี่ยนได้มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปริมาณของธาตุ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมในสารละลายดิน ซึ่งเป็นธาตุที่พืชมีความต้องการในปริมาณมาก ค่านี้จึงสามารถใช้ประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ ไอออนบวกมีหลายชนิด ได้แก่ ไอออนบวกของไฮโดรเจน อะลูมิเนียม โพแทสเซียม แคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม แต่การปลดปล่อยไอออนเหล่านี้ในสารละลายดินมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ pH ของดิน ในกรณีดินเป็นต่าง ไอออนบวกที่มีฤทธิ์เป็นต่างจะละลายออกมาได้มากกว่าดินอื่นๆ ได้แก่ ไอออนของโซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม ส่วนไอออนที่มีฤทธิ์ทำให้ดินเป็นกรดมีอยู่น้อย ได้แก่ ไอออนบวกของไฮโดรเจน และอะลูมิเนียม เป็นต้น (มุกดา สุขสวัสดิ์ 2544)

6.) ความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (Buffer Capacity of Soil)

เมื่อ  $H^+$  หรือ  $OH^-$  ส่วนที่สามารถละลายอยู่ในสารละลายในดินถูกทำให้หมดไป (neutralized) ส่วนที่ติดอยู่กับอนุภาคของดิน จะถูกปลดปล่อยออกมาแทนที่ ดังนั้น จึงทำให้ความเป็นกรด หรือต่างในดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เร็วเกินไป คุณสมบัติของดิน แบบนี้ที่ดินสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ได้ เรียกว่า “buffer capacity” ดินแต่ละชนิดจะมี buffer capacity ที่ต่างกัน โดยปกติในดินเหนียวจะมีค่า buffer capacity มากกว่าดินทราย เพราะดินเหนียวสามารถดูดซับประจุของ  $H^+$  ไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มากกว่า จึงมี  $H^+$  ที่จะปลดปล่อยออกมาแทนที่  $H^+$  ที่สูญเสียไปได้มาก จึงทำให้สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้นานกว่า ดังนั้น หากต้องการแก้ความเป็นกรดของดิน ในการใส่ปูน ถ้าหากเป็นดินเหนียว จะต้องใส่ปูนในปริมาณที่มากกว่าในดินทราย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา 2548)

#### 2.3.4.6 ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ความอุดมสมบูรณ์ของดิน หมายถึง ความสามารถและศักยภาพของดินในการให้ธาตุอาหาร สารประกอบที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช หมายถึง ปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ทั้งธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองที่มีอยู่ในดิน รวมไปถึงคุณสมบัติอื่นๆ ทั้งทางเคมีและกายภาพที่ทำให้ธาตุเหล่านั้นเป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้นเพียงใด (นวลศรี กาญจนกุล และคณะ 2543)

##### 1.) อินทรีย์วัตถุ

อินทรีย์วัตถุเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดินซึ่งมีอิทธิพลต่อสมบัติของดิน ทั้งสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ได้จากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ เซลล์ของจุลินทรีย์ที่ตายแล้วและยังมีชีวิตอยู่ รวมทั้งสารต่างๆ ที่สิ่งมีชีวิตในดินรวมทั้งรากพืชปลดปล่อยออกมา สิ่งมีชีวิตในดินทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์เป็นชิ้นเล็กๆจนสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ (อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ 2548)

1.1 แหล่งที่มาของอินทรีย์วัตถุ แหล่งที่มาที่สำคัญของอินทรีย์วัตถุในดินคือเนื้อเยื่อพืช ในสภาพป่าธรรมชาติส่วนประกอบด้วยพืชไม่ว่าจะเป็น กิ่ง ก้าน ใบ หรือผลเมื่อหล่นลงดินจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินกลายเป็นอินทรีย์วัตถุ สำหรับสัตว์จัดเป็นแหล่งของอินทรีย์วัตถุอันดับสองรองจากพืช เนื่องจากสัตว์กินพืชเป็นอาหาร เมื่อสัตว์ขับถ่ายของเสียออกมา

รวมทั้งร่างกายของมัน เมื่อหมดอายุขัยก็จะถูกย่อยสลาย นอกจากนี้ เซลล์ของจุลินทรีย์เองทั้งที่ตายแล้วและยังมีชีวิตอยู่ก็ถือว่าเป็นอินทรีย์วัตถุเช่นเดียวกัน

1.2 การย่อยสลายของสารอินทรีย์ เมื่อเติมซากพืชซากสัตว์ลงไป ในดิน หรือเกิดการร่วงหล่นทับถมโดยธรรมชาติ จุลินทรีย์จะทำหน้าที่ย่อยสลายโดยผลิตเอนไซม์ ออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อสลายชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะซึมผ่านผนังเซลล์เข้าไปได้ ขณะย่อยสลายจุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนและมีกิจกรรมโดยรวมมากขึ้น สังเกตได้จากการ ปลดปล่อยพลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาปริมาณมาก จุลินทรีย์ใช้พลังงานจากสารอินทรีย์ และปลดปล่อยออกมาในรูปของความร้อน เนื่องจากว่าจุลินทรีย์ไม่สามารถสังเคราะห์พลังงานได้เอง จึงอาศัยพลังงานจากอินทรีย์วัตถุ

(1) การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน คาร์บอนเป็น องค์ประกอบพื้นฐานของอินทรีย์วัตถุ เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์จะปลดปล่อยออกมาในรูป คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ในดินส่วนใหญ่มาจากสาเหตุนี้ มีส่วนน้อยที่มาจาก การหายใจของรากพืชหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับน้ำในดินได้เป็นกรด คาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) สารประกอบเกลือไบคาร์บอเนต และเกลือคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนตชนิด ต่างๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) แคลเซียมไบคาร์บอเนต ( $CaHCO_3$ ) และแมกนีเซียม คาร์บอเนต ( $MgCO_3$ ) เป็นต้น เกลือเหล่านี้ละลายน้ำได้ง่ายและอาจสูญเสียไปจากดินโดยการชะ ละลาย และพืชดูดขึ้นไปใช้ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วยังมีคาร์บอนที่อยู่ในรูปอื่น เช่น มีเทน ( $CH_4$ ) คาร์บอนไบซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแต่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ คาร์บอนไดออกไซด์

(2) การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน สารประกอบ โมเลกุลใหญ่ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบคือโปรตีน เมื่อถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะเปลี่ยนเป็น สารประกอบไนโตรเจนที่มีโมเลกุลเล็กลงคือ กรดอะมิโน และถูกย่อยสลายต่อไปเป็น แอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรต ( $NO_3^-$ ) สำหรับแอมโมเนียมและไนเตรตพืชสามารถนำไปใช้ ประโยชน์ได้ แต่ไนเตรตถูกชะล้างได้ง่าย เนื่องจากมีประจุลบ

(3) การย่อยสลายสารประกอบกำมะถัน กำมะถันเป็น องค์ประกอบที่อยู่ในเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ โดยเป็นองค์ประกอบของอะมิโนบางชนิด สารประกอบ หลายชนิดที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมักมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบด้วย ในการย่อยสลาย สารประกอบกำมะถันจะได้อนุมูลซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ก็สูญเสียโดย การชะล้างได้ง่ายเช่นเดียวกันไนเตรต

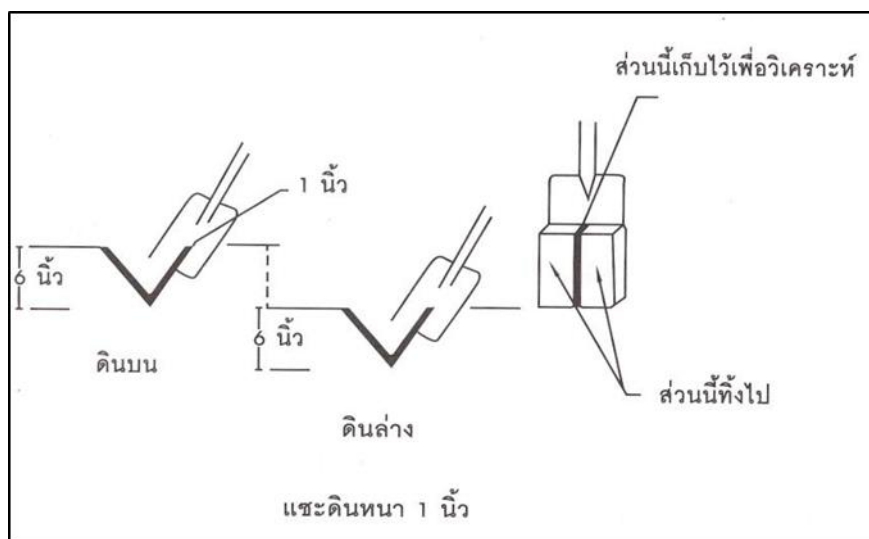
(4) การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัส สารอินทรีย์ที่มี ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ให้กลายเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัส เช่น  $H_2PO_4^-$  และ  $HPO_4^{2-}$  ซึ่งทั้งสองรูปพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การที่จะอยู่ในรูปไหนขึ้นอยู่กับค่า ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

### 1.3 ผลของอินทรีย์วัตถุต่อคุณสมบัติของดิน ดังนี้

- ช่วยปรับปรุงสภาพทางกายภาพของดิน ส่งเสริมการเกาะกันของอนุภาคดินกลายเป็นก้อนดินลดสมบัติการอาจแปรรูปได้และการดูดยึดระหว่างอนุภาค ทำให้ดินเหนียวร่วนซุย ระบายน้ำระบายอากาศดีขึ้น และช่วยให้ดินทรายสามารถอุ้มน้ำได้ดีมาก
- ทำให้ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมากขึ้น เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีค่า CEC สูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอลลอยด์ดินชนิดอื่น ในดินทั่วไปประมาณ 30-90% เป็นไอออนบวกที่ถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุ
- ช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน เนื่องจากอินทรีย์วัตถุช่วยทำให้ดินมี CEC เพิ่มขึ้น
- เป็นแหล่งที่มาของธาตุต่างๆ โดยเฉพาะไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ธาตุเหล่านี้จะเป็นประโยชน์กับพืชที่ต่อเมื่ออินทรีย์วัตถุถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แล้วปลดปล่อยออกมาสู่ดิน
- เป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะพวกที่ใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์มีบทบาทในเรื่องของการย่อยสลาย การแปรสภาพธาตุอาหารพืช ตลอดจนการตรึงไนโตรเจน

### 2.3.5 วิธีเก็บตัวอย่างดิน

ในการเก็บตัวอย่างดินต้องถากหญ้าหรือกวาดเศษพืชและใบไม้ที่คลุมดินอยู่ออก แล้วใช้จอบเสียมหรือพลั่วขุดหลุมเป็นรูปตัว V ลึกประมาณ 0-6 นิ้ว (0-15 เซนติเมตร) แล้วจึงชะเอาดินด้านข้างด้านหนึ่งหนาประมาณ 2-3 เซนติเมตรจากปากหลุม ขนานลงไปตามหน้าดินที่ขุดไว้ลึกถึงก้นหลุม แล้วจัดขึ้น ดินที่ต้องการก็จะติดตามมาบนพลั่ว จอบ หรือเสียม เอาดินนี้ใส่ถัง หรือ กระบุงไว้ ทำอย่างนี้จนครบทุกหลุม โดยปกติแปลงขนาดเนื้อที่ 10-20 ไร่ ควรขุดประมาณ 10-20 หลุม ในที่ต่าง ๆ กันให้กระจายทั่วแปลง หลังจากขุดดินครบทุกหลุมตามที่ต้องการแล้ว ทำดินเหล่านี้ให้เป็นก้อนเล็กๆ คลุกเคล้าให้ทั่วสม่ำเสมอแล้วแบ่งดินออกประมาณ 1 กิโลกรัม ใส่กล่องกระดาษแข็ง หรือ ถุงพลาสติกพร้อมกับเขียนรายละเอียดต่างๆ ใส่ไว้ข้างในและปิดข้างนอกกล่อง หรือถุงพลาสติกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.14

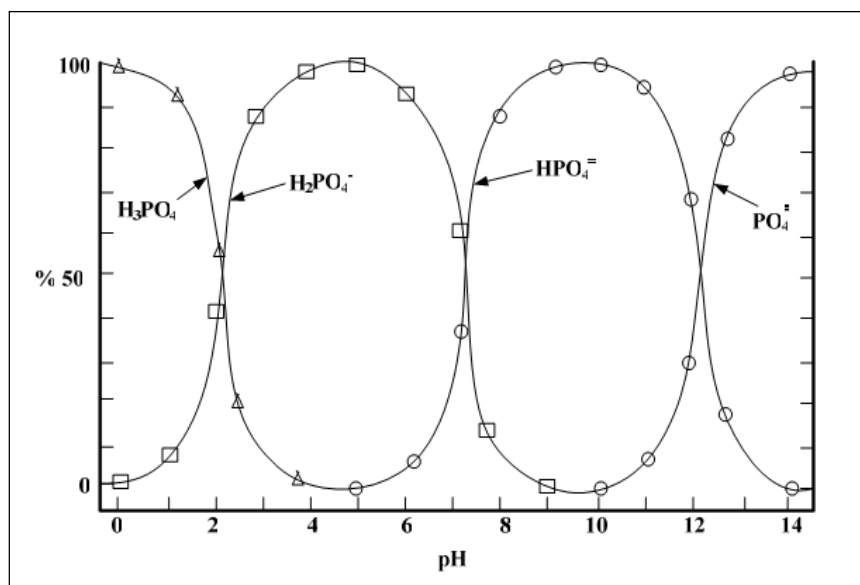


ภาพที่ 2.14 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน  
ที่มา : พิชรี อีร์จินดาจกร (2549)

## 2.4 ฟอสฟอรัส (phosphorus)

ฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่ในดินมีในปริมาณฟอสฟอรัสที่ไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช เนื่องจากเป็นธาตุที่ถูกตรึงหรือเปลี่ยนรูปได้ง่าย กลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยาก ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่อพืชลดลง (มุกดา สุขสวัสดิ์ 2544)

ฟอสฟอรัสในดินมีอยู่หลายรูปแบบ ทั้งในรูปแบบอนินทรีย์และอินทรีย์ ในดินเกษตรส่วนใหญ่ร้อยละ 50 - 75 ของฟอสฟอรัส (P) อยู่ในรูปแบบอินทรีย์ (Sharpley and Rekolainen 1977) ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียจะอยู่ในรูปต่างๆ กันของฟอสเฟต เช่น อินทรีย์ฟอสเฟต ออร์โธ-ฟอสเฟต คอนเดนซ์ฟอสเฟต ฟอสเฟตเหล่านี้ถูกปนเปื้อนในธรรมชาติได้หลายทาง โดยคอนเดนซ์ฟอสเฟตสามารถถูกไฮโดรไลซิสเป็นออร์โธฟอสเฟตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และค่า pH ต่ำ ซึ่ง pH สามารถเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมคุณสมบัติของสารประกอบฟอสเฟต ดังแสดงในภาพที่ 2.15 (อมรา ดาวไธสง 2550)



ภาพที่ 2.15 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ระดับพีเอชต่างๆ  
ที่มา : Kadlec and Knight (1996)

#### 2.4.1 ผลกระทบฟอสฟอรัสต่อแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสจัดเป็น growth limiting nutrient ของพืชน้ำ ดังนั้นการระบายน้ำทิ้งที่ยังมีสารประกอบของฟอสฟอรัสสูงลงไปในน้ำเป็นจำนวนมาก อาจกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวขุ่น ออกซิเจนลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) นอกจากนี้จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดมากขึ้นแล้ว ยังอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตของมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่มีอยู่ในสาหร่ายบางชนิด

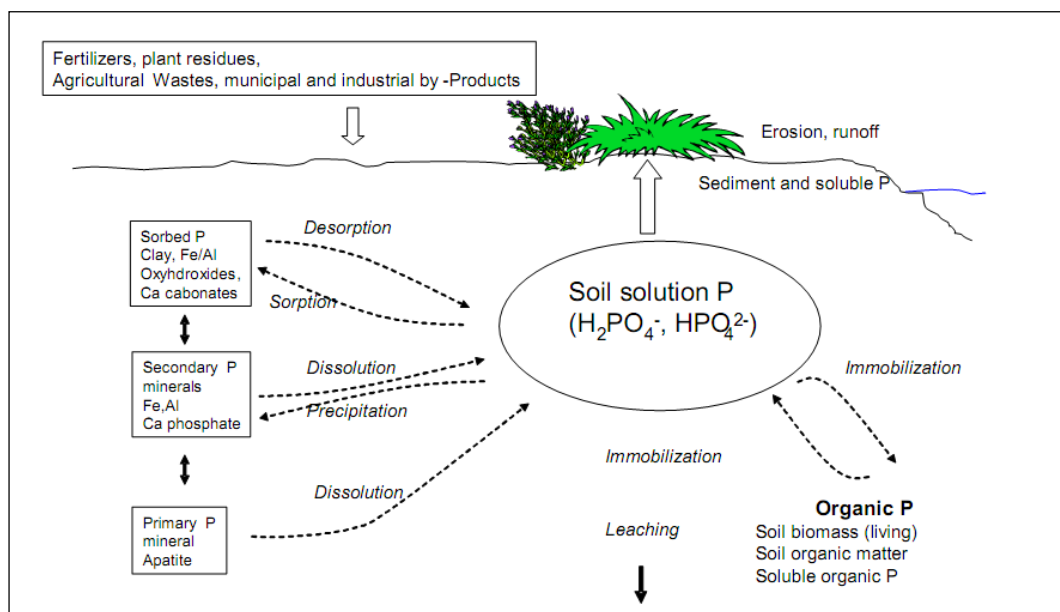
ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับห่วงโซ่อาหาร คือสาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ อนินทรีย์ไนโตรเจน ออร์โธฟอสเฟต และแร่ธาตุต่างๆ (trace element) ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่โดยการ เจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหารและความสมดุลในห่วงโซ่อาหาร จะถูกควบคุมโดยปริมาณธาตุอาหารที่มีในแหล่งน้ำ แต่เมื่อปริมาณอาหารในแหล่งน้ำสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารและห่วงโซ่ นอกจากนี้สาหร่ายบางส่วนที่เกิดการย่อยสลายในน้ำจะจมตัวลงใต้แหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดน้อยลงส่งผลกระทบต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ

จากผลการศึกษาของยูวดี พีรพรพิศาล (2548) โครงสร้างของแพลงก์ตอนพืชที่เปลี่ยนแปลงใน แต่ละฤดูบอถึงแร่ธาตุนิทรียที่ไหลลงสู่บึงบอระเพ็ดแสดงให้เห็นว่าบึงบอระเพ็ดมีภาวะน้ำแดงที่เกิดจากแพลงก์ตอนพืชบลูมเพราะมีแร่ธาตุโดยเฉพาะฟอสฟอรัสสูงสู่แหล่งน้ำที่มากเกินไป สอดคล้องกับนิคม ละอองศิริวงศ์ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร (2546) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของสภาวะยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา สรุปได้ว่า ยูโทรฟิเคชันเป็นปัญหาสำคัญของทะเลสาบ

สงขลา ดังนั้นการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จะเข้าสู่ทะเลสาบสงขลาเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดยูโทรฟิเคชันได้

สำหรับวิธีการชดเชยที่จะทำให้ฟอสฟอรัสในดินมีเพียงพอถือว่าเป็นเรื่องที่ยาก เพราะฟอสฟอรัสสามารถเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆในดิน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบต่างๆขึ้น ส่งผลให้ ฟอสฟอรัสในดินมีปริมาณต่ำและไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช (Schjorring and Jensen 2005)

ฟอสฟอรัสสามารถแบ่ง 4 กลุ่ม (categories) ได้แก่ 1. ฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในสารละลายดิน 2. ฟอสฟอรัสติดอยู่กับอนุภาคดิน 3. ฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับอินทรีย์วัตถุในดิน 4. สารประกอบอนินทรีย์ฟอสฟอรัส



ภาพที่ 2.16 วงจรฟอสฟอรัสในดิน (P cycle in soil)

ที่มา : Jensen and Husted (2005)

#### 2.4.2 ชนิดและปริมาณฟอสฟอรัสในดิน

ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน ที่อยู่ในสารละลายดินเท่านั้นที่พืชสามารถดูดใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตามเข้มข้นของฟอสฟอรัส จะมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียม พื้นที่ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกโดยทั่วไปจะมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดอยู่ประมาณ 0.02% การแพร่กระจายของปริมาณฟอสฟอรัสตามระดับความลึกของชั้นดินที่ใช้ในการเพาะปลูกนั้นพบว่าดินชั้นบนจะมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าดินชั้นล่างที่มีรากพืชแพร่กระจายอยู่ เนื่องจากพืชจะมีการดูดใช้ธาตุฟอสฟอรัสในระยะใกล้รากมากกว่าระดับผิวดินและในระดับผิวดินจะพบธาตุฟอสฟอรัสที่ได้จากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์และจากการใส่ปุ๋ยบริเวณดินบน ถึงแม้ว่าในดินชั้นบนจะมีการชะล้างฟอสฟอรัสสู่ดินชั้นล่าง แต่เนื่องจากอัตราที่พืชจะดูดใช้ฟอสฟอรัสจากดินชั้นล่างมาใช้

ประโยชน์มากกว่าอัตราที่ฟอสฟอรัสจะถูกชะล้างจากดินชั้นบนสะสมลงสู่ดินชั้นล่าง ดังนั้นการจัดการให้ปริมาณของฟอสฟอรัสในชั้นดินเพียงพอต่อความต้องการของพืชควรเพิ่มฟอสฟอรัสในรูปของปุ๋ยในตำแหน่งที่บริเวณรากพืชเนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ละลายน้ำได้ยากและง่ายต่อการถูกตรึงโดยธาตุอื่น นอกจากนี้ในดินที่มีเนื้อดินละเอียดจะมีปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่าดินเนื้อหยาบ

แหล่งที่มาของสารประกอบฟอสฟอรัสในดิน ฟอสฟอรัสจะปรากฏในดินในรูปของสารประกอบ ที่เรียกว่า ออร์โทฟอสเฟต หรือเมื่อมีการแตกตัวออกไป จะเรียกว่า ฟอสเฟตไอออน โดยมาจากแหล่งใหญ่ๆ 2 แหล่ง คือ

(1) อินทรีย์ฟอสเฟต (organic phosphate) ได้แก่ ฟอสเฟตที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตในดิน หรือที่มากจากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ มีมากมายหลายชนิดและที่มีในปริมาณมากคือ inositol hexaphosphate ซึ่งเป็น phytin ที่พบในรากพืช อินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ปรากฏในดิน น้อยมาก เนื่องจากสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีการย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์โดยเฉพาะมูลสัตว์ โดยจุลินทรีย์ในดินจะปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สู่ดินได้ 2 รูปแบบ คือ ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายได้ง่าย มีโมเลกุลเล็กเหมาะต่อการดูดไปใช้ของรากพืช อีกรูปหนึ่งเป็นฟอสเฟตไอออนในสารละลายดิน ดังนั้นการใส่ปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักลงในดิน จะเกิดการแปรสภาพฟอสฟอรัสในรูปอินทรีย์สารไปเป็นสารอนินทรีย์ และฟอสเฟตไอออนเป็นแหล่งฟอสฟอรัสในดินอีกแหล่งหนึ่ง แต่ปริมาณอินทรีย์ฟอสเฟตจะมีน้อยกว่าอินทรีย์ฟอสเฟตมาก สำหรับอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินทั่วไปนั้น พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 30–50 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน Paul and Clark (1989) และ ประพิศ แสงทอง (2534) รายงานว่าในดินของประเทศทั้งหมดมีอินทรีย์ฟอสฟอรัสอยู่ถึง 35% ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน

#### ตารางที่ 2.7 รูปและปริมาณของอินทรีย์ฟอสเฟตในดิน

รูปของอินทรีย์ฟอสเฟต	ปริมาณ (mg/kgดิน)	% ของอินทรีย์ฟอสเฟต
Inositol phosphate	1.4-356	0.3-62
Nucleic acid	0.1-97	0.1-65
Phospholipids	0.4-17	0.03-5.4

ตารางที่ 2.8 ปริมาณของอินทรีย์ฟอสเฟตในดินแร่และดินอินทรีย์ ในดินชนิดต่างๆ

เนื้อดิน (soil texture)	จำนวนตัวอย่าง	อินทรีย์ฟอสเฟต(organic phosphate)	
		mg/kg ดิน	% ของฟอสฟอรัสทั้งหมด
ดินแร่ (mineral soils)			
sands	194	121	34.1
loams	663	250	39.9
clay loams and clays	309	332	41.4
ดินอินทรีย์ (organic soils)			
organic loams	5	523	58.9
peats	85	579	65.4

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Prasad and Power (1997)

(2) อินทรีย์ฟอสเฟต คือฟอสเฟตที่มีอยู่ในหินแร่ธรรมชาติ และในปุ๋ยที่ใส่ลงไปดินรวมถึงพวกที่ดูดซับตามผิวของ Al, Fe oxide และแร่ดินเหนียว (clay mineral) (อรรณณ ฉัตรสุรัง 2551) หินแร่ฟอสเฟตทั่วไปจะเป็นสารประกอบกับ แคลเซียม เหล็กและอะลูมิเนียม โดยสัดส่วนของ แคลเซียมฟอสเฟต จะลดลงตามความรุนแรงการสลายตัวของแหล่งกำเนิด แต่ของ เหล็กฟอสเฟต จะเพิ่มขึ้นในดินที่มีการสลายตัว อย่างรุนแรง อินทรีย์ฟอสเฟตจะพบอยู่ในสัดส่วนที่เป็น occluded form และรูปที่ ละลายได้ เนื่องจากเกิดการเคลือบของออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม มาเคลือบรูปที่รวดเร็ว ส่วน pH ของดินก็มีผลต่ออินทรีย์ฟอสเฟตถ้ามี pH มากกว่า 6 จะพบ Ca-P มาก แต่ถ้า pH ต่ำ จะพบ Al-P มากกว่าและยังมีระดับความชื้นของดินที่เข้ามามีผลในการเปลี่ยนรูปด้วย โดยในดินที่มีน้ำขังจะมี การสะสมของอินทรีย์ฟอสเฟตในรูป Al-P และถ้าดินมีความชื้นจะพบอินทรีย์ฟอสเฟตในรูป Fe-P (วิเชียร ฝอยพิกุล 2536) อีกส่วนหนึ่ง คือส่วนที่อยู่ในสารละลายดิน และรูปอินทรีย์ฟอสเฟตที่เป็น ประโยชน์ในสารละลายดินจะอยู่ในรูปของ  $H_2PO_4^-$  และ  $HPO_4^{2-}$  ซึ่งปริมาณของไอออนฟอสเฟตทั้ง 2 รูป จะขึ้นอยู่กับค่า pH ของดิน โดยปกติแล้วมีอัตราดูดซึม (uptake) ไอออน  $H_2PO_4^-$  ได้เร็วกว่า  $HPO_4^{2-}$  มากในดิน ธรรมชาติที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในสารละลายดินจะมีฟอสฟอรัสประมาณ 0.05-0.3 mg/kg ส่วนดิน ที่มีการใส่ปุ๋ยมากติดต่อกันนานจะมีฟอสฟอรัสสูงมาก ซึ่งพืชใช้ได้นานถึง 10 ปี หรือมากกว่านั้น สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายดินที่พืชต้องการจะแปรผันตามชนิดพืชตั้งแต่ 0.003-0.3 mg/kg (อรรณณ ฉัตรสุรัง 2551)

