



การลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ  
และการบำบัดโดยดิน

Removal of Phenolic Compounds by Palm Oil Mill Wastewater  
Treatment Plant and Land Treatment

กุสุมาลย์ ล่องแก้ว  
Kusumal Longkaew

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

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ  
และการบำบัดโดยดิน

ผู้เขียน นางสาวกุสุมาลย์ ล่องแก้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภา กานตวนิชกูร)

.....  
(ดร.อรมาศ สุทธิ์นุ่น)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

.....  
(ดร.จิตติ มังคละศิริ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

.....กรรมการ  
(ดร.อรมาศ สุทธิ์นุ่น)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับ  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม

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

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน  
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(กฤษมาลย์ ล่องแก้ว)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(กฤษมาลย์ ล่องแก้ว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และการบำบัดโดยดิน
ผู้เขียน	นางสาวกฤษมาลย์ ล่องแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณและจำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และศึกษาการลดสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลดำเนินการ 2 วิธี ได้แก่ วิธี 4-Aminoantipyrine และ วิธี Folin-Ciocalteu โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (แบบที่ I) จำนวน 1 โรงงาน และโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (แบบที่ II) จำนวน 8 โรงงาน น้ำเสียที่เข้าระบบแบบที่ I และ II มีค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine เป็น 323 และ 334 mg/L ตามลำดับ สารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแบบที่ I มีค่าเป็น 33 mg/L และ แบบที่ II มีค่าเป็น 18 mg/L เมื่อตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu น้ำเสียที่เข้าระบบแบบที่ I และ II มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 1,661 และ 1,274 mg GAE/L ตามลำดับ สารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแบบที่ I มีค่าเป็น 226 mg GAE/L และ แบบที่ II มีค่าเป็น 105 mg GAE/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักที่ลดค่าสารประกอบ ฟีนอลในน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ II ชนิดสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ I ได้แก่ gallic acid, 4-hydroxybenzoic acid, caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, protocatechuic acid, phenol, *p*-coumaric acid และ ferulic acid โดยมีค่าเป็น 726, 229, 218, 105, 69, 32 และ 30 mg/L ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายตรวจพบปริมาณของ gallic acid เป็น 34 mg/L, protocatechuic acid เป็น 6 mg/L และ 4-hydroxybenzoic acid เป็น 6 mg/L น้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ II ตรวจพบ gallic acid, 4-hydroxybenzoic acid, caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, phenol, protocatechuic acid, *p*-coumaric acid และ ferulic acid โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 566, 184, 136, 99, 71, 16 และ 16 mg/L ตามลำดับ น้ำผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายตรวจพบปริมาณของ gallic acid เป็น 20 mg/L ปัจจุบันโรงงานนำน้ำที่ผ่านการบำบัดไปรดสวนปาล์มน้ำมันภายในโรงงาน ทำให้ไม่มีค่าเกรย์วอเตอร์จากการปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากโรงงาน กรณีที่โรงงานบำบัดน้ำเสียจนผ่านมาตรฐานและปล่อยน้ำสู่ธรรมชาติ ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์เมื่อคำนวณจากค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเป็น 364 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ การบำบัดโดยดินทดลองโดยรดน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแบบที่ II ด้วยอัตรา 3 และ 5 cm/week ซึ่งมีค่าสารประกอบฟีนอลเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine เท่ากับ 29 mg/L และ วิธี Folin-Ciocalteu เท่ากับ 162 mg GAE/L โดยรดน้ำทุกวัน และอาทิตย์ละครั้ง ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week คอลัมน์ที่มีการรดน้ำที่มีสารประกอบฟีนอลทุกวันและไม่มี การฆ่าเชื้อในตัวอย่างดินและน้ำ เป็นชุดทดลองที่มีประสิทธิภาพในลดสารประกอบฟีนอลดีที่สุดใน ประสิทธิภาพจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine และ วิธี Folin-Ciocalteu เป็น 95.3±2.4% และ 98.3±1.4% ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Removal of Phenolic Compounds by Palm Oil Mill Wastewater Treatment Plant and Land Treatment
<b>Author</b>	Miss Kusumal Longkaew
<b>Major Program</b>	Environmental Engineering
<b>Academic Year</b>	2013

#### ABSTRACT

This research is aimed at determining the quantity and characteristics of phenolic compound or phenols in palm oil mill effluent (POME) and its treated wastewater (TW) by the wastewater treatment plants (WWTP) of palm oil mills. The reduction of phenols by land treatment was carried out. The phenols were determined using 2 methods including the 4-Aminoantipyrine and Folin-Ciocalteu methods. The POME and TW were collected from one mill that used stabilization ponds (Type I) and eight mills that utilized biogas capture systems and stabilization ponds (Type II). Phenols in the POME of WWTP in Type I and II measured by a 4-Aminoantipyrine method were 323 and 334 mg/L, respectively. Phenols in the TW from WWTP Type I of 33 mg/L and WWTP Type II of 18 mg/L were detected. When using the Folin-Ciocalteu method, the phenols in the POME of WWTP Type I and Type II were 1,661 and 1,274 mg GAE/L, respectively. Phenols in TW from WWTP Type I of 226 mg GAE/L and WWTP Type II of 105 mg GAE/L were determined. The biogas capture system was the main cause of the action in the WWTP Type II that reduced phenols. The gallic acid, 4-hydroxybenzoic acid, caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, protocatechuic acid, phenol, *p*-coumaric acid and ferulic acid in the POME of WWTP Type I were 726, 229, 218, 105, 69, 32 and 30 mg/L, respectively. The amounts of gallic acid of 34 mg/L, protocatechuic acid of 6 mg/L and 4-hydroxybenzoic acid of 6 mg/L were observed in the TW. For the WWTP Type II, the gallic acid, 4-hydroxybenzoic acid, caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, phenol, protocatechuic acid, *p*-coumaric acid and ferulic acid in POME were 566, 184, 136, 99, 71, 16 and 16 mg/L, respectively. The amount of gallic acid of 20 mg/L was detected in the TW. At present, the TW is used for oil palm plantations; there is no grey water footprint from the discharging of the TW. When POME is treated to meet standards and TW is discharged to the natural waterways, the grey water footprint calculated by phenols in the TW from the final pond was 364 m<sup>3</sup>/ton crude palm oil, on average. A hydraulic loading rate of 3 and 5 cm/week was used in the land treatment. The TW from the final pond of WWTP Type II contained phenols to the amount of 29 mg/L (4-Aminoantipyrine method) and 162 mg GAE/L (Folin-Ciocalteu method) which were applied daily and weekly to soil columns. The best conditions observed were at the hydraulic loading rate of 5 cm/week, daily feeding, and with non-sterilized soil and treated wastewater (DFNS). The DFNS column could reduce phenols by 95.3±2.4% and 98.3±1.4% when determined by the 4-Aminoantipyrine and the Folin-Ciocalteu methods, respectively.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 กรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ปาล์มน้ำมัน	6
2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	6
2.3 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	10
2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	11
2.4.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อแอนแอโรบิก (anaerobic pond)	11
2.4.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ (biogas capture system)	12
2.5 สารประกอบฟีนอล (phenols)	14
2.5.1 สารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	16
2.5.2 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	18
2.5.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฟีนอล	23
2.6 เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (grey water footprint)	25
2.7 การบำบัดโดยดิน (land treatment)	27
2.7.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียบนดิน	28
กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR)	28
กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI)	28
กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process, OF)	28
2.7.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยดิน	33
กลไกทางกายภาพ (physical mechanism)	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การกรอง (filtration)	33
กลไกทางเคมี (chemical mechanism)	33
การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)	33
การดูดติดผิว (adsorption)	34
การดูดซับด้วยดิน	34
การตกผลึก (precipitation)	34
กลไกทางชีวภาพ (biological mechanism)	34
2.7.3 กลไกการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลจากการบำบัดน้ำเสียโดยดิน	35
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 การลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	38
3.1 บทนำ	38
3.2 วิธีการทดลอง	40
3.2.1 การเก็บตัวอย่างและจุดเก็บตัวอย่าง	40
3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย	41
การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล	41
การจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง HPLC	42
การคำนวณค่าเกย์วอเตอร์ฟูดพรินต์ของสารประกอบฟีนอลจากน้ำในบ่อสุดท้าย	43
3.2.3 วัสดุและอุปกรณ์	45
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย	45
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 ผลการทดลอง	46
3.3.1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	46
3.3.2 ค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	53
สี	53
บีโอดี	58
ซีโอดี	58
ทีโอดี	60
3.3.3 สารประกอบฟีนอล ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	62



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	66
3.3.5 การคำนวณค่าแก็รวอเตอร์พุตพรินต์ของสารประกอบฟีนอลจากน้ำทิ้งบ่อสุดท้าย	78
3.4 สรุปผลการทดลอง	83
บทที่ 4 การลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน	85
4.1 บทนำ	85
4.2 วิธีการทดลอง	86
4.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน	86
การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน	87
การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในดินที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอล	87
4.2.2 การออกแบบชุดการทดลอง	87
4.2.3 การเก็บและพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดทดลองคอลัมน์ดิน	89
การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล	90
การจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง HPLC	91
4.2.4 วัสดุและอุปกรณ์	92
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย	92
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดิน	92
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	92
วัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างชุดการทดลอง	92
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	92
4.3 ผลการทดลอง	94
4.3.1 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	94
4.3.2 ผลการศึกษาการบำบัดโดยดิน	95
ค่าพีเอช	95
ค่าซีไอดี	97
ค่าทีไอซี	102
ค่าหน่วยสี	106
ค่าสารประกอบฟีนอล	109

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำและดิน	115
ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน	117
ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน	118
4.3.3 ผลการศึกษาคุณภาพดินก่อนและหลังการทดลอง	121
ลักษณะเนื้อดิน	121
ค่าพีเอชในดิน	122
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน	122
อินทรีย์วัตถุในดิน	123
ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน	124
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน	125
4.3.4 แนวทางในการประยุกต์ใช้งานในสวนปาล์มน้ำมัน	128
4.4 สรุปผลการทดลอง	129
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	129
5.1 สรุปผลการทดลอง	130
5.2 ข้อเสนอแนะ	130
บรรณานุกรม	131
ภาคผนวก	143
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์	144
ภาคผนวก ข กราฟความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์	151
ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน	154
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์น้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ	159
ภาคผนวก จ มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	165
ประวัติผู้เขียน	171

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ลักษณะน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	11
2-2	คุณภาพน้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	13
2-3	คุณลักษณะของสารประกอบฟีนอลที่ทำการศึกษา	20
2-4	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแต่ละประเภท	33
3-1	ที่ตั้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและชนิดระบบบำบัดน้ำเสีย	41
3-2	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย	42
3-3	ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง	47
3-4	ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา	50
3-5	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	56
3-6	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	65
3-7	ประสิทธิภาพการบำบัดชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	76
3-8	ค่าเกรียวเตอร์ฟลูทพรินต์ของสารประกอบฟีนอลคำนวณโดยไม่คิดการป็นส่วนค่าเกรียวเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์ร่วมอื่นๆ	79
3-9	ค่าเกรียวเตอร์ฟลูทพรินต์ของสารประกอบฟีนอลคำนวณโดยคิดการป็นส่วนค่าเกรียวเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์ร่วมอื่นๆ	80
4-1	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะดิน	86
4-2	ปริมาณน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ทุกวันและอาทิตย์ละครั้ง	88
4-3	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดทดลองคอลัมน์ดิน	90
4-4	คุณภาพน้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	94
4-5	จำนวนเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดิน	116
4-6	ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในตัวอย่างดินก่อนและหลังการทดลองที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอล	117
4-7	ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน	118
4-8	ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน	119

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-9	ลักษณะเนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง	121
4-10	ค่าพีเอชในดินก่อนและหลังการทดลอง	122
4-11	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินก่อนและหลังการทดลอง	123
4-12	อินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการทดลอง	124
4-13	ไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการทดลอง	124
4-14	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการทดลอง	125
4-15	เกณฑ์การบำบัดที่เหมาะสมของระบบบำบัดโดยดินโดยใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดของ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	127
ง-1	ค่าพีเอชของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ	159
ง-2	ค่าหน่วยสีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ	160
ง-3	ค่าซีไอดีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ	161
ง-4	ค่าทีไอซีของน้ำออกจากระบบ	162
ง-5	ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4- aminoantiptrine	163
ง-6	ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteau	164
จ-1	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	165
จ-2	มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	167

## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1-1	กรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย	5
2-1	แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกที่เป็นแบบมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มดิบ	7
2-2	ตัวอย่างโครงสร้างของมอนอไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols)	15
2-3	ตัวอย่างโครงสร้างของไดไซคลิกฟีนอล (dicyclic phenols)	15
2-4	ตัวอย่างโครงสร้างของโพลีไซคลิกฟีนอล (polycyclic phenols) หรือ โพลีฟีนอล (polyphenol)	16
2-5	ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction)	17
2-6	การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่มีอากาศ	23
2-7	การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่ไม่มีอากาศ	24
2-8	กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR)	29
2-9	กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI)	30
2-10	กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process, OF)	31
2-11	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาวะบรรทุกของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ	32
3-1	ค่าสี (A) บีโอดี (B) ซีโอดี (C) และทีโอดี (D) ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	54
3-2	ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine (A) และวิธี Folin-Ciocalteu (B) ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	62
3-3	โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย (A) และน้ำจากบ่อสุดท้าย ที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่มีระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพ (B)	67
3-4	โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย (A), น้ำเสียก่อนเข้าระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพ (B), น้ำที่ออกจากระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพ (C) และน้ำจากบ่อสุดท้าย (D) ที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	68
3-5	ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (A) gallic acid; (B) Protocatechuic acid; (C) 4-hydroxybenzoic acid; (D) caffeic acid+syringic acid+vanillic acid; (E) <i>p</i> -coumaric acid; (F) ferulic acid; (G) phenol	70

### รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-6	ความเข้มข้นและการกระจายตัวของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC	75
4-1	ชุดทดลองคอลัมน์ดิน	89
4-2	ค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	96
4-3	ค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	98
4-4	ค่าทีโอซีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	103
4-5	ค่าหน่วยสีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	107
4-6	ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	110
4-7	ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	113
ก-1	กราฟมาตรฐานของสารฟีนอลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine	144
ก-2	กราฟมาตรฐานของของกรดแกลลิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ที่ความเข้มข้น 0-20 (A) และ 0-200 (B) mg/L	144
ก-3	กราฟมาตรฐานของสารแพลททินัมโคบอลต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สี	145
ก-4	กราฟมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์ทีโอซีที่ระดับความเข้มข้น 0-50 mg/L (A); 0-100 mg/L (B); 0-500 mg/L (C)	146
ก-5	กราฟมาตรฐานของ gallic acid (A); protocatechuic acid (B); 4-hydroxybenzoic acid (C); caffeic acid (D); syringic acid (E); vanillic acid (F); <i>p</i> -coumaric acid (G); ferulic acid (H); phenol (I)	147
ข-1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีและทีโอซีของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	151
ข-2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	152

### รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข-3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีและทีโอซีของน้ำผ่านการบำบัดโดยดิน	152
ข-4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน	153
ค-1	ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	154
ค-2	ประสิทธิภาพการลดค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	155
ค-3	ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	156
ค-4	ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	157
ค-5	ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)	158

### คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์

POME	คือ	Palm oil mill effluent
IBS	คือ	Influent wastewater into biogas capture system
EBS	คือ	Effluent water from biogas capture system
TW	คือ	Treated wastewater
In TWNS	คือ	Influent treated wastewater, non-sterilized into land treatment system (น้ำที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อและนำมารดคอกสัตว์)
In TWS	คือ	Influent treated wastewater, sterilized into land treatment system (น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อและนำมารดคอกสัตว์)
DFS	คือ	Daily feeding, sterilized soil and treated wastewater
WFS	คือ	Weekly feeding, sterilized soil and treated wastewater
DFNS	คือ	Daily feeding, non-sterilized soil and treated wastewater
WFNS	คือ	Weekly feeding, non-sterilized soil and treated wastewater



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคใต้ของประเทศไทย อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย การปลูกปาล์มน้ำมัน การสกัดน้ำมันปาล์มดิบ การกลั่นน้ำมันปาล์มโอเลอิน และการผลิตไบโอดีเซล ภาคใต้ของประเทศไทยมีการปลูกปาล์มน้ำมันและการสกัดน้ำมันปาล์มดิบเป็นหลัก ปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ปลูกมากในจังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ ชุมพร นครศรีธรรมราช พังงา และตรังตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) ปัจจุบันได้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2556 พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่เก็บเกี่ยวผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 3.92 ล้านไร่ ผลผลิตปาล์มสด 12.81 ล้านตันต่อปี ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ 2.00 ล้านลิตรต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) ผลิตภัณฑ์หลักจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ ส่วนผลิตภัณฑ์ร่วม ได้แก่ กะลา เมล็ดในปาล์ม หรือน้ำมันเมล็ดในปาล์ม และกากเมล็ดในปาล์ม ส่วนวัสดุเศษเหลือ ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใย และกากตะกอนดีเคนเตอร์ การสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกใช้น้ำในปริมาณสูงโดยมีค่าเฉลี่ย 4.59 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2013) หรือ 0.5-1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของทะลายปาล์มสด (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2554) การสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกถือเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่ง น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตมีปริมาณเฉลี่ย 0.64 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด หรือ 3.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2012) น้ำเสียดังกล่าวมีค่าความสกปรกสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า ซีไอดี บีไอดี ไชมันและน้ำมัน ของแข็งทั้งหมด และมีลักษณะสีของน้ำที่มีสีน้ำตาลแดง (Zahangir *et al.*, 2009) มีสารอินทรีย์ต่างๆ ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง เช่น รงควัตถุพวกแอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน ลิกนิน แทนนิน และโพลีฟีนอล (Hartley, 1977; Poh *et al.*, 2010; Madaki *et al.*, 2013) ซึ่งถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำจากการทำลายเซลล์ผลปาล์ม นอกจากนี้ยังมีสารประกอบพวกโพลีฟีนอลิก โพลีแอลกอฮอล์ งานวิจัยที่ผ่านมาตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าสูงถึง 1,206 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อลิตร (Chantho *et al.*, 2013)

สารประกอบฟีนอล (phenolic compound) เป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่พบได้ในผลปาล์มเมื่อเซลล์ผลปาล์มถูกทำลายจากกระบวนการผลิต สารประกอบฟีนอลถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต สารกลุ่มนี้เป็นกลุ่มสารที่กำจัดยาก เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อย (Marco *et al.*, 2007; Asses *et al.*, 2009; Cardinali *et al.*, 2010; Torrecilla, 2010) เมื่อสารประกอบฟีนอลเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดกลิ่น รสชาติของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ ส่งผลต่อความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ (Cardinali *et al.*, 2010) และทำให้ระบบนิเวศวิทยาทางน้ำเสื่อมโทรมลง การปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลเป็นผลให้ปริมาณ

สารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้น (Buondonno *et al.*, 2014) หากแหล่งน้ำนั้นเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำประปาซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนและอาจก่อให้เกิดกลุ่มของสารก่อมะเร็งในน้ำประปา ได้แก่ สารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) สารฮาโลอะซิติกอะซิด (haloacetic acids, HAAs) และ สารฮาโลอะซิโตไนไตร (haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น (Musikavong *et al.*, 2005) งานวิจัยที่ผ่านมารวบรวมพบปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเป็น 30-74 มิลลิกรัมต่อลิตร (พนิดา โต้ะสุ, 2556 และ อนุกุล เกียรติขวัญบุตร, 2556)

ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน กำหนดให้น้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) โดยค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลในมาตรฐานน้ำทิ้งวิเคราะห์จากผลรวมของปริมาณอนุพันธ์ของสารฟีนอลทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบต้องบำบัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ภายในโรงงาน ระบบการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (i) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรซึ่งประกอบด้วยบ่อแอนแอโรบิก บ่อแพคคัลเททิฟ และบ่อป่ม โดยระบบนี้ไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ (ii) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบปิดที่มีการรวบรวมก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อปรับเสถียร โดยระบบดังกล่าวประกอบด้วย บ่อแอนแอโรบิก บ่อก๊าซชีวภาพ และบ่อปรับเสถียร ปัจจุบันน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 ประเภทถูกนำไปใช้รดสวนปาล์ม น้ำมันของโรงงาน

เพื่อให้การสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความมั่นคงและยั่งยืน ตลอดจนสามารถรองรับมาตรการประเมินด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ ในระดับสากลได้ เช่น การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งเป็นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ และการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ซึ่งทำการประเมินการใช้น้ำทางตรงและทางอ้อมในการผลิตผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความจำเป็นต้องประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าการใช้น้ำที่เกิดขึ้นจากการผลิต ตลอดจนหาแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของการประเมินและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาได้ดำเนินการแล้วเสร็จ (Kaewmai *et al.*, 2012, 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเป็น 935 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2013) แต่การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ โดยเฉพาะการประเมินค่าการใช้น้ำในการเจือจางสารพิษเพื่อให้ได้น้ำสะอาด หรือ เกรย์วอเตอร์ (grey water) มีการดำเนินการค่อนข้างน้อย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ในน้ำทิ้งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แก่ ค่าบีโอดี (เพชรลดดา สัตยากุล, 2557) ซึ่งมีค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเป็น 20 mg/L ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของสารประกอบฟีนอลที่มีค่าต่ำถึง 1 mg/L ดังนั้นการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยใช้ค่าสารประกอบฟีนอลจึงมีความสำคัญ

ที่สามารถใช้บ่งชี้ปริมาณน้ำจืดที่ต้องการ เพื่อการเจือจางน้ำที่ผ่านการบำบัดให้มีค่าเทียบเท่ากับค่ามาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินที่รองรับน้ำทิ้งดังกล่าว

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้ง 2 ประเภทไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากมีสีที่ไม่พึงประสงค์ และค่าซีไอดีสูงกว่ามาตรฐาน ปัจจุบันจึงมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมัน รดต้นไม้ภายในโรงงาน หรือปล่อยให้มีการระเหยไปเองตามธรรมชาติ การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายมาประยุกต์ใช้ในการรดสวนปาล์มเป็นวิธีการบำบัดโดยดิน (land treatment) และจัดเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งเป็นวิธีการทางธรรมชาติโดยอาศัยพืชช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียไปใช้ในการเจริญเติบโตตลอดจนอาศัยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการลดปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายด้วยวิธีการบำบัดโดยดิน การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณสารประกอบฟีนอล และการจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ตลอดจนการลดสารประกอบฟีนอลโดยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มมีการดำเนินการค่อนข้างน้อย ทำให้ขาดองค์ความรู้ในเรื่องดังกล่าว องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้จึงเป็นองค์ความรู้ใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรและระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
2. เพื่อจำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
3. เพื่อประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ทางตรงต่อผลิตภัณฑ์หลักที่ผลิตได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ค่าสารประกอบฟีนอลเป็นค่ามาตรฐาน
4. เพื่อศึกษาการลดสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีกรอบแนวคิดดังแสดงในรูปที่ 1-1 และมีขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

- ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ทำการศึกษา ประกอบด้วยโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรจำนวน 1 โรงงาน และโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพจำนวน 8 โรงงาน

- จุดเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร มี 2 จุด ได้แก่ 1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต และ 2) น้ำบ่อสุดท้าย ส่วนจุดเก็บตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพมี 4 จุด ได้แก่ 1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต 2) น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ 3) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพ และ 4) น้ำบ่อสุดท้าย

- วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย ได้แก่ (i) สี (ii) พีเอช (iii) บีโอดี (iv) ซีโอดี (v) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (vi) ความเป็นด่าง (vii) ไซมันและน้ำมัน (viii) ของแข็งแขวนลอย (ix) ของแข็ง

ทั้งหมด (x) ของแข็งระเหยง่าย (xi) ทีเคเอ็น (xii) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (xiii) ทีโอซี (xiv) ปริมาณสารประกอบฟีนอล และ (xv) ลักษณะของสารประกอบฟีนอล

- การตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลโดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดำเนินการ 2 วิธี ได้แก่ 1) วิธี 4-aminoantipyrine โดยใช้สารฟีนอลเป็นสารมาตรฐาน หน่วยที่ใช้วิเคราะห์ คือ mg/L และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 nm (APHA, AWWA and WEF, 2005) 2) วิธี Folin-ciocalteau โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 nm โดยหน่วยที่วิเคราะห์ได้ คือ mg GAE/L โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, (2011)

- คำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยใช้ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียในแต่ละระบบของโรงงานที่ทำการศึกษา

- การทดลองการบำบัดโดยดินดำเนินการโดยใช้ชุดทดลองคอลัมน์ดิน จำนวน 8 คอลัมน์ การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) คอลัมน์ชุดควบคุม จำนวน 4 คอลัมน์ ทดลองโดยนำตัวอย่างดินและน้ำไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อ เพื่อศึกษาถึงการลดลงของสารประกอบฟีนอลด้วยการดูดซับโดยดินในกรณีที่ไม่มีการเติมจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้อง 2) คอลัมน์ชุดทดลอง จำนวน 4 คอลัมน์ ซึ่งเป็นชุดที่ทำการทดลองตามปกติ (ไม่มีการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างดินและน้ำ) รดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบผ่านคอลัมน์ ที่อัตราการรดน้ำ 2 อัตรา ได้แก่ 3 และ 5 cm/week โดยแต่ละอัตราการรดมีการรดน้ำ 2 แบบ คือ 1) รดน้ำผ่านคอลัมน์ทุกวัน และ 2) รดน้ำผ่านคอลัมน์อาทิตย์ละครั้ง

- น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ซีโอดี และสารประกอบฟีนอลอาทิตย์ละครั้ง การวิเคราะห์ค่าทีโอซีดำเนินการทุก 2 สัปดาห์ สำหรับการหาชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอล วิเคราะห์ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์และสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด ในคอลัมน์ชุดทดลองได้เพิ่มการวิเคราะห์ในสัปดาห์ที่มีค่าสารประกอบฟีนอลน้อยที่สุดจากการตรวจวัดน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteau

- สถานที่ทำการทดลอง ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, ห้องปฏิบัติการคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

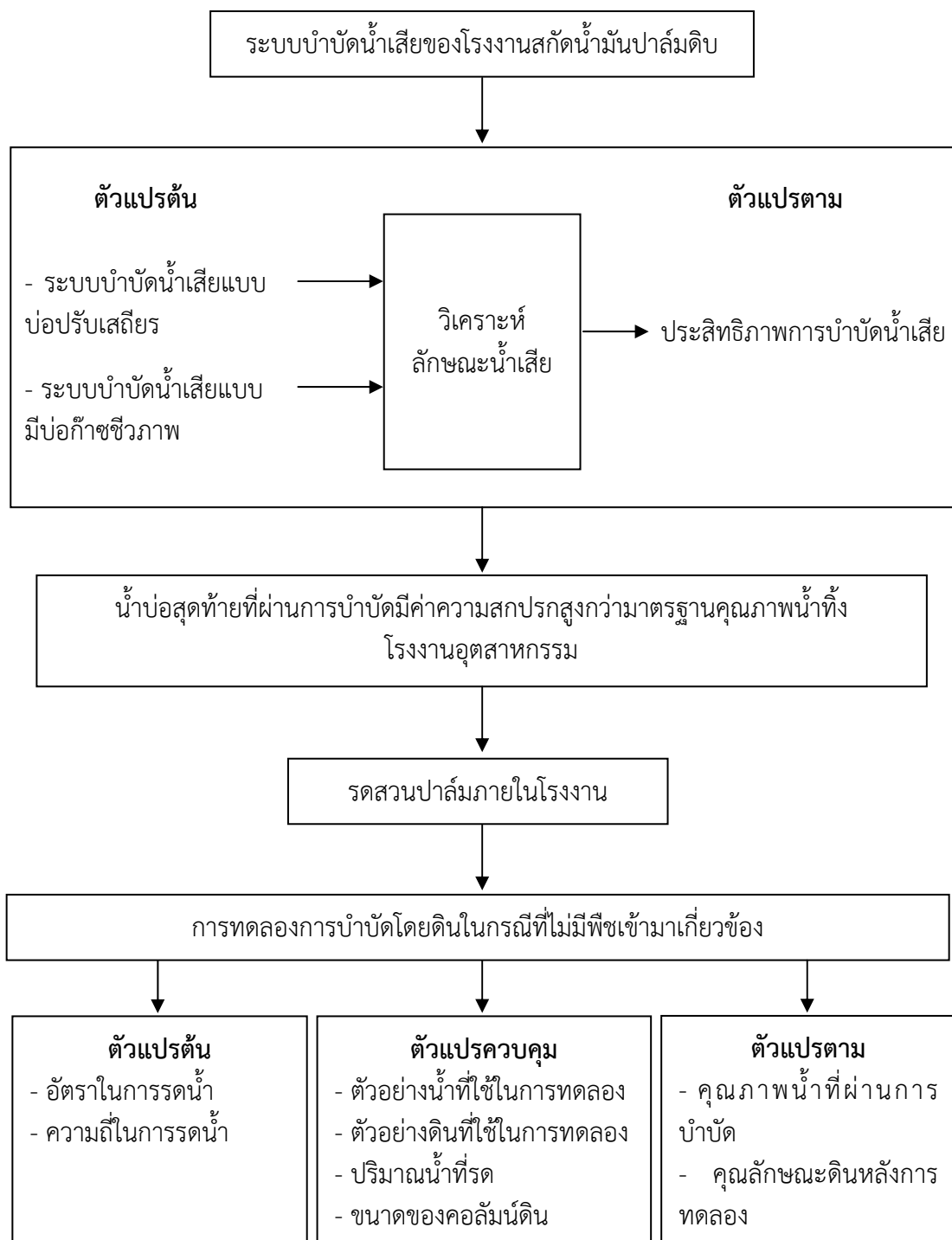
1. ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร และระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2. ทราบถึงอนุพันธ์ของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

3. ได้มาซึ่งค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากของอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

4. ทราบถึงค่าการลดลงของสารฟีนอลจากกระบวนการบำบัดโดยดิน

### 1.5 กรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย



รูปที่ 1-1 กรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปาล์มน้ำมัน (oil palm)

ปาล์มน้ำมัน (ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Elaeis guineensis* Jacq.) เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด หรือประมาณ 0.6 - 0.8 ตัน/ไร่/ปี มีต้นทุนการผลิตและราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายทั้งในสินค้าอุปโภคและบริโภค ด้วยเหตุนี้จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ในการปลูกปาล์มมากขึ้น ปาล์มน้ำมันเหมาะกับสภาพอากาศร้อนชื้น บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย บริเวณพื้นที่ที่ปลูกปาล์มมากที่สุด คือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ ชุมพร นครศรีธรรมราช พังงา และตรังตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556)

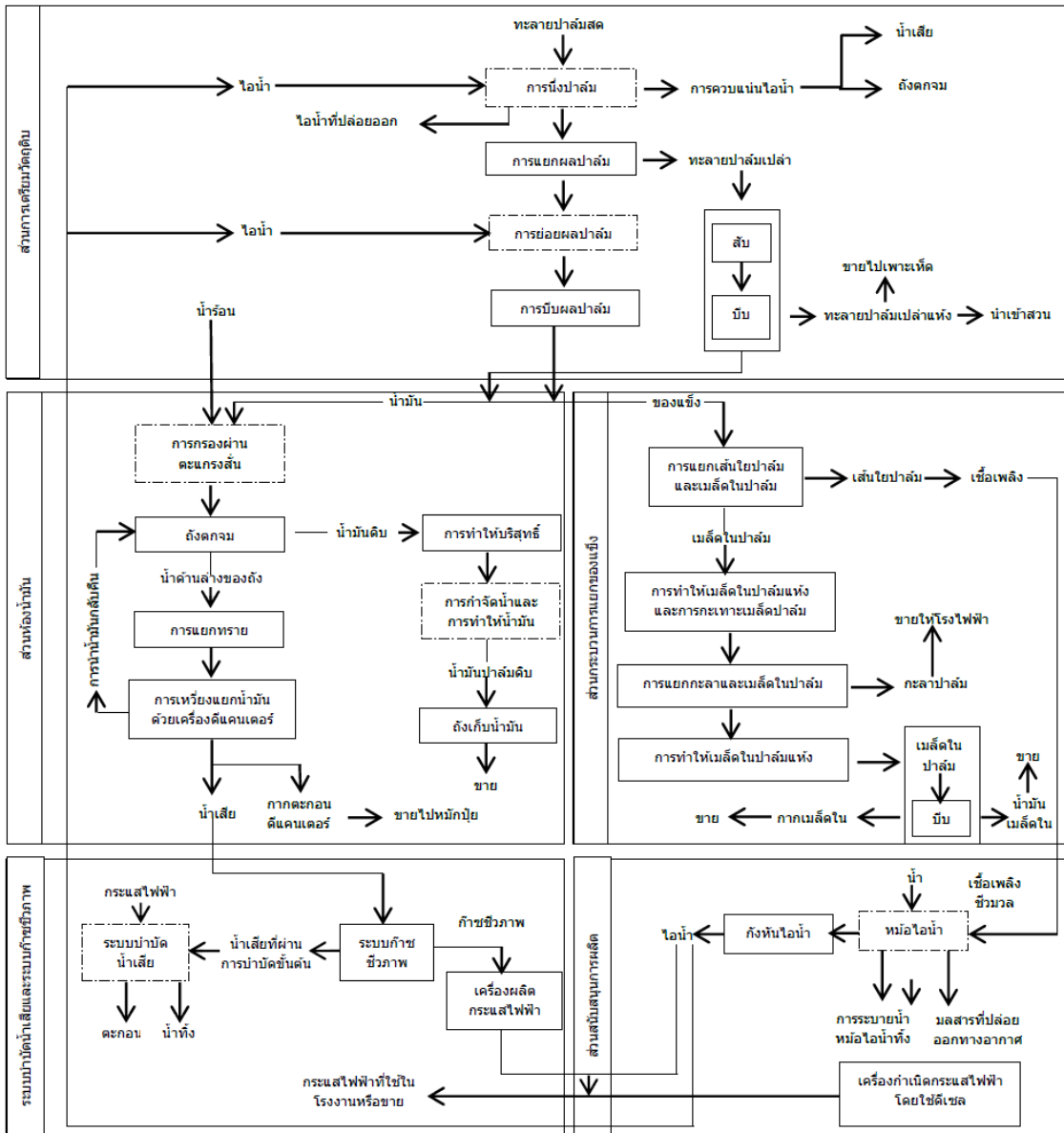
#### 2.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีกระบวนการผลิต จำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- การผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบที่เข้าสู่โรงงานจะเป็นผลปาล์มร่วงและผลปาล์มสดที่เป็นทะเลาะ ซึ่งจะไม่มีการใช้น้ำในการผลิต แต่จะมีการใช้พลังงานสูงเพื่อใช้กับเครื่องจักรโดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานจากไบโอดีเซล

- การผลิตแบบมาตรฐาน/แบบเปียก วัตถุดิบที่เข้าสู่โรงงาน คือ ผลปาล์มสดที่ถูกตัดมาจากสวนซึ่งทางโรงงานปลูกเอง หรือมาจากการรับซื้อจากสวนภายนอก โรงงานที่มีการผลิตแบบนี้ต้องใช้น้ำ ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่จะใช้น้ำผิวดินที่สูบมาจากคลอง หรือแม่น้ำในบริเวณใกล้ๆ โรงงาน เพื่อใช้ในกระบวนการผลิต สำหรับด้านพลังงานในกลุ่มของโรงงานเหล่านี้จะใช้ของเสีย เช่น ใยปาล์ม กะลาปาล์ม เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาสำหรับผลิตไอน้ำ

วิธีการที่เหมาะสมที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ในปริมาณมากและให้ผลผลิตในรูปน้ำมันปาล์มที่มีคุณภาพและเป็นวิธีที่ใช้กันมาก คือ การผลิตแบบเปียกโดย รูปที่ 2-1 แสดงแผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกที่เป็นแบบมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 2-1 แผนผังกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกที่เป็นแบบมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มดิบ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2549)

หลักการของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ คือ การสกัดน้ำมันจากผลปาล์มโดยใช้ไอน้ำและเครื่องอัด (pressing machine) น้ำมันปาล์มที่ได้จะถูกนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยการแยกน้ำมันโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกในการแยกน้ำมันปาล์มซึ่งรายละเอียดของกระบวนการผลิตมีดังต่อไปนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

1. การรับและการเก็บหลายปาล์มสด เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไขมันอิสระจากเอนไซม์ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในส่วนเนื้อชั้นกลางของผลปาล์ม ควรนำหลายปาล์มสดเข้าสู่กระบวนการผลิตภายใน 72 ชั่วโมง โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสดมีกรดไขมันอิสระประมาณ

1% หากทั้งผลปาล์มไวนานปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีปริมาณและคุณภาพลดลง

2. การนึ่งปาล์ม มีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งเอนไซม์ตามธรรมชาติ ทำให้ขี้ผลปาล์มนิ่มและหลุดร่วงออกจากทะเลาะปาล์มได้ง่าย แล้วยังทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มยุบซึ่งจะง่ายต่อการสกัดน้ำมัน โดยการนึ่งปาล์มจะทำในหม้อนึ่ง (autoclave) ที่มีความจุประมาณ 20-30 ตันทะเลาะปาล์ม และการนึ่งจะใช้ไอน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 3.1 บาร์ ป้อนเข้าสู่หม้อนึ่งอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เวลาประมาณ 90 นาที

3. การแยกผลปาล์ม ทะเลาะปาล์มที่ผ่านการนึ่งถูกนำเข้าสู่เครื่องแยกแบบหมุน (rotary drum thresher) เพื่อแยกผลปาล์มออกจากทะเลาะปาล์ม ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดทะเลาะปาล์มเปล่าที่สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์และวัสดุปรับปรุงดินได้ บางโรงงานได้ทำการบีบทะเลาะปาล์มเปล่าเพื่อลดความชื้นในทะเลาะปาล์ม แล้วยังนำไปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตไอน้ำและหรือกระแสไฟฟ้า

4. การย่อยผลปาล์ม ผลปาล์มที่แยกออกจากทะเลาะปาล์มแล้วจะถูกนำเข้าสู่เครื่องย่อยเพื่อเปลี่ยนผลปาล์มให้อยู่ในรูปของปาล์มที่ผ่านการย่อยที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous oily mash) โดยมีการป้อนน้ำร้อนเข้าสู่ขั้นตอนนี้เพื่อช่วยทำให้ปาล์มเป็นเนื้อเดียวกัน

5. การบีบผลปาล์ม เป็นขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์มที่ผ่านการย่อยแล้ว น้ำมันที่สกัดออกมาได้จะนำเข้าสู่ส่วนของการทำให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ในขณะที่ส่วนของแข็งซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยปาล์มและเมล็ดปาล์มจะผ่านการแยกอีกครั้งหนึ่ง

6. การทำให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

6.1 การกรองน้ำมันปาล์มดิบด้วย vibrating screen ซึ่งจะทำให้สิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ เช่น สิ่งเจือปนเส้นใยปาล์ม และชิ้นส่วนของกะลาปาล์มออกจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยขั้นตอนนี้จะมีการเติมน้ำร้อนให้แก่ น้ำมันปาล์มดิบเพื่อปรับปรุงขั้นตอนการแยก น้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการกรองนั้นยังคงมีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กและน้ำปะปนอยู่ พื้นผิวที่กว้างของเครื่องกรองจะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและอากาศ ซึ่งส่งผลให้น้ำมันมีคุณภาพลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

6.2 การแยกของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำมัน เพื่อทำให้ได้น้ำมันที่มีสัดส่วนของน้ำมัน 90% และน้ำ 10% โดยกระบวนการแยกน้ำและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำมันปาล์มทำในถังตกจม (settling tank) น้ำมันปาล์มดิบจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยใช้ไอน้ำร้อนหรือใช้ขดลวดที่ทำให้ร้อนโดยใช้ไอน้ำร้อน อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้มีประสิทธิภาพเพียง 50% เท่านั้น จึงส่งผลให้น้ำมันปาล์มยังคงมีของแข็งแขวนลอย หรือทำให้กากตะกอนมีปริมาณเจือปนอยู่สูงในน้ำมันปาล์ม นอกจากนี้ระยะเวลาที่น้ำมันอยู่ในถังตกจมนานและอุณหภูมิที่ใช้สูงจะทำให้ น้ำมันปาล์มมีคุณภาพลดลง ดังนั้นเพื่อที่เพิ่มปริมาณผลผลิต บางโรงงานจึงได้มีการใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าถังตกจม ซึ่งได้แก่ เครื่องแยกแบบเซ็นตริฟิวจ์ หรือดีแคนเตอร์ จากนั้นจะมีการรวบรวมน้ำมันที่ลอยอยู่ด้านบนของถังตกจมโดยใช้ระบบกรวยและนำเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ต่อไป ของเหลวด้านล่างของถังแยกนั้นจะไหลลงสู่ถังกากตะกอนและจะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการแยกน้ำมันกลับคืนต่อไป



6.3 การทำให้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (purification) ขั้นตอนนี้จะมีการแยกของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มที่มาจากส่วนบนของถังตกจมจะรวมเข้ากับน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนการแยกน้ำมันที่นำกลับได้จากส่วนล่างของถังตกจม ซึ่งทำให้ได้ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบรวมประมาณ 163 กิโลกรัมต่อหนึ่งตันของทะลายปาล์มสด เครื่องเหวี่ยงแยกจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนนี้

6.4 การกำจัดน้ำและการทำให้น้ำมันปาล์มเย็นลง น้ำมันปาล์มดิบที่มีไอน้ำเจือปนจะผ่านเข้าสู่ระบบระเหยสุญญากาศ เพื่อที่จะให้ได้น้ำมันปาล์มที่ไม่มีน้ำเจือปนและจะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำมันสำหรับขายให้กับโรงกลั่นน้ำมันพืชบริสุทธิ์ต่อไป

7. การนำน้ำมันปาล์มกลับคืน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำมันกลับคืนและลดภาวะความสกปรกของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากถังตกจมนี้ จะมีปริมาณน้ำมันเจือปนอยู่ถึง 14 % นอกจากนี้ ยังมีสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยและที่ละลายอยู่ในน้ำมันเจือปนอยู่ในปริมาณสูง และสารที่ละลายในน้ำได้ นอกจากนี้ในส่วนที่เป็นของเหลวยังประกอบไปด้วยเส้นใยปาล์มและทราย

7.1 การแยกทราย ขั้นตอนการแยกทรายเป็นการทำให้กากตะกอนบริเวณก้นถังตกจมมีความสะอาดระดับหนึ่งโดยวิธี Microstrainers/Hydrocyclones ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เครื่องดีแคนเตอร์ ดังนั้นการแยกทรายจึงมีขึ้นเพื่อที่จะป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแก่เครื่องมือในขั้นตอนต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องเหวี่ยงแยก ซึ่งจะเป็นการป้องกันการอุดตันการทำความสะอาดสะอาดเครื่องแยกทรายเหล่านี้จะทำโดยฉีดน้ำสะอาดเข้าไปเพื่อไล่ของแข็งที่สะสมอยู่ภายในเครื่องออกมา ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำประมาณ 5 ลิตรต่อหนึ่งตันของทะลายปาล์มสด

7.2 การแยกน้ำมันโดยการเหวี่ยงแยกโดยเครื่อง ดีแคนเตอร์-เซพพาเรเตอร์ การแยกน้ำมันออกจากกากตะกอนของถังตกจม มีวัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำมันที่เจือปนอยู่ในกากตะกอนกลับเข้าสู่ถังแยกน้ำมันอีกครั้งกากตะกอนและ/หรือน้ำเสียจากขั้นตอนการแยกทรายจะเข้าสู่ขั้นตอนการแยกน้ำมันนี้ ซึ่งจะแยกเป็น 3 ส่วน คือ น้ำมันที่นำกลับคืนเข้าถังตกจม กากตะกอนดีแคนเตอร์ และน้ำเสียซึ่งส่งไปบำบัดที่ระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

8. การนำเมล็ดปาล์มกลับคืน ในส่วนของแข็งที่ได้จากการบีบผลปาล์มจะประกอบไปด้วยเส้นใยปาล์ม และเมล็ดปาล์มซึ่งจะถูกแยกออกจากกัน เส้นใยปาล์มถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับหม้อไอน้ำภายในโรงงานในขณะที่ผลปาล์มจะนำเข้าผ่านกระบวนการแยกอีกครั้งเพื่อนำเมล็ดในออกมา เมล็ดในปาล์มนี้เป็นผลผลิตประเภทหนึ่งของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม กะลาปาล์มนั้นถูกขายเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลให้แก่อุตสาหกรรมอื่นได้ และมีเพียงส่วนน้อยของกะลาปาล์มที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำภายในโรงงาน

9. ระบบสนับสนุนการผลิต ระบบสนับสนุนการผลิตที่สำคัญของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ประกอบด้วย หม้อไอน้ำ ระบบบำบัดน้ำเสีย และระบบบ่อก๊าซชีวภาพ (ระบบบ่อก๊าซชีวภาพจะมีสำหรับบางโรงงานเท่านั้น)

## 2.3 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเกิดจากการใช้น้ำในระหว่างกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมาจาก 5 แหล่งใหญ่ คือ (จุฑารัตน์ หนูสุข, 2546)

1. น้ำเสียจากการนึ่งปาล์ม เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการอบทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำเสียส่วนนี้จะมีน้ำมันอยู่ มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชัน โดยทั่วไปการอบทะลายปาล์มสด 25 ตัน จะมีน้ำนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2-3 ลบ.ม.

2. น้ำเสียจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน น้ำทิ้งส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุดและเป็นน้ำทิ้งที่มีของแข็งแขวนลอยมาก กรณีที่ใช้เครื่องตีแคนเตอร์ ในการแยกน้ำทิ้งจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.35 ลบ.ม./ตันทะลายปาล์มสด และในกรณีที่ใช้เครื่องเซพพาเรเตอร์ จะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.65 ลบ.ม./ตันทะลายปาล์มสด

3. น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เช่น 1) เครื่องแยกกรวดทราย ซึ่งต้องล้างทุกครั้งชั่วโมง โดยใช้น้ำล้างประมาณ 0.05-0.1 ลบ.ม. 2) เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน เมื่อมีการใช้งานไประยะหนึ่งต้องมีการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ ซึ่งมีน้ำเสียเกิดขึ้นครั้งละ 0.2-0.5 ลบ.ม. 3) เครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง ต้องทำการล้างทุกๆ 20-30 นาที ใช้น้ำในการล้างครั้งละ 0.05-0.06 ลบ.ม. และนอกจากนี้ยังต้องล้างทำความสะอาดพื้น ถังพัก และพาชนะต่างๆ อีกด้วย

4. น้ำจากการหล่อเย็นหม้อกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย เป็นน้ำทิ้งที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมากและยังมีความสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่มีการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ซ้ำ

5. น้ำสลัดจ์จากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge) มีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 0.03-0.15 ลบ.ม./ตันทะลายปาล์มสด

น้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน และวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.64 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด หรือ 3.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2012) น้ำเสียส่วนใหญ่มาจากสองขั้นตอน คือ น้ำนึ่งปาล์มหรือน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ (sterilizer-condensate) มีอัตราการเกิดน้ำเสียประมาณ 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด และน้ำทิ้งจากเครื่องตีแคนเตอร์หรือเครื่อง separator ซึ่งมีอัตราการเกิดน้ำเสียระหว่าง 0.48-0.74 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด (ธนารักษ์ พงษ์เมตรา, 2543)

ลักษณะน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังตารางที่ 2-1 เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในปริมาณสูงตลอดจนลักษณะสีในน้ำเสียที่มีสีน้ำตาลแดง ส่งผลให้ไม่สามารถที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ ดังนั้นในปัจจุบันโรงงานได้ดำเนินการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรที่มีบ่อแอนแอโรบิกเรียงต่อกันหลายๆบ่อเป็นอนุกรม และระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้ง 2 ระบบยังคงมีค่าความสกปรกสูงกว่ามาตรฐาน ทางโรงงานจึงได้นำน้ำจากบ่อสุดท้ายไปรดสวนปาล์มของโรงงาน

ตารางที่ 2-1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

พารามิเตอร์	[1]	[2]	[3]	[4]
สี	น้ำตาลแดง	-	10,000	-
พีเอช	4.05-4.62	4.2	4.8	3.5
บีโอดี	50,000-60,000	25,000	52,200	25,545
ซีโอดี	80,500-115,000	50,000	68,341	55,775
กรดไขมันระเหยง่าย (ในรูปกรดอะซิติก)	3,100-5,800	-	-	-
ความเป็นด่าง (ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	68-200	-	-	-
ไขมันและน้ำมัน	16-2,500	6,000	7,250	8,020
ของแข็งแขวนลอย	18,500-52,000	18,000	30,933	18,479
ของแข็งทั้งหมด	49,000-88,500	40,500	57,650	-
ของแข็งระเหยง่าย	42,000-82,000	34,000	-	-
ทีเคเอ็น	-	-	1,020	-
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	27-61	35	-	36
ไนโตรเจนทั้งหมด	-	750	-	711

หมายเหตุ: ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช และสี, - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ที่มา: [1] พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533); [2] Thani *et al.*, (1999); [3] Chavalparit (2006); [4] Vijayaraghavan *et al.*, (2007)