อินทรีย์ฟอสเฟต สามารถจำแนกตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ 3 ประเภท ดังนี้

- 1.) สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยาก ได้แก่ แร่ปฐมภูมิที่มีแร่ฟอสเฟต

ชนิดต่าง ๆ



2.) สารประกอบฟอสเฟตที่สามารถละลายอย่างช้า ๆ (slowly available phosphate) และแตกตัวให้ฟอสเฟตไอออนได้เร็วพอสมควร

3.) ฟอสเฟตไอออนในสารละลายดิน ฟอสเฟตที่จัดว่าเป็นประโยชน์ได้ง่ายหรือละลายน้ำได้ดี ได้แก่ ไดไฮโดรเจนอโทฟอสเฟตไอออน ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) และโมโนไฮโดรเจนอโทฟอสเฟตไอออน ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) ที่อยู่ในสารละลายดิน และเกลือฟอสเฟต ซึ่งจะแตกตัวให้ไอออนทั้งสองนี้โดยง่าย ฟอสเฟตไอออนที่อยู่ในสารละลายดินจะง่ายและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาหรือถูกตรึงได้ทั้งในภาวะที่เป็นกรดและด่าง โดยจะทำปฏิกิริยาคกตะกอนกับเหล็กและอะลูมิเนียมในดินกรดและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟตที่มีการละลายน้ำได้ยากในดินด่าง ทำให้การสูญเสียความเป็นประโยชน์ไป ฟอสเฟตในสารละลายดินนี้จะมีเพียงเล็กน้อย คิดเป็นฟอสฟอรัสได้ประมาณ 0.3–3 ppm เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟอสฟอรัสทั้งหมด ในกรณีที่ดินมี pH เป็นกลางจะพบไอออนทั้งสองนี้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่หากดินเป็นกรดอ่อน ๆ (pH 6–8) จะพบ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ในสัดส่วนที่สูงกว่า ส่วนในสารละลายของดินด่าง (pH 6.8–7.2) จะพบ  $\text{HPO}_4^{2-}$  สูงกว่าอีกชนิดหนึ่งเช่นกัน

#### 2.4.3 ฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพของดิน

ปริมาณของฟอสฟอรัสในมวลชีวภาพของดินจะมีประมาณ ร้อยละ 2-5 ของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินที่มีการไถพรวน และร้อยละ 20 ของฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดินทุ่งหญ้า ปริมาณของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงร้อยละ 1.5-2.5 ในแบคทีเรีย และร้อยละ 4.8 ในเชื้อรา และเมื่อเปรียบเทียบกับฟอสฟอรัสในพืช ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนักจะเห็นว่าฟอสฟอรัส ในมวลชีวภาพจุลินทรีย์จะสูงกว่าในพืช ดังนั้นมวลชีวภาพจุลินทรีย์ของ ฟอสฟอรัสจะเป็นประโยชน์ต่อพืชมากกว่าอินทรีย์สารส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เพราะมวลชีวภาพจุลินทรีย์เป็นส่วนของอินทรีย์วัตถุในดินที่เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าอินทรีย์วัตถุในส่วนอื่นๆ การเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสอินทรีย์ ในดินโดยกระบวนการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสอินทรีย์ ให้เป็นฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (mineralization) เปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ ให้เป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์ (immobilization) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้นการรักษาปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ในสารละลายดิน จึงขึ้นอยู่กับระดับหนึ่งกับกระบวนการทั้งสอง กระบวนการที่มีทิศทางที่ตรงข้ามกันนี้ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการ mineralization ของอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดิน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศ pH ของดิน การไถพรวน พืชที่กำลังเจริญเติบโต และการใส่ปุ๋ย

#### 2.4.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสในดิน (P transformation process in soils)

กระบวนการตกตะกอน-ละลาย (precipitation-dissolution) การตกตะกอนมีความหมายว่า ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ในสารละลายถูกควบคุมโดย solubility product ของสารประกอบฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำน้อยที่สุด สารประกอบฟอสเฟตที่ตกตะกอนในดินที่ทำการเกษตรที่มีการใส่ปุ๋ยเป็นผลผลิตของ ปฏิกิริยาของปุ๋ยฟอสฟอรัสในดิน เมื่อใส่เม็ดปุ๋ยซึ่งละลายน้ำได้ลงไปในดินชั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ต่อเนื่องกันในเม็ดปุ๋ย และดินที่อยู่ล้อมรอบ เมื่อเม็ดปุ๋ยละลายเนื่องจากน้ำในดินเคลื่อนเข้าสู่เม็ดปุ๋ย จะทำให้เกิดสารละลายที่อิ่มตัวในบริเวณเม็ดปุ๋ย สารละลายปุ๋ยที่มีความเข้มข้นสูงจะแพร่ออกมาจาก บริเวณเม็ดปุ๋ยออกมายังสารละลายดิน สารละลายที่มี pH ต่ำจะมีการ

ละลายเหล็ก อะลูมิเนียมและไอออนประจุบวกอื่นๆ ในดิน และสร้างสารประกอบฟอสเฟตขึ้น ชนิดของสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาของสารละลายปุ๋ยกับดิน จะขึ้นกับชนิดและปริมาณของไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบในปุ๋ยและดิน ค่า pH และความชื้นดิน

โดยส่วนใหญ่ฟอสฟอรัสในรูปที่ตกตะกอน (precipitated P) จะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม ที่เป็นส่วนประกอบหลักของฟอสเฟต ที่ตกตะกอนในดิน สารประกอบเหล่านี้มีการละลายน้ำที่ต่ำ จึงละลายน้ำอย่างช้าๆ เมื่อละลายน้ำแล้วก็จะเป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งเป็นผลมาจากการตกตะกอนของฟอสเฟตที่มีการสลายตัวของแร่แอปพาไทต์ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชนิดหนึ่ง และเป็นผลผลิต ของปฏิกิริยาของปุ๋ยเคมี ฟอสเฟตในดิน สารประกอบฟอสเฟตตกตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาของปุ๋ย ในดินมี ลักษณะโมเลกุลประกอบด้วยสวนประกอบที่เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตชนิดต่างๆกับ แคทไอออนที่เป็นสวนประกอบของดิน ได้แก่ Ca, Al, Fe, Mg และ K เป็นต้น ตัวอย่างเช่น  $AlPO_4 \cdot 2H_2O$  (variscite),  $FePO_4 \cdot 2H_2O$  (strengite),  $CaHPO_4$  (dicalcium phosphate),  $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$  (newberryite) เป็นต้น

#### 2.4.5 การตรึงฟอสฟอรัสในดิน (phosphate retention or fixation in soils)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ถือว่าไม่เคลื่อนที่ในดิน (highly immobile) คือเป็น อนินทรีย์ฟอสฟอรัสในสารละลายดินส่วนที่ไม่ถูกใช้โดยจุลินทรีย์ดิน หรือไม่ถูกพืชดูดไปใช้ก็จะสามารถ ถูกดูดซับ (adsorbed) บนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ในดิน (labile P) หรือไม่ก็ตกตะกอน (precipitated) กลายเป็น secondary P compound ซึ่งจะถูกลดซับ หรือการตกตะกอนของฟอสเฟตในดินเรียกว่าเป็นการตรึงฟอสฟอรัส (P fixation) หรือการกักเก็บฟอสฟอรัส (P retention) การตรึงฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่สำคัญที่สุดคือ pH ของดิน โดยที่ฟอสฟอรัสในดินทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับ Ca เป็น Ca-phosphate ในดินต่างและทำปฏิกิริยากับ Fe, Al ในดินกรดเป็นสารประกอบ Fe และ Al-phosphate ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพราะเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ กระบวนการตรึงฟอสฟอรัส เกิดขึ้นได้หลายทางได้แก่ การตรึงฟอสฟอรัสโดยทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกไซด์ และ ออกซิไฮดรอกไซด์ของ เหล็ก และ/หรือ อลูมิเนียม (hydroxides and oxyhydroxide of Fe and Al) ซึ่ง Fe และ Al ions เหล่านี้พบมากในดินแร่ที่เป็นกรดและสามารถรวมตัวกับสารประกอบฟอสเฟต โดยที่การตรึงเกิดจากการแทนที่กลุ่มของ  $OH^-$  โดย  $PO_4^{3-}$  ได้ สารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble compound) ถ้า hydroxyl เพียงไอออนเดียวถูกแทนที่ที่เราเรียกการถูกดูดซับนี้เป็น reversible หรือ labile P คือยังสามารถแลกเปลี่ยนกลับสู่สารละลายดินได้เหมือนกัน แต่ถ้า hydroxyl ไอออนสองตัวถูกแทนที่แล้ว เราเรียกว่า irreversible หรือ non-labile P การตรึงฟอสฟอรัสโดยแร่ดินเหนียว (P fixation by clay minerals) กลไกการ ตรึงฟอสฟอรัสโดยแร่ดินเหนียวก็จะเช่นเดียวกับการตรึงโดย Fe และ Al-hydroxides ถ้ามีความ เข้มข้นของฟอสฟอรัสต่างๆ กระบวนการตรึงฟอสฟอรัสโดยแร่ดินเหนียวจะต่ำกว่าการตรึงฟอสฟอรัส โดย Fe และ Al-hydroxide มาก กลไกการตรึงฟอสฟอรัสในแร่ดินเหนียวก็จะเกิดตรงขอบของแร่ดินเหนียวในสารละลายที่มีฟอสฟอรัสสูง แร่ดินเหนียว illite, kaolinite และ montmorillonite ก็จะมีพฤติกรรมตรึงฟอสเฟตได้เหมือนกันกับ Fe และ Al-hydroxides และ oxyhydroxides ซึ่งจะทำให้ได้สารประกอบที่ตกตะกอนในดินของ Fe และ Al-phosphates

กระบวนการตรึงฟอสฟอรัสในดิน เป็นกระบวนการที่สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ง่ายทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุ ไอออนและสารประกอบต่างๆ ในดินกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากและมีประโยชน์ต่อพืชน้อยลง การตรึงฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยเกี่ยวกับส่วนประกอบในดิน เช่น ระดับ pH ปริมาณสารประกอบต่างๆ ในดิน และการเกิดปฏิกิริยาในดิน เป็นต้น

ปฏิกิริยาการตรึงฟอสเฟตของดิน แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

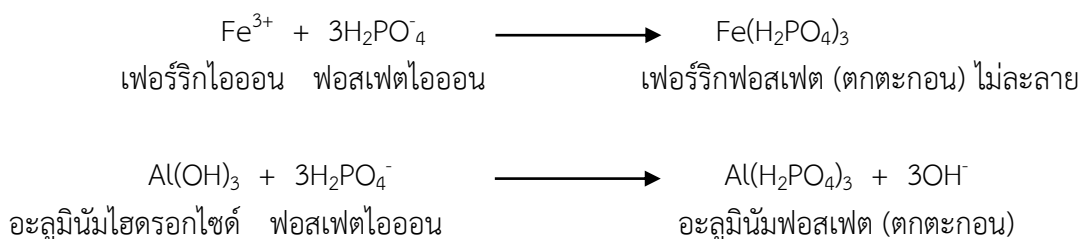
1) ปฏิกิริยาการดูดซับอยู่ตามผิว (adsorption reaction) อนุภาคของดินที่มีขนาดเล็กที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ เช่น พวกแร่ดินเหนียว อินทรีย์วัตถุและออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่และไอออนฟอสเฟตก็มีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถจะดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับภายนอกด้วยแรงดึงดูดยึดกันคือ แรง van der waals' forces ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตรวมอัดตัวอยู่รอบๆ พื้นผิวของคอลลอยด์เท่านั้น โดยโครงสร้างของคอลลอยด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2) การดูดซับด้วยพันธะทางเคมี (chemical reaction) ไอออนฟอสเฟตจับกับสารคอลลอยด์ด้วยพันธะทางเคมี หรือการจับตัวกันด้วยแขนของไอออนบวกต่อไอออนลบทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น ซึ่งก็จะเกิดขึ้นได้เพราะสารคอลลอยด์เหล่านี้มี hydroxyl หรือ silicate group ซึ่งอาจจะหลุดออกไปเหลือตำแหน่งที่จะต้องทำให้สมดุลด้วยไอออนลบ ไอออนฟอสเฟตก็อาจจะเข้ามาอยู่ในตำแหน่งนี้ได้ จึงก่อให้เกิดการจับตัวกันด้วยพันธะทางเคมี สภาพของโครงสร้างและผลึกจะคงตัวเป็นรูปร่างที่คงที่ แต่เมื่อไอออนฟอสเฟตเข้ามาแทนที่ hydroxyl หรือ silicate ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่โดยรอบพื้นผิวของแร่ดินเหนียว จะค่อยๆ เคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกต่อผลึกของแร่ดินเหนียว ไอออนฟอสเฟตบางไอออนจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสภาพที่ถูกดูดซับเป็นการเข้าแทนที่ไอออนลบของผลึก แล้วไอออนฟอสเฟตจะจับตัวกับแร่ดินเหนียวด้วยพันธะทางเคมี โครงสร้างของผลึกจะไม่คงที่อยู่่างเดิมเพราะขนาดของไอออนฟอสเฟตกับไอออนที่ถูกแทนที่ไม่เท่ากัน เมื่อเป็นเช่นนี้ผลึกของ clay colloid ที่มีไอออนฟอสเฟตอยู่ด้วยก็ต้องจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้ได้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกคงที่ ไอออนฟอสเฟตที่ถูกจับติดแน่นเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวชนิดใหม่อย่างถาวร ดังนั้นฟอสเฟตจำนวนนี้ก็จะถูกตรึงโดยที่ไม่มีโอกาสจะหลุดออกมาอยู่ในสารละลายดินอีก

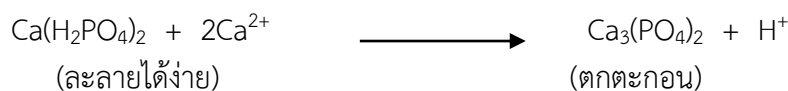
3) ปฏิกิริยาการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยา (double decomposition) สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายได้ดีจะละลายและแตกตัวให้ไอออนฟอสเฟตและไอออนอื่น ๆ ในดินมีสารประกอบต่างๆ เช่น เหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบเหล่านี้จะละลายและแตกตัวให้ไอออนบวกต่าง ๆ เช่น ไอออนของเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม และแมกนีเซียมอยู่ในสารละลายดิน และเมื่อไอออนฟอสเฟตกับไอออนบวกเหล่านี้พบกันจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต และสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เมื่อเกิดสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้นจึงเป็นการตรึงฟอสเฟตอย่างช้าๆ แต่ปริมาณของการตรึงฟอสเฟตด้วยกระบวนการนี้ต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับอยู่ตามผิวอนุภาคดิน

### 2.4.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงฟอสฟอรัสในดิน

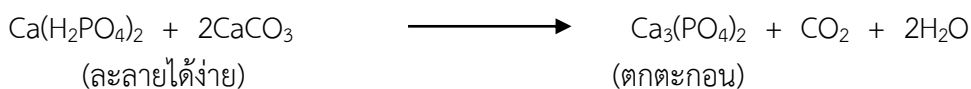
(1) ปฏิกิริยาของดิน ดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 และสูงกว่า 7.0 จะเป็นปัจจัยก่อให้เกิดการตรึงฟอสฟอรัสได้ง่าย เนื่องจากในดินกรดหรือดินที่มี pH ต่ำกว่า 5 ในสารละลายดินจะมีไอออนพวกเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส ละลายอยู่ในสารละลายดินมาก ฟอสเฟตจะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ตกตะกอน ไม่มีประโยชน์ต่อพืช ดังสมการ



และในดินต่าง ในสารละลายดินจะมีแคลเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอเนตของแคลเซียม แมกนีเซียม อยู่มาจึงตรึงกับฟอสเฟตได้ง่าย แปรรูปเป็นสารประกอบที่ตกตะกอน ดังในสมการ



รวมทั้งดินต่างอาจเกิดจากดินปูน เช่น ดินแคลคาร์เรียส หรือพวกดินแคลสิก หรือแร่อะพาไทต์ ซึ่งจะมีปูนแคลเซียมคาร์บอเนตสะสมอยู่ในปริมาณมาก ฟอสเฟตทำปฏิกิริยาแล้วเกิดการตกตะกอนอยู่ตามบริเวณผิวของอนุภาคหินปูน ละลายเป็นสารประกอบที่ไม่ค่อยละลายน้ำ ความเป็นประโยชน์ก็ลดลง



(2) องค์ประกอบทางแร่ของดิน เช่น ในดินที่มีแร่ดินเหนียวพวก montmorillonite และ kaolinite แร่ดินเหนียวเหล่านี้จะมีองค์ประกอบของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน โดยฟอสเฟตไอออนจากสารละลายดินเข้าแทนที่ไฮดรอกไซด์ที่อยู่รอบ ๆ ผิวของอนุภาคของแร่ดินเหนียวโดยเกิดพันธะทางเคมี และที่เป็นองค์ประกอบของแร่ ดินอื่น ๆ ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตไอออนลดลง

(3) ประเภทของเนื้อดิน จากปัจจัยของแร่ดินเหนียวที่มีอิทธิพลต่อการตรึงฟอสฟอรัสในดิน จึงพบได้ว่า ดินเนื้อละเอียดหรือดินที่มีอนุภาคของดินเหนียวมาก จะตรึงไอออนฟอสเฟตได้มากกว่าดินเนื้อหยาบที่มีอนุภาคดินเหนือน้อยกว่า ลำดับของการตรึงฟอสฟอรัสตามองค์ประกอบทางแร่ของดินจะสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ amorphous oxide รวมพวก

allophale > crystalline oxide แร่ gibbsite, goethite > 1:1 clay > 2:1 clay (วิเชียร ฝอยพิกุล 2536)

(4) ลักษณะพื้นที่ผิวของสารประกอบที่ปลดปล่อยฟอสเฟตไอออน ในการใส่ปุ๋ยที่มีอนุภาคเล็กซึ่งจะมีพื้นที่ผิวมากและละลายน้ำได้ดี แม้ว่าฟอสฟอรัสมีประโยชน์ต่อพืชได้รวดเร็วแต่จะง่ายต่อการตรึง เนื่องจากฟอสเฟตไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมาก และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นได้ด้วย

(5) ระยะเวลาที่ฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับดิน ระยะเวลาของการตรึงปุ๋ยฟอสเฟตที่อยู่ในดินระยะเวลานาน ๆ จะมีโอกาสมากในการทำปฏิกิริยากับดิน มีโอกาสถูกตรึงมากและแน่นมากขึ้น สารประกอบที่เกิดขึ้นยิ่งละลายได้ยากขึ้น

(6) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน อินทรีย์วัตถุจะสลายตัวและค่อย ๆ ปลดปล่อยฟอสเฟตไอออน เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมาและกรดคาร์บอนิก และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ได้จากการสลายตัวและปลดปล่อยออกมาของสารอินทรีย์ จะทำให้สารประกอบฟอสเฟตละลายได้มากขึ้น โดยฟอสเฟตไอออนที่มีการถูกตรึงตามผิวอนุภาคแร่ดินเหนียวแล้วบางส่วน จะมีการละลายตัวปลดปล่อยฟอสเฟตกลับคืนออกมา เป็นประโยชน์ได้โดยไอออนของกรดอินทรีย์ในดิน

(7) จุลินทรีย์ในดิน การละลายอินทรีย์ฟอสเฟตจากรูปฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำหรือกรดอ่อน ๆ นั้นไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช หรือพืชดูดนำไปใช้เป็นประโยชน์ไม่ได้ เปลี่ยนรูปเป็นฟอสฟอรัสละลายอยู่ในน้ำหรือสารละลายได้ จุลินทรีย์สามารถผลิตกรดขึ้นมาละลายหินฟอสเฟตให้อยู่ในรูปของฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ และอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงเรียกจุลินทรีย์นี้ว่า phosphate-dissolving microorganism กรดที่จุลินทรีย์ผลิตออกมาคือ lactic, citric, succinic และ P glycolic เป็นต้น โดยระดับการประเมินค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ระดับการประเมินค่าฟอสฟอรัสในดิน

ปริมาณฟอสฟอรัส (mg/kg)	ระดับ
> 45	สูงมาก
25 – 45	สูง
15 – 25	สูงปานกลาง
10 – 15	ปานกลาง
6 – 10	ต่ำปานกลาง
3 – 6	ต่ำ
< 3	ต่ำมาก

ที่มา : Land Classification Division and FAO Project Staff (1973) อ้างอิงใน ฐิตินัย พงศ์พิริยะกิจ (2546)

จากการที่ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการมากธาตุหนึ่ง และจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินมีปัจจัยควบคุมต่าง ๆ เช่น ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ชนิดของแร่ดินเหนียว เป็นต้น ปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (P.A.) ค่านี้จะมีประโยชน์ต่อเมื่อทดลองแล้วว่ามี correlation กับการตอบสนองของพืช ว่ามีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก ซึ่งเพียงพอกับความต้องการของพืช โดยปัจจุบันมีวิธีสกัดหลายอย่าง แต่ที่นิยมใช้คือ น้ำยาสกัด Bray II (Bray and Kurtz 1945) โดยมีระดับปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ระดับของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (Available P)

ระดับความเป็นประโยชน์ต่อพืช	(mg/kg)
ต่ำ (low)	< 10
ปานกลาง (medium)	10-25
สูง (high)	> 25

ที่มา : กองสำรวจที่ดิน (2523)

การสูญเสียฟอสฟอรัสในดิน เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ได้แก่

(1) การติดไปกับส่วนของพืชที่เอาออกไปจากดินเดิม (crop removal) ในการเก็บเกี่ยว ผลผลิตไม่ว่าจะเป็นส่วนใดของพืชจะมีฟอสฟอรัสติดออกไปโดยเฉลี่ยประมาณ 0.4% ของปริมาณ ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินในชั้นไทรพรวน

(2) การชะละลายลงไปในดินล่าง (leaching) สารประกอบฟอสเฟตส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ น้อยมากและมีไอออนฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในสารละลายดินในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 0.1 mg/kg P) ทำให้ฟอสฟอรัส ที่ถูกชะละลายไปดินล่างในระยะเวลาสั้นมีปริมาณที่น้อยมาก แต่ถ้าเป็นระยะ เวลนานก็มีการสูญเสียมากไปตามระยะเวลา ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนด้วย

(3) การระเหย (volatilization) ในดินที่มีน้ำขังอาจมาจากการสูญเสียในรูปของ phosphine ได้ แต่โดยทั่วไปสารประกอบออร์โธฟอสเฟตในสภาพของดินไร้มีการระเหย

(4) การกร่อนของดิน (soil erosion) เกิดจากน้ำที่พัดพาไป หรือลมพัดไปจากพื้นที่เดิมจะมี ฟอสฟอรัสติดออกไปด้วยประมาณร้อยละ 0.4-1.2% ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในชั้นไทรพรวน (ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ 2548)

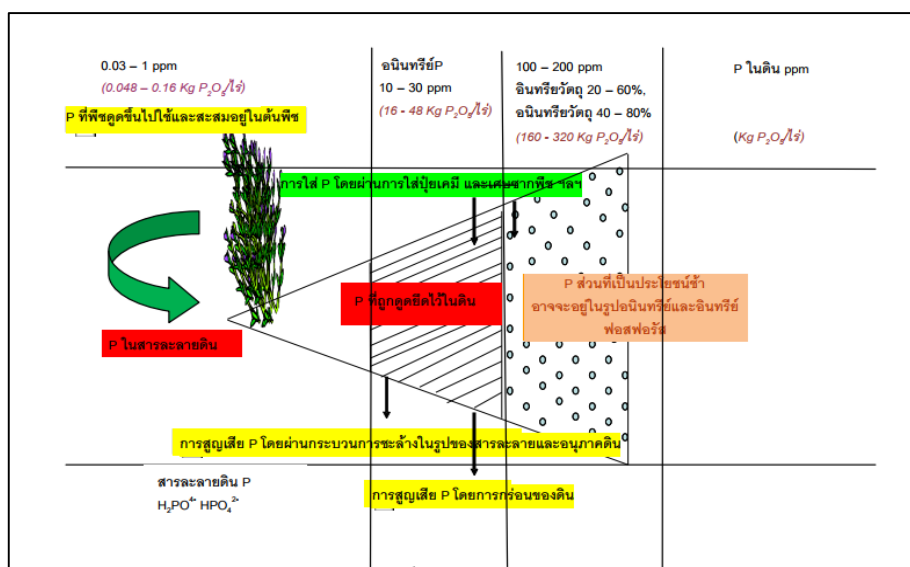
ประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสเฟตในดินมีความเป็นอิสระจึงเคลื่อนย้ายภายในหน้าตัดดินได้ต่างกัน โดยแบ่งตามความเป็นประโยชน์ได้ 3 ชนิด คือ

(1) ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ช้ามาก (very slowly available phosphate) ได้แก่ แร่อะพาไทต์ เหล็กฟอสเฟต แมงกานีสฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟตที่มีอายุมากและพวกอินทรีย์ฟอสเฟตที่สามารถละลายน้ำได้น้อยหรือแทบไม่ละลายน้ำเลย (humic acid และ inositols) เป็นต้น

(2) ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ค่อนข้างช้า (slowly available phosphate) ได้แก่ สารที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ ได้แก่ แคลเซียมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต และสารประกอบฟอสเฟตที่อยู่ในสภาพสารคอลลอยด์ รวมถึงอินทรีย์ฟอสฟอรัส บางส่วน (fulvic acid, nucleic acid และ phospholipids)

(3) ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ได้ง่าย (readily available phosphate) ได้แก่ อนุมูลฟอสเฟตที่อยู่ในสารละลายดิน และฟอสเฟตที่อยู่ในรูปโมโนแคลเซียมฟอสเฟต ( $\text{CaH}_2\text{PO}_4$ )<sub>2</sub>, แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และ แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{CaHPO}_4$ ) เป็นต้น



ภาพที่ 2.17 ปัจจัยและกระบวนการที่สำคัญต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช  
ที่มา : Rechigl and Muchovej (1995) อ้างอิงใน เบญญาภา ชีระวิทย์เลิศ และ สุทธิชา ภัทรานนท์ (2557)

#### 2.4.7 แคลเซียมในดิน

แคลเซียมเป็นธาตุที่รู้จักกันดีในรูปของหินอ่อน ปูนต่างๆ พบแคลเซียมมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก เป็นพวกธาตุโลหะค่อนข้างอ่อนว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา บางครั้งเรียกว่าธาตุปูน เพราะในปูนมักมีแคลเซียมกับแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่เสมอ ยิปซัมก็เป็นวัสดุที่ให้แคลเซียมแก่ดิน ซึ่งมีผลดีในด้านที่ไม่กระทบต่อ pH ดินมากนัก โดยไม่ทำให้ดินเป็นด่าง จะพบแคลเซียมในกระดูกสัตว์มากเช่นกัน ในอดีตมีการใช้กระดูกสัตว์เป็นปุ๋ยแคลเซียม แคลเซียมมักเป็นส่วนประกอบในส่วนที่แข็งแรง หรือโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต เช่น ในส่วนของต่องังพืชจะมีแคลเซียมสูงพืชสามารถนำแคลเซียมไปใช้ได้ในรูปแบบของแคลเซียมไอออนในสารละลายดิน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) แคลเซียมในดินมี