## 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบไม่มีการเติมสารเคมีชนิดใดลงไปในช่วงกระบวนการผลิต (Zahrim *et al.*, 2009; Poh *et al.*, 2010; Rupani *et al.*, 2010; Rakamthong *et al.*, 2011; Madaki *et al.*, 2013) น้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงไม่มีความเป็นพิษ มีปริมาณของสารอินทรีย์ปนเปื้อนสูง ซึ่งเหมาะแก่การบำบัดโดยใช้วิธีการทางชีวภาพ โดยอาศัยแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเลือกใช้ในปัจจุบัน จำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

### 2.4.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อแอนแอโรบิก (anaerobic pond)

บ่อแอนแอโรบิก บ่อผิ่ หรือบ่อปรับเสถียร ซึ่งเป็นบ่อดินแบบเปิดขนาดใหญ่ จำนวนและขนาดของบ่อบำบัดขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของแต่ละโรงงาน ความลึกบ่อโดยเฉลี่ยประมาณ 2-4 เมตร บ่อแอนแอโรบิกรับน้ำเสียที่มีภาระอินทรีย์ (organic loading rate) สูงหรือมีค่าบีโอดีสูงได้ จนทำให้สาหร่ายและการเติมออกซิเจนที่ผิวหน้าไม่สามารถผลิตและปล่อยออกซิเจนได้ทัน ส่งผลให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนละลายน้ำภายในบ่อ สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายด้วยปฏิกิริยา

เคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดกลิ่นอันเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารประกอบซัลไฟด์ อื่นๆ สารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

ระบบบ่อแอนแอโรบิก เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ง่ายที่สุด ดูแลรักษาได้ง่าย ทำให้ใช้ผู้ควบคุมระบบที่ไม่ต้องมีฝีมือหรือมีความรู้พิเศษมากนัก มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบต่ำเนื่องจากไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรกล และมีค่าการบำรุงรักษาต่ำ ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในน้ำสูงไม่ด้อยไปกว่าระบบอื่นๆ ข้อเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้คือ ต้องใช้พื้นที่มากในการดำเนินการ ซึ่งปัญหาข้างต้นไม่ได้เป็นปัญหาแก่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแต่อย่างใด เนื่องจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีพื้นที่กว้างขวางเพียงพอต่อการสร้างระบบบำบัดดังกล่าว ปัญหาหลักของระบบบำบัดนี้ คือปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นที่เกิดจากการหมักของน้ำเสียจึงเกิดความรำคาญแก่ชุมชนรอบข้างและผู้ที่อยู่จรผ่านในละแวกนั้น (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2550) นอกจากนี้การย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในบ่อภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ขึ้นสู่บรรยากาศ เป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจก (green house gas) ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนมากยิ่งขึ้น (เตือนใจ ปิยง, 2555)

#### 2.4.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ (biogas capture system)

เนื่องด้วยก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก เป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง และมีคุณสมบัติติดไฟได้ ก๊าซชีวภาพจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงาน เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น จึงมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยมีการก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพเพิ่มเติมขึ้นจากระบบบำบัดเดิม ซึ่งมีลักษณะเป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดที่มีการรวบรวมก๊าซชีวภาพเพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ นอกจากนี้จะได้ก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแล้วระบบบำบัดดังกล่าวยังสามารถลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นของน้ำเสียลงได้อีกด้วย

ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย 1) บ่อแอนแอโรบิก ซึ่งรับน้ำเสียจากโรงงานและลดอุณหภูมิของน้ำเสียให้มีค่าที่เหมาะสม 2) บ่อก๊าซชีวภาพ เป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดและมีระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ 3.) บ่อปรับเสถียร รับน้ำเสียจากบ่อก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดด้วยระบบบ่อแอนแอโรบิกหลายๆ บ่อ

เนื่องจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีภาระอินทรีย์สูง จึงมีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ระบบก๊าซชีวภาพจึงถูกนำมาใช้งานเพื่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ก๊าซชีวภาพที่ได้เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digestion) องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ประมาณ 60-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณ 28-38% ก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) และไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) เป็นต้น ประมาณ 2% จากข้างต้นกล่าวได้ว่าก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงโดยให้พลังงานความร้อนได้ถึงประมาณ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร และมีคุณสมบัติติดไฟได้ ก๊าซชีวภาพจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงาน เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น แต่หากไม่มีการนำก๊าซมีเทนดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ ก๊าซมีเทนจะก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน การปล่อยก๊าซมีเทน 1 ตัน เทียบเท่ากับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 ตันเมื่อ

พิจารณาการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (IPCC, 2007) โดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร ผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 12-16 ลูกบาศก์เมตร ก๊าซชีวภาพนี้ได้นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-1.2 หน่วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

น้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (ตารางที่ 2-2) ยังมีค่าความสกปรกสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม จึงไม่สามารถที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ ทางโรงงานจึงนำน้ำจากบ่อสุดท้ายไปรดสวนปาล์ม ต้นไม้ภายในโรงงาน หรือปล่อยให้ระเหยไปตามธรรมชาติแทนการปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ตารางที่ 2-2 คุณภาพน้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

พารามิเตอร์	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ*			มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง**
	บ่อฝั้ง	Covered Lagoon+บ่อฝั้ง	Covered Lagoon+บ่อเติมอากาศ+บ่อฝั้ง	
พีเอช	7.8	8.2	9.0	5.5-9.0
บีโอดี	146	72	60	ไม่เกิน 20
ซีโอดี	1,332	1,110	222	ไม่เกิน 120
ไขมันและน้ำมัน	29,960	12,118	600	ไม่เกิน 5
ทีเคเอ็น	248	230	4	ไม่เกิน 100
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	195	90	2	-
อินทรีย์ไนโตรเจน	53	140	2	-
ไนเตรท-ไนโตรเจน	0.68	0.80	0.56	-
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	28	154	79	-
ของแข็งแขวนลอย	435	253	22	ไม่เกิน 50
ของแข็งทั้งหมด	4,134	3,885	2,533	-
ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด	3,313	3,450	2,244	ไม่เกิน 3,000

หมายเหตุ: ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช, - ไม่ได้กำหนด

ที่มา: \*โรสนา กาชอ และคณะ (2555), \*\*ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539

Kaewmai *et al.*, (2012) ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในประเทศไทยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 14 โรงงาน โดยมี 10 โรงงานใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ส่วน 4 โรงงานใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อแอนแอรอบิก (ระบบบำบัดแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ) จากการศึกษา พบว่าโรงงานที่มีระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ และระบบบำบัดแบบบ่อแอนแอรอบิก มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ยเท่ากับ 1,039 และ 1,484 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ ตามลำดับ ระบบบ่อก๊าซชีวภาพสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 30% เมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบบ่อแอนแอรอบิก ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ดีที่สุดของโรงงานที่ทำการศึกษามีค่า 626 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ระบบบำบัดของโรงงานดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ได้สูง น้ำที่ออกจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพจึงมีค่าความสกปรกตกลง เมื่อถูกนำไปบำบัดด้วยบ่อปรับเสถียร ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักจึงมีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ พบว่า ซีโอดีในน้ำเสีย น้ำก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพ และน้ำบ่อสุดท้าย มีค่า ซีโอดีเฉลี่ยเป็น 76,198 mg/L, 62,890 mg/L, 11,188 mg/L, และ 3,243 mg/L ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดแบบบ่อแอนแอรอบิก และน้ำในบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัด มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 67,453 mg/L และ 2,064 mg/L ตามลำดับ

## 2.5 สารประกอบฟีนอล (phenols)

สารประกอบฟีนอล, ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล หรือสารประกอบฟีนอลิก (phenols, phenolics, phenolic compounds) เป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในพืชแทบทุกชนิดและเป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่พบในผลปาล์ม สารประกอบฟีนอลเป็นตัวแทนของสารในธรรมชาติที่นับว่ามีปริมาณมากชนิดหนึ่ง และมีความสำคัญต่อสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับสี กลิ่นและรส ทำให้ในพืชแต่ละชนิดมีปริมาณและชนิดของสารประกอบฟีนอลแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชนั้นๆ โดยทั่วไปสารประกอบฟีนอลจะมีฤทธิ์เป็นกรด สารประกอบฟีนอลอาจจะเกิดจากการรวมตัว ของหมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลกับสารอื่น เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) และอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์

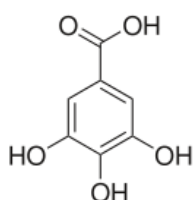
สารประกอบฟีนอลมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-Group) 1 หมู่ หรือมากกว่า 1 หมู่เข้ามาแทนที่และรวมไปถึงอนุพันธ์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งมีการแทนที่ด้วยหมู่เคมีต่างๆ โดยอาจมีรูปแบบเป็นโมเลกุลฟีนอลอย่างง่าย (simple phenolic molecules) มีหมู่แทนที่ต่างๆ มาเกาะจนถึงสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ (highly polymerized compound) สารประกอบในกลุ่มนี้มักเรียกว่าโพลีฟีนอล สารประกอบฟีนอลอย่างง่ายที่สุด คือ สารฟีนอล ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วงและหมู่ไฮดร

อกซิด 1 หมู่ สารประกอบฟีนอลสามารถแบ่งตามจำนวนวงแหวนฟีนอล ได้ 3 ชนิด คือ (Balasundram *et al.*, 2006)

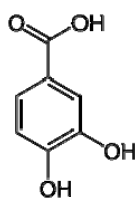
1. โมโนไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols) มีวงแหวนฟีนอลอยู่ 1 วง ที่พบทั่วไปในพืช เช่น tyrosol, gallic acid, vanillic acid และ *p*-hydroxybenzoic acid เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-2

2. ไดไซคลิกฟีนอล (dicyclic phenols) มีวงแหวนฟีนอลอยู่ 2 วง เช่น flavonoids, lignans เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-3

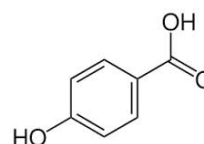
3. โพลีไซคลิกฟีนอล (polycyclic phenols) หรือ โพลีฟีนอล (polyphenol) มีวงแหวนฟีนอล 2 วงขึ้นไป เช่น lignins, melanins, flavolans เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2-4



Gallic acid



Protocatechuic acid



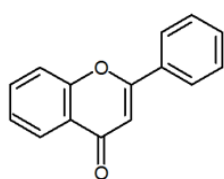
4-hydroxybenzoic acid

รูปที่ 2-2 ตัวอย่างโครงสร้างของโมโนไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols)

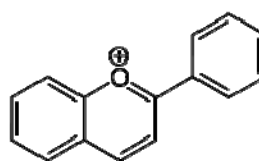
ที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic_acid)

[http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic_acid)



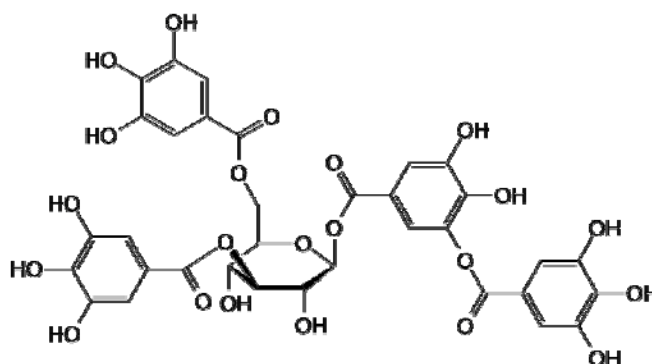
Flavone



Anthocyanidin

รูปที่ 2-3 ตัวอย่างโครงสร้างของไดไซคลิกฟีนอล (dicyclic phenols)

ที่มา: Balasundram *et al.*, (2006)



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างโครงสร้างของโพลีไซคลิกฟีนอล (polycyclic phenols) หรือ โพลีฟีนอล (polyphenol)

ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tannin>

### 2.5.1 สารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

สารประกอบฟีนอล (phenols) เป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่พบในผลปาล์ม จากกระบวนการผลิตเมื่อเซลล์ผลปาล์มถูกทำลาย จากการให้ความร้อนในขั้นตอนการนึ่งปาล์ม และการแตกตัวขององค์ประกอบของสารอินทรีย์จากขั้นตอนการหีบอัด ทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในผลปาล์มถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่สารประกอบฟีนอลจะละลายอยู่ในเฟสของน้ำได้ดีกว่าในเฟสของน้ำมัน เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต

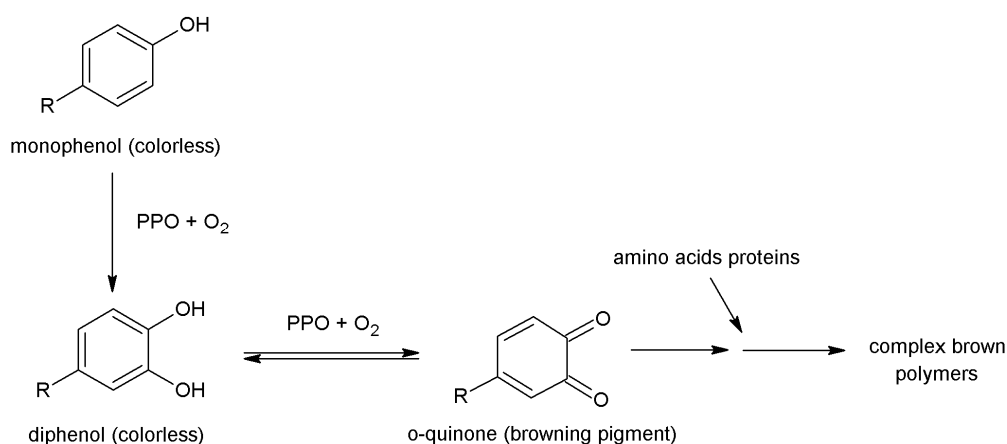
สารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (poly phenol oxidase, PPO) เกิดเป็นสารออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) ซึ่งจะถูกรีดออกซิไดซ์ต่อไปเป็นออร์โท-ควิโนน (o-quinones) ซึ่งมีสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่สีน้ำตาล มีโครงสร้างซับซ้อนและคืนตัวได้ยาก ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติได้ยาก เรียกสารประกอบพอลิเมอร์นี้ว่า เมลานิน (melanin) และเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลักษณะน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีสีน้ำตาลแดง

นอกจากนี้ลักษณะสีน้ำตาลแดงในน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิต ยังเกิดจากสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น รงควัตถุพวกแอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน ลิกนิน และแทนนิน (พูนสุข ประเสริฐสรุทธ์ และคณะ, 2544; Baker and Worgan, 1981; Poh *et al.*, 2010; Madaki *et al.*, 2013) สารอินทรีย์ดังกล่าวเป็นสารที่มีความคงตัวสูง ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติได้ยาก เป็นผลให้ลักษณะสีของน้ำจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเป็นสีแท้หรือสีจริง ซึ่งยากแก่การกำจัด น้ำในบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียยังมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำ (Bunrung *et al.*, 2011; Rakamthong *et al.*, 2011; Mohammed *et al.*, 2014) ซึ่งไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากลักษณะสีน้ำตาลคล้ำในน้ำทิ้งส่งผลให้แหล่งน้ำที่รองรับเกิดทัศนียภาพที่ไม่น่าดู และส่งผลให้การทะลุผ่านของแสงแดดลงสู่ใต้น้ำลดลง ทำให้พืชที่อยู่ในน้ำมีการสังเคราะห์



แสงน้อยลง ประกอบกับปริมาณออกซิเจนที่สัมผัสตรงบริเวณผิวหน้าของผิวน้ำลดลง ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

สารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม เป็นสารที่กำจัดได้ยาก เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ (antimicrobial) และต้านกระบวนการออกซิเดชัน (antioxidation) ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อยลง เมื่อมีความเข้มข้นของสารประกอบนี้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (Marco *et al.*, 2007; Asses *et al.*, 2009; Cardinali *et al.*, 2010; Torrecilla, 2010) เมื่อสารประกอบฟีนอลเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดกลิ่น รสชาติของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ ส่งผลต่อความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ (Cardinali *et al.*, 2010) และทำให้ระบบนิเวศวิทยาทางน้ำเสื่อมโทรมลง สารประกอบฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ การปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลเป็นผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Buondonno *et al.*, 2014) หากแหล่งน้ำนั้นเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา จะเป็นการเพิ่มโอกาสการก่อตัวของสารก่อมะเร็งในน้ำประปาซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนก่อให้เกิดกลุ่มสารก่อมะเร็งในน้ำประปา ได้แก่ สารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) สารฮาโลอะซิติกอะซิด (haloacetic acids, HAAs) และ สารฮาโลอะซิโตไนไตร (haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น (Musikavong *et al.*, 2005)



รูปที่ 2-5 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction)

ที่มา: Sapers and Miller (1993)

จากการศึกษาของ Chantho *et al.*, (2013) พบว่าน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลสูงถึง 1,206 mg GAE/L และการศึกษาของ Kietkwanboot *et al.*, (2013) พบว่าน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบ่อบำบัดเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลเป็น 428 mg GAE/L

จากที่ได้กล่าวในตอนต้น ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ (i) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดเสีย และ (ii) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อบำบัด

ก๊าซชีวภาพพร้อมกับบ่อปรับเสถียร น้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้งสองระบบไม่สามารถที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้เนื่องจากมีค่า ซีโอดี และ สี สูงกว่าค่ามาตรฐาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการมุ่งเน้นที่จะบำบัดค่าซีโอดีและสีในน้ำจากบ่อสุดท้ายให้มีค่าผ่านมาตรฐาน (Vijayaraghavan *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Thong *et al.*, 2008; Zahrim *et al.*, 2009; Chan *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2010; Gobi *et al.*, 2011) มากกว่าที่จะคำนึงถึงพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ จากประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับ ที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน กำหนดให้น้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่ากรณีที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบต้องการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

### 2.5.2 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1) การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine (APHA, AWWA and WEF, 2005) ซึ่งเป็นวิธีที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารประกอบฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำเสียทั้งหมดจะทำปฏิกิริยากับ 4-aminoantipyrine ซึ่งเป็น color reagent ในสภาวะที่มีโปแตสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดง ซึ่งสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 500 nm หน่วยที่ใช้วิเคราะห์ คือ mg/L โดยใช้สารฟีนอลเป็นสารมาตรฐาน การตรวจวัดด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัด คือไม่สามารถตรวจวัดสารประกอบฟีนอลที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่ง พารา-ฟีนอลได้ (APHA, AWWA and WEF, 2005) และ 2) การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu (ประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, 2011) สารประกอบฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำเสียทั้งหมดจะทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteu reagent ซึ่งประกอบด้วย phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents สารดังกล่าวจะถูกรีดิวซ์โดย phenolic hydroxyl groups ของสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเกิดเป็น tungsten และ molybdenum blue ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน (Waterman and Mole, 1994) ซึ่งสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 725 nm โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน หน่วยที่วิเคราะห์คือ mg GAE/L เนื่องด้วยการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu สามารถตรวจวัดกลุ่มสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่มีการปนเปื้อนในน้ำเสีย จึงได้ค่าสารประกอบฟีนอลที่แท้จริงที่พบในน้ำเสีย แต่จากการวิเคราะห์ไม่สามารถที่จะระบุถึงชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดได้ และจากการทบทวนเอกสารพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาถึงชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะตรวจวัดชนิดของสารประกอบฟีนอลโดยใช้เครื่อง High performance liquid chromatography (HPLC) (ประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Asses *et al.*, 2009)

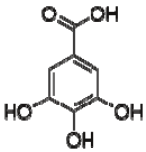
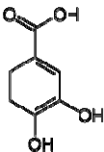
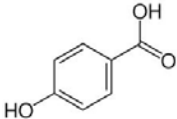
HPLC เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับแยกสารประกอบที่สนใจที่ผสมอยู่ในตัวอย่าง โดยกระบวนการแยกเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (stationary phase) หรือคอลัมน์ (column) กับเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) สารจะถูกแยกออกมาในเวลาที่แตกต่างกัน โดยสารที่ผสมอยู่ในตัวอย่างจะแยกออกจากกันได้นั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้ของสารนั้นกับเฟสเคลื่อนที่ โดยสารชนิดไหนที่เข้ากันได้ดีกับเฟสเคลื่อนที่ จะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ได้เร็ว และสารนั้นจะถูกแยกออกมาก่อน ส่วนสารที่เข้ากันได้ไม่ดีกับเฟสที่เคลื่อนที่ จะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ได้ช้า และถูกแยกออกมาทีหลัง โดยสารที่ถูกแยกออกมาได้จะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัด (detector) สัญญาณที่บันทึกได้จากตัวตรวจวัดจะมีลักษณะเป็นพีค เรียกว่า โครมาโทแกรม (chromatogram) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC สามารถตรวจวัดได้ทั้งเชิงคุณภาพวิเคราะห์ (qualitative analysis) และเชิงปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

เนื่องจากไม่มีการเติมสารเคมีชนิดใดลงไปในช่วงกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ สารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย จึงเป็นสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในผลปาล์มซึ่งถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ ซึ่งสารประกอบฟีนอลจะละลายในเฟสของน้ำได้ดีกว่าเฟสของน้ำมัน เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ดังนั้นสารมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC จึงเป็นสารประกอบฟีนอลที่มีการตรวจพบในผลปาล์ม ได้แก่ (i) Gallic acid (ii) Protocatechuic acid (iii) 4-hydroxybenzoic acid (iv) Caffeic acid (v) Syringic acid (vi) Vanillic acid (vii) *p*-coumaric acid (viii) Ferulic acid และเพิ่มสารฟีนอล (ix) Phenol ลงไปอีกหนึ่งตัว เนื่องจากสาร ฟีนอลเป็นโมเลกุลพื้นฐานของสารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบทั่วไปในธรรมชาติ (Waterman and Mole, 1994) และเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอล (Mahiuddin *et al.*, 1994) ซึ่งสารมาตรฐานดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มโมโนไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols) คุณลักษณะของสารประกอบฟีนอลดังแสดงในตารางที่ 2-3

Neo *et al.*, (2010) ตรวจวัดชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในผลปาล์มสายพันธุ์ *E. quineensis* พบว่ามีปริมาณ (หน่วยเป็น mg/g ของน้ำหนักแห้งของเนื้อปาล์มที่นำมาสกัด) 4-hydroxybenzoic acid (375.69) > ferulic acid (114.01) > *p*-coumaric acid (55.06) > vanillic acid (19.58) > syringic acid (19.33) > caffeic acid (18.04) > protocatechuic acid (12.43) > gallic acid (0.085)

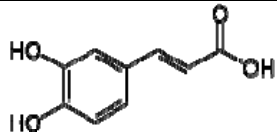
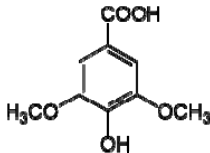
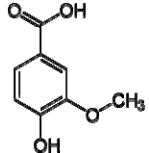
Maisarah *et al.*, (2013) ศึกษาชนิดและสารประกอบฟีนอลจากผลปาล์มน้ำมันพันธุ์เทนอราของสายพันธุ์ลูกผสม PP24 และ PP29 พบว่าสายพันธุ์ลูกผสมทั้งสองสายพันธุ์ตรวจพบปริมาณสาร syringic acid มากที่สุด รองลงมาคือ vanillic acid > gallic acid > ferulic acid > 4-hydroxybenzoic acid > caffeic acid > *p*-coumaric acid โดยสายพันธุ์ลูกผสม PP24 และ PP29 ตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลดังกล่าวข้างต้นได้เท่ากับ (หน่วยเป็น mg/g ของน้ำหนักแห้งของเนื้อปาล์มที่นำมาสกัด) 66.7, 46.9, 15.8, 9.83, 8.37, 4.73, 4.26 และ 65.1, 45.8, 16.5, 7.98, 6.30, 4.39, 4.24 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์สายพันธุ์ลูกผสม PP24 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเป็น 156 ซึ่งมีค่ามากกว่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของสายพันธุ์ลูกผสม PP29 ที่มีค่าเป็น 150 เล็กน้อย (หน่วยเป็น mg/g ของน้ำหนักแห้งของเนื้อปาล์มที่นำมาสกัด)

ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะของสารประกอบฟีนอลที่ทำการศึกษา

สารประกอบฟีนอล	ชื่อเรียกตามหลักสากล (IUPAC Name)	สูตรโครงสร้าง และมวลโมเลกุล	จุดเดือด (°C)	ลักษณะทางกายภาพของสาร
 <p>Gallic acid</p>	3,4,5-Trihydroxybenzoic acid	$C_7H_6O_5$ 170.12 g/mol	260	ผลึกสีขาวเหลือง
 <p>Protocatechuic acid</p>	3,4-Dihydroxybenzoic acid	$C_7H_6O_4$ 154.12 g/mol	221	ผงสีน้ำตาล
 <p>4-hydroxybenzoic acid</p>	4-Hydroxybenzoic acid	$C_7H_6O_3$ 138.12 g/mol	214.5	ผลึกสีขาว