บทบาทพิเศษต่อสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยทำให้ดินโปร่งร่วนซุยมากขึ้น มีผลต่อการระบายน้ำ ถ่ายเทอากาศของดิน

ปริมาณแคลเซียมในดินมีอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-2.0 แต่ในดินแคลคาเรียสจะมีแคลเซียมสูงถึงร้อยละ 25 ขณะที่ดินทรายกรดจัดหรือดินที่มีการชะล้างสูงจะมีแคลเซียมน้อยมากระดับความเข้มข้นของแคลเซียมที่พืชอาจใช้ประโยชน์ได้ในดินจะมีปริมาณอยู่ระหว่าง 1 ถึงมากกว่า 50 มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม ทั้งนี้ขึ้นกับความจุในการเปลี่ยนแปลงไอออนบวกของดินและระดับการสมดุลของแคลเซียมของดินนั้น ๆ ปริมาณแคลเซียมที่ในสารละลายดินมีความแตกต่างกันมาก ขึ้นกับวัตถุดิบกำเนิดดิน หินแร่ ชนิดดินและปริมาณของเกลือแคลเซียมที่มีในดินนั้น แคลเซียมที่อยู่ในสารละลายดิน เป็นรูปของไอออนสองบวก  $Ca^{2+}$  รูปของไอออนนี้ปกติจะมีอยู่น้อย โดยอยู่ในสภาพที่สมดุลกับแคลเซียมที่ถูกดูดยึดไว้กับเกลือแคลเซียมอิสระ pH ของดินมีผลกระทบต่อแคลเซียมที่อยู่ในรูปนี้มาก คือ ในดินกรดจะมีแคลเซียมไอออนอยู่ในสารละลายดินในปริมาณน้อย ส่วนดินที่เป็นกลางถึงด่างเล็กน้อยจะมีปริมาณมาก แคลเซียมในสารละลายในดินและแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งสองรูปนี้รวมกันถือว่าเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ หากสารละลายดินรอบ ๆ รากพืชมีแคลเซียม 5-40 ppm จะเพียงพอต่อความต้องการของพืช พืชจะใช้ประโยชน์จากแคลเซียมในรูปไดวาเลนต์แคลเซียมไอออน เมื่ออยู่ในเซลล์พืช แคลเซียมจะเคลื่อนย้ายทางท่ออาหารได้ยาก พืชใบเลี้ยงคู่ต้องการแคลเซียมสำหรับการเจริญเติบโตมากกว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยวตามขนาดลำต้น และลักษณะเนื้อเยื่อที่แน่นกว่า ปริมาณแคลเซียมที่พืชต้องการอยู่ในช่วง 300-500 มิลลิกรัม/ลิตร บทบาทแคลเซียมที่มีความสำคัญต่อพืช คือ ช่วยในการแบ่งเซลล์ ช่วยให้เซลล์พืชทำงานเป็นปกติ เป็นองค์ประกอบโครงสร้างของผนังเซลล์ใน middle lamella ซึ่งจะอยู่ในรูปแคลเซียมเพคเตท (calcium pectate) ช่วยให้ท่อน้ำ และท่ออาหารของพืชแข็งแรง ช่วยในการสร้างฮอร์โมนของพืช เช่น ฮอโมนไซโตไคนินเพื่อให้เกิดตาดอก โดยปกติในดินมักไม่ขาดแคลเซียม ยกเว้นในดินที่เป็นกรด ส่วนสภาพดินที่เป็นด่างจะมีปริมาณแคลเซียมมากเกินไป และดินที่เป็นด่างมักมีฟอสฟอรัสสูงซึ่งจะทำให้แคลเซียมรวมตัวกับฟอสฟอรัสเป็นแคลเซียมฟอสเฟตทำให้พืชนำฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ นอกจากนั้น ในดินที่เป็นด่างสูงจะมีผลทำให้พืชนำแร่ธาตุธาตุที่สำคัญบางอย่างไปใช้ประโยชน์ได้ลดลง เช่น เหล็ก ที่เป็นธาตุช่วยให้การดูดแคลเซียมดีขึ้น หากขาดธาตุเหล็กจะทำให้เกิดการขาดแคลเซียม ในพืช

ในการศึกษาการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมันโดยวิธีการบำบัดโดยดินที่ผ่านมา พบว่ามีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และค่าอื่นๆเหลืออยู่ และมีการศึกษากลไกการบำบัดในส่วนของสารอินทรีย์และไนโตรเจนจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดิน แต่ในส่วนของฟอสฟอรัสจากการบำบัดโดยดินยังไม่มีการศึกษา การวิจัยในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษากลไกการบำบัดฟอสฟอรัสในการบำบัดโดยดินโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นการศึกษาจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นที่นำมารดสวนปาล์มรวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพโครงสร้างของดินก่อนและหลังจากการรดน้ำ ธาตุฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้สามารถนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมารดสวนปาล์มได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและผลผลิตภายในสวนปาล์มน้ำมันอีกทางหนึ่งด้วย



## 2.5 ความชื้นน้ำของดิน (Permeability)

มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ดังนั้นเมื่อน้ำที่มีความดันต่างกันระหว่าง 2 จุดในมวลดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างเหล่านี้ ความสามารถที่มวลดินให้น้ำซึมผ่านไปได้นี้ เรียกว่า “ความชื้นน้ำของดิน” (Permeability),  $k$  ถ้ามวลดินที่น้ำซึมผ่านได้ยาก ค่า  $k$  ก็จะสูง เรามักเรียกว่า “Pervious Soil” ถ้าน้ำซึมผ่านได้มาก ค่า  $k$  ต่ำ จะเรียกว่า “Impervious Soil” ค่าความชื้นน้ำของดิน เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินหลายอย่าง (Soil Testing Siam 2015)

### ตารางที่ 2.11 การแบ่งชั้นของค่าอัตราการซึม (permeability : ค่า $k$ )

ชั้นของค่าการซึมผ่าน	ค่า $k$ (m/d)
ช้ามาก (very slow)	< 2
ช้า (slow)	0.2 – 0.5
ช้าปานกลาง (moderate)	0.5 – 1.4
เร็วปานกลาง (moderately rapid)	1.4 – 1.9
เร็ว (rapid)	1.9 – 3.0
เร็วมาก (very rapid)	> 3.0

ที่มา : ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ (2541)

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (Coefficient of Permeability) เป็นการทดสอบหาปริมาณของน้ำที่สามารถไหลผ่านตัวอย่างดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีความสำคัญในงานออกแบบระบบระบายน้ำ และการศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ทดสอบได้อาจมีค่าแตกต่างกันมาก (10-100 เท่า) ในดินชนิดเดียวกัน เนื่องจากผลการทดสอบจะขึ้นอยู่กับสภาพและวิธีการทดสอบ ในการทดสอบและรายงานผลจึงต้องระมัดระวังและทำการทดสอบให้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด การทดสอบสามารถทำได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในห้องปฏิบัติการทำได้สะดวกและง่ายกว่า แต่ต้องระมัดระวังโดยต้องทำการทดสอบในสภาพที่ใกล้เคียงธรรมชาติ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบอาจเป็นตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) สำหรับ ดินเม็ดละเอียด หรือตัวอย่างดินแปรสภาพ สำหรับดินทรายที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างคงสภาพได้ โดยตัวอย่างดินแปรสภาพต้องนำมาบดอัดใหม่ให้ได้ความหนาแน่น (Density) ใกล้เคียงธรรมชาติก่อนจึงทำการทดสอบนอกจากนี้ยังมีการทดสอบสำหรับ ค่าโดยทั่วไปของสัมประสิทธิ์ความชื้นผ่านของน้ำสำหรับดินชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ค่าทั่วไปของสัมประสิทธิ์การซึม

ชนิดของดิน	ค่า k (cm/s)
กรวด	$1 - 10^2$
กรวดเม็ดละเอียด, ทรายหยาบ	$1 - 10^{-3}$
ทรายละเอียดและทรายแป้งอัดไม่แน่น	$10^{-3} - 10^{-5}$
ทรายแป้งอัดแน่นและทรายแป้งปนดินเหนียว	$10^{-5} - 10^{-6}$
ดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว	$10^{-6} - 10^{-9}$

ที่มา : สำราญ ยอดอุปถัมภ์ (2543)

## 2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมา เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือส่วนต่อประสาน (interface) กัน) เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว (นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานุกรักษ์ 2550) โดยรูปแบบการดูดซับจะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

(1) การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวถูกดูดซับ ซึ่งเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงแดิโพล-ดิโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันหลายชั้น (multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

(2) การดูดซับทางเคมี (chemisorptions) มีลักษณะเหมือนการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นแรงที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ ทำให้การดูดซับทางเคมีผันกลับไม่ได้ (การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน) การดูด

ชั้นทางเคมีจะเกิดขึ้นเฉพาะเจาะจงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับจะมีลักษณะเป็นชั้นเดียว (monolayer) การดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้ดีในอุณหภูมิสูง แรงยึดเหนี่ยวจะสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.13 สมบัติของการดูดซับทางเคมี และทางกายภาพของดิน

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทการดูดซับได้โดยแบ่งตามกลไกการดูดซับ คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมของการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ และเคมี

### 2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีความแตกต่างกัน โดยสภาพของปัจจัยต่างๆ ต้องมีความเหมาะสมจึงจะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด สามารถแบ่งได้ 5 ส่วน ได้แก่

(1) ธรรมชาติของตัวดูดซับ (nature of adsorbent) ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดของตัวดูดซับ โดยที่ความสามารถของตัวดูดซับจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับ ปริมาณการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) คือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (มันสิน ตันกุลเวศม์ 2542) เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้

พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น หากตัวดูดซับมีรูพรุนมากแสดงว่ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ ตัวดูดซับที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากได้แก่ ถ่านกัมมันต์

(2) ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (nature of adsorbate) ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ การถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงถ้าตัวดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากการดูดซับจำเป็นต้องทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแยกออกจากน้ำไปยึดเกาะยังพื้นผิวของตัวดูดซับแทน หากโมเลกุลมีขนาดใหญ่ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลง ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดติดพื้นผิวได้มากขึ้น

(3) อัตราเร่งการปั่นกวน (mixing speed) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ การดูดซับมีกลไกการทำงาน คือ การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ขึ้นอยู่กับ การปั่นกวนของระบบ เมื่อระบบมีของเหลวมีความปั่นกวนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้น้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกวนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

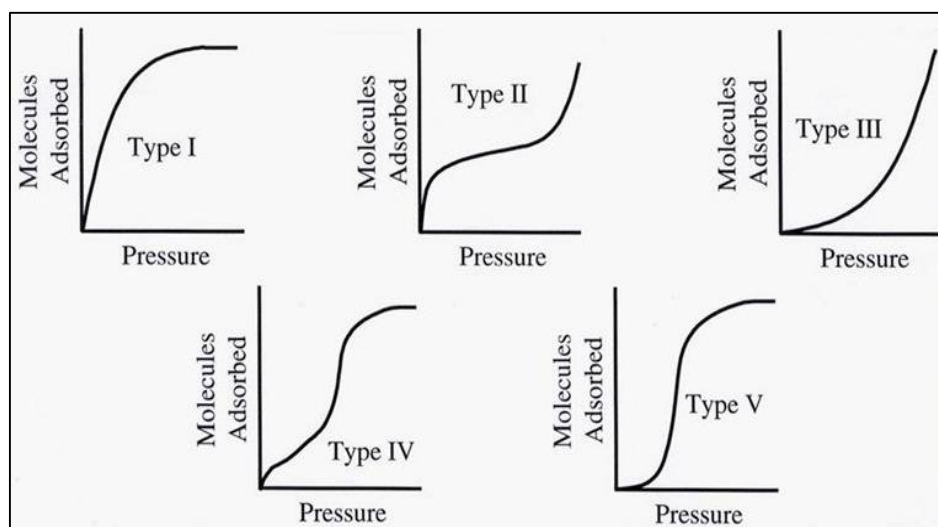
(4) อุณหภูมิ (temperature) การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับและอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง อุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับจะลดลงทำให้ตัวดูดซับดูดซับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยต่างๆ ได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงการดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้น้อยลง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้ดีในอุณหภูมิสูง

(5) พีเอช (pH) การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีความเป็นกรด (pH ต่ำ) ทำให้ ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดไอออนลบได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้มี  $OH^-$  บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น

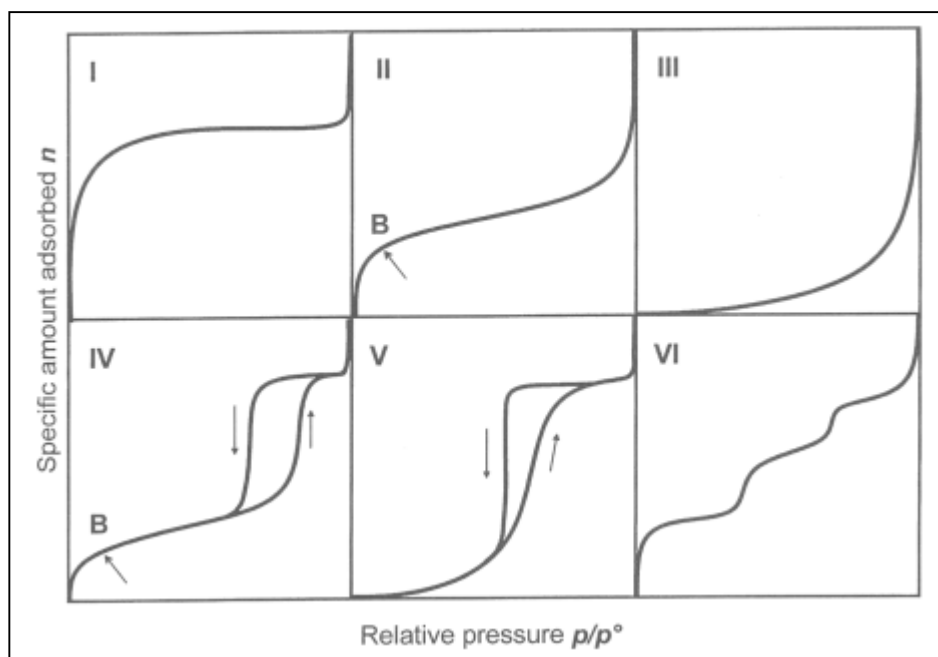
## 2.6.2 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในรูปของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในรูปของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิกงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่าง

ของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือคุณสมบัติของตัวถูกละลาย เมื่อเกิดการดูดซับชั้นโมเลกุลของตัวถูกละลาย จะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่งและจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวถูกละลายอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกละลายได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกละลายบนพื้นผิวตัวถูกละลาย ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกละลาย และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (Wang *et al.* 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 2.19 (วรวิทย์ จันทรสุวรรณ 2558)



ภาพที่ 2.18 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด  
ที่มา : Wang *et al.* (2012)



ภาพที่ 2.19 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC  
ที่มา : วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ (2558)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หาแกน  $P/P_0$  สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอิมตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมาจากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)

แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงราระหว่างโมเลกุลที่

ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P<sub>0</sub> จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัดซึ่งเป็นแบบพิเศษ

แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งจะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยาก เนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้นๆ ชั้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้นๆ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cabrera *et al.* (1996) ศึกษาเรื่อง ระบบบำบัดโดยดินของน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก มีการทดลองแบบ lysimeter และภาคสนาม โดยการทดลองแบบ lysimeter ใช้ดิน 2 ชนิด รดด้วยน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก พบว่า ดินทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่ระดับความลึกดิน 0-50 เมตร มีการซึมผ่านได้สูง เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของดิน ค่าความเค็ม อินทรีย์คาร์บอน TKN และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นและจะมีค่าสูงในชั้นดินตื้นๆ มีการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมและโซเดียมเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันการแลกเปลี่ยนแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าลดลง ที่ระดับความลึกดิน 1 เมตรมีการปนเปื้อนของโซเดียมและไนเตรต นำไปสู่การเพิ่มความเค็มและมลพิษให้กับน้ำบาดาลส่วนในภาคสนามใช้ดินชนิดเดียวแต่ 2 อัตราการรด พบว่าทั้ง 2 อัตราการรดมีอินทรีย์คาร์บอนและฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นในดินชั้นบน และมีปริมาณไนโตรเจนที่สูง ซึ่งสามารถให้ไนเตรตที่สูงได้ ซึ่งมีความเสี่ยงในการปนเปื้อนน้ำใต้ดิน

จิรารัตน์ บุญศรี (2543) ศึกษาการทดลองแบบกะ ที่ใช้ดินเป็นสารเพื่อดูดติดผิวในน้ำชะขยะ ผลปรากฏว่า ในดินทรายแป้งปนดินเหนียวสามารถบำบัดได้ และค่าซีโอทีได้ดีกว่าดินร่วนและรวมถึงดินร่วนเหนียว แต่การทดลองแบบนี้ไม่เหมาะสมกับการทดลองแบบต่อเนื่อง เพราะมีความสามารถในการซึมของน้ำต่ำ

นิคม ละอองศิริวงศ์ (2547) ศึกษาเกี่ยวกับสภาวะยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา พบว่าความเข้มข้นของสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งในรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ ยังสามารถเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงระดับความรุนแรงและพลวัตของยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำได้ สอดคล้องกับการศึกษา ที่พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ละลายน้ำเมื่อเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลาทุกบริเวณมีค่าสูง

แตกต่างกันอย่างชัดเจนกับเมื่อไม่เกิดยูโทรฟิเคชัน ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำเมื่อเกิดยูโทรฟิเคชันและไม่เกิดยูโทรฟิเคชันส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างกัน

เกสซ์ชรัตน์ กชกรจรรพพงศ์ (2550) ศึกษาเรื่อง การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งด้วยการบำบัดโดยดิน โดยสร้างระบบบำบัดจำลอง 6 แปลงทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่มเหมือนกัน ได้แก่ แปลงหญ้ามาเลเซีย แปลงผักบุงจีน และแปลงควบคุม (ไม่ปลูกพืช) แต่ใช้น้ำลักษณะต่างกันระหว่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากถังตกตะกอนโรงงานและน้ำประปาในโรงงาน ซึ่งกำหนดอัตราการใช้น้ำและใช้วิธีรดน้ำภายใต้สภาวะเดียวกัน ให้อัตราการใช้น้ำคือ 7.7 และ 12.6 cm/week พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนน้ำทิ้งสูง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยในน้ำทิ้งที่อัตราการใช้น้ำ 7.7 cm/week ของแปลงหญ้ามาเลเซียและแปลงควบคุม เท่ากับ  $92.18 \pm 10.11\%$  และ  $86.35 \pm 2.16\%$  ตามลำดับ ส่วนแปลงผักบุงจีนไม่สามารถคำนวณประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ เนื่องจากระบบเกิดโครงสร้างหลังดำเนินการทดลองเดินระบบแล้ว 30 วัน สำหรับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำทิ้งที่อัตราการใช้น้ำ 12.6 cm/week ของแปลงหญ้ามาเลเซีย แปลงผักบุงจีน และแปลงควบคุม เท่ากับ  $85.30 \pm 14.38\%$ ,  $81.63 \pm 8.89\%$  และ  $52.21 \pm 23.39\%$  ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่า แปลงที่ปลูกหญ้ามาเลเซียมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนสูงที่สุดทั้งสองอัตราการใช้น้ำ และพบว่า การบำบัดโดยดินจะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นหากใช้พืชร่วมด้วย ซึ่งไนโตรเจนส่วนใหญ่จะถูกกำจัดผ่านกระบวนการระเหยสู่บรรยากาศ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาดำเนินการทดลองในแต่ละอัตราการใช้น้ำ ผลผลิตผักบุงจีนและหญ้ามาเลเซียที่รดด้วยน้ำทิ้งให้ผลผลิตที่มีน้ำหนักพืชมากกว่าแปลงทดลองที่รดด้วยน้ำประปา และหลังดำเนินการทดลองพบว่าค่าไนโตรเจนทั้งหมดในดินจะอยู่ในช่วง 0.02-0.50% (0.20-5.00 g/kg) ซึ่งเป็นค่าไนโตรเจนที่พบในดินโดยทั่วไป และยังพบว่าพืชสามารถใช้ปริมาณไนโตรเจนที่มีในน้ำทิ้งได้มากกว่าปุ๋ยไนโตรเจนที่ถูกแนะนำ และยังช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งที่อาจจะสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำได้ในขณะเดียวกัน

Christen *et al.* (2010) ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทำไวน์ โดยใช้ดินเป็นตัวกรอง ซึ่งน้ำเสียต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยนำไปผ่านตะแกรงหยาบและตกตะกอนในบ่อ จากนั้นจึงนำมาเข้าระบบการกรองโดยดิน ดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายร่วมกับการปลูกพืช และระบายน้ำเสียด้วยอัตราการไหลช้า พบว่าน้ำเสียมีค่า pH เป็นกลาง แสดงให้เห็นว่าดินไปปรับสภาพ pH ของน้ำเสียในระหว่างการไหลผ่านชั้นดิน และดินมีประสิทธิภาพทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด มีค่าพีเอชของดินเป็นกลาง มีค่าของแข็งแขวนลอย บีโอดี และธาตุอาหารต่างๆที่เป็นพิษลดลง และเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำเสียมีปริมาณสูงจะส่งผลทำให้เกิดการอุดตันในช่องว่างของดิน ทำให้ค่าการซึมน้ำ (k) ลดลง แต่ค่าของความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการละลายของคาบอเนตในดิน ฟอสฟอรัสทั้งหมดมีค่าลดลงเนื่องจากการดูดซับของดิน โพแทสเซียมมีค่าลดลงเนื่องจากการดูดซับของดินและการนำไปใช้โดยพืช ค่าโซเดียมในน้ำเสียมีค่าสูงมากแต่เมื่อผ่านระบบแล้วมีแนวโน้มที่ลดลง เพราะโซเดียมถูกชะล้างจากการแลกเปลี่ยนของดิน ค่า SAR หลังจากผ่านระบบมีค่าลดลงแต่ยังคงมีสูงอยู่  $\text{NH}_4$  ที่ดินชั้นบนมีค่าสูงเพราะมีการตรึงอินทรีย์วัตถุไว้ที่ด้านบนและจะมีค่าลดลงเนื่องจากการดูดซับโดยดิน  $\text{NO}_3$  มีค่าน้อยมากเนื่องจากน้ำเสียมีค่านี้น้อย การบำบัดอินทรีย์คาร์บอนเกิดจากการดูดซับโดยดินและจุลินทรีย์มีการนำไปใช้ จากการวิเคราะห์



ลักษณะของดินพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าลดลงที่ทุกระดับ ความสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนโซเดียมลดลงที่ดินชั้นบนและจะเพิ่มขึ้นในดินชั้นล่าง และ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมมีค่าเพิ่มขึ้นที่ทุกระดับความสูง

Yang *et al.* (2010) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยใช้ดินบรรจุลงในคอลัมน์ แล้วรดน้ำด้วยอัตราการรดที่ 17 mm/d. เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ระบบสามารถบำบัดค่าบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ และเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินโปรโตในแปลงหญ้า น้ำที่รดไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของหญ้า

ทัยธช หิรัญเรือง (2553) ศึกษาเรื่อง การดูดซับโลหะหนักของดินบริเวณหลุมฝังกลบขยะชุมชน พบว่า ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก ซึ่งการดูดซับตะกั่วมีค่า  $K_f$  0.67 และ 0.88 L/g สำหรับดินชั้นต้นและดินชั้นลึกตามลำดับ และดินมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดีที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายต่ำ โดยการดูดซับแคดเมียมมีค่า  $K_f$  0.21 และ 0.51 L/g สำหรับดินชั้นต้นและดินชั้นลึกตามลำดับ

มณิรัตน์ เทียมทัน และจีมา ศรีลัมภ์ (2554) ศึกษาเรื่อง ไอโซเทอมการดูดซับของตะกั่วในน้ำชะมูลฝอยและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำชะมูลฝอยได้สูง โดยตัวอย่างดิน BK1-BK8 มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 0.23-0.79 L/g ตามลำดับ มีค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.59-0.98 ตามลำดับ

พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ในเรื่อง การนำน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางชั้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน พบว่า เมื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางชั้นที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วมารดสวนปาล์มน้ำมัน ทำให้ค่า COD, TKN และ SS ที่ผ่านระบบบำบัดมีค่าลดลง ซึ่งระบบบำบัดโดยดินสามารถบำบัดน้ำทิ้งให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ โดยแปลงที่รดน้ำทิ้งสัปดาห์ละครั้งมีประสิทธิภาพในการบำบัดโดยดินดีกว่าแปลงที่รดน้ำทิ้งทุกวัน โดยแปลงที่มีการรดน้ำทิ้งสัปดาห์ละครั้งมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD, TKN และ SS ทุกแปลงรวมเฉลี่ยเท่ากับ 80%, 69% และ 78% ตามลำดับ ส่วนแปลงที่รดน้ำทิ้งทุกวันมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD, TKN และ SS ทุกแปลงรวมเฉลี่ยเท่ากับ 71%, 52% และ 67% ตามลำดับ โดยแปลงที่รดในอัตรา 0.5 cm/week มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด โดยเกณฑ์การบำบัดที่เหมาะสมควรใช้ hydraulic loading rate น้อยกว่า 3 cm/week

โรสนา กาชอ และคณะ (2555) ได้ศึกษาเรื่อง การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน พบว่า เมื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วมารดในสวนปาล์มน้ำมัน ทำให้ค่า COD, TSS, TKN, TP และ sulfate ลดลง โดยแปลงที่รดในอัตรา 2.2 m<sup>3</sup>/2d มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TSS สูงสุดอยู่ในช่วง 52.5-92.0% และ 17.6-88.4% ตามลำดับ ส่วนแปลงที่รดในอัตรา 4.6 m<sup>3</sup>/2d มีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN, TP, และ Sulfate สูงสุดอยู่ในช่วง 50.02-95.7%, 36.1-83.8% และ 26.6-94.4% ตามลำดับ

กาญจณี ชูทอง (2556) ศึกษาเรื่องกลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดินแบบอัตราไหลช้า ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแต่ยังมีคุณภาพไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง มารดคอลัมน์ดินโดย

มีอัตราการรดที่ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week ตามลำดับ แบ่งการทดลองเป็นสองชุด คือ รดคอลัมน์ดิน 2 วัน/ครั้ง และรดคอลัมน์ดินสัปดาห์ละครั้ง พบว่า คอลัมน์ดินที่มีการรดน้ำทั้งในอัตรา 0.14 L/2d (1 cm/week) มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด อยู่ในช่วง 96.5-98.3% และ 97.7-99.9% ตามลำดับ คอลัมน์ดินที่มีการรดน้ำทั้งในอัตรา 0.25 L/week (0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นอยู่ในช่วง 97.8-99.8% โดยกลไกการบำบัดหลักมี 2 กลไก ได้แก่ กลไกการดูดซับสารอินทรีย์ของดินในคอลัมน์ทดลอง และกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ

วันวิจิตร ทิมฐาน (2559) ศึกษาการใช้ดินบำบัดเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรน หลังจากการเติมน้ำลงคอลัมน์ ในช่วงแรกของการทดลองไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ จนในสัปดาห์ที่ 4 จึงมีน้ำไหลออกมาทุกคอลัมน์ เนื่องจากในช่วงแรกดินที่บรรจุลงไปคอลัมน์จะทำการดูดซับน้ำที่รดลงไป แต่เมื่อรดน้ำลงไปเรื่อยๆขึ้น น้ำจึงไหลซึมออกมา คอลัมน์ที่รดน้ำด้วยอัตรา 1 cm/week สามารถไหลซึมลงดินได้ทั้งหมด แต่ในทางกลับกันคอลัมน์ที่รดน้ำด้วยอัตรา 3 cm/week ไม่สามารถไหลซึมผ่านได้ทั้งหมด ยังคงมีน้ำส่วนหนึ่งที่เอ่ออยู่ด้านบนผิวดิน

อดิษฐ์ อนุศักดิ์ (2560) ศึกษาการจัดการน้ำเสียด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์ ในช่วงแรกของการทดลองน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีปริมาณน้อย เนื่องจากดินมีความชื้นต่ำ ยังไม่เกิดการอิ่มตัว จึงต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการทำให้ดินอิ่มตัว อัตราการรดสูงส่งผลให้ดินอิ่มตัวเร็วกว่าอัตราการรดต่ำ ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์จึงมากกว่าอัตราการรดต่ำกว่า ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นจนถึงสัปดาห์ที่ 5-7 ดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำปริมาณน้ำไหลผ่านคอลัมน์ได้มากขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 7 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะหน้าดินมีการอุดตันจากสิ่งสกปรกในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำขัง และดินเกิดการยุบตัว ความหนาแน่นดินในคอลัมน์เพิ่มขึ้น

จากการผลวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่าพีเอชในดินส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนกับฟอสฟอรัสในน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  นั้นสามารถทำปฏิกิริยากับ hydrous oxide ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำเช่นกัน Brady (1974) และจาก Sanchez (1976) กล่าวว่า พีเอชของดินเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมรูปของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในดิน เมื่อดินเป็นกรดมากขึ้นจะมีอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูป Fe-P และ Al-P สูงขึ้น ในขณะที่ Ca-P ลดลง

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยดิน แบบอัตราการไหลช้า (slow rate irrigation) โดยใช้ปุ๋ยเสียดังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงาน โดยสร้างชุดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (lab-scale) ควบคุมไม่มีพิษมาเกี่ยวข้อง ได้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยจะสร้างชุดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (lab-scale) เป็นแบบคอลัมน์ในระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยในการออกแบบจะใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 เซนติเมตร มีความสูง 100 เซนติเมตร โดยมีโครงเหล็กในการยึดเพื่อความแข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และ 3.3 โดยบรรจุดินลงไป 80 เซนติเมตร ใช้ดินจากสวนปาล์มที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อน การศึกษาวิจัยนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

##### การทดลองรูปแบบที่ 1 คือการทดลองด้วยปุ๋ยเสียดังเคราะห์

ศึกษารูปแบบวิธีการของระบบบำบัดน้ำทิ้งโดยดิน (land treatment systems) และวิธีตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้งและคุณภาพดิน โดยการวิเคราะห์ค่าเนื้อดินเพื่อให้ได้รูปแบบของระบบบำบัดที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ และลักษณะเนื้อดิน เลือกพื้นที่ในสวนปาล์มน้ำมันใน จ.กระบี่ โดยเลือกใช้ดินในพื้นที่ของสวนปาล์มน้ำมันที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อน ดังแสดงที่ภาคผนวก ก ภาพที่ ก-1 จะใช้ปุ๋ยเสียดังเคราะห์ในการรด โดยมีอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2, 1 และ 0.5 cm/week และควบคุม pH ที่ 5, 7 และ 9 และทำการรดน้ำเสียดังเคราะห์ลงในคอลัมน์วันละครั้ง แสดงดังตารางที่ 3.3 เก็บตัวอย่างน้ำเสียดังเคราะห์หลังรดในชุดทดลองทุกๆ 15 วัน โดยวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัส และค่า Orthophosphate อย่างน้อยพารามิเตอร์ละ 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 3.1 และเก็บตัวอย่างดินทั้งก่อน และหลังการทดลองไปวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ในการทำการทดลองหลังเดินระบบด้วยปุ๋ยเสียดังเคราะห์แล้ว เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุด ในน้ำที่มีค่าฟอสฟอรัสแน่นอน จะทำการเลือกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ และค่า pH ของน้ำเสียดังเคราะห์ที่ดีที่สุด มาใช้ออกแบบในการทดลองรูปแบบที่ 2 โดยทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่

##### การทดลองรูปแบบที่ 2 คือการทดลองด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในการทดลองรูปแบบที่ 2 นี้จะใช้คอลัมน์ทดลอง 4 คอลัมน์ โดย 3 คอลัมน์จะทำการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับ pH 5, 7 และ 9 ทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดของดินเมื่อไม่มีการเติมฟอสฟอรัสลงในระบบ และอีกหนึ่งคอลัมน์ทำการทดลองโดยรดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ และปรับค่า pH ของน้ำทิ้งโรงงาน

ให้ตรงกับค่า pH ที่ดีที่สุดซึ่งเลือกไว้จากผลการทดลองรูปแบบที่ 1 เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดของดินจากน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบในน้ำทิ้งแตกต่างจากน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองรูปแบบที่ 1 ในการทดลองรูปแบบที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ ไปวิเคราะห์แสดงค่าดังตารางที่ 3.1 โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์อย่างน้อยพารามิเตอร์ละ 3 ซ้ำ และตัวอย่างดินทั้งก่อน และหลังการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้น ดังตารางที่ 3.2 รดลงในคอลัมน์วันละครั้ง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง วิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในดิน โดยดูฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ และออกจากระบบ แล้วนำข้อมูลที่ได้อมาประมวลผล วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และจัดทำรายงานเพื่อนำเสนอผลการวิจัย

### ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
1. pH	-	pH meter
2. TP (total phosphorus)	mg/L	Persulfate digestion
3. Orthophosphate	mg/L	Colorimetric & Stannous chloride method

ที่มา : APHA AWWA and WEF (2012)

### ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
1. เนื้อดิน (soil texture)	-	Hydrometer method*
2. Permeability	cm/s	Variable Head**
3. pH	-	pH meter*
4. Fe-Phosphate	mg/kg	Kuo method***
5. Al-Phosphate	mg/kg	Kuo method***
6. Ca-Phosphate	mg/kg	Kuo method***
7. TP (total phosphate)	mg/kg	HClO <sub>4</sub> digestion & molybdovanadophosphate method****
8. Available P	mg/kg	Bray II method****

ที่มา : \*AOAC (1999)

\*\*ASTM D (2434)

\*\*\*Modifications as reported by Kuo (1996)

\*\*\*\*APHA AWWA and WEF (2012)

ตารางที่ 3.3 คอลัมน์ที่ทำการรดน้ำวันละครั้ง (การทดลองรูปแบบที่ 1 รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์)

คอลัมน์ที่รดวัน/ครั้ง*	pH ของน้ำรด	Hydraulic loading (cm/week)	อัตราการรดน้ำ (mL/d)
D1	5	3.0	217
D2		2.0	145
D3		1.0	72
D4		0.5	36
D5	7	3.0	217
D6		2.0	145
D7		1.0	72
D8		0.5	36
D9	9	3.0	217
D10		2.0	145
D11		1.0	72
D12		0.5	36

\*ขนาดพื้นที่ในทุกคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 50.70 cm<sup>2</sup>

ตารางที่ 3.4 คอลัมน์ที่ทำการรดน้ำวันละครั้ง (การทดลองรูปแบบที่ 2 รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7)

คอลัมน์ที่รดวัน/ครั้ง*	ประเภทของน้ำที่รด	pH น้ำรด	Hydraulic loading (cm/week)	อัตราการรดน้ำ (mL/d)
C1	blank-pH 9	9	2.0	145
C2	blank-pH 7	7	2.0	145
C3	blank-pH 5	5	2.0	145
C4	น้ำทิ้งโรงงานปรับ pH 7	7	2.0	145

\*ขนาดพื้นที่ในทุกคอลัมน์มีค่าเท่ากับ 50.70 cm<sup>2</sup>



ภาพที่ 3.1 ชุดคอลัมน์ทดลอง

### 3.2 วัสดุและอุปกรณ์

#### 3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

- ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง เลือกใช้ดินในพื้นที่ของสวนปาล์มน้ำมันที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำมาก่อนใน จากสวนปาล์มน้ำมันของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่

- จอบ
- พลั่ว
- กระสอบ
- เชือกฟาง

#### 3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

- กระบวยตักน้ำ
- แกลลอนขนาด 40 ลิตร

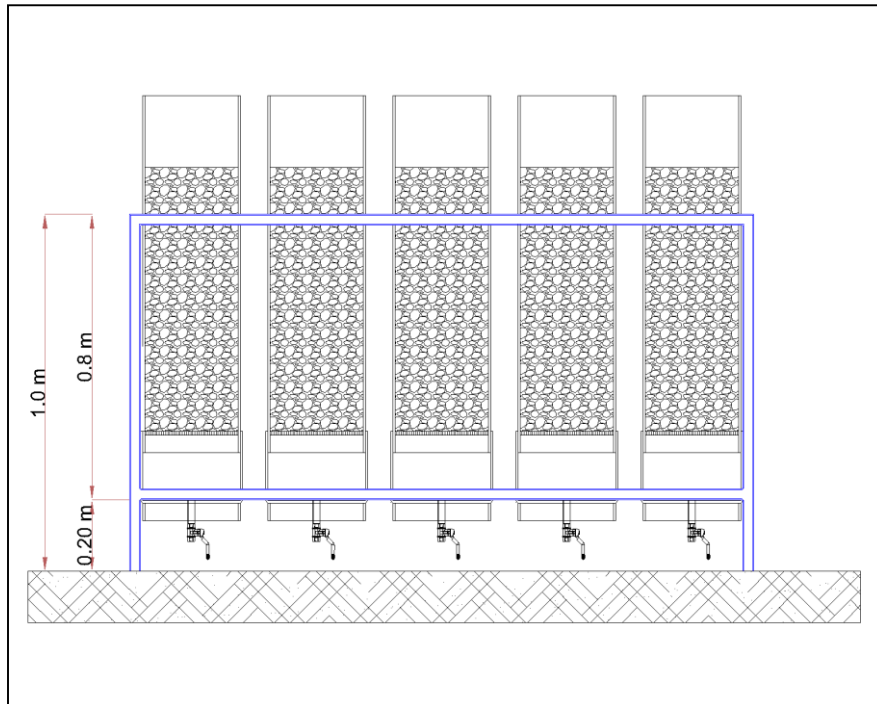
#### 3.2.3 สร้างชุดทดลอง

- ท่อ PVC 10 นิ้ว
- ฝาครอบท่อ PVC 10 นิ้ว
- ตาข่าย STL #80
- กาวท่อน้ำ
- ก๊อคน้ำ ½ นิ้ว

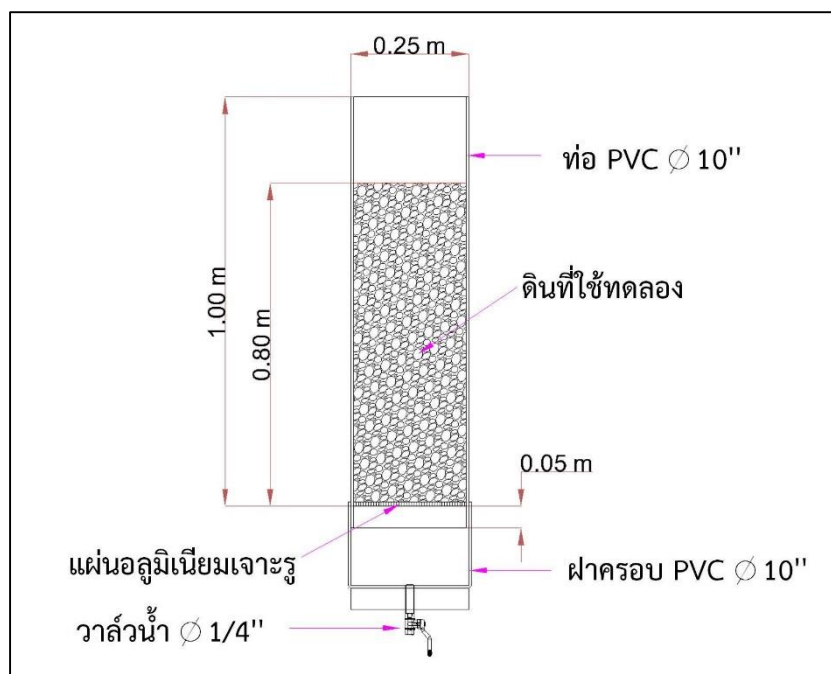
- เกลีสวใน ½ นิ้ว
- เกลีสวนอก ½ นิ้ว
- ท่อ PVC ½ นิ้ว
- ฝาครอบ ½ นิ้ว
- เหล็กเพลาสแตนเลส
- ปะเก็นยางกลม
- แผ่นอะลูมิเนียมเจาะรู
- สว่าน
- ปืนยิงกาว
- เลื่อยเหล็ก
- สตีฟเกลียว
- ค้อน
- โครมเหล็กทรงชุดทดลอง 2 ชุด

### 3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

- กระจกตวง
- ช้อนปลูกเก็บตัวอย่างดิน
- ขวดน้ำพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง
- ถังพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างดิน
- พาราฟิล์ม
- กระดาษอลูมิเนียม (foil)
- ถาดสแตนเลส
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 10
- เตาไฟฟ้า (hot plate)
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เครื่อง spectrophotometer unicam รุ่น GENESYS 10 UV
- กรวยกรองบุคเนอร์
- เครื่องปั๊มดูดสุญญากาศ (vacuum pump)
- กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- กระดาษกรองเบอร์ 5 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น sension1
- ตู้อบความร้อนแห้ง (hot air oven)
- ตู้ดูดควัน/ดูดไอสารเคมี (fume hood)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิพร้อมเขย่า (incubator shaker)
- ชุดทดสอบการซึม (permeability test)



ภาพที่ 3.2 ชุดทดลอง: รูปด้านหน้าของชุดทดลอง



ภาพที่ 3.3 ชุดทดลอง: ด้านตัดขวางอุปกรณ์



### 3.3 การเก็บตัวอย่างดิน และน้ำที่ใช้ในการทดลอง

โดยขั้นตอนแรกได้ไปเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในภาคผนวก ก ในวันที่ 19 พฤษภาคม 2558 เก็บตัวอย่างดิน และน้ำจากระบบบำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ เพื่อมาวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสเบื้องต้น การทดลองขั้นที่ 2 ไปเก็บตัวอย่างในวันที่ 6 มิถุนายน 2559 เก็บตัวอย่างดิน และน้ำจากระบบบำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ นำตัวอย่างน้ำแช่ในตู้เย็นของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ตลอดการทดลอง

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองจะเตรียมน้ำเสียขึ้นจาก  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ที่ความเข้มข้น 6 มก./ล. โดยการเตรียมน้ำ RO โดยที่ในน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร ประกอบไปด้วย สารละลายสารประกอบ  $\text{PO}_4^{3-}$  พร้อมปรับ pH ให้มีค่า pH 5, 7 และ 9 โดยใช้ NaOH ปรับให้น้ำเสียสังเคราะห์ให้เป็นเบส และใช้ HCl ปรับให้น้ำเสียสังเคราะห์ให้เป็นกรด

โดยมีการคิดคำนวณน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนี้

- การหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ ต้องการเตรียมสาร P น้ำหนักโมเลกุล = 31 กรัม/โมล

เตรียมจากสารประกอบ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  น้ำหนักโมเลกุล = 136 กรัม/โมล

ถ้าความเข้มข้นที่ต้องการ = 1 มก./ล.

น้ำหนักที่ใช้ มก. =  $\frac{136(\text{ก.}) \times 1000(\text{มก.}) \times 1(\text{มก.})}{31(\text{ก.}) \times 1000(\text{มก.})}$

= 4.387 มก.

น้ำหนักที่ใช้ ก. =  $\frac{4.387}{1000} = 0.0044 \text{ ก.}$

ดังนั้น ถ้าต้องการความเข้มข้น ที่ 6 มก./ล. จะต้องชั่งสารประกอบ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  มา  $0.0044 \times 6 = 0.0264$  กรัม ใส่ในน้ำปริมาตร 1 ลิตร

### 3.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการทดลอง จะนำผลที่ได้จากการทดลองรูปแบบที่ 1 มาเป็นตัวกำหนดในการออกแบบการทดลองรูปแบบที่ 2

#### การทดลองรูปแบบที่ 1

3.4.1 ศึกษาแบบวิธีการของระบบบำบัดน้ำทิ้งโดยดิน (land treatment systems) และวิธีตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้งและคุณภาพดิน เลือกพื้นที่ในสวนปาล์มน้ำมันใน จ.กระบี่ โดยเลือกใช้ดินในพื้นที่ของสวนปาล์มน้ำมันที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อน

3.4.2 ก่อนการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ มาวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัส ค่า Orthophosphate ค่าเหล็ก ค่าอะลูมิเนียม และค่าแคลเซียม เพื่อใช้ในการทำน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกำหนดค่าฟอสฟอรัสในการทดลองให้เท่ากับค่าฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

3.4.3 เก็บตัวอย่างดินเพื่อบรรจุคอลัมน์ทดลอง โดยเลือกดินในพื้นที่ที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำทั้งจากโรงงานมาก่อน จากสวนปาล์มน้ำมันของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ โดยนำดินจากในกระสอบ 16 กระสอบมาเทกองรวมกัน แยกเอาเศษกิ่งไม้ใบไม้และสิ่งเจือปนต่างๆออก จากนั้นตีดินก้อนใหญ่ให้ดินร่วนไม่เกาะเป็นก้อน และคลุกเคล้าทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในภาคผนวก ภาพที่ ก-3 และ ก-4 ก่อนนำดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง และเก็บตัวอย่างดินประมาณ 5-6 กิโลกรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆทั้งก่อนและหลังการบำบัด ดังตารางที่ 3.2

3.4.4 นำดินตัวอย่างมาวิเคราะห์เนื้อดิน (soil texture) ตามวิธี Hydrometer Method และวิเคราะห์หาค่าอัตราการซึม (permeability) ตามมาตรฐานของ ASTM D 2434 โดยวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4.5 สร้างชุดทดลองจำนวน 12 ชุด เป็นแบบคอลัมน์ในระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร โดยมีโครงเหล็กในการยึดเพื่อความแข็งแรง บรรจุดินลงไป 80 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และ 3.3 เน้นศึกษาแค่ส่วนของดินที่มีผลต่อน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 3, 2, 1 และ 0.5 cm/week และควบคุม pH ที่ 5, 7 และ 9 ทำการรดน้ำเสียสังเคราะห์ลงในคอลัมน์วันละครั้ง

3.4.6 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกจากชุดทดลองทุกๆ 15 วัน โดยวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัส และค่า Orthophosphate ประกอบกันอย่างน้อยพารามิเตอร์ละ 3 ซ้ำ ตามวิธีของ Standard Method (APHA AWWA and WEF 2012) เติกระบบจนกว่าระบบเริ่มจะมีค่าคงที่ โดยดูจากค่าฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบทุกๆ 15 วันเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน

3.4.7 นำดินตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการทดลอง จากทุกคอลัมน์วิเคราะห์ค่า Al- Phosphate, Fe-Phosphate และ Ca-Phosphate ตามขั้นตอนของ Kuo (1996) แสดงขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนของ Soluble and loosely bound P

นำดินตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้ง 0.5 กรัม ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ 1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในหลอด centrifuge จากนั้นปิดหลอดและทำการเขย่าเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เทสารละลายใสส่วนใส (supernatant) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ Deionized

- ขั้นตอนการแยก Al- Phosphate

หลังจากนั้นเติม 0.5M  $\text{NH}_4\text{F}$  (pH 8.2) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงไปในหลอด centrifuge ปิดฝาและเขย่าโดยมือจนกระทั่งตะกอนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไป centrifuge ที่ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที รินสารละลายใสส่วนบนลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วล้างตัวอย่างดินด้วย NaCl อิ่มตัว ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง แล้วนำไป centrifuge ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัส

- ขั้นตอนการแยก Fe-Phosphate

การแยกเหล็กฟอสเฟตโดยการเติม 0.1M NaOH ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในดิน จากนั้นปิดหลอดแล้วเขย่าด้วยมือให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเขย่าต่อเป็นเวลา 17 ชั่วโมง แล้วนำไป

centrifuge ที่ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บสารละลายส่วนใสลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ล้างตัวอย่างดินด้วย NaCl อิ่มตัว ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร นำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัส

- ขั้นตอนการแยก Ca-Phosphate

การแยกแคลเซียมฟอสเฟตโดยการเติม 0.25M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงไปในหลอด centrifuge ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไป centrifuge ที่ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายส่วนใสลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ล้างตัวอย่างดินด้วย NaCl อิ่มตัว ปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร นำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัส

- หาค่าฟอสฟอรัส

ด้วยวิธีการทำให้เกิดสีโดย molybdenum blue method ใช้โดย reduce agent คือ stannous chloride จะได้สีน้ำเงินเกิดขึ้นความเข้มข้นของสีน้ำเงินจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 690 นาโนเมตร

3.4.8 หลังจากเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์แล้ว ศึกษาประสิทธิภาพที่ดินสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้สูงสุด แล้วทำการเลือกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ และ pH ที่ดีที่สุด ไปใช้ทดลองในการทดลองรูปแบบที่ 2 ที่ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่

### การทดลองรูปแบบที่ 2

3.4.9 เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใน จ.กระบี่ ไปวิเคราะห์ค่าดังตารางที่ 3.1 โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์อย่างน้อยพารามิเตอร์ละ 3 ซ้ำ ที่ห้องปฏิบัติการของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4.10 บรรจุน้ำลงชุดการทดลองทำการทดลองเดินระบบด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเลือกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 2 cm/week ค่า pH ที่ 7 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในการบำบัดฟอสฟอรัสจากการทดลองรูปแบบที่ 1 มาใช้ในการทดลองรูปแบบที่ 2

3.4.11 รดน้ำกลั่นที่ปรับ pH 5, 7 และ 9 และทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเลือกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 2 cm/week ลงในคอลัมน์วันละครั้ง

3.4.12 เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากชุดการทดลองทุกๆ 15 วัน โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์อย่างน้อยพารามิเตอร์ละ 3 ซ้ำ ตามวิธีของ Standard Method (APHA AWWA and WEF 2012) เดินระบบจนกว่าระบบเริ่มจะมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุดใกล้เคียงกัน

3.4.13 หลังเสร็จสิ้นการทดลอง นำดินจากทุกคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) ตามวิธีของ Standard Method (APHA AWWA and WEF 2012) และวิเคราะห์ค่า Al- Phosphate, Fe-Phosphate และ Ca-Phosphate ตามขั้นตอนของ Kuo (1996)

3.4.14 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง วิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่อยู่ในดิน โดยดูฟอสฟอรัสที่เข้าระบบ และออกจากระบบ เพื่อดูประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสโดยดิน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และจัดทำรายงานเพื่อนำเสนอผลการวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาอัตราการรดน้ำ และ pH ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยดินศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินก่อนและหลังการทดลอง และคุณลักษณะน้ำทิ้งรดคอลลัมน์และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลลัมน์ทดลอง โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำ ของการทดลองรูปแบบที่ 1

ในการดำเนินการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงสกัดน้ำมันปาล์ม ของบริษัท เอเชีย น้ำมันปาล์ม อ.อ่าวลึก จ.กระบี่ เพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้ โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้ง ครั้งแรกเพื่อใช้ในการกำหนดค่าฟอสฟอรัสเริ่มต้น และครั้งที่ 2 ใช้ในการดำเนินการทดลอง

##### 4.1.1 คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ก่อนเริ่มการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ก่อนการทดลอง ดังแสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนการทดลอง

แหล่งน้ำ	พารามิเตอร์				
	ฟอสฟอรัส (mg/L)	Orthophosphate (mg/L)	เหล็ก (mg/L)	อะลูมิเนียม (mg/L)	แคลเซียม (mg.CaCO <sub>3</sub> /L)
น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนทดลอง	6.44	19.71	1.203	0.269	189
น้ำก่อนบำบัด**	3.78	11.57	0.440	0.048	103

\*\*น้ำก่อนบำบัด = น้ำก่อนเข้าระบบบำบัดเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

##### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนการทดลอง

ค่า pH ของน้ำเสีย และน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ มีค่าดังนี้

- ค่า pH ของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนเข้าระบบบำบัด เท่ากับ 7.11
- ค่า pH ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 เท่ากับ 9.08
- ค่า pH ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 เท่ากับ 8.56

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 1

ทำการวัดค่า pH ของน้ำทุกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ทดลอง รายละเอียดดังตารางที่ 4.2 โดยใช้เครื่อง pH-meter วัดค่าจากขวดเก็บตัวอย่าง โดยก่อนวัดได้ทำการเขย่าขวดเพื่อให้ตัวอย่างมี pH เดียวกันทั้งขวด

**ตารางที่ 4.2** ค่า pH ของน้ำที่เข้า - ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลัมน์	Hydraulic loading (cm/week)	pH น้ำ (ก่อนเริ่มการทดลอง)	pH น้ำเฉลี่ย±SD (หลังการทดลอง)
D1	3.0	5	8.21±0.15
D2	2.0	5	7.76±1.48
D3	1.0	5	5.52±1.38
D4	0.5	5	NA
D5	3.0	7	8.17±0.29
D6	2.0	7	7.88±0.14
D7	1.0	7	8.13±0.42
D8	0.5	7	NA
D9	3.0	9	8.38±0.20
D10	2.0	9	8.22±0.17
D11	1.0	9	7.40±1.47
D12	0.5	9	NA

NA = ไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์

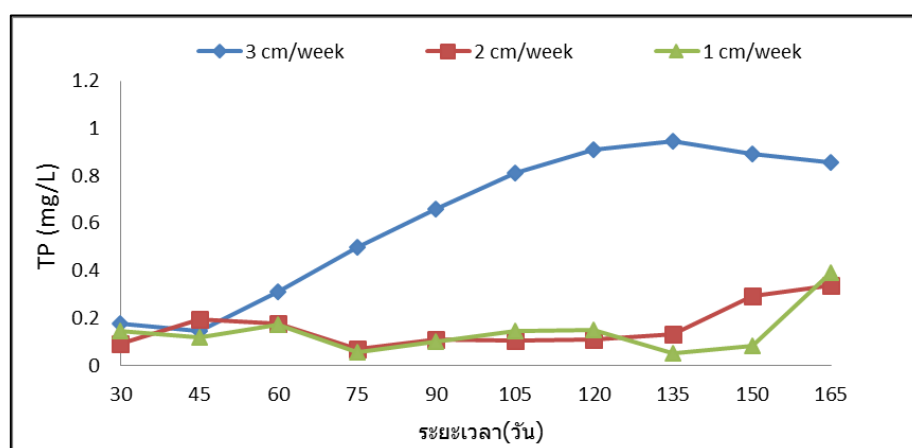
หลังจากควบคุม pH ของน้ำที่ไรรดให้เป็นไปตามที่กำหนดดังแสดงดังตารางที่ 4.2 ปรากฏว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองแล้ว คอลัมน์ D1 และ D2 ใช้อัตราการรดที่ 3 และ 2 cm/week ตามลำดับ ที่ pH 5 แต่ น้ำออกมีค่า pH เป็นต่าง อาจเนื่องมาจากดินที่มีการเก็บประจุไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ไว้มากได้สูญเสียสภาพหรือแตกตัวออกจากดินจำนวนมาก ซึ่งมาจากปริมาณตัวกระตุ้นคือ อัตราการรดที่สูงเป็นตัวเร่งให้มีการแตกตัวและแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ประจุ OH<sup>-</sup> ที่อยู่ในดินจึงการกระจายตัวออกไปมาก pH ในน้ำจึงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม pH ของน้ำที่ออกเฉลี่ยตลอดชุดการทดลอง มีค่าโดยรวมเป็นต่าง จากการทำการทดลองเมื่อรดน้ำผ่านคอลัมน์ทดลอง ในช่วงแรกค่า pH ของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ทดลองยังมีค่า pH ที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 3.56-3.87 ดังแสดงภาคผนวก ค ภาพที่ ค-1 – ค-3 เมื่อดำเนินการทดลองไปตลอดการทดลอง จะพบว่าค่า pH ของน้ำที่ออกจากระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากชุดดินที่นำมาใส่ในคอลัมน์ซึ่งมี pH ของดินเท่ากับ 5.64 เมื่อเทียบกับค่าการแปลความหมายค่า pH ของดินในตารางที่ 2.6 ดินมีความเป็นกรด