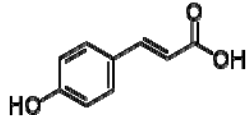
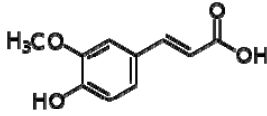
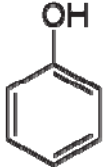
ที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid); [http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic_acid); [http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic_acid)

ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะของสารประกอบฟีนอลที่ทำการศึกษา (ต่อ)

สารประกอบฟีนอล	ชื่อเรียกตามหลักสากล (IUPAC Name)	สูตรโครงสร้าง และมวลโมเลกุล	จุดเดือด (°C)	ลักษณะทางกายภาพของสาร
 <p>Caffeic acid</p>	3-(3,4-Dihydroxyphenyl)-2-propenoic acid	$C_9H_8O_4$ 180.16 g/mol	223-225	ผงสีเหลือง
 <p>Syringic acid</p>	4-hydroxy-3,5-dimethoxybenzoic acid	$C_9H_{10}O_5$ 198.17 g/mol	205-209	ผลสีเหลือง
 <p>Vanillic acid</p>	4-Hydroxy-3-methoxybenzoic acid	$C_8H_8O_4$ 168.14 g/mol	210-213	ผงหรือผลึกสีขาวเหลือง

ที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Caffeic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Caffeic_acid); [http://en.wikipedia.org/wiki/Syringic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Syringic_acid); [http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillic_acid)

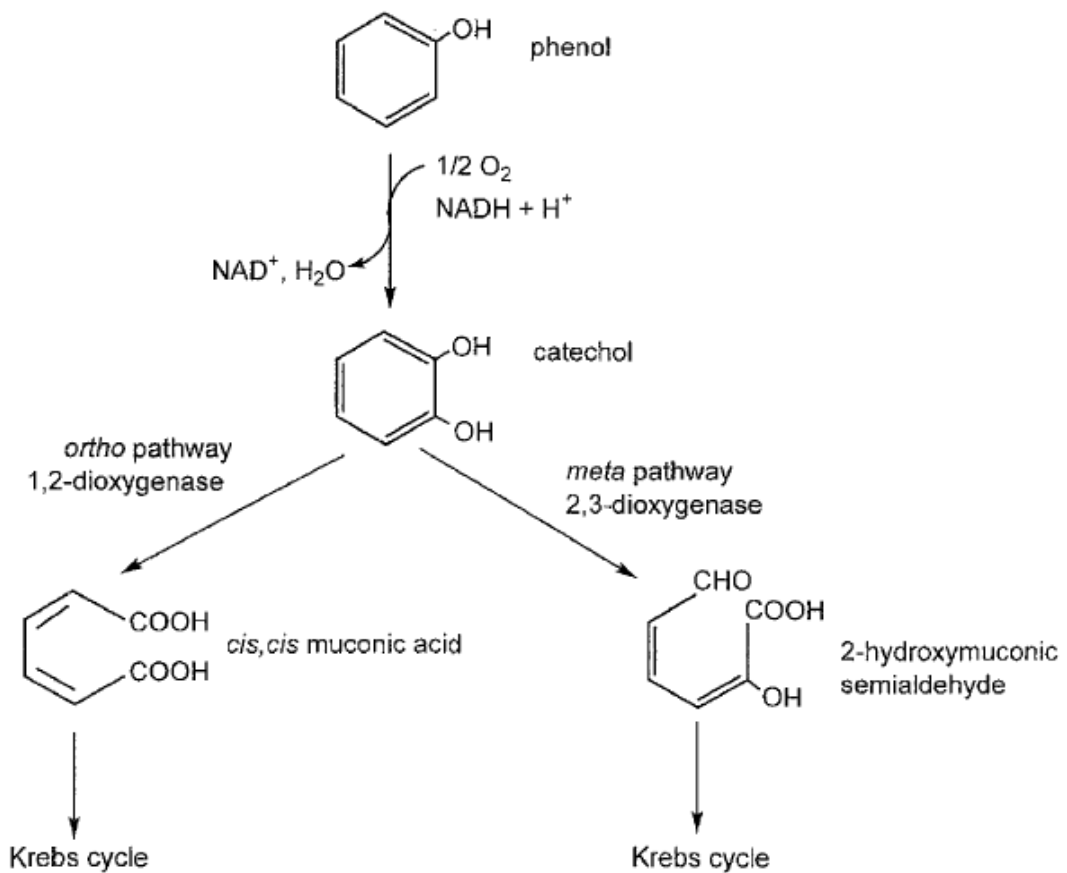
ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะของสารประกอบฟีนอลที่ทำการศึกษา (ต่อ)

สารประกอบฟีนอล	ชื่อเรียกตามหลักสากล (IUPAC)	สูตรโครงสร้าง และมวลโมเลกุล	จุดเดือด (°C)	ลักษณะทางกายภาพของสาร
 <p><i>p</i>-coumaric acid</p>	(E)-3-(4-hydroxyphenyl)-2-propenoic acid	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> 164.16 g/mol	210-213	ผงสีน้ำตาล
 <p>Ferulic acid</p>	(E)-3-(4-hydroxy-3-methoxy-phenyl)prop-2-enoic acid	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> 194.18 g/mol	168-172	ผงสีขาว
 <p>Phenol</p>	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O 94.11 g/mol	181.7	ผลึกแข็งใส

ที่มา [http://en.wikipedia.org/wiki/P-Coumaric\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/P-Coumaric_acid); [http://en.wikipedia.org/wiki/Ferulic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferulic_acid); <http://en.wikipedia.org/wiki/Phenol>

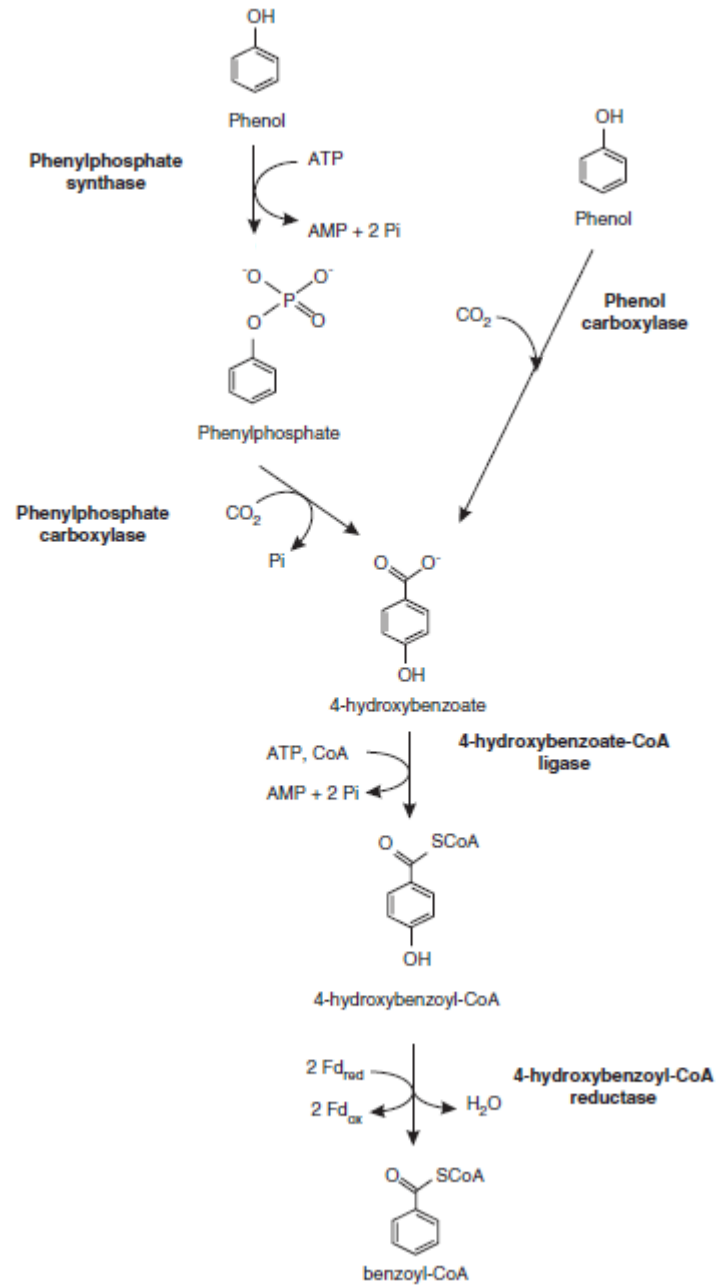
### 2.5.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฟีนอล

การย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฟีนอล โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเสียสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic) และไม่มีอากาศ (anaerobic) กระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่มีอากาศ แสดงในรูปที่ 2-6 เกิดตรงบริเวณผิวหน้าของน้ำที่มีการสัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิจีเนชัน (oxygenation) โดยเอนไซม์ฟีนอลไฮดรอกซิเลส (phenol hydroxylase) ซึ่งเป็นการเติมหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในตำแหน่งที่สองของวงแหวนเบนซีน (*ortho*-position) กลายเป็น แคตคอลล (catechol) จากนั้นจะเข้าสู่ปฏิกิริยาการแตกวงแหวนแคตคอลล (ring cleavage) ซึ่งมี 2 วิธี คือ 1) วิธีออโธ (*ortho*-pathway) เกิดโดยเอนไซม์ 1,2-dioxygenase ย่อยสลายวงแหวนแคตคอลล ได้สารตัวกลางเป็น *cis,cis*-muconic acid และ 2) วิธีเมตา (*meta*-pathway) เกิดโดยเอนไซม์ 2,3-dioxygenase ย่อยสลายวงแหวนแคตคอลล ได้สารตัวกลางเป็น 2-hydroxymuconic semialdehyde ก่อนที่จะเข้าสู่วัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) และเมทาบอลิซึมทั่วไปของสิ่งมีชีวิต (Schie and Young, 2000) ในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ จะได้น้ำ ( $H_2O$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ (Khalid and Naas, 2012)



รูปที่ 2-6 การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่มีอากาศ  
ที่มา: Schie and Young, (2000)

สำหรับกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่ไม่มีอากาศ ซึ่งเกิดจากกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่ไม่มีอากาศ  
ที่มา: Holmes *et al.*, (2012)



กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นเมื่อ ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดจากการหายใจระดับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ถูกไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กลายเป็น AMP (adenosine monophosphate) และหมู่ฟอสเฟต หมู่ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจะจับตัวกับสารประกอบฟีนอลกลายเป็น Phenylphosphate สารดังกล่าวจะรวมตัวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น 4-hydroxybenzoate นอกจากนี้ 4-hydroxybenzoate ยังสามารถเกิดได้โดยตรงจากการจับตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับสารประกอบฟีนอล จากนั้น 4-hydroxybenzoate ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโคเอนไซม์เอ เกิดเป็น 4-hydroxybenzoate-CoA และเกิดปฏิกิริยา Dehydroxylation กลายเป็น Benzoyl-CoA ก่อนที่จะเข้าสู่วัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) และเมแทบอไลซึมทั่วไปของสิ่งมีชีวิต (Holmes *et al.*, 2012) ในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) เป็นผลิตภัณฑ์ (Khalid and Naas, 2012)

อย่างไรก็ตามเมื่อมีหมู่แทนที่มาจากเบนวงแหวนเบนซีน จะส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ได้ยากขึ้น จากการศึกษาของ Balasundram *et al.*, (2006) และ Hernandez and Edyvean, (2008) พบว่าความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลทางชีวภาพของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของหมู่แทนที่บนวงแหวนเบนซีน โดยชนิดของหมู่แทนที่ที่มาจากโดยตรงกับวงแหวนเบนซีนมีผลต่อความเป็นพิษ และการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันตามลำดับ คือ COOH > OH > CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH

## 2.6 เกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (grey water footprint)

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (water footprint) เป็นวิธีการประเมินการใช้น้ำต่อผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ส่วน (Hoekstra *et al.*, 2011) ได้แก่ 1) กรีนวอเตอร์ (green water) คือ น้ำที่อยู่ในดินหรือความชื้นในดินที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต 2) บลูวอเตอร์ (blue water) คือ น้ำใช้ที่มาจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน และ 3) เกรย์วอเตอร์ (grey water) คือ ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการเจือจางน้ำทิ้งที่เกิดจากการใช้ปุ๋ย การใช้สารเคมี หรือการบำบัดน้ำเสียในน้ำทิ้งให้มีคุณภาพน้ำเทียบเท่ากับน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย 2 ส่วน (Hoekstra *et al.*, 2011) คือ 1) วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของการปลูกปาล์มน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วย กรีนวอเตอร์ บลูวอเตอร์ และเกรย์วอเตอร์ การประเมินค่ากรีนวอเตอร์และบลูวอเตอร์จากการใช้น้ำของต้นปาล์มน้ำมัน ประเมินโดยใช้โปรแกรม CROPWAT 8.0 ประเมินโดยการหาความต้องการน้ำของพืช (crop water requirement, CWR) และการให้น้ำชลประทาน (Irrigation schedule, IRR) โดยอาศัยข้อมูลทางภูมิอากาศ ข้อมูลของต้นปาล์มน้ำมัน และข้อมูลดินในการประเมินค่าดังกล่าว จากการประเมินจะทราบถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินหรือค่ากรีนวอเตอร์ในแต่ละพื้นที่ หากต้นปาล์มน้ำมันมีการใช้น้ำ (CWR) น้อยกว่าค่ากรีนวอเตอร์ที่ได้จากการประเมิน ก็ไม่จำเป็นต้องนำน้ำจากชลประทาน (IRR) มาใช้เพิ่มเติม ซึ่งน้ำชลประทานที่กล่าวถึงคือค่าบลูวอเตอร์ ส่วนเกรย์วอเตอร์ประเมินได้จากปริมาณการใช้น้ำซึ่งต้องดำเนินการเก็บข้อมูลบัญชีรายการ 2) วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ในส่วนนี้จะเป็นการประเมิน

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในส่วนของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งประกอบด้วย บลูวอเตอร์ และเกรย์วอเตอร์ โดยบลูวอเตอร์เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำที่โรงงานใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถสอบถามข้อมูลของโรงงานจากมิเตอร์น้ำที่ติดตั้งอยู่ภายในโรงงานได้โดยตรง และเกรย์วอเตอร์ คำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์ของน้ำในบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัด ดังสมการที่ 2.1

เนื่องจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการใช้น้ำและก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก น้ำเสียเหล่านี้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วยังไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะประเมินค่าการใช้น้ำในการเจือจางค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อให้มีค่าเทียบเท่ากับมาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินที่รองรับน้ำทิ้งดังกล่าว หรือ เกรย์วอเตอร์ (grey water) เนื่องด้วยในปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไม่สามารถปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากมีค่าความสกปรกสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม หากในอนาคตโรงงานมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจนสามารถบำบัดค่าความสกปรกผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งได้ทั้งหมด การประเมินค่าเกรย์วอเตอร์จึงเป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง

ในการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ต้องใช้ค่ามาตรฐานของแหล่งน้ำธรรมชาติที่โรงงานนำมาใช้ในกระบวนการผลิต จึงใช้มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นมาตรฐานแหล่งน้ำที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (ภาคผนวก จ ตารางที่ จ-2) และค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก จ ตารางที่ จ-1) เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของมาตรฐานดังกล่าว พบว่ามีพารามิเตอร์หลายตัวที่ระบุไว้ทั้ง 2 มาตรฐาน เช่น บีโอดี ฟีนอล ทองแดง นิกเกิล แมงกานีส เป็นต้น ซึ่งตามหลักในการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ต้องทำการประเมินทุกพารามิเตอร์ที่มีการอ้างอิงอยู่ที่ 2 มาตรฐาน (Hoekstra *et al.*, 2011) แต่ในงานวิจัยนี้เน้นศึกษาถึงค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสารฟีนอล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่เป็นปัญหาของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพ ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อย และเมื่อพิจารณามาตรฐานคุณภาพน้ำดังกล่าว จะเห็นได้ว่าสารประกอบฟีนอลถือเป็นสารที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องด้วยค่ามาตรฐานที่ค่อนข้างต่ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์จากความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

งานวิจัยนี้จึงมีการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์โดยใช้สมการที่ 2.1 โดยสูตรในการคำนวณหาค่าเกรย์วอเตอร์ ( $WF_{proc, grey}$ , volume/time) คำนวณจากผลต่างระหว่าง อัตราการไหลของน้ำเสีย ( $Effl$ , volume/time) คูณกับความเข้มข้นของสารมลพิษ ( $C_{effl}$ , mass/volume) กับ อัตราการไหลของน้ำดิบ ( $Abstr$ , volume/time) คูณกับความเข้มข้นของสารมลพิษในแหล่งน้ำดิบ ( $C_{act}$ , mass/volume) หาดด้วยผลต่างของค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้กับความเข้มข้นที่มีอยู่เดิมในแหล่งน้ำธรรมชาติ ( $C_{max}-C_{nat}$ , mass/volume) แล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วยปริมาณผลผลิตของโรงงานที่ผลิตได้ (ton crude palm oil) จะได้ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (volume/tonCPO) (Hoekstra *et al.*, 2011)

$$WF_{\text{proc, grey}} = \frac{(\text{Effl} \times C_{\text{effl}}) - (\text{Abstr} \times C_{\text{act}})}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ ส่วนผลิตภัณฑ์ร่วม ได้แก่ กะลา และเมล็ดในปาล์ม ดังนั้นในการคิดค่าเกรย์วอเตอร์โดยคิดเทียบเป็น ต่อตันของผลิตภัณฑ์ สามารถดำเนินการได้ 2 วิธี คือ 1) ไม่คิดการปันส่วนค่าเกรย์วอเตอร์ให้กับ ผลิตภัณฑ์ร่วมอื่นๆ โดยคิดเทียบกับปริมาณมวลรวมของผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานเพียงอย่างเดียว คือ น้ำมันปาล์มดิบทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และ 2) คิด การปันส่วนค่าเกรย์วอเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์ร่วมอื่นๆ โดยคิดจากมวลของผลิตภัณฑ์ได้ในแต่ละตัว จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ อันได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ กะลา และเมล็ดใน ปาล์ม ซึ่งการปันส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละตัวจะปันส่วนโดยใช้ราคา ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึง ประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ทั้งแบบปันส่วนและไม่ปันส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมัน ปาล์มดิบ

## 2.7 การบำบัดโดยดิน (land treatment)

การใช้ดินในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้น้ำรดพืชเกษตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัด โดยดิน ดินและพืชจะเป็นตัวกรองในการดูดซับสารพิษและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยผ่าน กระบวนการบำบัดทางธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา ที่ เกิดขึ้นภายในดิน ประกอบกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นการเพิ่มธาตุอาหารให้แก่ดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ขึ้น ประกอบกับพืชสามารถนำธาตุ อาหารดังกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อีกด้วย การบำบัดโดยดินเป็นวิธีการที่ควบคุมการทำงาน และบำรุงรักษาง่าย ใช้พลังงานต่ำ เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ต้องใช้พื้นที่มากในการดำเนินการ เหมาะกับลักษณะน้ำเสียที่มีแร่ธาตุอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่ถ้าเป็นน้ำ เสียที่มีสารพิษปนเปื้อน จะต้องคำนึงถึงปริมาณและชนิดของสารพิษด้วย

การบำบัดโดยดินนอกจากจะใช้ในการบำบัดน้ำเสียแล้ว ผลพลอยได้จาก กระบวนการดังกล่าว ยังเป็นการเพิ่มรายได้จากการขายพืชผลทางการเกษตร เป็นการใช้ทรัพยากรน้ำ อย่างคุ้มค่า ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี จากการศึกษาของ Chavalparit *et al.*, (2006) พบว่าการนำน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มดิบไปประยุกต์ใช้ในการรดสวนปาล์มนอกจากจะเป็นการประยุกต์ใช้ทรัพยากรน้ำอย่าง คุ้มค่าแล้วยังสามารถลดต้นทุนจากการซื้อปุ๋ยได้ เนื่องจากในน้ำบ่อสุดท้ายยังมีสารอาหารพวก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารที่ต้นปาล์มน้ำมันต้องการ

### 2.7.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียบนดิน

#### กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR)

กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR) หรือที่เรียกว่า Irrigation เป็นการบำบัดโดยการรดน้ำสำหรับการเกษตรกรรมที่มีการปลูกพืชร่วมด้วย น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการระเหยออกไป ถูกดูดซับด้วยพืช และไหลซึมลงใต้ดิน ในการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นดินจะเกิดกระบวนการกรอง การดูดซับ และการแลกเปลี่ยนประจุไอออน กลไกในการบำบัดน้ำเสียจึงมีทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ระบบนี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนการใช้น้ำ ผลผลิตของพืช และการเปลี่ยนน้ำเสียให้เป็นน้ำใช้สำหรับการเกษตรในฤดูแล้ง ซึ่งเป็นการอนุรักษ์น้ำ เป็นระบบที่มีศักยภาพการกำจัดมลสารสูง ต้องการพื้นที่กว้าง และการกระจายของมลสารมีผลต่อดินและพืชน้อยมาก (รูปที่ 2-8)

วัตถุประสงค์จากการบำบัดโดยดินแบบอัตรากการไหลช้า คือ การบำบัดน้ำเสีย การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในทางเกษตรกรรมแทนการทิ้งน้ำ และเป็นการอนุรักษ์น้ำ ตลอดจนการใช้ประโยชน์จากสารอาหารในน้ำเสีย (เกสส์ชรัตน์, 2550)

#### กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI)

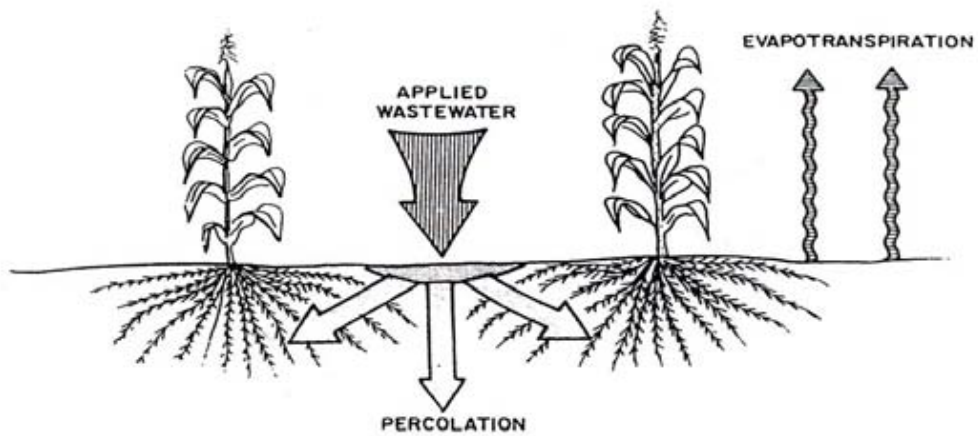
กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI) เป็นการปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น จะถูกปล่อยลงบนพื้นดินอย่างรวดเร็ว และไหลซึมผ่านชั้นดินซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรอง โดยการกระจายลงในอ่างหรือบ่อ โดยดินที่ใช้ในกระบวนการนี้ต้องเป็นดินที่มีลักษณะยอมให้น้ำซึมผ่านได้สูง เช่น ทราย หรือดินร่วนปนทราย ภายใต้อ่างต้องมีระบบท่อรองรับน้ำเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ต่อไป วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้พืชเข้ามาช่วยในการบำบัด (รูปที่ 2-9)

วัตถุประสงค์ของการบำบัดโดยดินแบบไหลซึมเร็ว ประกอบด้วย การบำบัดน้ำเสียเป็นวัตถุประสงค์หลัก, การเติมน้ำใต้ดิน (ground recharge), การฟื้นฟูพื้นที่บำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การปล่อยทิ้งหรือการเติมน้ำผิวดิน และการเก็บกักน้ำบำบัดไว้ใต้พื้นที่เพาะปลูกเพื่อนำกลับมาใช้ในระยะเวลาเพาะปลูกต่อไป (เกสส์ชรัตน์, 2550)

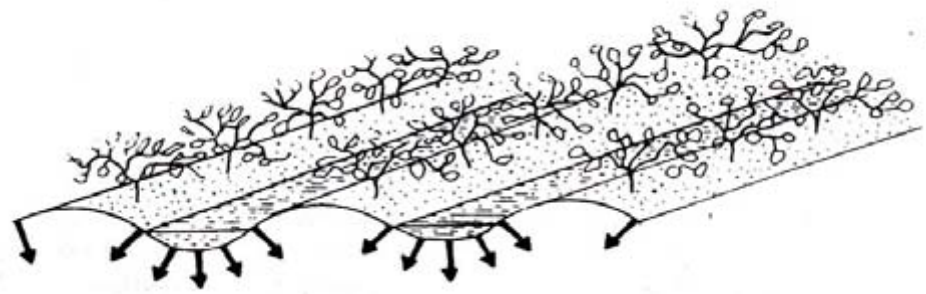
#### กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process, OF)