ปานกลาง (pH 5.0-6.0) (อภิรดี อิ่มเอิบ 2534 และคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา 2548) ซึ่งในดินมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) อยู่ เมื่อทำการรดน้ำที่ผ่านคอลัมน์ดินจะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกันระหว่างไอออนในน้ำและดิน ส่งผลให้ค่า pH มีการเปลี่ยนแปลง โดยหลังการทดลองค่า pH มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อน้ำรดผ่านระบบบำบัดโดยดินมีค่า pH เป็นกลางถึงด่าง แสดงว่าระบบบำบัดโดยดินมีผลทำให้ pH ของน้ำหลังการทดลองมีค่าเป็นกลางถึงด่างได้ ทั้งนี้จากผลการทดลอง อัตราการรดสูงมีแนวโน้มที่ค่า pH จะสูงกว่าอัตราการรดต่ำ เมื่อระยะเวลาบำบัดเพิ่มขึ้นจากภาพในภาคผนวก ค ภาพที่ ค-1 – ค-3 ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) และ กุสุมาลย์ ส่องแก้ว (2557)

#### 4.1.4 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

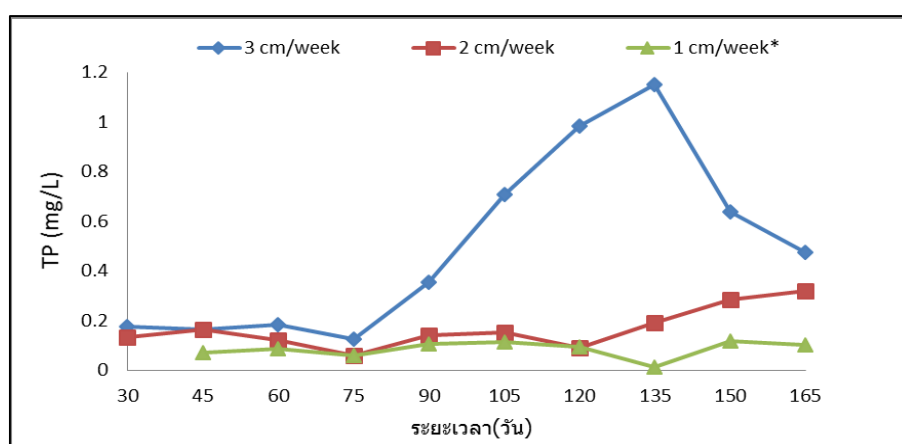
การทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำ โดยใช้ค่า pH เป็นเกณฑ์ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ เลือกใช้ค่า pH 3 ช่วง คือ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า TP เท่ากับ 6 mg/L ซึ่งมีค่าเทียบเคียงกับค่า TP จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจริง รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1 โดยแบ่งอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week ผลการทดลองศึกษาค่า TP ในแต่ละคอลัมน์การทดลองที่ pH 5, 7 และ 9 แสดงดังกราฟที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

จากกราฟที่ 4.1 ที่ pH 5 ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week สามารถลดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า TP จาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย 0.62, 0.16 และ 0.14 mg/L ตามลำดับ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่า TP จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุดจากค่าเริ่มต้น เหลือเฉลี่ย  $0.14 \pm 0.10$  mg/L นอกจากนี้พบว่าที่ระยะเวลา 75 และ 135 วัน ของอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 1 cm/week มีการบำบัดที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาทดลอง และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week มีแนวโน้มการลดลงหลังวันที่ 165



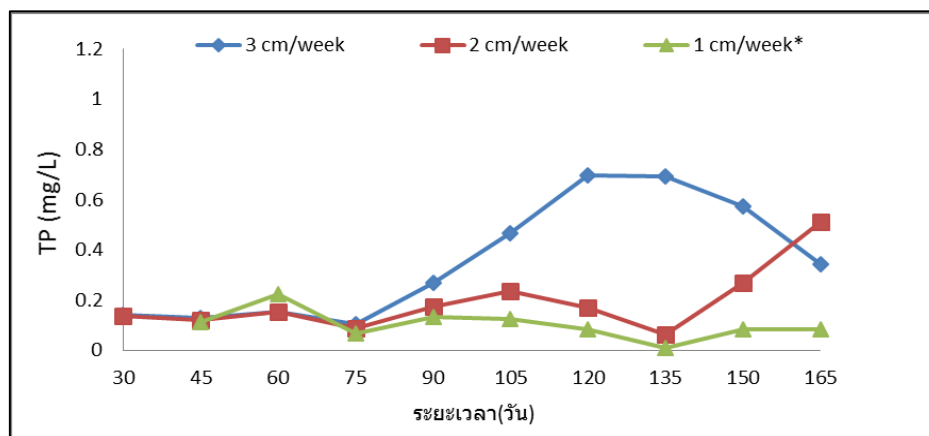
กราฟที่ 4.1 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 5

จากกราฟที่ 4.2 ที่ pH 7 ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week สามารถลดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า TP จาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย 0.50, 0.17 และ 0.08 mg/L ตามลำดับ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่า TP จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุดจาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย  $0.08 \pm 0.03$  mg/L นอกจากนี้พบว่าที่ระยะเวลา 75 วัน ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week มีการลดลงของค่า TP ในช่วงแรก และที่ระยะเวลา 135 วัน ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีการบำบัดที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาทดลอง



\*หมายเหตุ: น้ำที่ออกจากคอลัมน์ในช่วงก่อนวันที่ 45 ไม่เพียงพอต่อการทดลอง  
กราฟที่ 4.2 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 7

จากกราฟที่ 4.3 ที่ pH 9 ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week สามารถลดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า TP จาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย 0.34, 0.19 และ 0.10 mg/L ตามลำดับ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่าฟอสฟอรัสจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุดจาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย  $0.10 \pm 0.06$  mg/L นอกจากนี้พบว่าที่ระยะเวลา 75 วัน ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week มีการลดลงของค่า TP ในช่วงแรกและและที่ระยะเวลา 135 วัน ของอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 1 cm/week มีการบำบัดที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาทดลอง



\*หมายเหตุ: น้ำที่ออกจากคอลัมน์ในช่วงก่อนวันที่ 45 ไม่เพียงพอต่อการทดลอง  
 กราฟที่ 4.3 ค่า TP ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 9

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำ จากความสัมพันธ์ของกราฟที่ 4.1-4.3 สามารถคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละคอลัมน์ (คอลัมน์ D1-D12) ศึกษาจากค่า TP ในน้ำก่อนรดลงในคอลัมน์ และ TP ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ รายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลัมน์	pH น้ำ (ก่อนเริ่มการทดลอง)	ประสิทธิภาพการบำบัด TP (เปอร์เซ็นต์)
D1	5	89.66
D2	5	97.32
D3	5	97.65
D4	5	NA
D5	7	91.74
D6	7	97.26
D7	7	98.61
D8	7	NA
D9	9	94.40
D10	9	96.80
D11	9	98.30
D12	9	NA

NA = ไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์



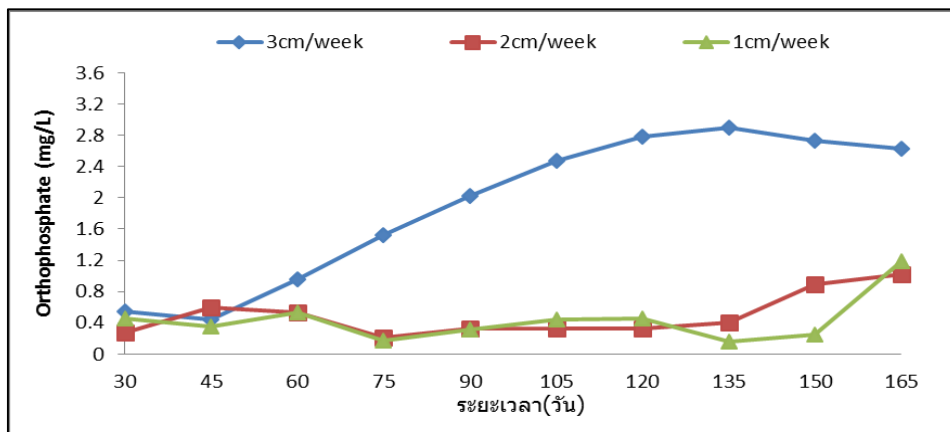
จากตารางที่ 4.3 ในการทดลองรูปแบบที่ 1 รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ คอลัมน์ D3, D7 และ D11 ค่า pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week เป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุด เท่ากับ 97.65, 98.61 และ 98.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ผลจากการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละคอลัมน์ พบว่าการรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week และค่า pH ของน้ำที่รด เท่ากับ 7 สามารถลดค่า TP จาก 6 mg/L เหลือเฉลี่ย  $0.08 \pm 0.03$  mg/L โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 98.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถการบำบัดฟอสฟอรัส เนื่องจากอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีปริมาณการรดน้ำที่น้อยกว่า ทำให้น้ำที่รดลงไปมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินในคอลัมน์นานกว่า ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 3 cm/week และที่ระดับน้ำรดที่ pH 7 อยู่ในสภาวะที่ในน้ำมีความสมดุลของไอออนของ  $H^+$  และ  $OH^-$  ซึ่งเป็นตัวกลางที่ดีในการทำปฏิกิริยากับไอออนของสาร หรือธาตุอื่น ส่งผลให้ปฏิกิริยาของดินเกิดกระบวนการการบำบัดฟอสฟอรัสในดิน เช่น การตกตะกอน การกรอง และการดูดซับของดิน รวมไปถึงการรวมตัวของฟอสฟอรัสในน้ำที่รดลงไปกับสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกได้ดี

#### 4.1.5 ค่า Orthophosphate ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 1

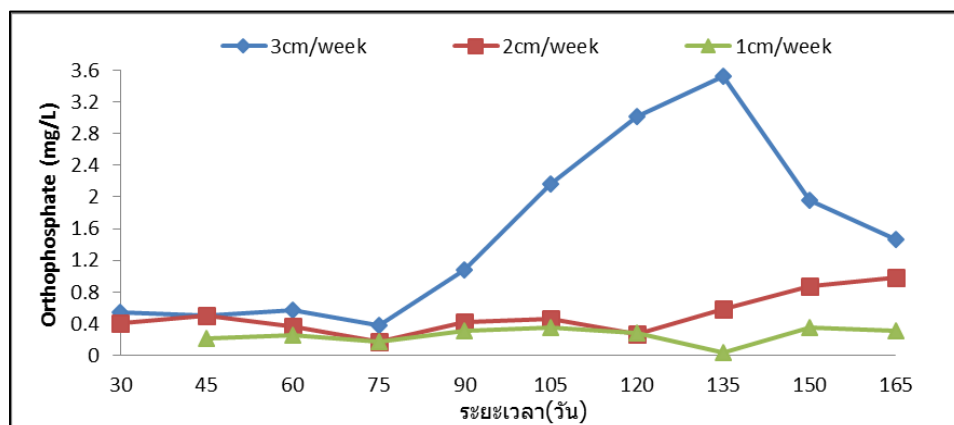
การทดลองในรูปแบบที่ 1 โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า orthophosphate 18.36 mg/L ซึ่งมีค่า Orthophosphate เท่ากับน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ ในการเก็บน้ำรอบแรก ในการทดลองในรูปแบบที่ 1 มี 3 คอลัมน์ คือ D4, D8, และ D12 ซึ่งทั้ง 3 คอลัมน์ มีอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ ที่ 0.5 cm/week ไม่มีผลการทดลอง เนื่องจากตลอดการทดลอง น้ำไม่ไหลออกจากคอลัมน์ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้ ดังแสดงในกราฟที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

กราฟที่ 4.4 ที่ pH 5 จากผลของการทดลองในรูปแบบที่ 1 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดการทดลอง เมื่อพิจารณาค่า orthophosphate เริ่มต้น ที่ 18.36 mg/L พบว่าค่า orthophosphate โดยเฉลี่ยลดลงในทุกคอลัมน์ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $1.90 \pm 0.96$  mg/L ที่อัตราการระบรทุกทาง-ชลศาสตร์ 2 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.49 \pm 0.27$  mg/L และที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.43 \pm 0.29$  mg/L และ D4 ไม่มีผลการทดลอง จากกราฟดังกล่าวสรุปได้ว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่า orthophosphate จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุด และพบว่าที่ระยะเวลา 75 วัน และ 135 ของอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 1 cm/week มีการบำบัดที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาการทดลอง และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week มีแนวโน้มการลดลงของค่า orthophosphate หลังวันที่ 165



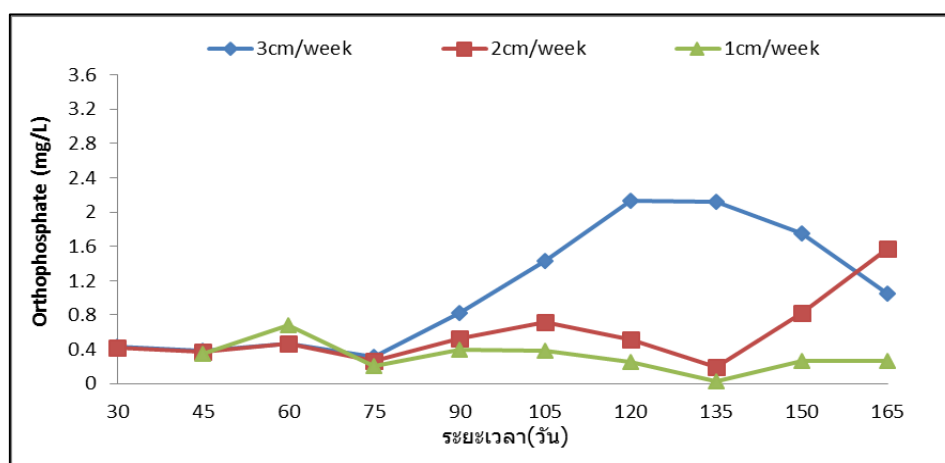
กราฟที่ 4.4 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 5

กราฟที่ 4.5 ที่ pH 7 จากผลของการทดลองในรูปแบบที่ 1 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลอง เมื่อพิจารณาค่า orthophosphate เริ่มต้น ที่ 18.36 mg/L พบว่า ค่า orthophosphate โดยเฉลี่ยลดลงในทุกคอลัมน์ โดยที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $1.52 \pm 1.12$  mg/L ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.50 \pm 0.25$  mg/L และที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.26 \pm 0.10$  mg/L และ D8 ไม่มีผลการทดลอง จากกราฟดังกล่าวสรุปได้ว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่า orthophosphate จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุด และนอกจากนี้พบว่าที่ระยะเวลา 75 วัน ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week มีการลดลงของค่า orthophosphate ในช่วงแรก และที่ระยะเวลา 135 วัน ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week การบำบัดที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาการทดลอง



กราฟที่ 4.5 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 7

กราฟที่ 4.6 ที่ pH 9 จากผลของการทดลองในรูปแบบที่ 1 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า orthophosphate เริ่มต้น ที่ 18.36 mg/L ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นพบว่า ค่า orthophosphate โดยเฉลี่ยลดลงในทุกคอลัมน์ คอลัมน์ โดยที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $1.03 \pm 0.72$  mg/L คอลัมน์ที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.59 \pm 0.39$  mg/L และที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีค่า orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.31 \pm 0.18$  mg/L และ D12 ไม่มีผลการทดลองเนื่องจากไม่มีน้ำไหลออกจากระบบตลอดการทดลอง จากผลข้างต้นสรุปได้ว่าที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week สามารถลดค่า orthophosphate จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า TP ในน้ำด้วยเช่นกัน



กราฟที่ 4.6 ค่า orthophosphate ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ pH 9

จะเห็นได้ว่า กราฟที่ 4.4 – 4.6 ที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week ในระดับ pH ที่ 5, 7 และ 9 อาจไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ ถึงแม้ว่ากราฟจะมีแนวโน้มโค้งลง เนื่องจากดินอาจไม่มีคุณสมบัติในการดูดซับฟอสฟอรัสแล้ว เช่นเดียวกันกับ ที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 1 cm/week ในทุกระดับ pH ของการทดลอง อาจต้องเพิ่มระยะเวลาไปอีก เพื่อเข้าสู่ภาวะความอิ่มตัวของระบบเช่นเดียวกันกับอัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week

สรุปได้ว่า การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ในน้ำ จากความสัมพันธ์ของกราฟที่ 4.4 - 4.6 สามารถคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ในแต่ละคอลัมน์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า orthophosphate เริ่มต้น ที่ 18.36 mg/L พบว่า ค่า orthophosphate ลดลงในทุกคอลัมน์ โดยเฉพาะที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ที่ 1 cm/week ควบคุม pH 5, 7 และ 9 มีประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate โดยเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 97.65, 98.60 และ 98.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยน้ำรดที่ควบคุม pH 7 ที่อัตราการระบายรทุกทางชลศาสตร์ที่ 1 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ดีที่สุดมากถึง 98.60 เปอร์เซ็นต์ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส เพราะที่

อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week มีปริมาณการรดน้ำที่น้อยกว่า ส่งผลให้น้ำที่รดลงไปมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินในคอลัมน์นานกว่า ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 และ 3 cm/week และที่ระดับน้ำรดที่ pH 7 อยู่ในสถานะที่ในน้ำมีความสมดุลของ ไอออนของ  $H^+$  และ  $OH^-$  ซึ่งเป็นตัวกลางที่ดีในการทำปฏิกิริยากับไอออนของสาร หรือธาตุอื่น ๆ ส่งผลให้ปฏิกิริยาของดิน เกิดกระบวนการการบำบัด orthophosphate ในดิน เช่น การตกตะกอน การกรอง และการดูดซับของดินได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate สูงกว่าที่ระดับ pH 5 และ pH 9 มีผลประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลัมน์	pH น้ำ (ก่อนเริ่มการทดลอง)	ประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate (เปอร์เซ็นต์)
D1	5	89.65
D2	5	97.32
D3	5	97.65
D4	5	NA
D5	7	91.74
D6	7	97.25
D7	7	98.60
D8	7	NA
D9	9	94.40
D10	9	96.80
D11	9	98.30
D12	9	NA

NA = ไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ดิน ของการทดลองรูปแบบที่ 1

ในการเก็บตัวอย่างดินจากโรงงานได้ทำการคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกันหมดก่อนจะบรรจุลงในแต่ละคอลัมน์ โดยใช้วิธีเก็บตามวิธีของ กรมพัฒนาที่ดิน (2547) ดังภาพที่ 2.14 ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินทำทั้งก่อน และหลังการทดลองโดยเก็บตัวอย่างดินคอลัมน์ละ 1 ตัวอย่างรายละเอียดดังนี้

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน (soil texture) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

จากการวิเคราะห์เนื้อดิน โดยใช้ Hydrometer method ในการทดลองรูปแบบที่ 1 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดิน โดยวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคระหว่างดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทราย ก่อนการทดลองพบว่า เนื้อดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) คือ เนื้อดินที่มีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวต่ำ แต่มีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทรายสูง ซึ่งจัดเป็นกลุ่มดินเนื้อหยาบ (coarse-textured soils) เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อดินหลังจากการรดคอลลัมน์ดินด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ลักษณะเนื้อดินหลังการทดลองเป็นแบบดินร่วนปนทราย (sandy loam) เช่นเดิม คือ เนื้อดินหลังการรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคระหว่างดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากเดิม เพราะการรดน้ำผ่านดินที่มีความโปร่งของดินสูง ไม่ได้ทำให้เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายเพิ่มขึ้นหรือลดลงมาก จึงทำให้ลักษณะเนื้อดินในคอลลัมน์เป็นแบบดินร่วนปนทราย (sandy loam) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ เพ็ญญา ทองประไพ (2555) ว่าเมื่อรดด้วยน้ำทิ้งผ่านดินร่วนปนทราย (sandy loam) ลักษณะเนื้อดินจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เนื้อดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลลัมน์	เนื้อดิน (ก่อนเริ่มการทดลอง)	เนื้อดิน (หลังการทดลอง)
D1	ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	ดินร่วนปนทราย
D2		ดินร่วนปนทราย
D3		ดินร่วนปนทราย
D4		ดินร่วนปนทราย
D5		ดินร่วนปนทราย
D6		ดินร่วนปนทราย
D7		ดินร่วนปนทราย
D8		ดินร่วนปนทราย
D9		ดินร่วนปนทราย
D10		ดินร่วนปนทราย
D11		ดินร่วนปนทราย
D12		ดินร่วนปนทราย

#### 4.2.2 วิเคราะห์หาค่าอัตราการซึม (permeability, k) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

โดยใช้ดินจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อนมาทำการทดลองโดยวิเคราะห์ค่าอัตราการซึมทั้งก่อน และหลังการทดลอง มีค่าแสดงดังตาราง ที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึมที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลัมน์	อัตราการซึม(cm/s) (ก่อนเริ่มการทดลอง)	อัตราการซึม(cm/s) (หลังการทดลอง)
D1	$3.76 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-7}$
D2		$3.74 \times 10^{-7}$
D3		$3.20 \times 10^{-7}$
D4		$3.52 \times 10^{-7}$
D5		$3.93 \times 10^{-7}$
D6		$3.53 \times 10^{-7}$
D7		$4.62 \times 10^{-7}$
D8		$3.46 \times 10^{-7}$
D9		$6.59 \times 10^{-7}$
D10		$4.24 \times 10^{-7}$
D11		$5.43 \times 10^{-7}$
D12		$5.10 \times 10^{-7}$
ค่าเฉลี่ย±SD		$4.92 \times 10^{-7} \pm 1.26 \times 10^{-7}$

จากตารางที่ 4.6 พบว่าดินมีค่าอัตราการซึม (k) หลังทดลองเฉลี่ย คือ  $4.92 \times 10^{-7}$  cm/s ซึ่งมีค่าอัตราการซึมผ่านน้อยเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 2.12 พบว่าดินทั้งหมดที่ใช้ทดลองเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว แสดงให้เห็นว่าหลังการทดลองที่รดน้ำผ่านคอลัมน์ทุกวัน ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำไหลยากขึ้น ดินมีความหนาแน่นมากขึ้น และเกาะตัวแน่นมากขึ้น และจากค่าอัตราการซึม (k) เมื่อวิเคราะห์ชนิดของดิน พบว่าดินเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว ซึ่งเป็นดินคนละชนิดกับการวิเคราะห์ชนิดเนื้อดินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) เป็นเกณฑ์ คือผลที่ได้เป็นดินชนิดดินร่วนปนทราย จากการวิเคราะห์ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการเก็บดิน การถูกระหว่างขนย้าย ทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวน

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินทั้งก่อน และหลัง ชุดทดลองรูปแบบที่ 1

การวิเคราะห์ค่า pH ของดินก่อน และหลังการทดลอง พบว่าเมื่อนำดินที่ผ่านการรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้พัล่วชุดลงในคอลัมน์เพื่อนำดินออกมาทำการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน ซึ่งในการเก็บจะเก็บดินจากผิวดินจนตลอดความลึกของคอลัมน์ และคลุกเคล้าทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนนำไปวิเคราะห์ แสดงผลค่า pH ของดินดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

คอลัมน์	pH ดิน (ก่อนเริ่มการทดลอง)	pH ของน้ำเสียสังเคราะห์	pH ดิน (หลังการทดลอง)
D1	5.64	5	6.43
D2			6.32
D3			6.32
D4			5.84
D5		7	6.63
D6			6.27
D7			6.27
D8			5.72
D9		9	6.81
D10			6.47
D11			6.09
D12			5.82
ค่าเฉลี่ย±SD			6.25±0.33

หมายเหตุ : ในการวิเคราะห์ค่า pH ของดิน คือ อัตราน้ำ : ดิน เท่ากับ 1 : 1

จากตารางที่ 4.7 เป็นการรดโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับค่า pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 ในการรด พบว่าค่า pH ของดินก่อนการทดลองเท่ากับ 5.64 และหลังการทดลอง มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งดินยังคงสภาพความเป็นกรดตามเกณฑ์การความหมายค่า pH ของดิน ดังตารางที่ 2.6 ดินกรด คือ ดินที่สามารถปลดปล่อย  $H^+$  ออกมาได้เมื่อนำมาละลายน้ำ ทั้งนี้จากการทดลองที่ดินยังคงสภาพความเป็นกรดได้ เนื่องจากเมื่อ  $H^+$  ที่ละลายอยู่ในสารละลายดินนั้นถูกทำให้หมดไป (neutralized) ส่วนที่ถูกยึดไว้ที่อนุภาคดิน จะถูกปล่อยมาแทนที่ ส่งผลให้ความเป็นกรดในดินเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินที่เรียกว่า ความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (Buffer Capacity of Soil) pH ของดินที่ได้หลังการทดลองทั้งหมดจึงยังคงค่าความเป็นกรดไว้นั่นเอง

ทั้งนี้ในส่วนของการทดลองที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 0.5 cm/week (คอลัมน์ D4, D8 และ D12) ผลจากการศึกษาตลอดการทดลอง พบว่าไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์การทดลองดังกล่าว เมื่อนำดินจากคอลัมน์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ค่า pH ของดิน มีค่าเท่ากับ 5.84, 5.72 และ 5.82 ตามลำดับ ซึ่งยังคงสภาพเป็นกรด มีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ของดินเริ่มต้นการทดลอง

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate และ TP ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

ทำการวิเคราะห์ทั้งก่อน และหลังการทดลองจากดินทุกคอลัมน์ ตามขั้นตอนของ Kuo (1996) แสดงดังตารางที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ของดินก่อน และหลังที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

ประเภทดิน	พารามิเตอร์				
	Fe-Phosphate (mg/kg)	Al-Phosphate (mg/kg)	Ca-Phosphate (mg/kg)	(Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) (mg/kg)	TP (mg/kg)
ดินก่อนทดลองที่ 1	181.90	53.62	63.82	299.34	273.60
D1	176.45	114.80	36.20	327.45	214.00
D2	197.00	142.80	49.30	389.10	257.10
D3	89.60	99.70	36.80	226.10	246.60
D4	155.90	102.10	38.90	296.90	264.70
D5	175.80	103.10	33.60	312.50	249.90
D6	177.00	125.30	56.00	358.30	286.20
D7	158.90	109.90	60.00	328.80	242.76
D8	141.10	117.70	51.10	309.90	264.45
D9	192.60	122.40	73.00	388.00	202.73
D10	113.10	112.60	39.40	265.10	251.20
D11	120.70	104.10	43.10	267.90	221.10
D12	125.50	93.00	27.20	245.70	217.25

จากผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ดังตารางที่ 4.8 ของการทดลองรูปแบบที่ 1 พบว่า pH ของดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.25 ดังแสดงในตารางที่ 4.7 แสดงว่าดินมีความเป็นกรดปานกลาง เทียบกับตารางที่ 2.6 การแปลความหมายค่า pH ของดิน ทำให้มีค่าของ Fe-Phosphate และ Al-Phosphate มีค่าสูงกว่า Ca-Phosphate ซึ่งตรงกับที่ Chang and Jackson (1957) ได้กล่าวหาว่าปริมาณของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาดิน (pH) เป็นสำคัญ ซึ่งในดินกรดมักพบในรูป Fe-P และ Al-P ส่วนในดินที่เป็นกลางและด่างมักพบในรูป Ca-P



ในส่วนของคุณค่าฟอสฟอรัส (TP) ในดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในดิน พบว่าไม่มี ความแตกต่างจากค่า TP ในดินเริ่มต้น โดย TP ในดินมีแนวโน้มลดลงทุกคอลัมน์ โดยที่คอลัมน์ D6 ที่ อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 2 cm/week ที่ระดับ pH 7 มีค่า TP สูงขึ้นจาก 273.60 mg/kg เป็น 286.20 mg/kg ซึ่งเป็นค่าที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย พบว่าเมื่อเทียบกับระดับการประเมินค่า TP ใน ดินทั้งก่อน และหลังการทดลอง ระดับค่า TP อยู่ในระดับที่สูงมาก ดังตารางที่ 2.9 เช่นเดียวกันกับผล การทดลองจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์

#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินก่อนและ หลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

นอกจากการวิเคราะห์ค่า TP ในดินแล้ว ในการทดลองนี้ได้วิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่ เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ด้วย เพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณ TP ที่พืชเอาไป ใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินก่อน และ หลังที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 1

ประเภทดิน	Available P (mg/kg)
ดินก่อนทดลองที่ 1	188.20
D1	50.60
D2	60.30
D3	47.20
D4	40.40
D5	38.55
D6	40.93
D7	41.80
D8	48.75
D9	49.61
D10	56.55
D11	38.05
D12	40.40

จากตารางที่ 4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ตั้งแต่ D1-D12 มีค่าลดลงมาจากค่าเริ่มต้น 188.20 mg/kg เหลืออยู่ในช่วง 38.05-56.55 mg/kg และจาก ผลการทดลองคอลัมน์ที่ D5-D6 ซึ่งมีการปรับ pH ของน้ำเข้า เท่ากับ 7 นั้น ค่าฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ในดินที่ออกมามีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่รดน้ำ และ คอลัมน์ที่ D4 ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่น้ำไม่ไหลออกจากคอลัมน์เลย มีค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน สูงสุดที่ 48.75 mg/kg ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินในทุกคอลัมน์มีค่าลดลง เนื่องจาก ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ถูกตรึงหรือเปลี่ยนเป็นสารประกอบได้ง่ายทำให้ละลายน้ำได้ยาก อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่าดินจากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบ มีปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดินมีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกระดับสูง ที่มีค่ามากกว่า 25 mg/kg ซึ่งเพียงพอกับความต้องการ ของพืช

หลังเสร็จสิ้นการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับ pH แตกต่างกัน 3 ค่า คือ ที่ pH 5, 7 และ 9 รดด้วยอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2 และ 1 cm/week จากผล การวิเคราะห์น้ำเข้า และออกจากคอลัมน์การทดลอง ค่า pH ของน้ำทิ้งที่ออกจากคอลัมน์ทดลองใน ช่วงแรกยังมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อดำเนินการทดลองไปตลอดการทดลอง จะพบว่าค่า pH ของน้ำทิ้งที่ ออกจากระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นเข้าใกล้ค่า ค่า pH ของน้ำเข้าระบบต่างกัน ที่อัตราการระบรทุกทาง ชลศาสตร์ 1 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุด และค่า orthophosphate ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week ที่ระบบ pH น้ำเข้า เท่ากับ 7 เกิดการบำบัด orthophosphate สูงสุด และเมื่อมาศึกษาผลการวิเคราะห์ของดิน เมื่อพิจารณาการรดน้ำที่อัตรา การระบรทุกทางชลศาสตร์ต่างกันไม่ทำให้ลักษณะเนื้อดินเปลี่ยน เนื้อดินทั้งก่อน และหลังการทดลอง ยังเป็นแบบดินร่วนปนทราย (sandy loam) และยังพบว่าดินหลังทดลองมีค่าอัตราการซึมผ่าน (k) น้อยเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน ในการวิเคราะห์ค่า pH ของดิน ค่า pH ของดินเริ่มต้นการทดลองมีค่า ใกล้เคียงกับค่า pH ของดินหลังการทดลอง ซึ่งยังคงสภาพเป็นกรด ถึงแม้ว่าจะมีการรดน้ำที่ต่าง pH กันก็ตาม ส่งผลให้ค่าของ Fe-Phosphate และ Al-Phosphate มีค่าสูงกว่า Ca-Phosphate ในทุก คอลัมน์การทดลอง และในส่วนของค่าฟอสฟอรัส (TP) ในดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ต่าง pH กัน นั้น พบว่าไม่มีความแตกต่างจากค่า TP ในดินเริ่มต้น โดย TP ในดินมีแนวโน้มลดลงทุกคอลัมน์ รวมถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าลดลงมาจากค่าเริ่มต้นเช่นกัน จากผลข้างต้น เป็น ผลให้กำหนดแนวทางในการออกแบบการทดลองรูปแบบที่ 2 ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week และ pH ของน้ำที่รดเท่ากับ 7 แต่เนื่องจากเมื่อ เริ่มดำเนินการทดลองรูปแบบที่ 2 ผ่านไป 45 วัน ไม่สามารถเก็บผลมาวิเคราะห์ได้ จึงเพิ่มอัตราการ ระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสใกล้เคียงกัน และ pH ของ น้ำที่รดเท่ากับ 7 ยังคงเดิม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสที่มาจากน้ำทิ้งจริงจาก โรงงาน เพราะในน้ำทิ้งจริงจากโรงงานยังมีค่าพารามิเตอร์อื่นที่เป็นองค์ประกอบในน้ำนอกจากค่า ฟอสฟอรัส และในส่วนของชุดการทดลองชุดควบคุมเพื่อศึกษาถึงกระบวนการการบำบัดของดิน โดยที่ ไม่มีการเติมฟอสฟอรัสเข้าไปในระบบ

### 4.3 ผลการวิเคราะห์น้ำ ของการทดลองรูปแบบที่ 2

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 2

ทำการวัดค่า pH ของน้ำทุกครั้งหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ทดลอง ทุกๆ 15 วัน โดยใช้เครื่อง pH-meter วัดค่าจากขวดเก็บตัวอย่าง โดยก่อนวัดได้ทำการเขย่าขวด เพื่อให้ตัวอย่างน้ำมี pH เดียวกันทั้งขวด รายละเอียดดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ค่า pH ของน้ำที่เข้า - ออกจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

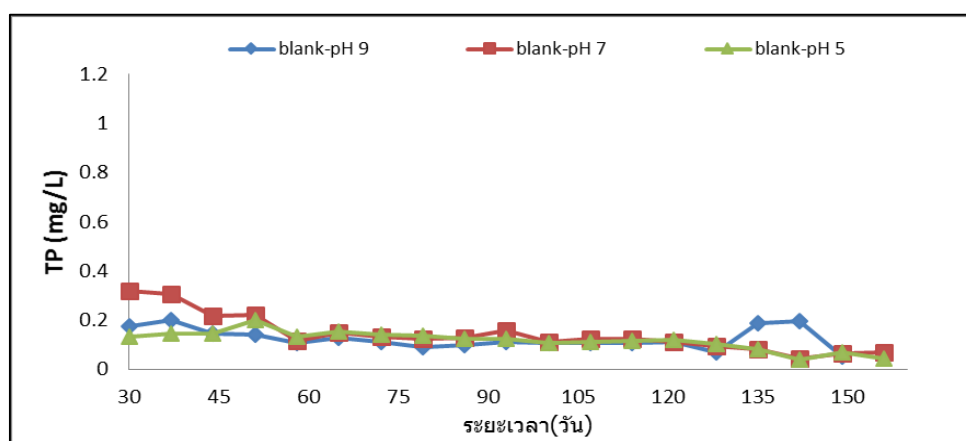
คอลัมน์	Hydraulic loading (cm/week)	pH น้ำ (ก่อนเริ่มการทดลอง)	pH น้ำเฉลี่ย±SD (หลังการทดลอง)
C1	2.0	9	8.55±0.24
C2	2.0	7	8.23±0.27
C3	2.0	5	8.36±0.25
C4	2.0	7	7.12±2.15

หลังจากควบคุม pH ของน้ำกลั่น (C1-C3) และคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ปรับ pH เท่ากับ 7 ดังแสดงดังตารางที่ 4.10 แล้ว ปรากฏว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองแล้ว pH ของน้ำที่ออกเฉลี่ยตลอดชุดการทดลอง มีค่าโดยรวมเป็นต่าง จากการทำการทดลองเมื่อรดน้ำผ่านคอลัมน์ทดลอง แม้ในคอลัมน์ C3 ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ pH 5 ก็ตามค่า pH ของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ทดลองยังมีค่า pH โดยรวมยังเป็นต่าง แต่จะมีคอลัมน์ C4 ที่หลัง 120 วัน ค่า pH ของน้ำออกจากคอลัมน์ มีความเป็นกรดสูงขึ้นตลอดการทดลอง ดังแสดงภาคผนวก ค ภาพที่ ค-4 และคอลัมน์ C1-C3 เมื่อดำเนินการทดลองไปตลอดการทดลอง จะพบว่าค่า pH ของน้ำที่ออกจากระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากค่า pH ของดินก่อนการทดลองมีค่า pH เท่ากับ 5.62 มีความเป็นกรดปานกลาง (pH 5.0-6.0) (อภิตี อิมเอิบ 2534 และคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา 2548) ซึ่งในดินมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) อยู่ เมื่อทำการรดน้ำที่ผ่านคอลัมน์ดิน น้ำที่รดเป็นตัวเร่งให้มีการแตกตัว และแลกเปลี่ยนประจุได้ดี  $OH^-$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกันระหว่างไอออนในน้ำและดิน ดินที่มีการเก็บประจุ  $OH^-$  ไว้มากได้สูญเสียสภาพ หรือแตกตัวออกจากดิน ส่งผลให้ pH ในน้ำสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำออกจากคอลัมน์มีค่า pH เป็นกลาง-ต่าง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำหลังการทดลอง กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าค่า pH ของน้ำหลังการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง pH เท่ากับ 5.52-8.55 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งค่า pH มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม คืออยู่ในช่วง pH เท่ากับ 5.5-9.0 (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

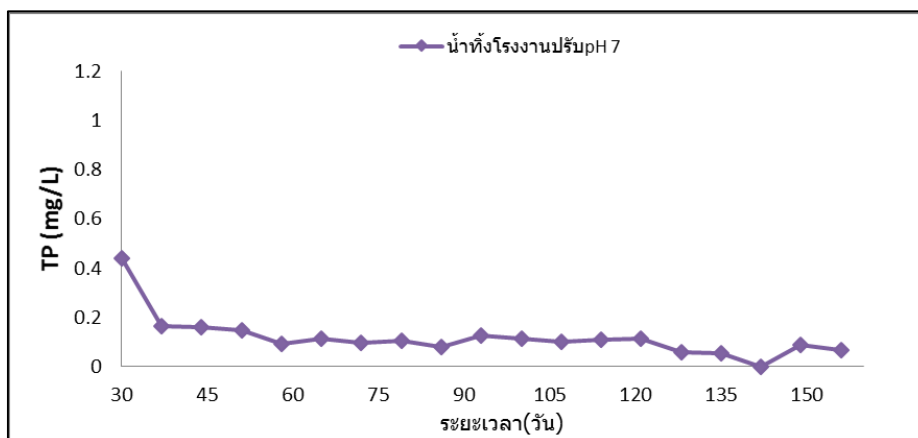
#### 4.3.2 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของน้ำออกจากคอลัมน์ ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

การทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำ โดยใช้ค่า pH เป็นเกณฑ์ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ใช้น้ำกลั่นที่มีค่า pH 3 ค่า คือ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 ในการทดลองรูปแบบที่ 2 นี้จะทำการทดลองโดยใช้น้ำที่จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้รด โดยเลือกพิจารณาจากคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัด TP ที่ดีที่สุด จากผลการทดลองศึกษาค่า TP จากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 1 แสดงดังกราฟที่ 4.7 และ 4.8



กราฟที่ 4.7 ค่า TP ของชุดควบคุมที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2

จากกราฟที่ 4.7 ได้ทำการทดลองของชุดทดลองควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 พบว่าผลการทดลองค่า TP ที่ออกจากคอลัมน์ชุดการทดลองควบคุมมีค่าเฉลี่ย TP เท่ากับ 0.14, 0.14 และ 0.12 mg/L ตามลำดับ ซึ่งค่า TP ที่วิเคราะห์ได้เกิดจากการชะของน้ำกลั่นที่รด และพบว่าปัจจัยควบคุมคือค่า pH สำหรับชุดการทดลองควบคุม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TP ดังนั้นจากค่าประสิทธิภาพการบำบัด TP ในน้ำที่ดีที่สุดข้างต้น ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week ค่า pH เท่ากับ 7 จึงนำมาใช้ทดลองต่อในการทดลองรูปแบบที่ 2 คือการนำน้ำที่จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้รดจริง พบพบว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week น้ำไม่ไหลออกมาจากคอลัมน์การทดลอง จึงพิจารณาเปลี่ยนอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์จากเดิมที่ 1 cm/week เป็น 2 cm/week ในการทดลองเพื่อให้สามารถดำเนินการทดลองต่อได้ คอลัมน์ที่เดินระบบด้วยน้ำที่จริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีค่า TP เริ่มต้นเท่ากับ 1.33 mg/L พบว่าระบบสามารถลด TP ลงเหลือเฉลี่ย  $0.12 \pm 0.08$  mg/L ดังกราฟที่ 4.8

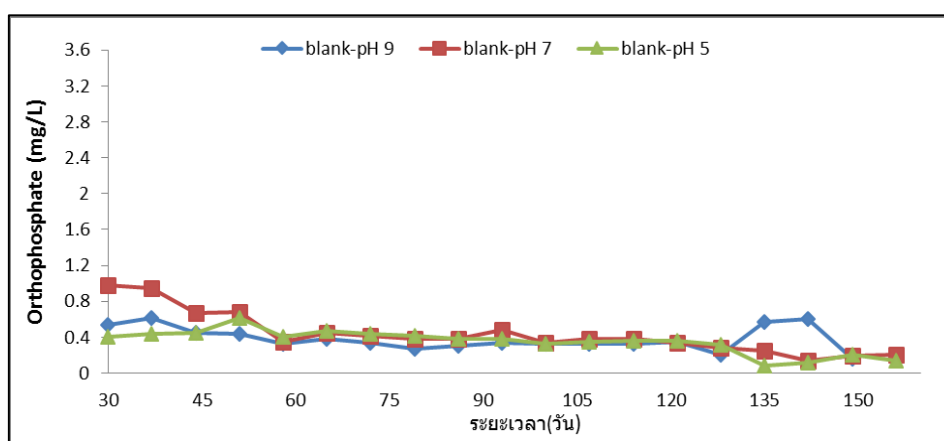


กราฟที่ 4.8 ค่า TP ของน้ำทิ้งที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2

เมื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่า TP เริ่มต้นเท่ากับ 1.33 mg/L พบว่าระบบสามารถลด TP เหลือเฉลี่ย  $0.12 \pm 0.08$  mg/L ระบบบำบัดโดยดินสามารถบำบัด TP ได้โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 91.13 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินจะดูดซับฟอสฟอรัสไว้ในระบบ และสอดคล้องกับการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ระดับ pH 7 ระบบบำบัดโดยดินมีประสิทธิภาพการบำบัด TP มากสุดถึง 98.61 เปอร์เซ็นต์

#### 4.3.3 ค่า Orthophosphate ของน้ำออกจากคอลัมน์ชุดทดลองรูปแบบที่ 2

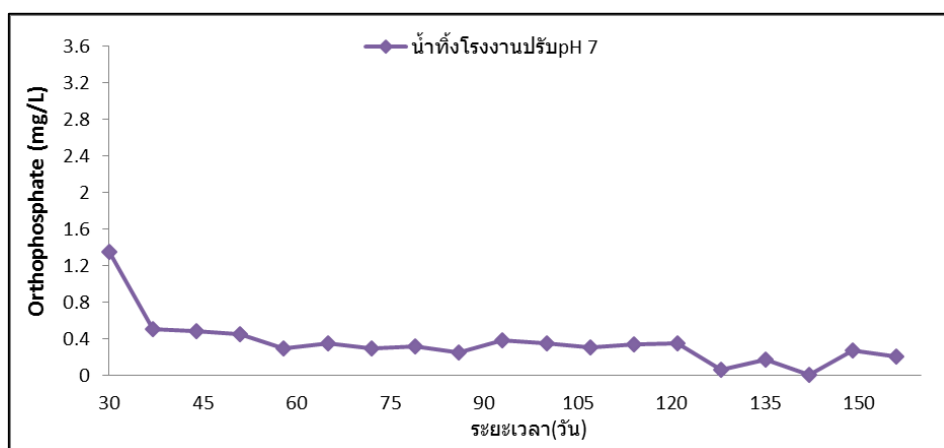
ในการทดลองรูปแบบที่ 2 ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ ควบคุม pH 7 มีค่า orthophosphate 4.07 mg/L เป็นการเก็บน้ำในรอบที่ 2 และคอลัมน์อีก 3 คอลัมน์ทำการทดลองเป็นชุดทดลองควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 ในการรด



กราฟที่ 4.9 ค่า orthophosphate ของชุดควบคุมที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2

จากกราฟที่ 4.9 ทำการทดลองของชุดควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 ในการรด พบว่าผลจากการทดลองค่า orthophosphate ที่ออกจากคอลัมน์ชุดการทดลอง

ควบคุมมีค่าเฉลี่ย orthophosphate เท่ากับ 0.35, 0.43 และ 0.42 mg/L ตามลำดับ ซึ่งค่า orthophosphate ที่วิเคราะห์ได้เกิดจากการชะของน้ำกลั่นที่รด และพบว่าปัจจัยควบคุมคือค่า pH สำหรับชุดการทดลองควบคุม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า orthophosphate ดังนั้นจากค่าประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate ในน้ำที่ตีที่สุดข้างต้น ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week ค่า pH เท่ากับ 7 จึงนำมาใช้ทดลองต่อในการทดลองรูปแบบที่ 2 คือการนำน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้รดจริง ผลพบว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week น้ำไม่ไหลออกมาจากคอลัมน์การทดลอง จึงพิจารณาเปลี่ยนอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์จากเดิมที่ 1 cm/week เป็น 2 cm/week ในการทดลอง เพื่อให้สามารถดำเนินการทดลองต่อได้ คอลัมน์ที่เดินระบบด้วยน้ำทิ้งจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีค่า orthophosphate เริ่มต้นเท่ากับ 4.07 mg/L พบว่าระบบสามารถลด orthophosphate ลงเหลือเฉลี่ย  $0.36 \pm 0.28$  mg/L ดังกราฟที่ 4.10



กราฟที่ 4.10 ค่า orthophosphate ของน้ำทิ้งที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2

เมื่อนำน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใน จ.กระบี่ ที่มีค่า orthophosphate เริ่มต้นเท่ากับ 4.07 mg/L พบว่าระบบสามารถลด orthophosphate เหลือเฉลี่ย  $0.36 \pm 0.28$  mg/L ระบบบำบัดโดยดินสามารถบำบัด orthophosphate ได้โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate เท่ากับ 91.28 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก orthophosphate ของน้ำถูกยึดอยู่กับอนุภาคดิน จึงส่งผลให้น้ำรดที่ไหลออกจากคอลัมน์มีค่า orthophosphate ลดลง และจากการทดลองยังสามารถสรุปได้ว่าที่ pH แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อการลดลงของ ค่า orthophosphate จากผลการทดลองในรูปแบบที่ 2 ยังสอดคล้องกับการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่ระดับ pH 7 ระบบบำบัดโดยดินมีประสิทธิภาพการบำบัด orthophosphate มากสุดถึง 98.60 เปอร์เซ็นต์

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ดิน ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

เช่นเดียวกันกับการทดลองในรูปแบบที่ 1 การเก็บตัวอย่างดินจากโรงงานได้ทำการคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกันหมดก่อนจะบรรจุลงในแต่ละคอลัมน์ ดังแสดงในภาคผนวก ก. โดยใช้วิธีเก็บตามวิธีของ กรมพัฒนาที่ดิน (2547) แสดงดังภาพที่ 2.14 ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินทำทั้ง

ก่อน และหลังการทดลองโดยเก็บตัวอย่างดินคอลัมน์ละ 1 ตัวอย่าง รายละเอียดผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้

#### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน (soil texture) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

ในการทดลองรูปแบบที่ 2 ใช้น้ำที่จากรองงานสกัดน้ำมันปาล์มในการรด จากการวิเคราะห์เนื้อดิน โดยใช้ Hydrometer method ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดิน โดยวิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคระหว่างดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทราย ก่อนการทดลองพบว่าเนื้อดินมีลักษณะเป็น ดินร่วนปนทราย (sandy loam) คือ เนื้อดินที่มีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียวต่ำกว่าอนุภาคดินทรายแป้ง และอนุภาคดินทราย และเมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อดินหลังจากการรดคอลัมน์ดินด้วยน้ำกลั่นของชุดควบคุม และน้ำที่จากรองงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่า ลักษณะเนื้อดินหลังการทดลองเป็นแบบดินร่วนปนทราย (sandy loam) เช่นเดิม คือ เนื้อดินหลังการรด มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคระหว่างดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากเดิม เพราะการรดน้ำผ่านดินที่มีความโปร่งของดินสูง ไม่ได้ทำให้เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายเพิ่มขึ้นหรือลดลงมาก จึงทำให้ลักษณะเนื้อดินในคอลัมน์เป็นแบบดินร่วนปนทราย (sandy loam) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ เพ็ญนภา ทองประไพ (2555) ว่า ดินร่วนปนทราย (sandy loam) เมื่อรดด้วยน้ำที่ ลักษณะเนื้อดินจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

**ตารางที่ 4.11** ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน ที่รดด้วยน้ำที่จากรองงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

คอลัมน์	เนื้อดิน (ก่อนเริ่มการทดลอง)	เนื้อดิน (หลังการทดลอง)
C1	ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	ดินร่วนปนทราย
C2		ดินร่วนปนทราย
C3		ดินร่วนปนทราย
C4		ดินร่วนปนทราย

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราการซึม (permeability, k) ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

ในการเลือกใช้ดิน จะเลือกดินจากรองงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่เคยผ่านการรดน้ำที่มาก่อนมาทำการทดลองโดยวิเคราะห์ค่าอัตราการซึมทั้งก่อน และหลังการทดลอง มีค่าแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึม ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

คอลัมน์	อัตราการซึม(cm/s) (ก่อนเริ่มทดลอง)	อัตราการซึม(cm/s) (หลังทดลอง)
C1	$4.55 \times 10^{-7}$	$6.57 \times 10^{-7}$
C2		$6.06 \times 10^{-7}$
C3		$6.49 \times 10^{-7}$
C4		$6.24 \times 10^{-7}$
ค่าเฉลี่ย±SD		$6.34 \times 10^{-7} \pm 2.36 \times 10^{-8}$

จากตารางที่ 4.12 ค่าอัตราการซึมของดินหลังจากทดลองที่ C2 และ C4 ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 7 และ น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ปรับ pH เท่ากับ 7 มีค่าอัตราการซึมผ่านที่มากกว่าคอลัมน์ C1 และ C3 ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 9 และ 5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าอัตราการซึมของดินทั้ง 4 คอลัมน์ หลังการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยอัตราการซึมของทั้ง 4 คอลัมน์ที่ได้คือ  $6.34 \times 10^{-7}$  cm/s ซึ่งเป็นค่าอัตราการซึมผ่านน้อยเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน ที่มีค่าเท่ากับ  $10^{-6}$ - $10^{-9}$  cm/s ดังตารางที่ 2.12 พบว่าดินทั้งหมดเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งและดินเหนียว แสดงว่าดินมีความหนาแน่นมาก มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อย ทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก

และเมื่อพิจารณาชุดทดลองทั้ง 2 รูปแบบการทดลอง ซึ่งมีค่าอัตราการซึมไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้อัตราการซึมของดินทั้ง 2 การทดลอง มีค่าเฉลี่ยรวม คือ  $5.28 \times 10^{-7}$  cm/s เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการซึม ดังแสดงในตารางที่ 2.11 พบว่า มีค่าการซึมที่ช้ามาก และเมื่อเทียบค่าอัตราการซึมผ่าน ดังแสดงในตารางที่ 2.12 พบว่า ดินทั้งหมดเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง และดินเหนียว แสดงว่าดินมีความหนาแน่นมาก มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อย ทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งค่าอัตราซึมก่อน และหลังการทดลองอยู่ในช่วงเดียวกันไม่เกิดความแตกต่างกัน แสดงว่าค่าอัตราการซึมดินมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้ในช่วงหลังของการทดลองน้ำมีการซึมผ่านลงคอลัมน์ได้ช้า

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินทั้งก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

การวิเคราะห์ค่า pH ของดินก่อน และหลังการทดลอง พบว่าเมื่อนำดินที่ผ่านการรดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยหลังเสร็จสิ้นการทดลองใช้พลังดูดลงในคอลัมน์แต่ละคอลัมน์เพื่อนำดินออกมาทำการวิเคราะห์หาค่า pH ของดิน ซึ่งในการเก็บจะเก็บดินจากผิวดินจนตลอดความลึกของคอลัมน์ และคลุกเคล้าทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนนำไปวิเคราะห์ แสดงผลค่า pH ของดินดังตารางที่ 4.13



**ตารางที่ 4.13** ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดิน ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

คอลัมน์	pH ดิน (ก่อนเริ่มการทดลอง)	pH ดิน (หลังการทดลอง)
C1	5.61	5.21
C2		5.27
C3		5.10
C4		5.47
ค่าเฉลี่ย±SD		5.26±0.16