กระบวนการไหลล้นผิว เป็นการบำบัดโดยปล่อยให้ น้ำเสียไหลลงไปตามพื้นที่ที่มีการปลูกพืช บนพื้นที่ที่มีความลาดเทประมาณ 2-8% ใช้สำหรับดินที่มีลักษณะซึมน้ำได้ต่ำ เช่น ดินเหนียว การซึมของน้ำลงดินจะมีเพียงเล็กน้อย กลไกการบำบัดส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างที่น้ำไหลผ่านพืชที่มีการเพาะปลูกไว้ เช่น การตกตะกอน การกรองด้วยหญ้า ปฏิริยาชีวเคมีและการดูดซับ (รูปที่ 2-10)

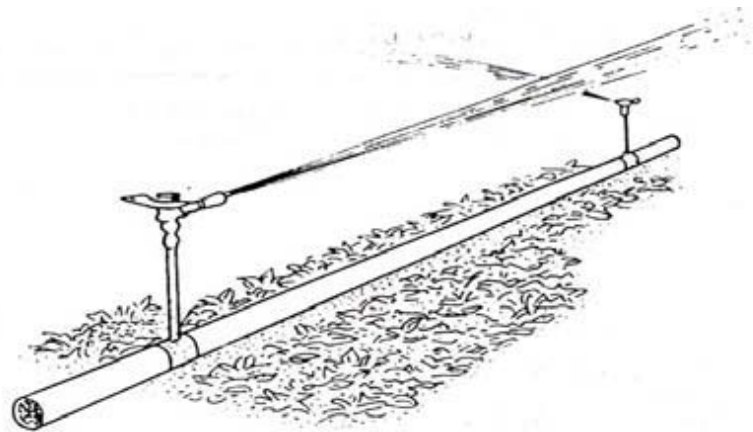
วัตถุประสงค์ของกระบวนการไหลล้นผิว คือ เป็นการประยุกต์ให้เกิดการบำบัดขั้นที่สองหรือขั้นที่สาม เพื่อผลิตหญ้าซึ่งเป็นอาหารสัตว์ และเพื่อการอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว (เกสส์ชรัตน์, 2550)



ก. การไหลของน้ำ (hydraulic pathway)

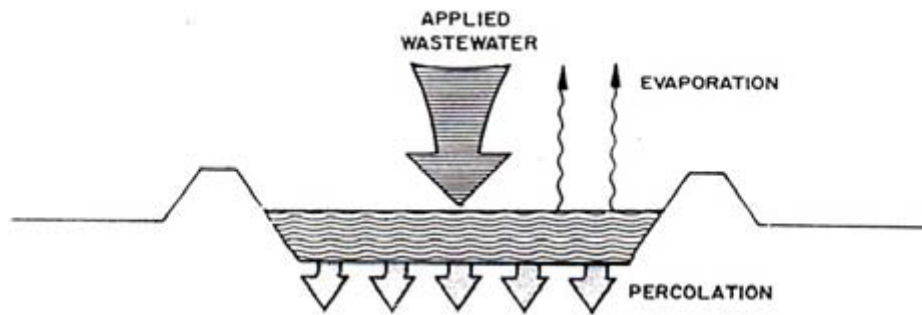


ข. การยกร่องดินกันระหว่างแปลงเพื่อให้น้ำไหลลงไปในดิน  
(surface distribution)

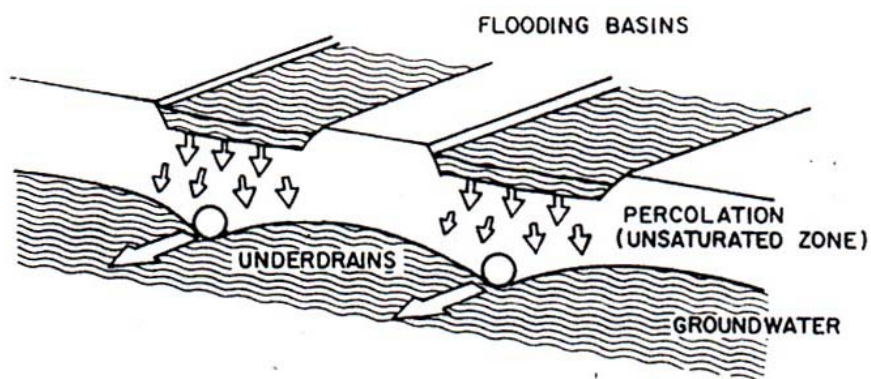


ค. การพ่นฝอยโดยใช้เครื่องพ่นน้ำ (sprinkler distribution)

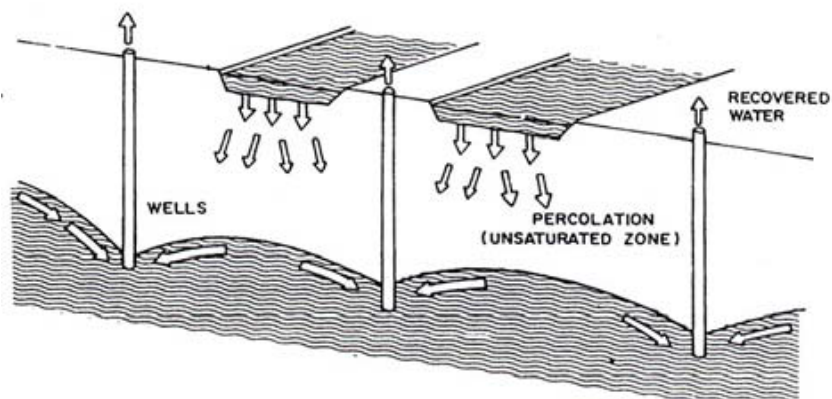
รูปที่ 2-8 กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR)  
ที่มา: Polprasert, 1995 อ้างอิงใน ภาควงศ์ชัยสวัสดิ์, (2552)



ก. การไหลของน้ำ (hydraulic pathway)

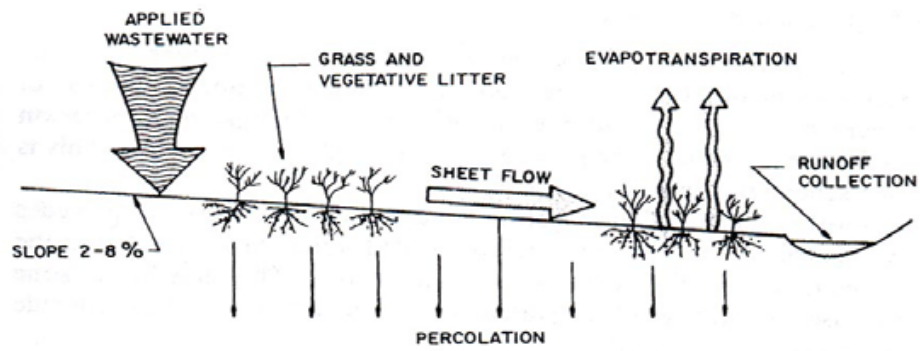


ข. น้ำไหลเข้าไปในน้ำใต้ดินเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำใต้ดิน  
(recovery of renovated water by underdrains)

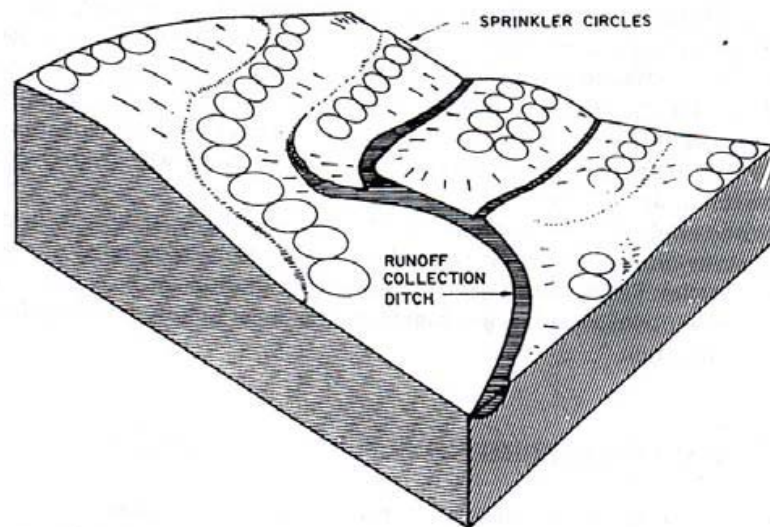


ค. การสูบน้ำกลับขึ้นมาใช้ใหม่  
(recovery of renovated water by wells)

รูปที่ 2-9 กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI)  
ที่มา: Polprasert, 1995 อ้างอิงใน ภาคภูมิ ชัยสวัสดิ์, (2552)



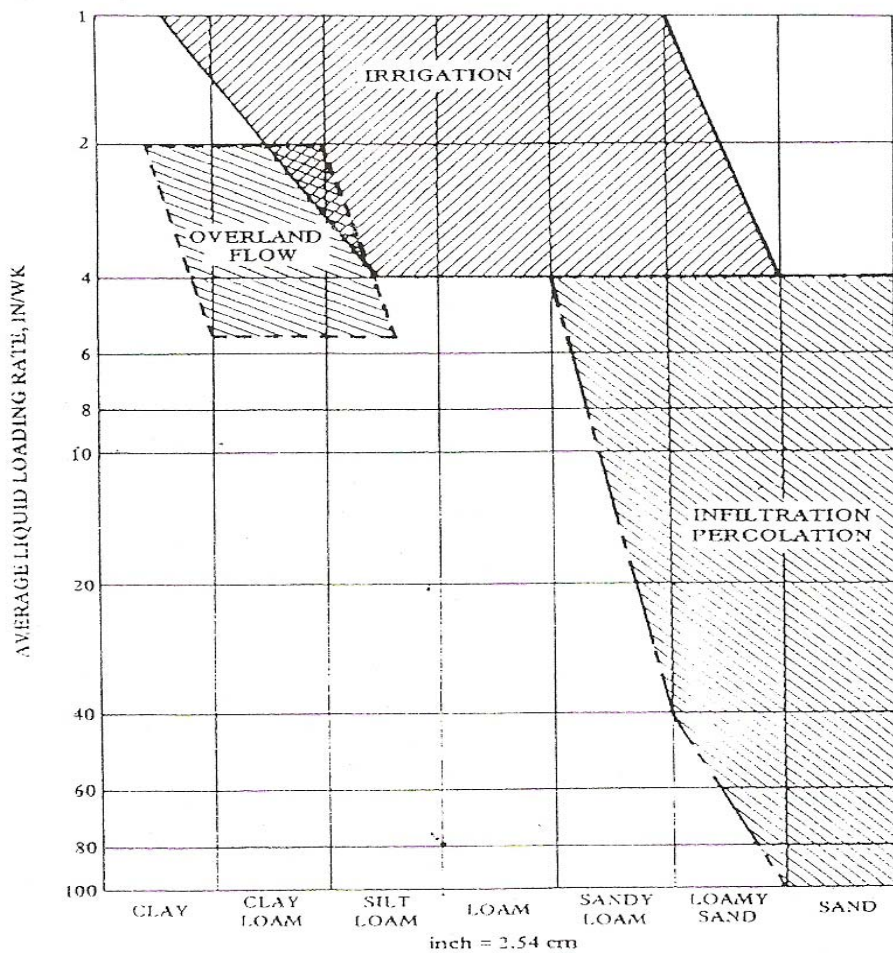
ก. การไหลของน้ำ (hydraulic pathway)



ข. การใช้เครื่องพ่นน้ำ (pictorial view of sprinkler application)

รูปที่ 2-10 กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process, OF)  
ที่มา: Polprasert, 1995 อ้างอิงใน ภาคภูมิ ชัยสวัสดิ์, (2552)

ทางเลือกในการใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียบนดิน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัดและชนิดของดินในแต่ละพื้นที่บำบัด โดยความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาวะบรรทุกของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-11 เนื่องจากลักษณะเนื้อดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีลักษณะแบบดินร่วนปนทราย (sandy clay) วิธีการบำบัดโดยดินที่เหมาะสมกับดินลักษณะดังกล่าว คือ กระบวนการซึมช้า (slow rate process, SR) กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process, RI) ซึ่งการทดลองในครั้งนี้เลือกกระบวนการบำบัดแบบซึมช้า เนื่องจากเป็นการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมาประยุกต์ใช้ในทางการเกษตร ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ดินที่ไม่มีพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของดินและภาวะบรรทุกของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ

ที่มา: U.S. EPA, (1976)



## 2.7.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยดิน

กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยดินจะต้องอาศัยกลไกทางกายภาพ (physical mechanism) กลไกทางเคมี (chemical mechanism) และกลไกทางชีวภาพ (biological mechanism) ร่วมกันดังนี้ (ภาคภูมิ ชัยสวัสดิ์, 2552)

### กลไกทางกายภาพ (physical mechanism)

#### การกรอง (filtration)

เมื่อน้ำเสียเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในดิน ของแข็งแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์ (colloid) ในน้ำเสียจะถูกกำจัดออกไปโดยการกรองด้วยดิน ประสิทธิภาพของการกรองนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของดิน เนื้อดิน โดยดินที่มีเม็ดละเอียดจะสามารถกรองได้ดี ค่าการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 2-4 และหากน้ำเสียมีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากเกินไปจะทำให้ช่องว่างในดินเกิดการอุดตันได้

ตารางที่ 2-4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินแต่ละประเภท

ชนิดของดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (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)

### กลไกทางเคมี (chemical mechanism)

#### การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนประจุชนิดหนึ่งกับประจุอีกชนิดหนึ่งเพื่อให้เกิดเสถียรภาพทางเคมี โดยปราศจากการรบกวนทางโครงสร้างของแร่ที่อยู่ในดิน โดยทั่วไปดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity: CEC) อยู่ในช่วง 10–30 meq/100g โดยค่า CEC ของดินแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ เช่น ฮิวมัส พีเอชของดิน และขนาดอนุภาคของดิน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสามารถเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ clay loams > loams > sands > gravel โดยฮิวมัสและแร่ดินเหนียว (clay) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงสุด ประกอบกับถ้าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้น

### การดูดติดผิว (adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่โมเลกุลของมวลสารถูกดูดติดอยู่กับพื้นผิวของอนุภาคดิน ซึ่งทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (dissolved solids) ในน้ำเสียลดลง ส่วนปฏิกิริยาที่ตรงข้ามกับการดูดติดผิวเรียกว่า การหลุดออกจากผิว (desorption) ความสามารถในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับปริมาณอนุภาคดินเหนียว (clay particle) พีเอช และส่วนประกอบของน้ำเสีย โดยกลไกการดูดติดผิวมักจะเกิดไปพร้อมๆ กับกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ

### การดูดซับด้วยดิน

ดินเป็นตัวดูดซับที่มีความสำคัญตัวหนึ่ง โดยจะทำการดูดซับสารปนเปื้อนหรือพวกของเสียอันตราย ซึ่งถ้าของเสียอันตรายชนิดใดมีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อย หรือเป็นพวกไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะทำให้ดินสามารถดูดซับของเสียอันตรายได้มาก

### การตกผลึก (precipitation)

การตกผลึกเกิดจากการที่สารละลายมีค่าความเข้มข้นเกินค่าจำกัดการละลาย (solution limit) จึงเกิดการตกผลึกและตกตะกอน ซึ่งจะเกิดกับสารประกอบที่มีค่าความเข้มข้นในระดับสูง (macro concentration) ส่วนสารประกอบที่มีค่าความเข้มข้นอยู่ในระดับต่ำจะเกิดกระบวนการดูดติดผิวเป็นกระบวนการหลัก ส่วนค่าจำกัดการละลายจะขึ้นกับชนิดของไอออน ความเข้มข้นของสารละลายที่ละลายในน้ำเสีย อุณหภูมิ พีเอช และค่า Redox potential (Eh) แต่องค์ประกอบที่สำคัญในการควบคุมกลไกคือ พีเอช และค่า Eh (ชาญวิทย์ สายหยุดทอง, 2537)

### กลไกทางชีวภาพ (biological mechanism)

กลไกทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในดินในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของสารอินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์พวกเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic) คือจุลินทรีย์ที่อาศัยสารอินทรีย์เพื่อสร้างพลังงานและการเจริญเติบโต หรือใช้อินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอน จุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเพื่อเป็นอาหารและพลังงานสำหรับการดำเนินชีวิต โดยหน้าที่ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน คือ (พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์, 2555)

1. การย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีโอดี และ ของแข็งแขวนลอยสูง เมื่อรดลงไปบนดินจะถูกสิ่งมีชีวิตในดินช่วยกันย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ ฮิวมัส และสารอาหารพืช พืชได้รับประโยชน์โดยตรงจากสารอาหารที่เกิดขึ้น เช่น ไนเตรต แอมโมเนียม ฟอสเฟต และซัลเฟต เป็นต้น ฮิวมัสช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ช่วยให้อนุภาคดินจับตัวกันเป็นเม็ดดินทำให้ดินมีช่องว่างมากขึ้น การซึมซับน้ำ และการระบายอากาศดีขึ้น เป็นต้น โดยน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดโดยดินจะมีสารอินทรีย์ลดลง

2. การตรึงไนโตรเจน จุลินทรีย์ในดินบางชนิดสามารถเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีทั้งชนิดที่ตรึงไนโตรเจนได้เมื่อต้องอาศัยร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น และที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้โดยอิสระ โดยกระบวนการทางเคมี โดยขั้นแรกก๊าซไนโตรเจนจะถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนีย และมีเอนไซม์ไนโตรจิเนสเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะ

รวมตัวกับกรดอินทรีย์ได้เป็นกรดอะมิโน และเปลี่ยนเป็นโปรตีนต่อไป เมื่อจุลินทรีย์เหล่านี้ตายและถูกย่อยสลาย สารประกอบไนโตรเจนภายในเซลล์ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นสารอาหารพืช ทำให้ไนโตรเจนในน้ำทิ้งลดลง

การสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินถูกควบคุมโดยปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การถ่ายเทอากาศ ความชื้น พีเอช แร่ธาตุต่างๆ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ที่ใส่ลงไป เป็นต้น การทำงานของจุลินทรีย์เกิดได้ดีในสภาพที่มีดินเนื้อละเอียด มีอินทรีย์วัตถุสูง มีการขังน้ำอย่างต่อเนื่อง มีพีเอชปานกลาง หรือเป็นด่างเล็กน้อย และมีอุณหภูมิปานกลาง

### 2.7.3 กลไกการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลจากการบำบัดน้ำเสียโดยดิน

กลไกการบำบัดสารประกอบฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดิน มีกลไกรวมกัน 3 แบบ คือ กลไกทางกายภาพ กลไกทางเคมี และกลไกทางชีวภาพ ดังนี้ (Buondonno *et al.*, 2014)

1. เมื่อรดน้ำตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลลงในดิน อนุภาคดินทำหน้าที่เป็นตัวกรองและดูดซับสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในน้ำทิ้งมาเกาะติดตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดิน สารประกอบฟีนอลที่ถูกดูดซับไว้ในดินจะเกิดการตกตะกอนและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerisation) กลายเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน และเมื่อระยะเวลาผ่านไปอินทรีย์วัตถุเหล่านี้เกิดการย่อยสลายกลายเป็นฮิวมัสในดิน (Hattenschwiler and Vitousek, 2000) เป็นผลให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

2. สารประกอบฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่าง เมื่อสัมผัสกับอนุภาคดินจะเกิดการดูดติดผิว และการแลกเปลี่ยนประจุไอออนขึ้นระหว่างสารประกอบฟีนอลกับประจุไอออนอิสระในดิน เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลเปลี่ยนรูปไปเปลี่ยนฟีนอลเลต ( $C_6H_5O^-$ ) ซึ่งเป็นสารในรูปคีเลต ที่สามารถจับกับแร่ธาตุที่มีประจุบวกในดิน เช่น เหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง เป็นต้น ทำให้อนุภาคของธาตุอาหารไม่ถูกยึดอยู่กับดิน เป็นผลให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ได้ง่ายขึ้น และเนื่องจากฟีนอลเลตเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ดีจึงไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชในการดูดซึมสารอาหารในรูปคีเลต

3. กลุ่มจุลินทรีย์พวกเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic) ที่อยู่ในดิน สามารถใช้สารประกอบฟีนอลเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อสร้างพลังงานและการเจริญเติบโต กลไกในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลของจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีอากาศ (aerobic) และไม่มีอากาศ (anaerobic) ดังแสดงในรูปที่ 2-7 และ 2-8 ตามลำดับ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดิน โดยนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำยางชั้นไปรดสวนปาล์มน้ำมัน โดยทดลองที่ 4 ภาวะบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยรดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง จากการทดลองพบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในแต่ละแปลงมีค่าความสกปรกลดลง การลดลงของค่าดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นดินนั้นชั้นดินทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวกรองสารอินทรีย์ต่างๆ ให้มาสะสมอยู่ตรงบริเวณผิวหน้าและภายในชั้นดิน ประกอบกับรากของพืชซึ่งมีทั้งต้นปาล์มน้ำมันและต้นหญ้าขนาดเล็ก ช่วยดูดซับสารอินทรีย์เหล่านี้เอาไว้ และจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ โดยแปลงที่รดน้ำสัปดาห์ละครั้งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าแปลงที่รดน้ำทุกวัน โดยแปลงที่รดด้วยอัตรา  $10.7 \text{ m}^3/\text{week}$  (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและทีเคเอ็นสูงสุดเป็น  $81.7 \pm 12.7\%$  และ  $74.1 \pm 18.3\%$  ตามลำดับ และแปลงที่รดด้วยอัตรา  $56.1 \text{ m}^3/\text{week}$  (hydraulic loading 3 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุดเป็น  $81.7 \pm 12.7\%$

โรสนา กาซอ และคณะ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดิน โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไปรดสวนปาล์มน้ำมัน โดยทดลองที่ 4 ภาวะบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยรดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง จากการทดลองพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะใสขึ้น มีค่าซีโอดี ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และซัลเฟตลดลง โดยเกิดจากชั้นดินและรากของพืชจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรอง คอยกรองพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้ง เป็นผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าความสกปรกดังกล่าวลดลง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดค่าดังกล่าวในแต่ละแปลงการทดลอง พบว่าแปลงที่รดน้ำในอัตรา  $2.2 \text{ m}^3/2\text{d}$  (ภาวะบรรทุกที่ 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี และของแข็งแขวนลอยสูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น  $70.2 \pm 12.3\%$  และ  $48.0 \pm 20.6\%$  ตามลำดับ และแปลงที่รดน้ำด้วยอัตรา  $4.6 \text{ m}^3/2\text{d}$  (hydraulic loading 1 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็น, ฟอสฟอรัสทั้งหมด และซัลเฟต สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น  $67.8 \pm 13.1\%$   $65.8 \pm 14.6\%$  และ  $51.8 \pm 17.0\%$  ตามลำดับ

กาญจณี ชูทอง (2556) ศึกษาการบำบัดโดยดินจากชุดการทดลองคอลัมน์ดิน โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาบำบัดผ่านคอลัมน์ดิน โดยทดลองที่ 4 ภาวะบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ คอลัมน์ที่รดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง พบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดการทดลองมีค่าความสกปรกลดลงน้อยกว่าน้ำเข้าระบบ และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์มีค่าความสกปรกลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อถึงจุดๆหนึ่งที่ระบบเริ่มเสถียรค่าความสกปรกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่เติมเข้าไปได้ทั้งหมด การบำบัดโดยคอลัมน์ดินเกิดขึ้นได้โดยชั้นดินเป็นตัวกรอง คอยกรองพวกสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ต่างๆ ให้ตกสะสมตรงบริเวณผิวหน้าของชั้นดิน สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน โดยคอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา  $0.14 \text{ L}/2\text{d}$  (ภาวะบรรทุกที่ 1 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและฟอสฟอรัสทั้งหมด สูงสุดอยู่ในช่วง 96.5-98.3% และ 97.7-99.7% ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพ

เฉลี่ยเป็น  $97.8 \pm 0.6\%$  และ  $99.1 \pm 0.8\%$  ตามลำดับ และ คอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา  $0.25 \text{ L/week}$  (ภาวะบรรทุกที่  $0.5 \text{ cm/week}$ ) มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น สูงสุดอยู่ในช่วง  $97.8\text{-}99.8\%$  มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเป็น  $98.9 \pm 0.9\%$  และศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารอินทรีย์ พบว่าความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของดินหลังการทดลองมีค่ามากกว่าดินก่อนการทดลอง และพบว่าคอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา  $0.07 \text{ L/2d}$  (ภาวะบรรทุกที่  $0.5 \text{ cm/week}$ ) มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์สูงสุดเป็น  $1.15 \times 10^{-11} \text{ L/g}$  และศึกษาอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของดินก่อนและหลังการทดลอง พบว่า ค่า oxygen uptake rate (OUR) ดินหลังการทดลองมีค่ามากกว่าก่อนการทดลองโดยคอลัมน์ที่รดในอัตรา  $0.29 \text{ L/2d}$  (ภาวะบรรทุกที่  $2 \text{ cm/week}$ ) มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุดเป็น  $35.78 \text{ mg/L-hr}$