ในตารางที่ 4.13 ผลทดลองของการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับ pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 และใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ปรับ pH 7 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 1 cm/week น้ำไม่ไหลออกมาจากคอลัมน์ในชุดการทดลองที่ 2 จึงเลือกใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 2 cm/week รดในแต่ละคอลัมน์ ค่า pH ของดิน เริ่มต้นเท่ากับ 5.61 หลังการทดลองค่า pH ของดินที่ C1, C2, C3 และ C4 มีค่า pH เท่ากับ 5.21, 5.27, 5.10 และ 5.47 ตามลำดับ ซึ่งค่า pH ของดินไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละคอลัมน์ รวมถึง pH ของดินทั้งก่อน และ หลังการทดลอง โดย pH ของดินหลังทดลอง เฉลี่ยเท่ากับ 5.26 แสดงว่าน้ำรดที่ระดับ pH ต่างกัน ไม่ได้ทำให้คุณภาพของดินในด้านของ pH ของดินเปลี่ยนแปลง ซึ่งดินยังคงสภาพความเป็นกรดตามเกณฑ์การความหมายค่า pH ของดิน ดังตารางที่ 2.6 ดินกรด คือ ดินที่สามารถปลดปล่อย  $H^+$  ออกมาได้เมื่อถูกนำมาละลายน้ำ ทั้งนี้จากการทดลองที่ดินยังคงสภาพความเป็นกรดได้ เนื่องจากเมื่อ  $H^+$  ที่ละลายอยู่ในสารละลายดินนั้นถูกทำให้หมดไป (neutralized) ส่วนที่ถูกยึดไว้ที่อนุภาคดิน จะถูกปลดปล่อยมาแทนที่ ส่งผลให้ความเป็นกรดในดินเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินที่เรียกว่า ความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (Buffer Capacity of Soil) pH ของดินที่ได้หลังการทดลองทั้งหมดจึงยังคงค่าความเป็นกรดไว้นั่นเอง จึงสรุปได้ว่า ผลการทดลองรูปแบบที่ 1 และ 2 มีค่า pH ของดินเป็นกรดไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองค่า pH ของดินข้างต้น ตามหลักเกณฑ์ของ Tchobanoglous and Burton (1991) แล้วถือได้ว่า pH ของดินอยู่ในช่วง pH 5.5-8.4 เป็นค่า pH ของดินที่ยอมรับได้ของเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการเลือกพื้นที่เพาะปลูกในการบำบัดโดยดินแบบอัตราไหลช้า

#### 4.4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate และ TP ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

ทำการวิเคราะห์ทั้งก่อน และหลังการทดลองจากดินทุกคอลัมน์ ตามขั้นตอนของ Kuo (1996) แสดงดังตารางที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP

**ตารางที่ 4.14** ผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ของดินก่อน และหลังที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

ประเภทดิน	พารามิเตอร์				
	Fe-Phosphate (mg/kg)	Al-Phosphate (mg/kg)	Ca-Phosphate (mg/kg)	(Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) (mg/kg)	TP (mg/kg)
ดินก่อนทดลองที่ 2	87.80	37.40	26.70	151.90	124.00
C1	91.15	38.50	19.13	148.78	142.50
C2	91.40	40.40	22.60	154.40	116.50
C3	79.70	28.50	19.20	127.40	151.20
C4	82.20	29.10	20.20	131.50	139.10

จากผลการวิเคราะห์ค่า Fe-Phosphate, Al-Phosphate, Ca-Phosphate, (Fe-P)+(Al-P)+(Ca-P) และ TP ดังตารางที่ 4.14 ของการทดลองรูปแบบที่ 2 พบว่า pH ของดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.26 แสดงว่าดินมีความเป็นกรดปานกลาง เทียบกับตารางที่ 2.6 การแปลความหมายค่า pH ของดิน ทำให้มีค่าของ Fe-Phosphate และ Al-Phosphate มีค่าสูงกว่า Ca-Phosphate ซึ่งตรงกับที่ สิริขวัญ ภูงา (2551) ได้กล่าวว่าปริมาณของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาดิน (pH) เป็นสำคัญ ซึ่งในดินกรดมักพบในรูป Fe-P และ Al-P ส่วนในดินที่เป็นกลางและด่างมักพบในรูป Ca-P สำหรับค่าของฟอสฟอรัส (TP) ในดิน ที่รดด้วยน้ำกลั่นของชุดควบคุม ที่คอลัมน์ C1 และ C3 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 124.00 mg/kg เป็น 142.50 และ 151.20 mg/kg ตามลำดับ รวมถึงคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 124.00 mg/kg เป็น 139.10 mg/kg แสดงว่าการรดน้ำที่ไม่มี TP ที่คอลัมน์ C1, C3 และคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (C4) ส่งผลต่อการเพิ่มค่า TP ในดิน พบว่าเมื่อเทียบกับระดับการประเมินค่า TP ในดินทั้งก่อน และหลังการทดลอง ระดับค่า TP อยู่ในระดับที่สูงมาก ดังตารางที่ 2.9 เช่นเดียวกับกับผลการทดลองจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ สรุปได้ว่า ระดับค่า TP ในดิน มีค่าไม่แตกต่างกันทั้งก่อนและหลังทดลอง

#### 4.4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินก่อนและหลัง ของชุดทดลองรูปแบบที่ 2

นอกจากการวิเคราะห์ค่า TP ในดินแล้ว ในการทดลองนี้ได้วิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ด้วย เพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณ TP ที่พืชเอาไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.15 ของการทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมัน

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ของการทดลองรูปแบบที่ 2 โดยใช้อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

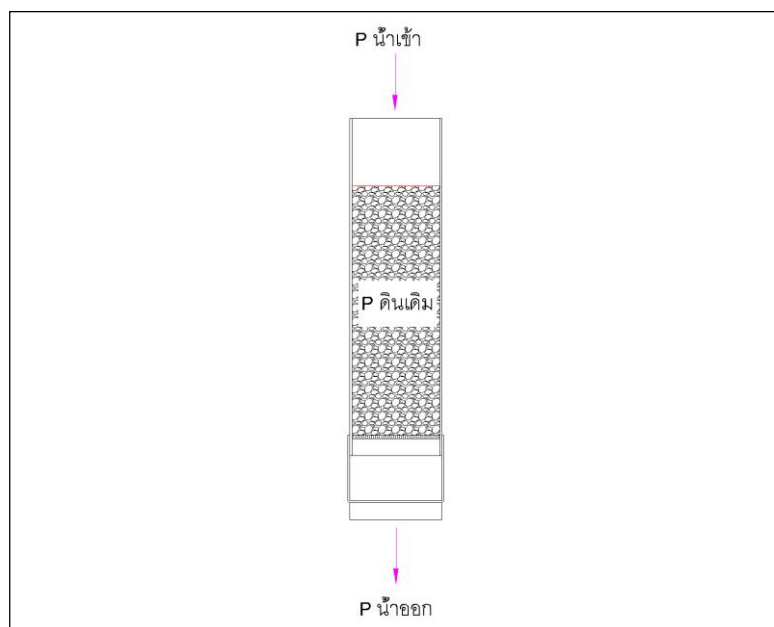
ประเภทดิน	Available P (mg/kg)
ดินก่อนทดลองที่ 2	30.60
C1	28.60
C2	26.70
C3	28.30
C4	34.00

จากตารางที่ 4.15 สำหรับค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) ของดินที่ใช้น้ำทิ้งจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มรด พบว่าที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, ปรับ pH เท่ากับ 7 มีค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น 30.60 mg/kg เป็น 34.00 mg/kg สอดคล้องกับการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) และ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ซึ่งพบว่าค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด เพราะเมื่อมีการรดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีค่าฟอสฟอรัสลงไป ทำให้ไปเพิ่มค่าฟอสฟอรัสที่ไม่ได้รวมตัวเป็นการประกอบอื่น เช่น Fe-P, Al-P และ Ca-P เป็นการเพิ่มค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

จากความสัมพันธ์ของค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินทั้งในดินที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อเทียบกับระดับของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (Available P) ดังตารางที่ 2.10 ของ กองสำรวจที่ดิน (2523) สรุปได้ว่าดินจากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบมีปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกระดับสูง ที่มีค่ามากกว่า 25 mg/kg ซึ่งเพียงพอกับความต้องการของพืช

#### 4.5 สมดุลฟอสฟอรัสในระบบ

โดยการศึกษา และเปรียบเทียบค่าฟอสฟอรัสในน้ำเข้า และออกจากระบบ ค่าฟอสฟอรัสในดินเดิม(ก่อนทดลอง) และค่าฟอสฟอรัสในดินหลังการทดลอง ของการทดลองทั้ง 2 รูปแบบ โดยพิจารณาจากค่า TP น้ำเข้าระบบ, TP น้ำออกระบบ, TP น้ำที่หายไป, TP สะสมในดิน, TP ในดินหลังทดลอง และ TP ในดินเดิม แสดงรูปแบบการพิจารณาสมดุลฟอสฟอรัสในระบบ ดังภาพที่ 4.1 และ ผลการทดลองแสดงค่า TP ทั้งหมดในน้ำ แสดงดังตารางที่ 4.16 และ ค่า TP ทั้งหมดในดินหลังจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.17



ภาพที่ 4.1 สมดุลฟอสฟอรัสในระบบ

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบสมดุล TP ในน้ำทั้งหมด โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

ประเภทดิน	พารามิเตอร์		
	TPน้ำเข้าระบบ (mg.P/L)	TPน้ำออกระบบ (mg.P/L)	TPน้ำที่หายไป (mg.P/L)
D1	6	0.62	5.38
D2	6	0.16	5.84
D3	6	0.14	5.86
D4	6	NA	NA
D5	6	0.50	5.5
D6	6	0.17	5.83
D7	6	0.08	5.92
D8	6	NA	NA
D9	6	0.34	5.66
D10	6	0.19	5.81
D11	6	0.10	5.9
D12	6	NA	NA
C4	1.33	0.12	1.21

NA = ไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์

จากตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบสมมูล TP ทั้งหมดในน้ำ พบค่า TP ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อรดน้ำผ่านคอลัมน์ทดลองทำให้น้ำที่ผ่านคอลัมน์มีค่า TP ลดลง ซึ่งการลดลงของค่า TP นี้ มีกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นในดินโดยกระบวนการการดูดซับ (adsorption) เกิดจากไอออนของ P จะถูกนำมาอยู่ที่ผิวของคอลลอยด์ดิน ปริมาณของ P ที่ถูกดูดซับในดิน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก คือ ความสามารถที่ดินจะดูดซับ P ซึ่งความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของดินที่ทำหน้าที่ดูดซับ P ได้ ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่นี้เป็นตัวหลักคือ hydrous oxides ของเหล็ก และอะลูมิเนียมที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และเป็นผลึก (crystalline) และแร่อะลูมิโนซิลิเกตอสัณฐาน ปริมาณของส่วนประกอบดินเหล่านี้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของการดูดซับ P และปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณ P ที่ใส่ลงในดิน สำหรับดินที่มีความจุในการดูดซับ P เท่าๆกัน เมื่อใส่ P ลงไปเป็นปริมาณมาก ปริมาณ P ที่ถูกดูดซับจะมากขึ้นด้วย (เป้ทมา วิทยากร 2547) จึงสรุปได้ว่า ดินสามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ ผ่านการบำบัดน้ำโดยดินแบบกระบวนการการดูดซับ (adsorption) โดยดูจากค่า TP ของน้ำที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกคอลัมน์

นอกจากกระบวนการดูดซับ ยังผ่านการบำบัดน้ำโดยดินแบบกระบวนการตกตะกอน (precipitation) ที่ส่งผลให้ค่า TP ของน้ำที่หายไปลดลง สำคัญที่สุดคือ pH ของดิน โดยที่ฟอสฟอรัสในดินทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับ Ca เป็น Ca-phosphate ในดินต่าง และทำปฏิกิริยากับ Fe, Al ในดินกรด เป็นสารประกอบ Fe และ Al-phosphate ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช เพราะเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ

**ตารางที่ 4.17** เปรียบเทียบสมมูล TP ในดินทั้งหมด โดยใช้ดินที่ผ่านการรดน้ำเสียสังเคราะห์ และดินที่ผ่านการรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7

ประเภทดิน	พารามิเตอร์		
	TPในดินเดิม (mg/kg)	TPในดินหลังทดลอง (mg/kg)	TPสะสมในดิน (mg/kg)
D1	273.60	214.00	-59.6
D2	273.60	257.10	-16.5
D3	273.60	246.60	-27
D4	273.60	264.70	-8.9
D5	273.60	249.90	-23.7
D6	273.60	286.20	12.6
D7	273.60	242.76	-30.84
D8	273.60	264.45	-9.15
D9	273.60	202.73	-70.87

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมดุล TP ในดินทั้งหมด โดยใช้ดินที่ผ่านการรดน้ำเสียสังเคราะห์ และดินที่ผ่านการรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week, pH 7 (ต่อ)

ประเภทดิน	พารามิเตอร์		
	TPในดินเดิม (mg/kg)	TPในดินหลังทดลอง (mg/kg)	TPสะสมในดิน (mg/kg)
D10	273.60	251.20	-22.4
D11	273.60	221.10	-52.5
D12	273.60	217.25	-56.35
C4	124.00	139.10	15.10

จากตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมดุล TP ทั้งหมดในดิน ก่อนการรดน้ำด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่า TP ในดินเท่ากับ 273.60 mg/kg และ 124.00 mg/kg ตามลำดับ พบว่าหลังการรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองรูปแบบที่ 1 ค่า TP ในดิน มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก TP ในดิน อาจจะถูกใช้เป็นแหล่งอาหาร และพลังงานของจุลินทรีย์แบบคีย์เรีย และเชื้อรา จากการกล่าวของ ปัทมา วิตยากร (2533) TP ในดินที่อยู่ในเนื้อเยื่อของจุลินทรีย์ดิน (microbial biomass) มีปริมาณร้อยละ 1-2 ของ TP ทั้งหมดในดิน และปริมาณ TP ในเนื้อเยื่อจุลินทรีย์ ที่เป็นแบบคีย์เรียจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5-2.5 และที่อยู่ในเชื้อราร้อยละ 4.8 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ TP ในพืชซึ่งมีปริมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก ค่า TP ในมวลชีวภาพจุลินทรีย์จะสูงกว่าในพืช

ในคอลัมน์ C4 มีแนวโน้ม ค่า TP สะสมในดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเดิมมีค่า TP ในดินเดิมเท่ากับ 124.00 mg/kg หลังการรดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ในการทดลองรูปแบบที่ 2 ค่า TP สะสมในดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 15.10 mg/kg ซึ่งแตกต่างจากคอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองรูปแบบที่ 1 ที่มีแนวโน้มค่า TP สะสมในดินลดลง ทั้งนี้ค่า TP สะสมในดินที่ต่างเพียงเล็กน้อยนี้อาจเนื่องมาจากในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบของธาตุอาหารอย่างอื่นนอกจาก TP จึงส่งผลให้ TP ถูกยึดหรือตรึงมากขึ้น แตกต่างจากการที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า TP เป็นหลักตั้งนั้น และยังคงสรุปได้ว่า ค่า TP ที่สะสมในดินของทั้ง 2 รูปแบบการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน

สุภาพร จันรุ่งเรือง และคณะ (2553) กล่าวว่า จุลินทรีย์ในดินมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารต่างๆ ในดิน รวมทั้งมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนรูปฟอสฟอรัสซึ่งมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในดินที่สามารถ ละลายหรือปลดปล่อยฟอสเฟตจากรูปของอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ในดินได้เพื่อประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ และพืช จุลินทรีย์ในดินเองนั้นก็แหล่งฟอสเฟตอินทรีย์ ซึ่งมีความสามารถที่จะปลดปล่อยให้กับพืชเมื่อพืชตาย และถูกย่อยสลายได้ โดยที่จุลินทรีย์มีกลไกในการ

ปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้เป็นประโยชน์กับพืชแตกต่างกันออกไป (Salehrastin 1999) โดยจุลินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มศักยภาพในการดูดซึมธาตุอาหารพืชได้แก่ เชื้อราไมคอร์ไรซา ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันกับรากพืชชั้นสูง เชื้อราเหล่านี้จะได้รับอาหารจากพืช และเนื่องจากการวิจัยนี้ไม่ได้มีพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ไม่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในเชิงลึก

จากผลการทดลองเปรียบเทียบสมดุลฟอสฟอรัสในระบบ ค่า TP ของดิน และค่า TP ของน้ำ ค่อนข้างมีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มผ่านกระบวนการบำบัดโดยดิน ซึ่งได้ผลการทดลองออกมาว่าใช้บำบัดได้จริง โดยในงานวิจัยนี้ในการทดลองผ่านกระบวนการบำบัดโดยดิน 2 กระบวนการหลัก คือ ทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอน (sedimentation) และการกรอง (filtration) ทางเคมี ได้แก่ การรวมตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำหรือการตกตะกอนผลึก (precipitation) และการดูดซับ (adsorption) และอีกหนึ่งกระบวนการซึ่งมีผลกับกระบวนการบำบัดโดยดิน คือ ทางชีวภาพ ซึ่งไม่ได้ทำการวิจัยกระบวนการทางชีวภาพนี้อาจมีผลทำให้ค่า TP สะสมของดินในแต่ละคอลัมน์หลังการทดลองมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามโดยรวมแล้วค่า TP สะสมของดินมีความไม่แตกต่างกัน ในส่วนของค่า TP ของน้ำแสดงให้เห็นว่าดินสามารถบำบัดน้ำได้ จากค่า TP ของน้ำที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดฟอสฟอรัส โดยใช้วิธีบำบัดโดยดิน (land treatment systems) แบบระบบอัตราไหลช้า (slow-rate Irrigation) โดยใช้น้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดแล้ว และใช้ดินจากพื้นที่ดินในสวนปาล์มที่ไม่ผ่านการรดน้ำทิ้งมาก่อนของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จ.กระบี่ มีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินเกิดขึ้น 2 กระบวนการ กระบวนการที่ 1. เป็นกระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอน (sedimentation), การกรอง (filtration) และกระบวนการที่ 2. เป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการหลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การรวมตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำหรือการตกตะกอนผลึก (precipitation) และการดูดซับ (adsorption) โดยทำการศึกษาคูณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ทดลอง รวมถึงอัตราการรดน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยดิน และคุณสมบัติทางกายภาพของดินก่อน และหลังการทดลอง สรุปได้ว่า

1. จากการทดลองเมื่อรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มผ่านคอลัมน์ดิน ในช่วงแรกค่า pH ของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่า pH ที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะพบว่าค่า pH ของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีแนวโน้มสูงขึ้น

2. จากผลการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีค่าฟอสฟอรัสสูง มารดผ่านคอลัมน์การทดลอง พบว่า ค่าฟอสฟอรัสของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าน้อยลง ในทุกการทดลอง แสดงว่าระบบบำบัดโดยดินสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดี เฉลี่ยร้อยละ 91.13-98.60 เช่นเดียวกับประสิทธิภาพในการบำบัด ค่า orthophosphate ที่มีเฉลี่ยร้อยละ 88.18-98.61

3. จากการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 5, 7 และ 9 ที่อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ ที่ 0.5 cm/week ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้ เนื่องจากไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์ จากผลจากการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ เลือกค่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ดีที่สุด เพื่อทำการทดลองรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเลือกที่ pH 7 และอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 1 cm/week แต่ไม่สามารถเก็บผลการทดลองได้เนื่องจากไม่มีน้ำออกจากคอลัมน์ การทดลองที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จึงเลือกอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ที่ 2 cm/week มาทดลอง

4. เนื้อดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ทั้งการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ผลจากการวิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธี Hydrometer method ดินมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ทั้งก่อนและหลังการทดลอง

5. ดินมีค่าอัตราการซึมเฉลี่ยรวมทั้งการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ  $5.28 \times 10^{-7}$  cm/s



6. การทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH ต่างกัน คือ pH 5, 7 และ 9 โดยค่า pH เริ่มต้นของดินก่อนการทดลองเท่ากับ 5.64 และหลังการทดลอง มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.40 แสดงว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้รดที่ระดับ pH ต่างกัน ไม่ส่งผลให้คุณภาพของดินในด้านของ pH เปลี่ยนแปลง ดินยังคงสภาพ pH เดิม เช่นเดียวกันกับการทดลองที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีการปรับ pH ให้เท่ากับ 7 โดยค่า pH ของดินก่อนการทดลองเท่ากับ 5.61 หลังการทดลอง มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 5.26 เนื่องจากดินมีคุณสมบัติของดินที่เรียกว่า ความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (Buffer Capacity of Soil)

7. จากการศึกษาปริมาณของอนินทรีย์ฟอสฟอรัส พบว่าปริมาณของอนินทรีย์ฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน โดย pH ของดินหลังการทดลองทั้งการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่าค่า pH ของดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.05 แสดงว่าดินมีความเป็นกรด ทำให้ค่าของ Fe-Phosphate และ Al-Phosphate มีค่าสูงกว่า Ca-Phosphate

8. จากการรดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีฟอสฟอรัสลงในดิน พบว่าไม่ส่งผลต่อการเพิ่มฟอสฟอรัสในดิน (TP)

9. หลังการทดลองที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และรดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available P) โดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 25 mg/kg ซึ่งเพียงพอกับความต้องการของพืช จึงมีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก

10. จากผลการทดลองเปรียบเทียบสมดุลฟอสฟอรัสในระบบ พบว่าระบบบำบัดโดยดินสามารถบำบัดฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ โดยมีกระบวนการบำบัดโดยดินที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางกายภาพและทางเคมี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเห็นได้ว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่นำมารดที่ pH 9 สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ผลใกล้เคียงกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 7 ซึ่งน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษามีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 8.57 จึงไม่จำเป็นต้องปรับ pH

2. หากมีผู้สนใจศึกษาในเรื่องของฟอสฟอรัส อาจศึกษาโดยให้พืชมาเกี่ยวข้อง เพื่อจะได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดทางชีวภาพ เนื่องจากฟอสฟอรัสต้องใช้รากที่อาศัยอยู่ในรากพืชช่วยในการย่อยสลาย และควรมีการวิเคราะห์ความชื้นเพิ่มเติม เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นในดินมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินที่มาจากน้ำทิ้ง

3. หากต้องการศึกษางานวิจัยในเชิงลึก ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำ รวมถึงลักษณะการชะสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ อาจศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์ ลักษณะการไหลภายในคอลัมน์แบบ Equilibrium Transport Model (ADR) เพื่อหาสัดส่วนของกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นได้ ในอนาคตหากต้องการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรมนี้ ผู้วิจัยควรศึกษาเรื่องลักษณะการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับโปรแกรมให้อย่างครบถ้วน

## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html) (สืบค้นเมื่อ 18 ธันวาคม 2559).
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. 235 หน้า.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2560. คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรม. [http://www2.diw.go.th/\\_Standard/](http://www2.diw.go.th/_Standard/). (สืบค้นเมื่อ 18 กรกฎาคม 2560).
- กองสำรวจดิน. 2523. งานสำรวจดิน. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.
- กาญจณี ชูทอง. 2556. กลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กุสุมาลย์ ล่องแก้ว. 2557. การลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพมหานคร : เรื่องธรรมการพิมพ์.
- จิราภรณ์ อินทสาร, ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร, จักรพงษ์ ไชยวงศ์. 2556. การใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่สามารถละลายฟอสเฟตได้ภายใต้การผลิตลำไยอินทรีย์ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- จุฑารัตน์ หนูสุข. 2546. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สาม สำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทัยธัช หิรัญเรือง. 2553. การดูดซับโลหะของดินบริเวณหลุมฝังกลบชุมชน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนารักษ์ พงษ์เกตุรา. 2543. ข้อมูลเทคโนโลยีสำหรับการจัดการของเสียโรงงานปาล์มน้ำมัน. เอกสารประกอบการบรรยายสำหรับการฝึกอบรมเรื่อง เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดและการป้องกันมลพิษของโรงงานอุตสาหกรรม. วันที่ 10-12 พฤษภาคม 2543 ณ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตสุราษฎร์ธานี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ธิดารัตน์ บุญศรี. 2543. การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตินัย พงศ์พิริยะกิจ. 2546. สมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญบางประการของดินชุดหลักในกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นวลศรี กาญจนกุล, สุวรรณีย์ ภูธรธราช และชนิษฐศรี อุ้นตระกูล. 2543. ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน. เอกสารวิชาการกองวิเคราะห์ดิน. กรมพัฒนาที่ดิน.
- นิคม ละอองศิริวงศ์ และ ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2546. สภาวะยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา.
- นิคม ละอองศิริวงศ์. 2547. ธาตุอาหารที่เป็นปัจจัยจำกัดมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชในทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 140 หน้า
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- เบญญาภา ธีระวิทย์เลิศ และ สุทธิชา ภัทรานนท์. 2557. อิทธิพลของไกลโฟเสตต่อการเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัสรูปแบบต่างๆ. โครงการวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ประพิศ แสงทอง. 2534. อนินทรีย์และอินทรีย์ฟอสฟอรัสในดินไร่. ดินและปุ๋ย 13(2): 142-145.
- ปัทมา วิตยากร. 2533. ดิน: แหล่งธาตุอาหารของพืช. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 215 หน้า.
- ปัทมา วิตยากร. 2547. ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 423 หน้า.
- พวงเพชร อึ้งวิศิษฏ์วงศ์. 2559. การพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันไทยสู่มาตรฐาน RSPO. ธนาคารแห่งประเทศไทย.
- พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์. 2555. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางข้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัชร ธีรจินดาขจร. 2549. หลักและวิธีการวิเคราะห์ดินทางเคมี: ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- พูนสุข ประเสริฐสรรพ และ อรัญ หันพงศ์กิตติกุล. 2554. การประยุกต์ใช้เอนไซม์ทางการค้าและจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้ในการเก็บเกี่ยวน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และ อรัญ หันพงศ์กิตติกุล. 2533. กระบวนการผลิตการใช้ประโยชน์วัสดุเศษเหลือทิ้งและคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม. วารสารสงขลานครินทร์. 12(2): 169-176.
- เพ็ญนภา ทองประไพ. 2555. ลักษณะดินและน้ำท่าจากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำยางชั้นด้วยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกษัชรรัตน์ กชกรจารุพงศ์. 2550. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งด้วยการบำบัดโดยดิน. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มณีนีรัตน์ เทียมทัน และ จีมา ศรีลัมภ์. 2554. ไอโซโทมการดูดซับของตะกั่วในน้ำชะมูลฝอยและดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 10, สงขลา, 23-25 มีนาคม 2554.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ยงยุทธ โอสดสภา, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชัยสิทธิ์ ทองจู. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยุวดี พิรพรพิศาล. 2548. สหรัยน้ำจืดในภาคเหนือของประเทศไทย. โครงการพัฒนาองค์ความรู้และศึกษานโยบายการจัดการทรัพยากรชีวภาพในประเทศไทย : 359 หน้า.
- โรสนา กาชอ, อุดมผล พิชนไพบูลย์, สมทิพย์ ด่านธีรวินิชย์ , พรทิพย์ ศรีแดง, พนาลี ชีวกิตาการ และ เจิตจรรย์ ศิริวงศ์. 2555. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 11, เชียงราย, 21-23 มีนาคม 2555
- วรวิทย์ จันทรสุวรรณ. 2558. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. รายงานฉบับสมบูรณ์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. กรุงเทพฯ.
- วันวิจิตร ทิมฐาน. 2559. การใช้ดินบำบัดและกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อควบคุมฟาวลิงของเมมเบรนในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- วารีย์ ช้วนรักธรรม. 2548. นวัตกรรมแห่งน้ำมันปาล์ม. วารสาร engineering today. ปีที่ 3 ฉบับที่ 36.
- วิเชียร ฝอยพิกุล. 2536. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิชาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสุรินทร์. 238 หน้า.
- ศิริขวัญ ภูนา. 2551. การประเมินฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน โดยวิธีการวิเคราะห์ดินทางเคมี และการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสของข้าวโพดที่ปลูกในชุดดินองครักษ์ โคราช ลี ปากช่อง ชัยบาดาล และหินซ็อน.ปาล์ม. วิทยานิพนธ์. สาขาปฐพีวิทยา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. 2556 .รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report) โครงการพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมกับประเทศเพื่อนบ้าน (ยุทธศาสตร์การพัฒนาคือความร่วมมือ ด้านอุตสาหกรรม ภายใต้กรอบโครงการพัฒนาเขตเศรษฐกิจสามฝ่าย อินโดนีเซีย-มาเลเซีย-ไทย: IMT-GT).
- สำราญ ยอดอุปลัมภ์. 2543. ปฐพีกลศาสตร์เบื้องต้น. หน้า 122. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 11. 2543. รายงานการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากปาล์ม น้ำมันในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและกระบี่.
- สุภาพร จันรุ่งเรือง, เบญจมาศ รสโสภา และ กรรณิการ์ สัจจาพันธ์. 2553. ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *Burkholderia* sp. สายพันธุ์ Rs01 ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ.
- สุเมธ ไชยประพัทธ์, พนาลี ชิวกิตาการ, ภัทรธร เอื้อกฤดาธิการ และพรทิพย์ ศรีแดง. 2550. โครงการการบูรณาการเทคโนโลยีเคมีกายภาพขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบำบัดชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- เสนีย์ กาญจนวงศ์, ขจรศักดิ์ โสภาจารย์, วิไลลักษณ์ กิจจนะพานิช, ทรงเชาว์ อินสมพันธ์, โชคชัย ไชยมงคล, อุดง ศิลป์ประเสริฐ, ทิพวรรณ ประภามณฑล, รัศมี แก้ววิชิต และสุรีย์ บุญญานุพงศ์. 2545. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้เพื่อการเกษตร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อดิพันธ์ อนุศักดิ์. 2560. การจัดการน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อภิรดี อิมเอิบ. 2534. การตรวจสอบดิน. วารสารอนุรักษ์ดินและน้ำ. 7(7). 5-23.

- อมรา ดาวไธสง. 2550. การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรรณณ ฉัตรสีรุ่ง. 2551. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 253 หน้า.
- อรัญ หันพงศ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสริฐสรณ์ และฉวีวรรณ มลิวัลย์. 2553. การใช้ bacillus subtilis A2 ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลเนสในการแยกน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์. 2548. ปฐพีวิทยา. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราช-ภัฏยะลา.
- อุดมผล พีชนไพบูลย์, พรทิพย์ ศรีแดง, พนาลี ชีวกิตาการ, เจิดจรรย์ ศิริวงศ์ และสมทิพย์ ต่านธีรวินิชย์. 2555. การพัฒนาการจัดการสิ่งแวดล้อมของการผลิตผลิตภัณฑ์ยางพาราและน้ำมันปาล์มของประเทศไทยและมาเลเซีย : จากแปลงปลูกถึงอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1985. Method D 2434-68. Permeability of Granular Soils (Constant Head). Annual book of ASTM standards, USA.
- AOAC. 1999. Official Method of Analysis of The Association of Official Analytical Chemists. 14th edition.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 22th edition. American Public Health Association, Washington DC.
- Brady, C. N. 1974. The Nature and Properties of Soils. 8 th ed. Macmillan Publishing Co., Inc. New York. 639 p.
- Bray, R.H. and Kurtz, N. 1945. Determination of total, organic and available forms of Phosphorus in Soils. Soil Science, 1945. 59(1): p. 39-46.
- Cabrera, F., Lopez, R., Martinez-Bordiu, A., Dupuy de Lome, E. and Murillo, J.M. 1996. Land Treatment of Olive Mill Wastewater. International Biodeterioration & Bio degradation. 215-225.

- Chavalparit, O., Rulkens, W. H., Mol, A.P.J. and Khaodhair, S. 2006. Options for Environmental Sustainability of the Crude Palm Oil Industry in Thailand through Enhancement of Industrial Ecosystems. Department of Environmental and Hazardous, Environmental Technology, Waste Management, Social Sciences, Environment Policy.
- Christen, E.W., Quayle, W.C., Marcoux, M.A., Arienzo, M. and Jayawardane, N.S. 2010. Winery wastewater treatment using the land filter technique. *Environmental Management*. 91, 1665-1673.
- Crites, R. and Tchobanoglous, G. 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. New York: McGraw Hill.
- Fujikawa, Y. 2014. History of Technical Developments of Soil Percolation System for Wastewater and River Water Treatment in Japan. Research Reactor Institute. Kyoto University.
- Isakandar, I.K. 1981. Modeling wastewater renovation: Land Treatment. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire.
- Jenkins, T.F. and Palazza, A.J. 1981. Wastewater Treatment by a Slow Rate Land Treatment System. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Region Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire. CRREL Report 81-84.
- Jensen L.S. & Husted S. In: Applied Plant Nutrition Soil Fertility, Fertilizers and Manure Nutrient Management. Plant and Soil Science Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. pp 1-35.
- Jewell, W.J. and Seabrook, B.L. 1979. History of Land Application as a Treatment Alternative. EPA 430/9-79-012, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. 1996. *Treatment Wetland*. Boca Raton: Lewis Press.
- Kidder, E.H. 1976. Selection of the system for wastewater application on agricultural land. In Knezek BD and Miller RH (eds) *Application of sludge and waste waters on agriculture land: a planning and education guide*. Ohio Agric Res Dev Cent, Wooster, Res Bull 1090: 8.1-8.7.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. pp. 869-919. In: Bigham, J.M. (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America, Book Series No. 5. Madison, Wisconsin.

- Land Classification Division and FAO Project Staff. 1973. Soil Interpretation Handbook for Thailand. Dept. of Land Development, Min. of Agri. And Coop., Bangkok. 135p.
- Metcalf and Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
- Mousavinezhad, M., Rezazadeh, M., Golbabayee, F., & Sadati, E. 2015. Land treatment method a review on available method and its ability to remove pollutants. Orient J Chem.
- Patent Science and Technology. 2016. <http://www.hualongbiosciences.com/m/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=10&id=31>. (สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2560).
- Paul, E.A. and Clark, F.E. 1989. Soil microbiology and biochemistry. New York: Academic Press.
- Pescod, M.B. 1992. Wastewater Treatment and Use in Agriculture Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Polprasert, C. 1989. Organic Waste Recycling. New York: John Wiley & Son.
- Polprasert, C. 2007. Organic waste recycling. IWA Publishing.
- Pound, C.E. and Crites, R.W. 1973. Wastewater Treatment and Reuse by Land Application. EPA 660/2-73-006b, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C
- Pound, C.E., Griffes, D.A. and Crites, R.W. 1983. Engineering and economics of applying wastewater and sludge to land. In : Page AL, Gleason TL, Smith JE, Iskander IK, Sommers LE (eds) Utilization of municipal wastewater and sludge on land. Univ Cal Press, Riverside, 53-75.
- Prasad, R. and Power, J.F. 1997. Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- Raffer, G.W. 1899. Sewage Irrigation. Part II Water Supply and Irrigation Papers, No.22, U.S. Geological Survey, U.S. Government Printing Office, Alexandria, VA.
- Ronald, W., Joe, E. and Sherwood, C. 2006. Natural Wastewater Treatment Systems. Taylor & Francis Group, LLC.



- Salehrastin, N. 1999. Biological fertilizer. *Sci. J. Soil Water*. 12: 116-120.
- Sanchez, A. P. 1976. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. Department of Soil Sciences. North Carolina State University. John Wiley & Sons. Inc. 618p.
- Schjorring, J.K. and Jensen, L.S. 2005. Phosphorus Fertilizers and Fertilization, by Jensen, L.S. & Husted, S. In: *Applied Plant Nutrition Soil Fertility, Fertilizers and Manure Nutrient Management*. Plant and Soil Science Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. pp 1-35.
- Scopper, W.E. and Kardos, L.T. 1973. *Recycling Treated Municipal Wastewater and Sludge Through Forest and Cropland*. The Pennsylvania State University Press, University Park, PA.
- Sharpley, A.N. and Rekolainen, S. 1997. Phosphorus in agriculture and its environmental implications. p. 1-54. In Tunney, H., Carton, O. T., Brookes, P. C., and Johnston, A. E. (eds.) *Phosphorus loss from soil to water*. CAB International Press, Cambridge, England
- Soil Testing Siam Co., Ltd. 2015. คู่มือการทดสอบหาการซึมผ่านได้ของน้ำในดินด้วยวิธีการใช้แรงดันสูง : การทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำในดินด้วยวิธีการใช้แรงดันสูง (High Pressure). กรุงเทพฯ.
- Stowell, R., Ludwig, R., Colt, J. and Tchobanoglous, G. 1981. Concepts in aquatic treatment system design. *J. Env. Eng. Div., ASCE*, 107, 919-940.
- Thongnuekhang, V. and Puetpaiboon, U. 2004. Nitrogen removal from concentrated latex wastewater by land treatment. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 26(4): 521-528.
- U.S.EPA. 1981. *Process Design manual for Land Treatment of municipal Wastewater*. EPA 625/1-81-013. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R. and Laber, J. 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. 17-66.
- Wong, K. K. 1980. Application of ponding system in the treatment of palm oil mill and rubber mill effluents. *Pertanika*, 133-141.

- Yang, H., Xiao, J., Gamel El – Din, M., Buchanan, I. D., Bromley, D., & Ikehata, K. 2010. Soil based treatment of partially treated liquid swine manure. *Environmental technology*, 59-70
- Wang, Y., Zhang, X., Zhang, H., Lu, Y., Huang, H., Dong, X., Chen, J., Dong, J., Yang, X., Hang, H. and Jiang, T. 2012. Coiled-coil networking shapes cell molecular machinery. *MolBiol Cell*. 23(19): 3911-22

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การเก็บตัวอย่างดินเพื่อบรรจุคอลัมน์ทดลอง

เก็บตัวอย่างดินจากสวนปาล์มบริเวณพื้นที่สวนปาล์มของบริษัทเอเซียนน้ำมันปาล์ม อ.อ่าวลึก จ.กระบี่ ในการเก็บตัวอย่างดินต้องถางหญ้าหรือกวาดเศษพืชและใบไม้ที่คลุมดินอยู่ออก แล้วใช้จอบเสียมหรือพลั่วขุดหลุมเป็นรูปตัว V เก็บดินจากผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 15 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ ก-1 และ ก-2 โดยเก็บดินครั้งที่ 1 ปริมาตรประมาณ 700 กิโลกรัม และเก็บดินครั้งที่ 2 ปริมาตรประมาณ 350 กิโลกรัม โดยนำดินในแต่ละครั้งมารวมกันแล้วแยกเศษกิ่งไม้ และรากไม้ออก จากนั้นตีดินที่จับตัวเป็นก้อนใหญ่ให้ร่วนไม่เกาะเป็นก้อน แบ่งกองดินออกเป็นสี่ส่วนด้วยวิธี Quartering แยกสิ่งเจือปนต่างๆออกอีกครั้ง ดังภาพที่ ก-3 และคลุกเคล้าทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อนำดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง แสดงดังภาพที่ ก-4



ก-1



ก-2

ภาพที่ ก-1 และ ก-2 การเก็บตัวอย่างดิน



ก-3



ก-4

ภาพที่ ก-3 และ ก-4 การเตรียมดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง

#### การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อใช้ในการทดลอง

เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงาน บริษัท เอเชีย น้ำมัน ปาล์ม อ.อ่าวลึก จ.กระบี่ ในการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นการเก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) โดยตักน้ำจากระบบบำบัดในบ่อสุดท้ายใส่แกลอน ในเก็บน้ำจะทำการเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ปริมาตรประมาณ 1.5 ลิตรเพื่อมาวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้น และเก็บดินครั้งที่ 2 ลงในแกลอนละ 40 ลิตรทั้งหมด 3 แกลอน หลังเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแล้ว นำตัวอย่างน้ำทิ้งเก็บในตู้แช่ของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้รดคอลัมน์วันละครั้ง



ภาพที่ ก-5 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก-1 วันที่เก็บตัวอย่างดิน และน้ำทิ้งจากโรงงานบริษัท เอเชียน น้ำมันปาล์ม

ครั้งที่	วันที่เก็บตัวอย่างดิน
1	19 พฤษภาคม 2558
2	6 มิถุนายน 2559

คอลัมน์ทดลองมีทั้งหมด 16 คอลัมน์ แบ่งเป็น 2 รูปแบบการทดลอง โดยรูปแบบการทดลองที่ 1 รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3, 2, 1 และ 0.5 cm/week ควบคุม pH ที่ 5, 7 และ 9 ส่วนการทดลองรูปแบบที่ 2 รดด้วยน้ำกลั่นควบคุม pH ที่ 5, 7 และ 9 และคอลัมน์สุดท้ายน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ pH 7 ทั้ง 4 คอลัมน์มีอัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะมีตัวย่อของแต่ละชุดรูปแบบการทดลอง ดังนี้

D1 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 5 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week

D2 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 5 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

D3 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 5 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week

D4 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 5 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 0.5 cm/week

D5 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week

D6 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

D7 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week

D8 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 0.5 cm/week

D9 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 9 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 3 cm/week

D10 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 9 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

D11 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 9 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 1 cm/week

D12 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 9 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 0.5 cm/week

C1 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ pH 9 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

C2 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

C3 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำกลั่นที่ pH 5 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

C4 = คอลัมน์ที่รดด้วยน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ pH 7 อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ 2 cm/week

## ภาคผนวก ข

## ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของดิน

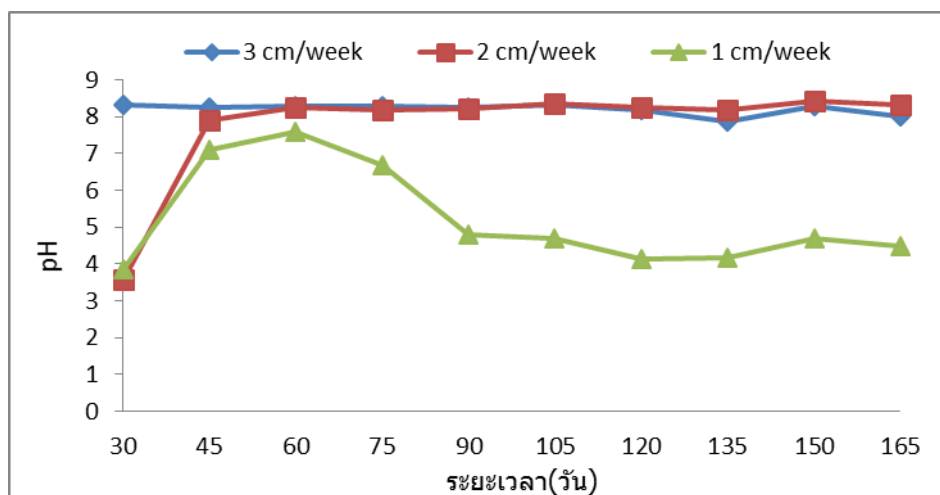
ตารางที่ ข-1 ค่าเนื้อดิน (soil texture)

ตัวอย่างดิน	ขนาดอนุภาค		
	% ดินเหนียว	% ทรายแป้ง	% ทราย
ดินก่อนทดลองที่ 1	14.82	17.03	68.15
D1	17.50	17.58	64.92
D2	18.26	17.45	64.29
D3	18.78	16.08	65.14
D4	18.69	15.98	65.33
D5	18.73	14.15	67.12
D6	18.83	17.30	63.88
D7	18.41	16.66	64.94
D8	17.42	17.84	64.74
D9	18.73	17.91	63.36
D10	19.05	15.95	65.00
D11	19.38	16.31	64.31
D12	19.28	16.19	64.53
ดินก่อนทดลองที่ 2	17.04	13.45	69.51
C1	15.54	19.77	64.69
C2	16.78	20.29	62.93
C3	15.67	19.72	64.61
C4	16.77	18.93	64.29

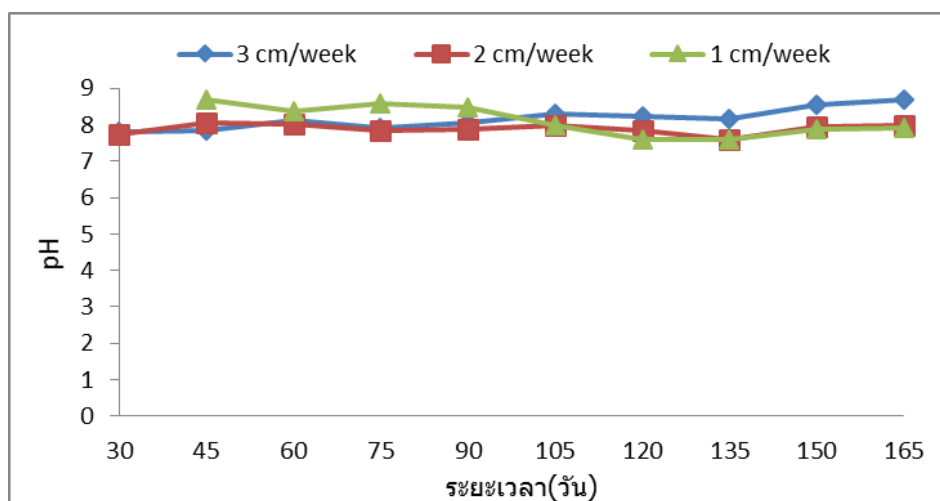


ภาคผนวก ค  
ผลการวิเคราะห์ของน้ำ

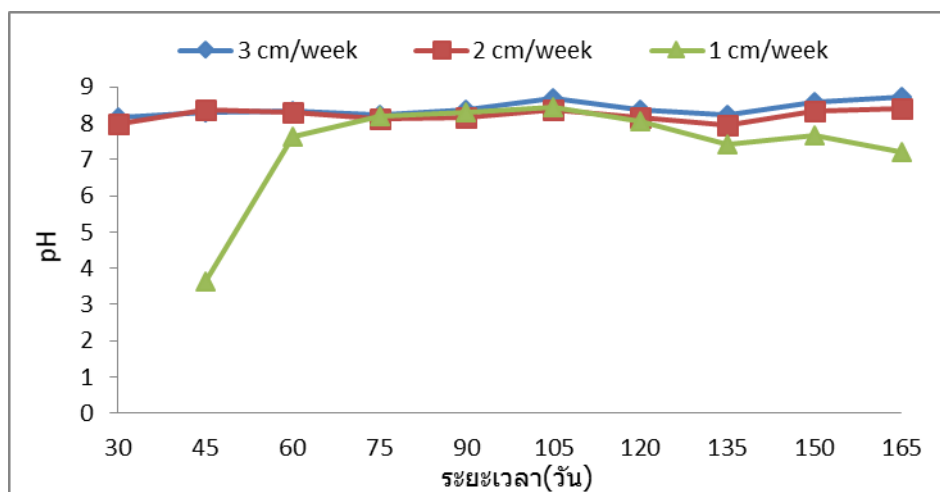
ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1



กราฟที่ ค-1 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 5

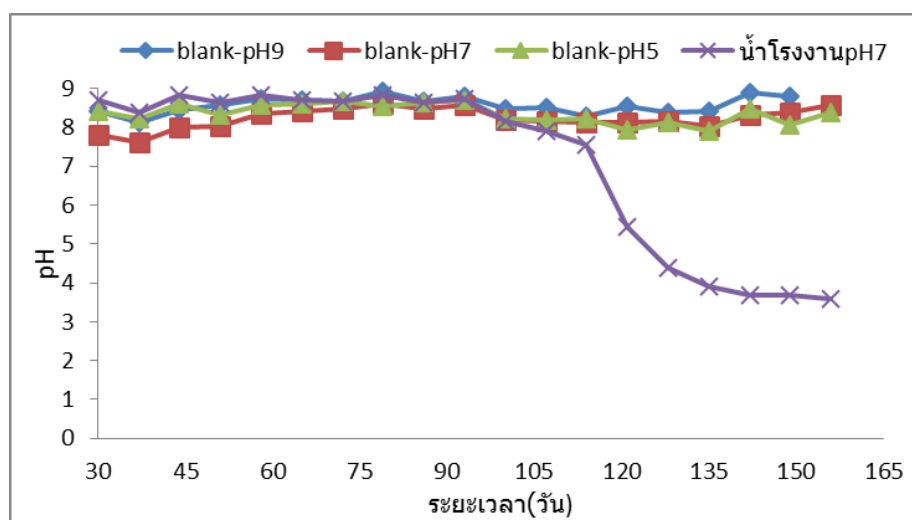


กราฟที่ ค-2 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 7



กราฟที่ ค-3 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 1 ที่น้ำเข้า pH 9

ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2



กราฟที่ ค-4 ค่า pH ของน้ำที่ออกจากชุดทดลองรูปแบบที่ 2

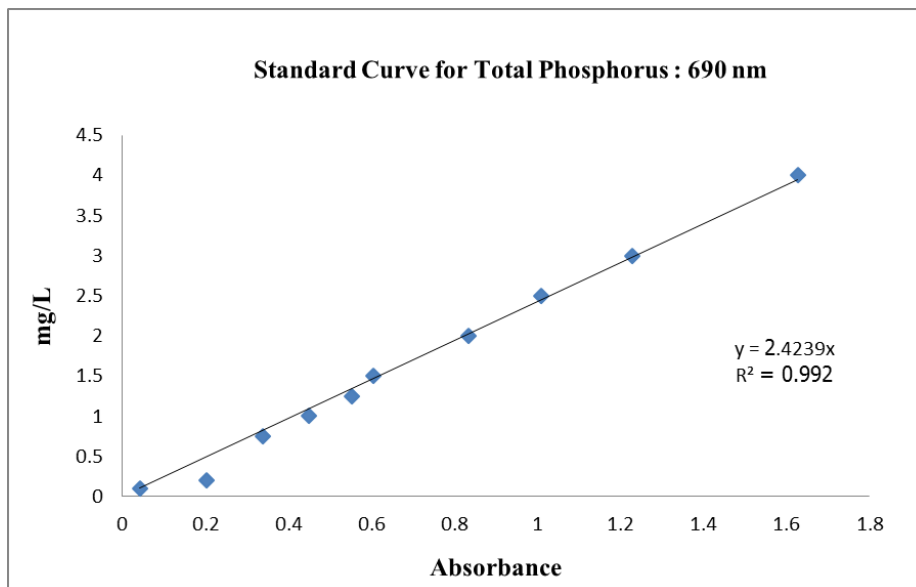
### การวิเคราะห์ค่า Al, Fe และ Ca

ในการวิเคราะห์ค่า Al, Fe และ Ca ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามขั้นตอนของ APHA, AWWA and WEF (2012) ทำการวิเคราะห์หลังการทดลองจากน้ำออกดินทุกคอลัมน์ แสดงดังตารางที่ 4.13 เป็นค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง

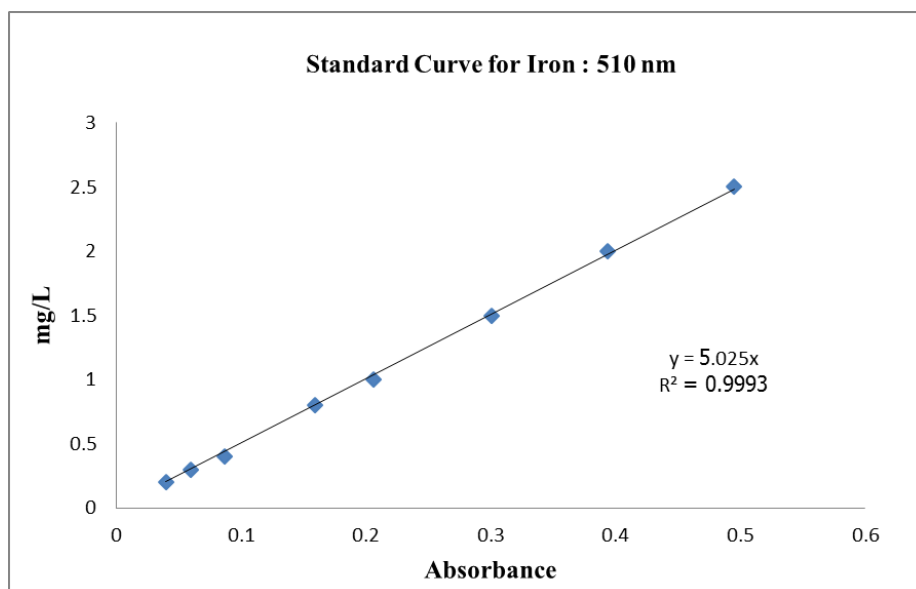
ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ค่า เหล็ก, อะลูมิเนียม และแคลเซียม ของน้ำหลังการทดลอง

ประเภทดิน	พารามิเตอร์		
	เหล็ก (mg/L)	อะลูมิเนียม (mg/L)	แคลเซียม (mg/L)
D1	0.394	0.057	119.93
D2	0.380	0.001	228.97
D3	4.677	0.341	269.45
D4	NA	NA	NA
D5	0.326	0.015	131.00
D6	0.312	0.003	191.81
D7	0.684	0.346	233.09
D8	NA	NA	NA
D9	0.548	0.069	148.47
D10	0.462	0.000	248.55
D11	1.965	0.331	327.51
D12	NA	NA	NA
C1	0.475	0.017	88.67
C2	0.510	0.208	47.56
C3	0.790	0.065	67.45
C4	2.148	0.055	107.82

กราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์



กราฟที่ ค-5 กราฟมาตรฐานของฟอสฟอรัสที่ใช้ในการวิเคราะห์



กราฟที่ ค-6 กราฟมาตรฐานของเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์

### วิธีวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

นำดินตัวอย่างวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด(TP) ด้วยการนำดิน 2 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ 125 มิลลิลิตร เติมกรด  $\text{HClO}_4$  เข้มข้น 10 มิลลิลิตร แล้วย่อยบน hot plate จนสารละลายมีสีใส วางไว้ให้อุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันวางให้ตกตะกอน(สมศักดิ์ มณีพงศ์, 2537) ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย vanadomolybdate 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที อ่านค่าที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และทำ blank เพื่อหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่างเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด

### วิธีวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P)

นำดินตัวอย่างวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์(available P) โดยใช้น้ำยาสกัดBray II ด้วยการนำดิน 2.85 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ 100 มิลลิลิตร เติม reagent A 20 มิลลิลิตร เขย่า 1 นาที กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ปิเปตสารละลายส่วนใส 5 มิลลิลิตร และ 0.5% ascorbic acid ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปิเปตสารสกัดที่กรองได้(ปริมาตรที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส) ปรับปริมาตรด้วยน้ำ เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 40 นาที อ่านค่าที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตร และทำ blank เพื่อหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟสารมาตรฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (สมศักดิ์ มณีพงศ์, 2537)

**ประวัติผู้เขียน**

**ชื่อ สกุล**                      นางสาวเปรมยุดา กาญจนจันทร์  
**รหัสประจำตัวนักศึกษา** 5510120078  
**วุฒิการศึกษา**

<b>วุฒิ</b>	<b>ชื่อสถาบัน</b>	<b>ปีที่สำเร็จการศึกษา</b>
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วาริชศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

**ทุนการศึกษา**

- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2558

**การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน****บทความที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ**

เปรมยุดา กาญจนจันทร์ และ อุดมผล พิชน์ไพบูลย์. 2560. ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ดิน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร. ระหว่างวันที่ 17 – 18 พฤษภาคม 2560.