Amornprasertsook and Polprasert (1996) ศึกษาความเป็นพิษและการกำจัดสารฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดิน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาความเป็นพิษของสารฟีนอลต่อจุลินทรีย์ในดิน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสารฟีนอล  $10\text{-}100 \text{ mg/L}$  รดน้ำผ่านคอลัมน์ดินด้วยอัตราการรดน้ำ  $5 \text{ cm/week}$  พบว่าระบบบำบัดโดยดินกำจัดสารฟีนอลได้ดี การเพิ่มขึ้นของสารฟีนอลไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ภายในดิน ในทางกลับกันจุลินทรีย์สามารถใช้สารฟีนอลเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อสร้างพลังงานและใช้ในการเจริญเติบโต การทดลองที่ 2 ศึกษาความเป็นพิษของสารฟีนอลต่อจุลินทรีย์ในดินที่ 2 อัตราการรดน้ำคือ  $5$  และ  $10 \text{ cm/week}$  โดยทดลองที่ความเข้มข้นของสารฟีนอลที่  $200$   $300$   $500$  และ  $800$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟีนอลสูงกว่า  $200$  มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในดินเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลลดลง

Achak *et al.*, (2009) ศึกษาการบำบัดโดยดินจากชุดการทดลองคอลัมน์ดิน โดยนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกซึ่งทำการเจือจางกับน้ำเสียชุมชนในอัตราส่วน  $1:1$  มารดผ่านคอลัมน์ที่มีทรายเป็นตัวกรองด้วยอัตราการรดน้ำ  $4 \text{ cm/day}$  โดยทำการรด  $3$  วันครั้ง น้ำเข้าระบบบำบัดมีค่าพีเอชเฉลี่ยเป็น  $4.8$  ซีไอเฉลี่ย  $30.8 \text{ g/L}$  และสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยสูงถึง  $5.5 \text{ g/L}$  ระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น  $10$  สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยตัวกรองทรายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก  $4.84$  เป็น  $8.25$  ระบบสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้  $90\%$  สามารถลดสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป ซีไอ และสารประกอบฟีนอลได้  $90\%$  และ  $92\%$  ตามลำดับ สามารถลดสารอาหารที่อยู่ในรูป ทีเคเอ็น แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนเตรต-ไนโตรเจน และฟอสเฟต ได้  $91\%$ ,  $97\%$ ,  $99\%$  และ  $99\%$  ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC เพื่อศึกษาชนิดของสารประกอบฟีนอลที่ย่อยสลายได้ยาก จากผลการศึกษา น้ำเข้าระบบ ตรวจพบ hydroxytyrosol และ tyrosol ตามลำดับ และน้ำที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณ hydroxytyrosol และ tyrosol ลดลง  $99\%$  และ  $100\%$  ตามลำดับ

### บทที่ 3

## การลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลโดยระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

### 3.1 บทนำ

การสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกเป็นวิธีการสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่นิยมใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย ในกระบวนการสกัดต้องใช้น้ำในปริมาณสูงโดยมีค่าเฉลี่ย 4.59 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2013) หรือ 0.5-1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของทะเลาะปาล์มสด (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2554) อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกถือเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่ง น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตมีค่าเฉลี่ย 0.64 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลาะปาล์มสด หรือ 3.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2012) น้ำเสียดังกล่าวมีค่าความสกปรกสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า ซีโอดี บีโอดี ไซมันและน้ำมัน และของแข็งทั้งหมด ตลอดจนลักษณะของน้ำที่มีสีน้ำตาลแดง (Zahangir *et al.*, 2009) มีสารอินทรีย์ต่างๆปนเปื้อนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง เช่น รงควัตถุพวกแอนโทไซยานิน แคโรทีน เมลานอยดิน ลิกนิน แทนนิน และโพลีฟีนอล (Hartley, 1977; Poh *et al.*, 2010; Madaki *et al.*, 2013) ซึ่งถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำจากการทำลายเซลล์ผลปาล์ม

สารประกอบฟีนอล (phenol compounds) เป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่พบในผลปาล์ม (Neo *et al.*, 2010; Maisarah *et al.*, 2013) เมื่อเซลล์ผลปาล์มถูกทำลายจากกระบวนการผลิต สารประกอบฟีนอลจะถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากกระบวนการผลิต สารกลุ่มนี้เป็นกลุ่มสารที่กำจัดยาก เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพได้เกิดขึ้นได้น้อย (Marco *et al.*, 2007; Asses *et al.*, 2009; Cardinali *et al.*, 2010; Torrecilla, 2010) และเมื่อเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดกลิ่น รสชาติของน้ำที่ไม่พึงประสงค์ ส่งผลต่อความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ (Cardinali *et al.*, 2010) ตลอดจนทำให้ระบบนิเวศทางน้ำเสื่อมโทรมลง งานวิจัยที่ผ่านมาตรวจพบสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีค่าสูงถึง 1,206 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อลิตร (Chantho *et al.*, 2013) ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน กำหนดให้น้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) โดยค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลในมาตรฐานน้ำทิ้งวิเคราะห์จากผลรวมของปริมาณอนุพันธ์ของสารฟีนอลทั้งหมด กรณีที่ทางโรงงานต้องการทิ้งน้ำออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโรงงานจำเป็นต้องบำบัดสารประกอบฟีนอลให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ กรณีที่โรงงานต้องการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่การลดค่าความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลซึ่งเป็นสารพิษก็มีความจำเป็นเช่นกัน

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (i) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ซึ่งประกอบด้วยบ่อแอนแอโรบิก บ่อแพคคัล เททีฟ และบ่อปม โดยระบบนี้ไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ (ii) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร โดยโรงงานจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากการดำเนินการซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงาน หรือจำหน่ายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ ระบบดังกล่าวประกอบด้วย บ่อแอนแอโรบิก บ่อก๊าซชีวภาพ และบ่อปรับเสถียร

เพื่อให้การสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความมั่นคง และยั่งยืน ตลอดจนสามารถรองรับมาตรการประเมินด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ ในระดับสากลได้เช่น การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งเป็นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ และการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ซึ่งทำการประเมินการใช้น้ำทางตรงและทางอ้อมในการผลิตผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความจำเป็นต้องประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าการใช้น้ำที่เกิดขึ้นจากการผลิต ตลอดจนหาแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าดังกล่าวข้างต้น ในการส่วนของการประเมินและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาได้ดำเนินการแล้วเสร็จ (Kaewmai *et al.*, 2012, 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเป็น 935 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2013) แต่การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ โดยเฉพาะการประเมินค่าการใช้น้ำในการเจือจางสารพิษเพื่อให้ได้น้ำสะอาดหรือ เกรย์วอเตอร์ (grey water) มีการดำเนินการค่อนข้างน้อย ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ในน้ำทิ้งจากงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ได้แก่ ค่าบีโอดี (เพชรลดา สัตยากุล, 2557) ซึ่งมีค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเป็น 20 mg/L ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของสารประกอบฟีนอลที่มีค่าต่ำถึง 1 mg/L ดังนั้นการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยใช้ค่าสารประกอบฟีนอลจึงมีความสำคัญที่สามารถใช้ประเมินน้ำจืดที่ต้องการเพื่อการเจือจางน้ำที่ผ่านการบำบัดให้มีค่าเทียบเท่ากับค่ามาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินที่รองรับน้ำทิ้งดังกล่าว

ที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปริมาณสารประกอบฟีนอล และชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนของระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 ประเภท ตลอดจนไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดโดยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้ง 2 ประเภท ทำให้ขาดองค์ความรู้ในเรื่องดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาลักษณะสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแต่ละขั้นตอนของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ตลอดจนศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ผลการศึกษาที่ได้ทำให้ทราบถึงระดับการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอล ชนิดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัด ซึ่งจะนำไปสู่การนำเสนอแนวทางดำเนินการจัดการปัญหาการปนเปื้อนสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเบียดต่อไป

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การเก็บตัวอย่างและจุดเก็บตัวอย่าง

งานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 9 โรงงาน ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ระหว่าง 45-90 ตันทะลายปาล์มสดต่อชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3-1 เมื่อพิจารณาการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียเริ่มต้นที่โรงงานเลือกใช้เพื่อรองรับปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต คือระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรหรือบ่อฝิ่ง ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถก่อสร้างได้ง่าย ควบคุมและดูแลรักษาได้ง่ายทำให้ใช้ผู้ควบคุมระบบที่ไม่ต้องมีความชำนาญเฉพาะด้าน มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมและบำรุงรักษาต่ำ ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในน้ำสูงไม่ด้อยไปกว่าระบบอื่นๆ โดยระบบดังกล่าวมีลักษณะเป็นบ่อดินแบบเปิดขนาดใหญ่เรียงต่อกันเป็นอนุกรมหลายๆบ่อ ทำให้ระบบนี้ต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินการสูง ซึ่งไม่ได้เป็นปัญหาแก่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแต่อย่างใด เนื่องจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีพื้นที่กว้างขวางเพียงพอต่อการสร้างระบบบำบัดดังกล่าว ข้อเสียของระบบนี้คือปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นที่เกิดจากการหมักของน้ำเสีย นอกจากนี้การย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในบ่อภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ขึ้นสู่บรรยากาศ โดยก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และเนื่องจากก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก ซึ่งเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยให้พลังงานความร้อนได้ถึงประมาณ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตรและมีคุณสมบัติติดไฟได้ ก๊าซชีวภาพจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงาน เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจึงมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยมีการก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพเพิ่มเติมจากระบบบำบัดน้ำเสียเดิม โดยบ่อก๊าซชีวภาพมีลักษณะเป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดที่มีการรวบรวมก๊าซชีวภาพเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ นอกจากระบบบำบัดดังกล่าวจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากการดำเนินการและสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงานงาน หรือจำหน่ายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้เป็นอย่างดีแล้ว ระบบบ่อก๊าซชีวภาพสามารถจัดการกับปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดขึ้นได้ จึงส่งผลให้หาโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพได้ค่อนข้างยาก การศึกษาครั้งนี้จึงมีโรงงานที่เข้าร่วมโครงการซึ่งประกอบด้วยโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ซึ่งตั้งอยู่ในเขตภาคใต้ของประเทศไทย 1 โรงงาน และ โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ 8 โรงงาน ซึ่งตั้งอยู่ในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี 2 โรงงาน จังหวัดกระบี่ 3 โรงงาน จังหวัดชุมพร 2 โรงงาน และจังหวัดชลบุรี 1 โรงงาน

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ หรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบบ่อปรับเสถียร ประกอบด้วย บ่อแอนแอโรบิก บ่อแฟคัลเททีฟ และบ่อบ่ม ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยบ่อแอนแอโรบิก บ่อก๊าซชีวภาพ และบ่อปรับเสถียร ตามลำดับ โดยมี 1 โรงงานที่ใช้ระบบบึงประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำที่ออกจากบ่อปรับเสถียร จุดเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับระบบบำบัดแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ มี 2 จุด ได้แก่ 1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต และ 2) น้ำบ่อสุดท้าย ส่วนจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ มี 4 จุด ได้แก่ 1) น้ำเสียจาก



กระบวนการผลิต 2) น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ 3) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพ และ 4) น้ำบ่อสุดท้าย

ตารางที่ 3-1 ที่ตั้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและชนิดระบบบำบัดน้ำเสีย

โรงงาน	จังหวัด	ช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง	ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย
A	ในภาคใต้	เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร
B	สุราษฎร์ธานี	เดือนธันวาคม พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
C	สุราษฎร์ธานี	เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
D	กระบี่	เดือนกันยายน พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
E	กระบี่	เดือนกันยายน พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
F	กระบี่	เดือนธันวาคม พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
G	ชุมพร	เดือนธันวาคม พ.ศ. 2555	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
H	ชุมพร	เดือนมกราคม พ.ศ. 2556	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ
I	ชลบุรี	เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ

### 3.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3-2 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียดำเนินการตามวิธีที่ระบุใน APHA, AWWA and WEF, (2005) ค่าความเป็นด่าง และกรดไขมันระเหยง่ายวิเคราะห์ตามวิธีของ Dilallo *et al.*, (2012) การตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอล ดำเนินการ 2 วิธี ได้แก่ 1) วิธี 4-aminoantipyrine โดยใช้สารฟีนอลเป็นสารมาตรฐาน โดยหน่วยที่ใช้วิเคราะห์ คือ mg/L และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 nm (APHA, AWWA and WEF, 2005) 2) วิธี Folin-ciocalteau โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 nm โดยหน่วยที่ใช้วิเคราะห์ได้ คือ mg GAE/L โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, (2011) ส่วนการจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลนั้นวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Asses *et al.*, (2011)

#### การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, (2011) ดำเนินการโดยนำตัวอย่างน้ำเสียไปหมუნเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยแล้วทำการเจือจางตัวอย่างตามระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น นำน้ำตัวอย่างที่เจือจางแล้วมา 200 ไมโครลิตร เติม Folin-Ciocalteau's phenol reagent ซึ่งทำการเจือจาง 4 เท่าด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (20% w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่น เป็น blank ซึ่งทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteau phenol reagents และสารละลายโซเดียม

คาร์บอนเนต เช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก และคำนวณค่าที่ได้ด้วยการคูณด้วยปริมาณเท่าที่ทำการเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในหน่วย mg GAE/L

**ตาราง 3-2** พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
สี	Colorimetric Method
ความเป็นกรด-ด่าง	Electrometric Method
บีโอดี	5-day BOD Test
ซีโอดี	Closed reflux, Titrimetric Method
*กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	Direct Titration Method
*ความเป็นด่าง	Direct Titration Method
ไขมันและน้ำมัน	Soxhlet Extraction Method
ไขมันและน้ำมัน	Soxhlet Extraction Method
ของแข็งแขวนลอย	Dried at 103-105 °C
ของแข็งทั้งหมด	Dried at 103-105 °C
ของแข็งระเหยง่าย	Burn at 550 °C
ทีเคเอ็น	Kjeldahl Method
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	Distilled and Titration Method
**ทีโอซี	High-Temperature Combustion Method
ปริมาณสารประกอบฟีนอล	Colorimetric method
***ปริมาณสารประกอบฟีนอล	Colorimetric method
****การจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอล	High Performance Liquid Chromatography

**ที่มา:** APHA, AWWA and WEF, (2005), \*Dilallo *et al* (2012), \*\* น้ำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่าทีโอซี ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C, \*\*\*Ergul *et al.*, (2011), \*\*\*\* Asses *et al.*, (2011)

#### การจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง HPLC

การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำตัวอย่างน้ำเสียไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอย แล้วทำการเจือจางตัวอย่างตามระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยเมทานอล/น้ำ DI (60:40 v/v) กรองตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าวผ่าน Syringe nylon filter ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC ผลิตภัณฑ์ของ Hewlett Packard รุ่น 1100 (HP 1100) ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ (diode array detector, DAD) ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ คอลัมน์ RP-18 ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร หนา 5 ไมโครเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตร ต่อนาที โดยใช้ตัวทำละลาย 0.1% (v/v) phosphoric acid ในน้ำ DI (A) กับ 50% (v/v)

acetonitrile ในน้ำ DI (B) การวิเคราะห์ดำเนินการแบบแกรเดียนโดยใช้เวลา 45 นาที เริ่มต้นที่ตัวทำละลาย B 20% และเพิ่มเป็น 50% ที่เวลา 30 นาที หลังจากนั้นสารถูกชะต่อด้วยตัวทำละลาย B 50% เป็นเวลา 10 นาที และลดลงเหลือ 20% จนสิ้นสุดการวิเคราะห์ การดำเนินการข้างต้นประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Asses *et al.*, (2011) คำนวณค่าที่ได้ด้วยการคูณด้วยปริมาณเท่าที่ทำการเจือจางตัวอย่างเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลแต่ละตัวในหน่วย mg/L

สารมาตรฐานของสารประกอบฟีนอลที่วิเคราะห์อ้างอิงตามชนิดของสารประกอบฟีนอลที่มีการตรวจพบในผลปาล์มน้ำมัน (Maisarah *et al.*, 2013; Neo *et al.*, 2010) ได้แก่ (i) Gallic acid (ii) Protocatechuic acid (iii) 4-hydroxybenzoic acid (iv) Caffeic acid (v) Syringic acid (vi) Vanillic acid (vii) *p*-coumaric acid (viii) Ferulic acid และเพิ่มสารฟีนอล (ix) Phenol ลงไปอีกหนึ่งตัว เนื่องจากสารฟีนอลเป็นโมเลกุลพื้นฐานของสารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบทั่วไปในธรรมชาติ (Waterman *et al.*, 1994) และเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอล (Mahiuddin *et al.*, 2012)

#### การคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสารประกอบฟีนอลจากน้ำในบ่อสุดท้าย

การสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการใช้น้ำและก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก น้ำเสียเหล่านี้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วยังไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการบริหารจัดการน้ำในการสกัดน้ำมันปาล์มดิบให้มีความมั่นคง และยั่งยืน การประเมินการใช้น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อมในการผลิตผลิตภัณฑ์ หรือการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ ของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบจึงมีความจำเป็น เพื่อหาแนวทางในการลดการใช้น้ำในกระบวนการผลิต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ ในส่วนของการประเมินค่าการใช้น้ำในการเจือจางสารพิษเพื่อให้ได้น้ำสะอาดหรือ เกรย์วอเตอร์ (grey water) มีการดำเนินการค่อนข้างน้อย

งานวิจัยนี้จึงมีการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์โดยใช้สมการ 2.1 โดยสูตรในการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ ( $WF_{proc, grey}$ , volume/time) คำนวณจากผลต่างระหว่าง อัตราการไหลของน้ำเสีย (Effl, volume/time) คูณกับความเข้มข้นของสารมลพิษ ( $C_{effl}$ , mass/volume) กับ อัตราการไหลของน้ำดิบ (Abstr, volume/time) คูณกับความเข้มข้นของสารมลพิษในแหล่งน้ำดิบ ( $C_{act}$ , mass/volume) หาดด้วยผลต่างของค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้กับความเข้มข้นที่มีอยู่เดิมในแหล่งน้ำธรรมชาติ ( $C_{max}-C_{nat}$ , mass/volume) แล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วยปริมาณผลผลิตของโรงงานที่ผลิตได้ (ton crude palm oil) จะได้ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (volume/tonCPO) (Hoekstra *et al.*, 2011)

เนื่องด้วยโรงงานส่วนใหญ่ใช้น้ำผิวดินที่สูบมาจากคลอง หรือแม่น้ำในบริเวณใกล้ๆ โรงงาน เพื่อใช้ในกระบวนการผลิต ในการคำนวณค่าเกรย์วอเตอร์ จึงใช้มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นมาตรฐานแหล่งน้ำที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (ตารางที่ จ-2) และเมื่อพิจารณามาตรฐานคุณภาพน้ำดังกล่าว จะเห็นได้ว่าสารประกอบฟีนอลถือเป็นสารที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องด้วยค่ามาตรฐานที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งกำหนดให้มีค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำได้ไม่เกิน 0.005 mg/L งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการประเมินค่าเกรย์วอเตอร์จากความเข้มข้นของ

สารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลักจากระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ ส่วนผลิตภัณฑ์ร่วม ได้แก่ กะลา และเมล็ดในปาล์ม ดังนั้นในการคิดค่าเกรย์วอเตอร์ สามารถดำเนินการได้ 2 วิธี คือ 1) คิดจากมวลรวมของผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มดิบทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (ไม่คิดการปันส่วน) และ 2) คิดจากมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละตัว จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ อันได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ กะลา และเมล็ดในปาล์ม (คิดการปันส่วน) ซึ่งการปันส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละตัวจะปันส่วนโดยใช้ราคา เพื่อที่จะทราบถึงงบประมาณที่ต้องใช้ในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียหากในอนาคตโรงงานต้องการที่จะสร้างระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพเพียงพอ ที่สามารถบำบัดค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินที่รองรับน้ำทิ้งดังกล่าว ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงประเมินค่าเกรย์วอเตอร์ทั้งแบบปันส่วนและไม่ปันส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

### 3.2.3 วัสดุและอุปกรณ์

#### วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

- (1) ขวดน้ำพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย
- (2) กระบวยตักน้ำ

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ผลิตภัณท์ HACH รุ่น sension1
- (2) เตาย่อยซีไอดี (COD Reactor) ผลิตภัณท์ HACH รุ่น DRB 200
- (3) ตู้ป้อน (Incubator) ผลิตภัณท์ Kelvinator
- (4) ตู้อบ (Hot air oven) ผลิตภัณท์ Memmert
- (5) เตาไฟฟ้า (Hot plate) ผลิตภัณท์ IKA รุ่น C-MAG HS 10
- (6) เตาเผา (Furnace) ผลิตภัณท์ GALLENKAMP
- (7) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Electronic balance) ผลิตภัณท์ OHAUS
- (8) โถดูดความชื้น (Desiccator) ผลิตภัณท์ DURAN
- (9) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ผลิตภัณท์ Grant รุ่น SUB 36 และ ผลิตภัณท์ Memmert
- (10) ชุดสกัด (Soxhlet apparatus)
- (11) ชุดกรอง (Filtration unit)
- (12) เครื่องปั๊มดูดสุญญากาศ (vacuum pump) ผลิตภัณท์ GAST รุ่น 0823
- (13) ชุดย่อยไนโตรเจน (Nitrogen digester apparatus) ผลิตภัณท์ VELP SCIENTIFICA รุ่น DK20
- (14) ชุดกลั่นแอมโมเนีย (Ammonia distillation apparatus) ผลิตภัณท์ VELP SCIENTIFICA รุ่น UDK126A
- (15) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuges) ผลิตภัณท์ Harmonic Series
- (16) เครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) ผลิตภัณท์ Helderoph รุ่น Vibramax 110
- (17) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ผลิตภัณท์ Shimadzu รุ่น UV 1601
- (18) ไมโครปิเปต (Micropipette) ผลิตภัณท์ Denville Scientific
- (19) กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- (20) กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร
- (21) กระดาษกรอง Membrane Nylon 0.2  $\mu\text{m}$ , 47 mm
- (22) หัวกรอง Syringe Nylon 0.2  $\mu\text{m}$ , 13 mm
- (23) เครื่องวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon analyzer) ผลิตภัณท์ Shimadzu
- (24) เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ผลิตภัณท์ของ Hewlett Packard รุ่น 1100 (HP 1100)

### 3.3 ผลการทดลอง

#### 3.3.1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรและระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรแสดงดังตารางที่ 3-3 โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ซึ่งประกอบด้วยบ่อดินเปิดแบบขนาดใหญ่จำนวนหลายๆ บ่อต่อกันแบบอนุกรม น้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าพีเอชเป็นกรด ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณกรดอินทรีย์ที่เกิดจากการทำลายเซลล์ผลปาล์มจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบปนเปื้อนมากับน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตในปริมาณสูง (Madaki *et al.*, 2013)

ปริมาณของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมันมีค่าเป็น 38,025 และ 16,650 mg/L ตามลำดับ น้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอชเป็นด่าง ประกอบกับในการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าลดลง ค่าพีเอชในน้ำจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรลดค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมันได้ 95% และ 94% ตามลำดับ น้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน เป็น 1,850 และ 920 mg/L ตามลำดับ

ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็น ในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงกว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสารประกอบจำพวกโปรตีนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน (Magnaye *et al.*, 2009) และภายใต้สภาวะไร้อากาศ จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนเป็นสารแอมโมเนียไนโตรเจนได้ (He *et al.*, 2007) โดยแอมโมเนียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อเซลล์ ส่งผลให้มีสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นและทำให้ค่าทีเคเอ็นเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (ธีระ เกรอต, 2539)

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำในบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร กับน้ำในบ่อสุดท้ายที่ใช้ระบบบำบัดเดียวกันจากระบบบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโรงงานอื่นๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงในตารางที่ 3-4 พบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายของแต่ละโรงงานมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นด่าง และมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกัน โดยค่าความสกปรกที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันของแต่ละโรงงาน เช่น จำนวนบ่อปรับเสถียร ขนาดของบ่อ ระยะเวลาในการกักเก็บ และการเติมอากาศในบ่อบำบัดแต่ละบ่อ เป็นต้น ตลอดจนความเชี่ยวชาญในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย

อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าว ยังคงมีค่าความสกปรกสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ทางโรงงานได้นำน้ำที่ผ่านการบำบัดดังกล่าวไปรดสวนปาล์มเพื่อดำเนินการบำบัดโดยดินต่อไป

ตารางที่ 3-3 ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (1 โรงงาน)		โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดน้ำเสีย (8 โรงงาน)*				มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง**
	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต	น้ำบ่อบำบัดสุดท้าย	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต	น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ	น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพ	น้ำบ่อบำบัดสุดท้าย	
พีเอช	4.4	8.5	4.5-5.2 (4.8±0.2)	4.1-5.1 (4.4±0.4)	7.2-8.0 (7.5±0.3)	7.7-9.1 (8.3±0.5)	5.5-9.0
ความเป็นด่าง (ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	870	4,620	710-1,670 (1,323±307)	460-3,380 (1,095±1,076)	2,765-5,470 (4,478±874)	465-4,640 (2,686±1,444)	-
กรดไขมันระเหยง่าย (ในรูปกรดอะซิติก)	4,780	410	2,640-3,370 (2,951±246)	3,090-6,000 (4,459±902)	180-420 (281±84)	41-440 (168±129)	-
ของแข็งแขวนลอย	38,025	1,850	21,000-51,900 (35,033±9,843)	4,230-37,975 (23,020±10,630)	1,108-14,020 (8,786±4,219)	10-3,417 (1,193±1,310)	50
ของแข็งทั้งหมด	63,380	12,205	49,957-68,683 (58,189±7,409)	15,973-66,937 (50,177±15,294)	9,537-24,263 (17,269±4,328)	1,417-11,867 (6,868±3,765)	-

หมายเหตุ: ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช, - ไม่ได้กำหนด, \*ผลการศึกษแสดงเป็นช่วงและค่าเฉลี่ย

ที่มา: \*\*ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539

ตารางที่ 3-3 ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง (ต่อ)

พารามิเตอร์	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (1 โรงงาน)		โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดน้ำเสีย (8 โรงงาน)*				มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง**
	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต	น้ำบ่อบำบัดสุดท้าย	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต	น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ	น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพ	น้ำบ่อบำบัดสุดท้าย	
ของแข็งระเหยง่าย	52,568	3,825	41,330-57,310 (48,747±6,248)	9,213-54,693 (40,625±13,793)	3,150-12,757 (8,360±2,862)	223-4,067 (2,108±1,338)	-
ไขมันและน้ำมัน	16,650	920	10,793-17,267 (14,411±2,441)	1,280-15,060 (10,498±4,278)	116-747 (424±217)	9-480 (97±156)	5
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	69	222	13-59 (41±16)	29-238 (72±69)	85-347 (196±90)	5-150 (70±58)	-
ทีเคเอ็น	152	410	80-140 (104±21)	45-321 (142±80)	263-904 (435±208)	5-370 (129±116)	100

หมายเหตุ: ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช, - ไม่ได้กำหนด, \*ผลการศึกษาแสดงเป็นช่วงและค่าเฉลี่ย

ที่มา: \*\*ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539



เนื่องจากระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นจากน้ำเสียอย่างรุนแรง จึงเกิดความรำคาญแก่ชุมชนรอบข้างและผู้ที่เกี่ยวข้องในละแวกนั้น (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2550) และน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณและมีค่าความสกปรกสูง จึงมีการนำน้ำเสียดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการหมักเพื่อให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงานงาน หรือจำหน่ายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ จึงมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร โดยมีการก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพเพิ่มเติมขึ้นจากระบบบำบัดเดิม โดยบ่อก๊าซชีวภาพมีลักษณะเป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดที่มีการรวบรวมก๊าซชีวภาพ นอกจากระบบจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากการดำเนินการแล้วยังสามารถจัดการกับปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

ระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวประกอบด้วย 1) บ่อแอนแอโรบิก ซึ่งรับน้ำเสียจากโรงงานและลดอุณหภูมิของน้ำเสียให้มีค่าที่เหมาะสม 2) บ่อก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดและมีระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ 3) บ่อปรับเสถียร ซึ่งรับน้ำเสียจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดด้วยระบบบ่อแอนแอโรบิกหลายๆ บ่อ

จากตารางที่ 3-3 พบว่า น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตมีค่าพีเอชเป็นกรดซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับน้ำเสียที่เข้าระบบบ่อปรับเสถียร น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.1-5.1 มีค่าเฉลี่ยเป็น 4.4 พีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบบ่อก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนของการสร้างมีเทน (methanogenesis) แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในกลุ่มนี้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Poh *et al.*, 2010) กรณีที่พีเอชในระบบมีค่าต่ำกว่า 6.2 แบคทีเรียจะถูกยับยั้งการทำงานเป็นผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและมีฝ้าตะกอนเกิดขึ้น และเมื่อพีเอชสูงกว่า 8 แบคทีเรียจะผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยลง (เกรียงศักดิ์ อุดมโรจน์, 2543) ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงดังกล่าวโดยการเติมปูนขาว (CaO), โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>), โซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น เป็นผลให้น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าพีเอชเป็นด่าง

ค่าความสกปรกที่อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ไขมันและน้ำมัน มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านแต่ละระบบของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยบ่อแอนแอโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าสู่บ่อก๊าซชีวภาพลดค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมันได้เฉลี่ย 34% และ 29% ตามลำดับ ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักที่ลดค่าไขมันและน้ำมันได้เฉลี่ย 95% และลดค่าของแข็งแขวนลอยได้เฉลี่ย 61% น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพถูกบำบัดต่อโดยระบบบ่อปรับเสถียร ระบบบ่อปรับเสถียรเป็นระบบหลักที่ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้เฉลี่ย 79% และลดค่าไขมันและน้ำมันได้เฉลี่ย 75% ประสิทธิภาพรวมของระบบในการลดค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน เฉลี่ยเป็น 96% และ 99.1% ตามลำดับ น้ำในบ่อสุดท้ายมีค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน อยู่ในช่วง 10-3,417 mg/L และ 9-480 mg/L ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเป็น 1,193 mg/L และ 97 mg/L ตามลำดับ

ตารางที่ 3-4 ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต				น้ำบ่อสุดท้าย				
	ผลการทดลองครั้งนี้		[1]	[2]	ระบบแบบ A <sup>*</sup>		ระบบแบบ B		
	ระบบแบบ A <sup>*</sup>	ระบบแบบ B <sup>*,a</sup>			ผลการทดลองครั้งนี้	[3]	[4]	ผลการทดลองครั้งนี้	[3]
พีเอช	4.4	4.5-5.2 (4.8±0.2)	4.05-4.62	4.8	8.5	7.8	7.6	7.7-9.1 (8.3±0.5)	8.4
ความเป็นด่าง (ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต)	870	710-1,670 (1,323±307)	68-200	-	4,620	-	-	465-4,640 (2,686±1,444)	-
กรดไขมันระเหยง่าย (ในรูปกรดอะซิติก)	4,780	2,640-3,370 (2,951±246)	3,100-5,800	-	410	-	-	41-440 (168±129)	-
ของแข็งแขวนลอย	38,025	21,000-51,900 (35,033±9,843)	18,500-52,000	30,93 3	1,850	915	-	10-3,417 (1,193±1,310)	635
ของแข็งทั้งหมด	63,380	49,957-68,683 (58,189±7,409)	49,000-88,500	57,65 0	12,205	6,582	24,900	1,417-11,867 (6,868±3,765)	5,161

หมายเหตุ: <sup>\*</sup> ระบบแบบ A คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร, ระบบแบบ B คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร

<sup>a</sup> ผลการศึกษาแสดงเป็นช่วงและค่าเฉลี่ย เนื่องจากระบบแบบ B เก็บข้อมูลจาก 8 โรงงาน ในขณะที่ระบบแบบ A เก็บข้อมูลจาก 1 โรงงาน ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช, - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ที่มา: [1] พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, (2533); [2] Chavalparit (2006); [3] โรสนา กาชอ และคณะ, (2555); [4] อนุกุล เกียรติขวัญบุตร (2556)

ตารางที่ 3-4 ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากกระบวนการผลิต				น้ำป่อสุดท้าย				
	ผลการศึกษาค้างนี้		[1]	[2]	ระบบแบบ A *		ระบบแบบ B <sup>*,a</sup>		
	ระบบแบบ A *	ระบบแบบ B <sup>*,a</sup>			ผลการศึกษาค้างนี้	[3]	[4]	ผลการทดลองค้างนี้	[3]
ของแข็งระเหยง่าย	52,568	41,330-57,310 (48,747±6,248)	42,000-82,000	-	3,825	-	-	223-4,067 (2,108±1,338)	-
ไขมันและน้ำมัน	16,650	10,793-17,267 (14,411±2,441)	16-2,500	7,250	920	240	620	9-480 (97±156)	700
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	69	13-59 (41±16)	27-61	-	222	244	-	5-150 (70±58)	91
ทีเคเอ็น	152	80-140 (104±21)	-	1,020	410	328	1,212	5-370 (129±116)	151

หมายเหตุ: \* ระบบแบบ A คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร, ระบบแบบ B คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร  
<sup>a</sup> ผลการศึกษาแสดงเป็นช่วงและค่าเฉลี่ย เนื่องจากระบบแบบ B เก็บข้อมูลจาก 8 โรงงาน ในขณะที่ระบบแบบ A เก็บข้อมูลจาก 1 โรงงาน  
 ค่าทุกค่ามีหน่วยเป็น mg/L ยกเว้นค่าพีเอช, - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ที่มา: [1] พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, (2533); [2] Chavalparit (2006); [3] โรสนา กาชอ และคณะ, (2555); [4] อนุกุล เกียรติขวัญบุตร (2556)

ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน และค่าที่เคเอ็นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต น้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเช่นเดียวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ ระบบบ่อบั่ปรับเสถียรซึ่งรับน้ำเสียจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดด้วยระบบบ่อบั่แอนแอโรบิกหลายๆ บ่ ลดค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็น ได้เฉลี่ย 63% และ 66% ตามลำดับ

น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบั่ปรับเสถียร มีค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน และค่าที่เคเอ็นสูงกว่ามาตรฐาน ทำให้ไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในส่วนนี้ กรณีที่โรงงานต้องการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นเกณฑ์ โรงงานต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมเพื่อบำบัดน้ำในบ่อบั่สุดท้ายของระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบั่ปรับเสถียร โดยระบบบำบัดที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติมต้องมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการลดค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน ตลอดจนทีเคเอ็น ได้สูงกว่า 71%, 84% และ 21% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อบั่สุดท้ายของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพจากการศึกษาในครั้งนี้ กับน้ำทิ้งบ่อบั่สุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแบบเดียวกันของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโรงงานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-4 พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในบ่อบั่สุดท้ายของแต่ละโรงงานมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นต่าง และมีค่าความสกปรกที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภท ระยะเวลาในการกักเก็บของระบบบ่อก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ และประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของระบบ จำนวนบ่อบั่ปรับเสถียรซึ่งรับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพ ขนาดของบ่อบั่ และระยะเวลาในการกักเก็บ จากการเข้าเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าบางโรงงานมีการเติมอากาศในบ่อบั่สุดท้ายก่อนนำน้ำไปรดสวนปาล์มน้ำมัน ตลอดจนมีโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ และใช้พื้นที่ในส่วนของระบบบ่อบั่ปรับเสถียรก่อสร้างเป็นระบบบึงประดิษฐ์ประเภทน้ำไหลบนผิว (free water surface) แบบน้ำตื้นเท่ากันตลอด โดยเมื่อเพิ่มระบบบึงประดิษฐ์เป็นผลให้น้ำในบ่อบั่สุดท้ายมีค่าความสกปรกลดน้อยลง โดยมีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมันเป็น 99.96% และ 99.8% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ย 3.96% และ 0.7% ตามลำดับ

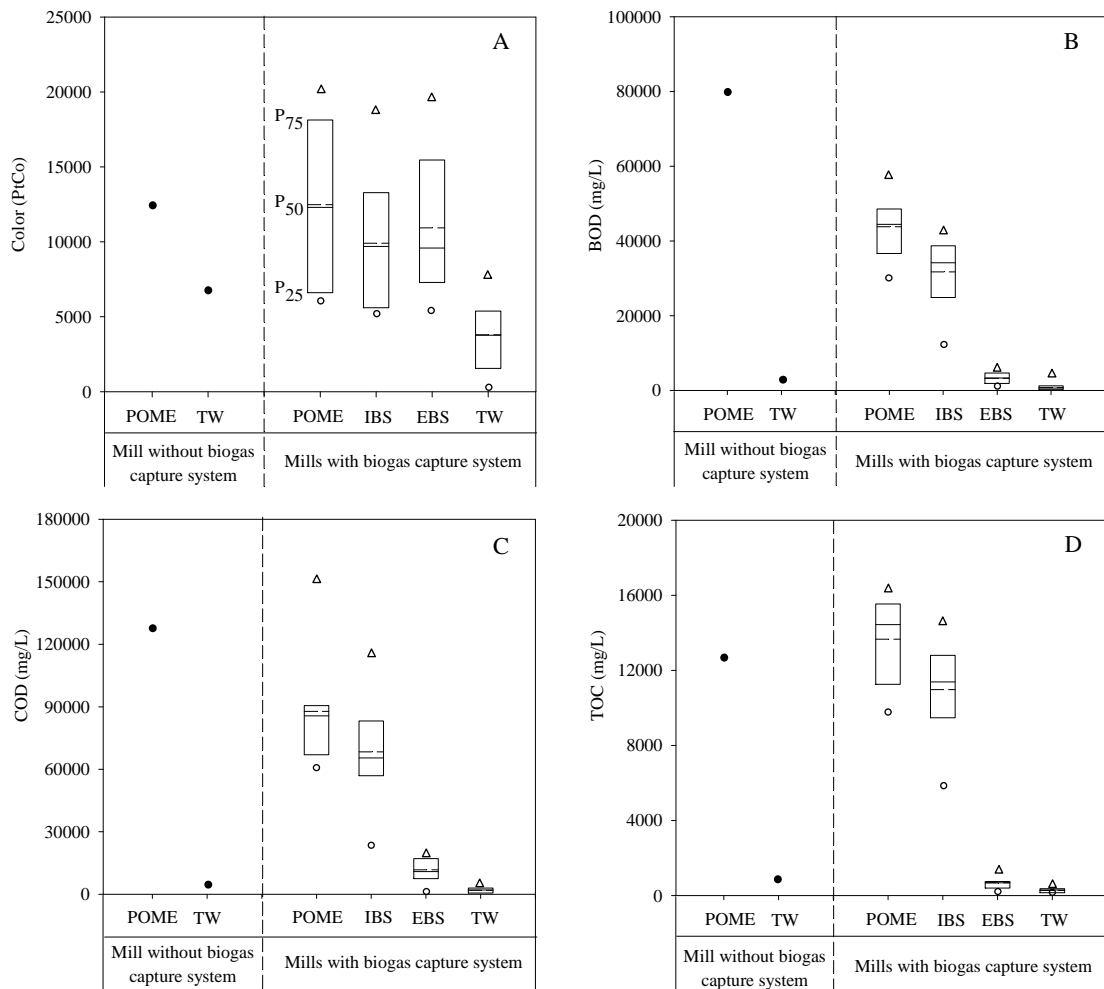
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของทั้ง 2 ระบบ พบว่าระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบั่ปรับเสถียรมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในน้ำเสียได้ดีกว่าระบบบ่อบั่ปรับเสถียร เนื่องจากจุลชีพในระบบบ่อก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน ประกอบกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบดังกล่าวถูกบำบัดต่อโดยระบบบ่อบั่ปรับเสถียรก่อนเก็บกักในบ่อบั่สุดท้าย เป็นผลให้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในน้ำเสียดีกว่าระบบบำบัดแบบบ่อบั่ปรับเสถียรเพียงอย่างเดียว

การใช้เครื่องแยกน้ำและของแข็งออกจากน้ำมัน มีผลต่อปริมาณและลักษณะน้ำเสีย ที่ออกจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบเช่นกัน เตือนใจ ปิยัง, (2555) พบว่า เครื่องจักรที่ใช้ในการ สกัดน้ำมันปาล์มดิบของแต่ละโรงงาน ไม่มีความแตกต่างในเรื่องของกรรมวิธีหรือความหลากหลายใน เชิงเทคนิค เว้นแต่เครื่องจักรที่ใช้ในการแยกน้ำและของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำมัน เครื่องจักรที่ สำคัญในขั้นตอนนี้ ได้แก่ เครื่องตีแคนเตอร์และเครื่องเซพพาราเรเตอร์ การดำเนินการในปัจจุบันมี 3 ลักษณะ คือ (1) ใช้เครื่องตีแคนเตอร์ (2) ใช้เครื่องเซพพาราเรเตอร์ (3) ใช้เครื่องตีแคนเตอร์ร่วมกับเซพ พาราเรเตอร์ จากการศึกษาพบว่า โรงงานที่ใช้เครื่องเซพพาราเรเตอร์มีปริมาณน้ำทิ้งต่อตันทะลายปาล์มสด สูงกว่าโรงงานที่ใช้เครื่องตีแคนเตอร์ การใช้เครื่องแยกตีแคนเตอร์ช่วยลดต้นทุนการผลิตทั้งค่าใช้จ่าย ด้านเครื่องจักรและพลังงาน ขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีถังตกจม ไม่ จำเป็นต้องใช้น้ำในการเจือจางมาก ทำให้มีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นน้อย และมีปริมาณของแข็ง แขวนลอยปนเปื้อนมากับน้ำเสียดำ ในขณะที่ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของเครื่องจักรทั้งสอง แบบมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 95.9% และ 95.3% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันโดยการติดตั้งเครื่องเซพพาราเรเตอร์ร่วมกับเครื่องตีแคนเตอร์ เพื่อแยก น้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ออกจากเครื่องตีแคนเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออก จากน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 97%

### 3.3.2 ค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

#### สี

ผลการวิเคราะห์ค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแสดงดังรูปที่ 3-1 ส่วนประสิทธิภาพการลดค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแสดงในตารางที่ 3-5 น้ำเสียที่ออก จากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรมี ลักษณะสีน้ำตาลแดงมีค่าหน่วยสีเป็น 12,417 PtCo ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าหน่วยสีได้ 46% น้ำที่ ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลคล้ำโดยมีค่าหน่วยสีเป็น 6,733 PtCo ค่าหน่วยสี ในน้ำบ่อสุดท้ายจากระบบบ่อปรับเสถียรในการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับการศึกษาของ Zahrim *et al.*, (2009) ซึ่งตรวจวัดค่าหน่วยสีในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบ่อปรับเสถียรของ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแห่งหนึ่งในประเทศมาเลเซีย โดยผลการศึกษาพบว่าน้ำ ทิ้งที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำมีค่าหน่วยสีอยู่ในช่วง 3,816-6,994 PtCo อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยสีในน้ำบ่อสุดท้ายกับผลการศึกษาของ Kietkwanboot *et al.*, (2013) ซึ่งตรวจวัดค่าหน่วยสีในน้ำบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในจังหวัดสตูลที่มีระบบ บำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรเรียงต่อกันจำนวน 3 บ่อ น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ ดังกล่าวมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำ โดยมีค่าหน่วยสีเป็น 16,500 PtCo ค่าหน่วยสีในน้ำจากบ่อสุดท้าย ของแต่ละโรงงานขึ้นอยู่กับกระบวนการ เทคโนโลยี และการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียของแต่ละ โรงงาน



รูปที่ 3-1 ค่าสี (A) บีโอดี (B) ซีโอดี (C) และทีโอซี (D) ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

หมายเหตุ: POME คือ Palm oil mill effluent

IBS คือ Influent wastewater into biogas capture system

EBS คือ Effluent water from biogas capture system

TW คือ Treated wastewater

• คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

◦ คือ ค่าต่ำสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

△ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

— คือ ค่ามัธยฐาน (Median) ของข้อมูล

--- คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของข้อมูล

P<sub>25</sub> คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 25 ของข้อมูล

P<sub>50</sub> คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของข้อมูล (ค่ามัธยฐานของข้อมูล)

P<sub>75</sub> คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 75 ของข้อมูล

น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร มีลักษณะสีน้ำตาลแดงซึ่งมีค่าหน่วยสีอยู่ในช่วง 6,267-20,667 PtCo และมีค่าเฉลี่ยเป็น 12,477 PtCo เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยสีของน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีและไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแต่มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Mohammed *et al.*, (2014) ซึ่งพบว่าลักษณะสีของน้ำที่ออกจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีสีน้ำตาลแดงโดยมีค่าหน่วยสีเป็น 9,000 PtCo

บ่อแอนแอโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบ่อก๊าซชีวภาพ ลดค่าสีได้เฉลี่ย 19% น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีลักษณะสีน้ำตาลแดง มีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 9,902 PtCo โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,333-18,417 PtCo ระบบบ่อก๊าซชีวภาพลดค่าสีได้เล็กน้อย คิดเป็นค่าเฉลี่ย 12% สีของน้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีลักษณะสีดำนวล มีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 10,925 PtCo โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,433-19,500 PtCo เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยพบว่าน้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าหน่วยสีเพิ่มสูงขึ้นกว่าน้ำเข้าระบบเล็กน้อย เนื่องจากเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ระหว่างน้ำตาล (คาร์โบไฮเดรต) กับโปรตีน (กลุ่มอะมิโน) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มสารประกอบเมลานอยดิน (Zahrim *et al.*, 2009) ส่งผลให้ค่าหน่วยสีเพิ่มสูงขึ้น ระบบบ่อปรับเสถียรซึ่งรับน้ำเสียจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดด้วยระบบบ่อแอนแอโรบิกหลายบ่อ เป็นระบบหลักที่ลดค่าหน่วยสีในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยลดค่าหน่วยสีได้เฉลี่ย 55% ลักษณะสีน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีสีน้ำตาลคล้ำ โดยมีค่าหน่วยสีอยู่ในช่วง 313-8,333 PtCo คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,795 PtCo เมื่อพิจารณาน้ำทิ้งในบ่อสุดท้ายของทั้งสองระบบพบว่าจะยังคงมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำ ส่งผลให้ไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

Bunrung *et al.*, (2011) และ Rakamthong *et al.*, (2011) ตรวจวัดค่าหน่วยสีในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดสุราษฎร์ธานี 2 โรงงาน โดยโรงงานดังกล่าวใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำโดยมีค่าหน่วยสีเป็น 1,633 และ 2,417 PtCo ตามลำดับ ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ แต่เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยพบว่าค่าหน่วยสีเฉลี่ยจากการศึกษาครั้งนี้สูงกว่างานวิจัยดังกล่าว

ตารางที่ 3-5 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

พารามิเตอร์	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (1 โรงงาน)	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (8 โรงงาน)				
	ประสิทธิภาพ <sup>a</sup> (%)	ประสิทธิภาพแต่ละบ่อ <sup>b</sup> (%)			ประสิทธิภาพสะสม <sup>c</sup> (%)	
		บ่อปรับเสถียร	บ่อแอนแอรโรบิก	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*	บ่อก๊าซชีวภาพ
<b>สี (PtCo)</b>						
ช่วง	N.A.	4-39	2-38	30-94	11-51	45-95
ค่าเฉลี่ย	46	19±11	12±16	55±22	23±19	70±18
<b>บีโอดี (mg/L)</b>						
ช่วง	N.A.	11-58	77-97	45-95	87-98	96-99.7
ค่าเฉลี่ย	97	29±16	89±6	70±21	93±4	98±1
<b>ซีโอดี (mg/L)</b>						
ช่วง	N.A.	2-60	75-91	17-98	76-96	95-99.8
ค่าเฉลี่ย	96	23±19	84±6	70±28	87±6	97±2

หมายเหตุ: N.A. = Not available, <sup>a</sup>ประสิทธิภาพการลดค่าสี = [(ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสีน้ำทิ้งบ่อสุดท้าย)/ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, <sup>b</sup>ประสิทธิภาพค่าสีแต่ละบ่อ = [(ค่าสีน้ำเสียที่เข้าบ่อ-ค่าสีน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสีน้ำเสียที่เข้าบ่อ]×100, <sup>c</sup>ประสิทธิภาพค่าสีสะสม = [(ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสีน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, b และ c คือ ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่เกิดจากการเฉลี่ยค่าของทุกโรงงาน, \* ประสิทธิภาพเฉลี่ยของ 7 โรงงาน ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดี, ซีโอดี และทีโอดีคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับสมการดังกล่าวข้างต้น



ตารางที่ 3-5 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสี บีโอดี ซีโอดี และทีโอดี ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (ต่อ)

พารามิเตอร์	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (1 โรงงาน)	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (8 โรงงาน)				
	ประสิทธิภาพ <sup>a</sup> (%)	ประสิทธิภาพแต่ละบ่อ <sup>b</sup> (%)			ประสิทธิภาพสะสม <sup>c</sup> (%)	
		บ่อปรับเสถียร	บ่อแอนแอโรบิก	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*	บ่อก๊าซชีวภาพ
ทีโอดี (mg/L)						
ช่วง	N.A.	4-46	91-96	2-91	91-97	97-99.3
ค่าเฉลี่ย	94	20±13	94±2	44±35	95±2	98±1

หมายเหตุ: N.A. = Not available, <sup>a</sup> ประสิทธิภาพการลดค่าสี = [(ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสีน้ำทิ้งบ่อสุดท้าย)/ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, <sup>b</sup> ประสิทธิภาพค่าสีแต่ละบ่อ = [(ค่าสีน้ำเสียที่เข้าบ่อ-ค่าสีน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสีน้ำเสียที่เข้าบ่อ]×100, <sup>c</sup> ประสิทธิภาพค่าสีสะสม = [(ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสีน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสีน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, b และ c คือ ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่เกิดจากการเฉลี่ยค่าของทุกโรงงาน, \*ประสิทธิภาพเฉลี่ยของ 7 โรงงาน ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดี, ซีโอดี และทีโอดีคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับสมการดังกล่าวข้างต้น

## บีโอดี

ค่าบีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรมีค่า 80,250 mg/L ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าบีโอดีได้ 97% น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าบีโอดีเป็น 2,783 mg/L ค่าบีโอดีดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าจากการศึกษาของ โรสนา กาชอ, (2555) และ Kietkwanboot *et al.*, (2013) ที่ตรวจวัดค่าบีโอดีในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้เป็น 146 และ 1,356 mg/L ตามลำดับ

สำหรับน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีค่าบีโอดีเฉลี่ยเป็น 43,800 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 31,500-57,400 mg/L ค่าดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าบีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร แต่มีค่าสูงกว่าช่วงค่าจากงานวิจัยของ พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ (2533) ที่แสดงค่าบีโอดีในน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในช่วง 50,000-60,000 mg/L ค่าบีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านแต่ละระบบของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยบ่อแอนแอรโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบ่อก๊าซชีวภาพลดค่าบีโอดีเฉลี่ยได้ 29% น้ำเสียก่อนเข้าสู่บ่อก๊าซชีวภาพมีค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 13,200-43,100 mg/L คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31,721 mg/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักที่ลดค่าบีโอดีได้เฉลี่ย 89% น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าบีโอดีเฉลี่ยเป็น 3,218 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 960-5,420 mg/L ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าบีโอดีเฉลี่ย 70% น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีค่าบีโอดีเฉลี่ยเป็น 732 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 106-1,815 mg/L ปัจจุบันน้ำในบ่อสุดท้ายมิได้มีการปล่อยทิ้งออกจากโรงงาน โดยได้มีการนำน้ำดังกล่าวไปรดสวนปาล์มภายในโรงงาน ค่าบีโอดีในน้ำจากบ่อสุดท้ายในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าวจากการศึกษาของ กาญจณี ชูทอง, (2556) และ โรสนา กาชอ, (2555) ซึ่งตรวจวัดค่าบีโอดีของน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเป็น 54 และ 104 mg/L ตามลำดับ

## ซีโอดี

น้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรมีค่าซีโอดีเท่ากับ 128,000 mg/L ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าซีโอดีได้ 96% เมื่อผ่านการบำบัด พบว่าค่าซีโอดีในน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 4,800 mg/L จากการศึกษาของ Kaewmai *et al.*, (2012) ซึ่งตรวจวัดค่าซีโอดีในน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร โดยมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 62,853-74,334 mg/L มีค่าเฉลี่ยเป็น 67,453 mg/L น้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 2,064 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 474-2,851 mg/L ค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียจากงานวิจัยดังกล่าวมีค่าเป็น 97%

ซีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีค่าเฉลี่ยเป็น 87,748 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 60,547-152,320 mg/L ซีโอดีจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านแต่ละระบบของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยบ่อแอนแอรโรบิกลดค่าซีโอดีได้เฉลี่ย 23% น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบ่อก๊าซชีวภาพมี

ค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 68,338 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 24,507-115,763 mg/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพ เป็นระบบหลักที่ลดค่าซีโอดี โดยลดค่าซีโอดีได้เฉลี่ย 84% น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่า ซีโอดีเฉลี่ยเป็น 11,721 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2,162-21,840 mg/L น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อ สูดท้ายมีค่าซีโอดี เฉลี่ยเป็น 1,910 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 190-3,400 mg/L บ่อปรับเสถียรลดค่าซี โอดีเฉลี่ย 70% ซึ่งน้ำบ่อสุดท้ายมีได้มีการปล่อยทิ้งออกจากโรงงาน โดยได้มีการนำน้ำดังกล่าวไปรด สวนปาล์มภายในโรงงาน

ค่าน้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายจากการศึกษาในครั้งนี้มีใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kaewmai *et al.*, (2013) ซึ่งตรวจวัดค่าซีโอดีในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมี บ่อก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าค่าซีโอดีในน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตมีค่าเฉลี่ยเป็น 93,044 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 53,082-124,342 mg/L บ่อแอนแอรโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิ ลด ค่าซีโอดีได้เฉลี่ย 27% น้ำเสียก่อนเข้าระบบบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 52,576-92,516 mg/L เฉลี่ยได้ 73,027 mg/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่าซีโอดีเฉลี่ยได้ 81% น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 16,085 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3,902-31,982 mg/L น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดบ่อสุดท้ายมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 488-13,437 mg/L มีค่าเฉลี่ยเป็น 4,694 mg/L

ที่ผ่านมามีค่าซีโอดี เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการวัดค่าความสกปรกของน้ำเสียจาก อาคารบ้านเรือน แหล่งชุมชน และจากโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์สามารถทำได้กับตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านและไม่ผ่านการกรอง ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมดที่ไม่ผ่านการกรอง โดยค่าซีโอดี วิเคราะห์ในรูปของปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน โดยอาศัยสารออกซิไดซ์เป็นตัวให้ออกซิเจนในปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและ ที่อุณหภูมิสูง เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ จาก ข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ เพื่อให้อิเล็กตรอน กรณีที่น้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์มีสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ที่เป็นสารอนินทรีย์ปนเปื้อน อยู่ด้วย สารดังกล่าวก็สามารถเกิดการย่อยสลายได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าซีโอดีที่ได้จึงเป็นผลรวมของ สารอินทรีย์ทั้งหมดและสารอนินทรีย์บางส่วนที่มีอยู่ในน้ำเสีย (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542) จากข้างต้น เป็นผลให้ค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้มีโอกาสที่จะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง และเนื่องจากน้ำเสียของโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์มดิบมีการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์ที่เป็นสารรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์อยู่ด้วย เช่น ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ), ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ), ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) เป็นต้น ทำให้ค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้เป็นทั้ง สารอินทรีย์ทั้งหมดและสารอนินทรีย์บางส่วนที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงปริมาณ สารอินทรีย์คาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่จริงในน้ำเสีย และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ งานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์หาค่าที่ไอซีในตัวอย่างน้ำ เสีย

## ทีโอซี

ทีโอซี (Total Organic Carbon) คือ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำทั้งหมด วิเคราะห์โดยการเผาตัวอย่างจนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำ ค่าทีโอซีที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในการศึกษานี้เป็นค่าทีโอซีของตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.12 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีการปนเปื้อนสารแขวนลอยในปริมาณสูงอาจส่งผลต่อการทำงานของเครื่องทีโอซี

จากการทดลอง ค่าทีโอซีของน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร มีค่าเท่ากับ 12,654 mg/L บ่อปรับเสถียรลดค่าทีโอซีได้ 94% น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีค่าทีโอซีเป็น 768 mg/L สำหรับน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีค่าทีโอซีอยู่ในช่วง 9,841-16,331 mg/L คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 13,656 mg/L ค่าทีโอซีลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านแต่ละระบบของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยบ่อแอนแอโรบิกลดค่าทีโอซีเฉลี่ยได้ 20% น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าทีโอซีเฉลี่ยเป็น 10,973 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,809-14,787 mg/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่าทีโอซี โดยลดค่าทีโอซีได้เฉลี่ย 94% น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าทีโอซีอยู่ในช่วง 378-1,397 mg/L คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้ 675 mg/L บ่อปรับเสถียรลดค่าทีโอซีเฉลี่ยได้ 44% น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายมีค่าทีโอซีเฉลี่ยเป็น 262 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 51-419 mg/L

ที่ผ่านมานิยมใช้ค่าซีไอดีเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายน้ำ เนื่องจากการวิเคราะห์ซีไอดีทำได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์มากกว่าการวิเคราะห์ผลในรูปของทีโอซี จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าซีไอดีและทีโอซีของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาคผนวก ข รูปที่ ข-1 แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นตรงดังกล่าวได้ เนื่องจากมีความแตกต่างในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ กล่าวคือ ในการศึกษาค้างนี้ค่าทีโอซีที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเป็นค่าทีโอซีที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีการปนเปื้อนสารแขวนลอยในปริมาณสูงอาจส่งผลต่อการทำงานของเครื่องทีโอซี ในทางกลับกันค่าซีไอดีที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเป็นค่าซีไอดีของตัวอย่างน้ำทั้งหมดซึ่งไม่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร พบว่า ระบบดังกล่าวลดค่าหน่วยสีได้เฉลี่ย 70% โดยมีประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 45%-95% ประสิทธิภาพรวมในการลดค่าหน่วยสีของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์มีค่าเป็น 96% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของช่วงประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสี และมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย 26% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพลดค่าหน่วยสีได้สูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร 24% การเพิ่มโอกาสให้น้ำเสียสัมผัสกับพวงจลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบบ่อก๊าซชีวภาพ โดยการกวนอย่างสมบูรณ์หรือการไหลตามกันภายในบ่อ

ก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสียและมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) เป็นผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มสารที่ก่อเกิดสีในน้ำเสีย จากโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เป็นสารที่มีโครงสร้างขนาดเล็กลง เช่น สารประกอบพวกกลีโคลิน แพนนิน และกรดฮิวมิก (Zahrim *et al.*, 2009) ประกอบกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพจะถูกบำบัดต่อโดยระบบบ่อบำบัดปรับเสถียร จุลินทรีย์ในระบบบ่อบำบัดปรับเสถียรสามารถย่อยสลายกลุ่มสารประกอบดังกล่าวได้ง่ายขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงเพิ่มสูงขึ้น

ประสิทธิภาพรวมในการลดค่าบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดปรับเสถียรมีค่าเฉลี่ยเป็น 98% โดยมีประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 96%-99.7% ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อบำบัดปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์ มีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าบีโอดีเป็น 99.7 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงค่าและค่าเฉลี่ยดังกล่าว ค่าเฉลี่ยดังกล่าวมีค่าสูงกว่าการลดค่าบีโอดีโดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดปรับเสถียรเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาการลดค่าค่าซีโอดี พบว่าประสิทธิภาพรวมของระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดปรับเสถียร สามารถลดค่าซีโอดีได้เฉลี่ย 97% โดยมีประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 95%-99.8% ประสิทธิภาพรวมในการลดค่าซีโอดีของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อบำบัดปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์เป็น 99.7% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงค่าและค่าเฉลี่ยดังกล่าว ค่าเฉลี่ยดังกล่าวมีค่าสูงกว่าการลดค่าซีโอดีโดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดปรับเสถียรเล็กน้อย

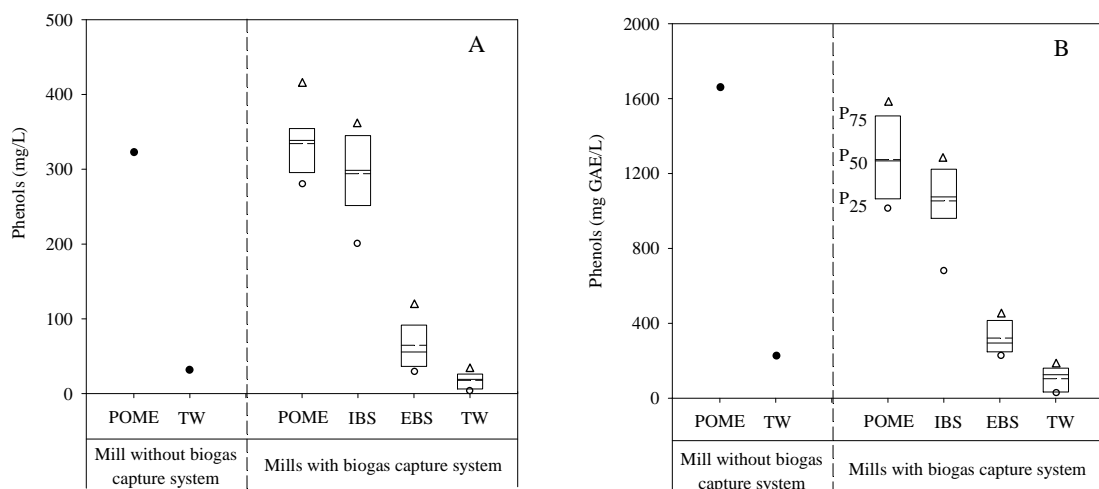
ประสิทธิภาพรวมของระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีระบบบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดปรับเสถียรในการลดค่าทีโอซีเฉลี่ยเป็น 98% โดยประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 97%-99.3% ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อบำบัดปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์ มีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าทีโอซีเป็น 99.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงค่าและค่าเฉลี่ยดังกล่าว ค่าเฉลี่ยดังกล่าวมีค่าสูงกว่าการลดค่าทีโอซีโดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดปรับเสถียร 4%

จากข้างต้นเห็นได้ว่าระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อบำบัดปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าบีโอดี ซีโอดี และทีโอซี ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพเฉลี่ยและช่วงค่าประสิทธิภาพ ของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อบำบัดปรับเสถียรเพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดค่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปบีโอดี ซีโอดี และทีโอซี พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าดังกล่าวสูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อบำบัดปรับเสถียรเพียงเล็กน้อย น้ำบ่อสุดท้ายจากทั้ง 2 ระบบยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์สูงไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดี บีโอดี และทีโอซีมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่าหน่วยสี กรณีที่โรงงานต้องการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โรงงานต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมเพื่อบำบัดน้ำในบ่อสุดท้ายของระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยระบบบำบัดที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติมต้องมีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดี และซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบปัจจุบันได้เฉลี่ยสูงกว่า 93% และ 84% ตามลำดับ

### 3.3.3 สารประกอบฟีนอล ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแสดงดังรูปที่ 3-2 ส่วนประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลแสดงดังตารางที่ 3-6 การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine พบว่า น้ำเสียของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรมีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 323 mg/L ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 90% น้ำจากบ่อสุดท้ายมีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 33 mg/L ส่วนน้ำเสียของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร มีค่าเฉลี่ยสารประกอบฟีนอลเป็น 334 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 281-419 mg/L ค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านแต่ละระบบของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยบ่อแอนแอโรบิกลดค่าสารประกอบฟีนอลได้เล็กน้อยคิดเป็นค่าเฉลี่ย 12% น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 294 mg/L ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 200-362 mg/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักที่ลดค่าสารประกอบฟีนอลได้เฉลี่ย 78% โดยมีค่าการลดอยู่ในช่วง 61%-86% น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพมีช่วงค่าสารประกอบ ฟีนอลเป็น 34-124 mg/L คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 65 mg/L ระบบบ่อปรับเสถียรลดค่าสารประกอบ ฟีนอลได้เฉลี่ย 61% โดยมีค่าการลดอยู่ในช่วง 35%-94% น้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 18 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-39 mg/L



รูปที่ 3-2 ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine (A) และวิธี Folin-Ciocalteu (B) ในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

สำหรับการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu พบว่า น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 1,661 mg GAE/L ระบบดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 86% น้ำที่ผ่านการบำบัดบ่อสุดท้ายมีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 226 mg GAE/L ส่วนโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร น้ำเสียจากกระบวนการผลิตมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ย 1,274 mg

GAE/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,017-1,583 mg GAE/L บ่อแอนแอโรบิกลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 17% น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 1,054 mg GAE/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 672-1,270 mg GAE/L ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่าสารประกอบฟีนอลได้เฉลี่ย 70% น้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 105 mg GAE/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2-177 mg GAE/L

อนุกุล เกียรติขวัญบุตร, (2556) ตรวจวัดค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-Ciocalteu ได้เท่ากับ 74 mg/L และ 475 mg GAE/L ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในระบบบำบัดเดียวกันของการศึกษาในครั้งนี้ และมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลองของ พนิดา ไต่ะสุ, (2554) ซึ่งตรวจวัดสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยบ่อปรับเสถียรได้ 30 mg/L

ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับรายงานที่ผ่านมาของ Alam *et al.*, (2009) ที่รายงานความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ตั้งอยู่ในประเทศมาเลเซียซึ่งมีค่ามากกว่า 1,000 mg/L Chantho *et al.*, (2013) ตรวจวัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ได้เท่ากับ 1,206 mg GAE/L ค่าดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ และค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่มีบ่อก๊าซชีวภาพของการศึกษาในครั้งนี้

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร มีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine เฉลี่ยเป็น 94% โดยมีประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 88%-99.0% สำหรับประสิทธิภาพรวมในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu มีประสิทธิภาพการลดอยู่ในช่วง 86%-98.7% ประสิทธิภาพการลดเฉลี่ยเป็น 90% ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์ มีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-Ciocalteu เป็น 99.7% และ 99.8% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของช่วงประสิทธิภาพการลด และมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย 5.7% และ 9.8% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพรวมในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดทั้ง 2 วิธี พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าวของระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรเล็กน้อยประมาณ 4% เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบบ่อก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน โดยสารประกอบฟีนอลเป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ ประกอบกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพจะถูกบำบัดต่อด้วยระบบบ่อปรับเสถียรก่อนเก็บกักในบ่อสุดท้ายเพื่อนำไปรดสวนปาล์ม เป็นผลให้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบฟีนอลดีกว่าระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรเพียงอย่างเดียว กรณีที่โรงงานต้องการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โรงงานต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมเพื่อบำบัดน้ำในบ่อสุดท้ายของระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยระบบบำบัดที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติมต้องมีประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบปัจจุบันจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-

aminoantipyrine ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจวัดฟีนอลตามมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉลี่ยเป็น 93%

เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้ง 2 วิธี พบว่าการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ให้ค่าสารประกอบฟีนอลสูงกว่าการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ประมาณ 5 เท่า เนื่องจากการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ไม่สามารถตรวจวัดกลุ่มสารประกอบฟีนอลที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่ง พวรา-ฟีนอล ได้ (APHA, AWWA and WEF, 2005) จึงให้ค่าสารประกอบฟีนอลล้นกว่าการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu สามารถตรวจวัดกลุ่มสารประกอบฟีนอลได้ทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตัวอย่างจึงได้ค่าของสารประกอบฟีนอลที่แท้จริงที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำ แต่เนื่องด้วยการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการดังกล่าวจึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้การวิเคราะห์หาค่าสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำ และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มจากการตรวจวัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้ง 2 วิธีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-Ciocalteu โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ได้แสดงในภาคผนวก ข รูปที่ ข-2 และมีสมการดังนี้ ค่าสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu =  $3.8039 \times$  ค่าสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์ด้วยวิธี 4-aminoantipyrine (จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 34 ตัวอย่าง  $R^2$  เป็น 0.9295 และ significant level เป็น 0.01)



ตารางที่ 3-6 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

การตรวจวัดฟีนอล	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (1 โรงงาน)*	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (8 โรงงาน)				
		ประสิทธิภาพแต่ละบ่อ <sup>b</sup> (%)			ประสิทธิภาพสะสม <sup>c</sup> (%)	
		บ่อปรับเสถียร	บ่อแอนแอมโรบิก	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*	บ่อก๊าซชีวภาพ
วิธี 4-aminoantipyrine (mg/L)						
ช่วง	N.A.	2-33	61-86	35-99.0	63-89	88-99.0
ค่าเฉลี่ย	90	12±11	78±10	66±24	81±10	94±3
วิธี Folin-ciocalteau (mg GAE/L)						
ช่วง	N.A.	2-41	63-75	33-99.3	66-81	86-98.7
ค่าเฉลี่ย	86	17±14	70±5	64±25	75±5	90±5

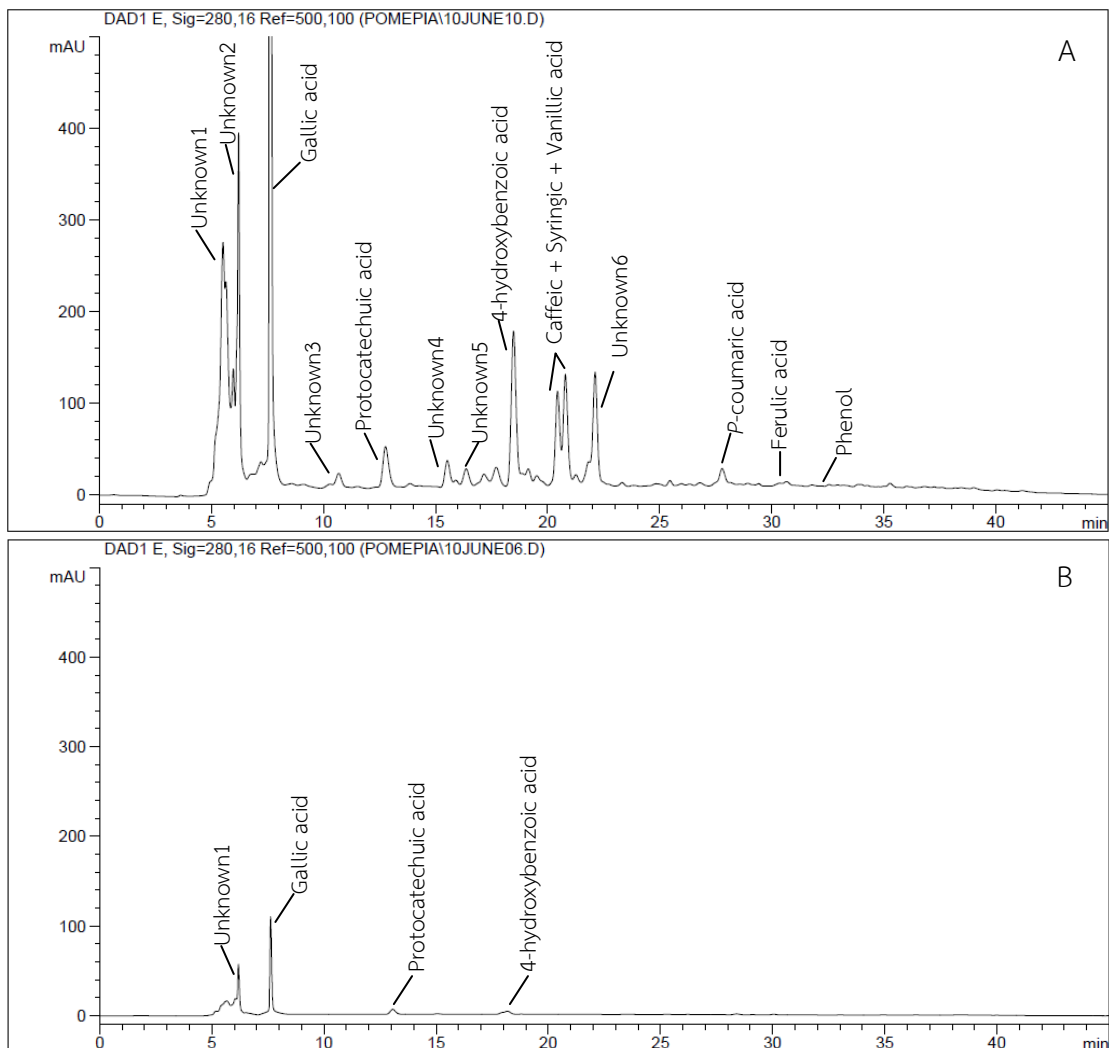
หมายเหตุ: N.A. = Not available, <sup>a</sup>ประสิทธิภาพการลดค่าสี = [(ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำทิ้งบ่อสุดท้าย)/ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, <sup>b</sup>ประสิทธิภาพค่าสีแต่ละบ่อ = [(ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียที่เข้าบ่อ-ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียที่เข้าบ่อ]×100, <sup>c</sup>ประสิทธิภาพค่าสีสะสม = [(ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียจากกระบวนการผลิต-ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำที่ออกจากบ่อ)/ค่าสารประกอบฟีนอลน้ำเสียจากกระบวนการผลิต]×100, b และ c คือ ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่เกิดจากการเฉลี่ยค่าของทุกโรงงาน, \* ประสิทธิภาพเฉลี่ยของ 7 โรงงาน

### 3.3.4 ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu สามารถตรวจวัดกลุ่มสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่มีการปนเปื้อนในน้ำเสีย แต่ไม่สามารถที่จะระบุถึงชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดได้

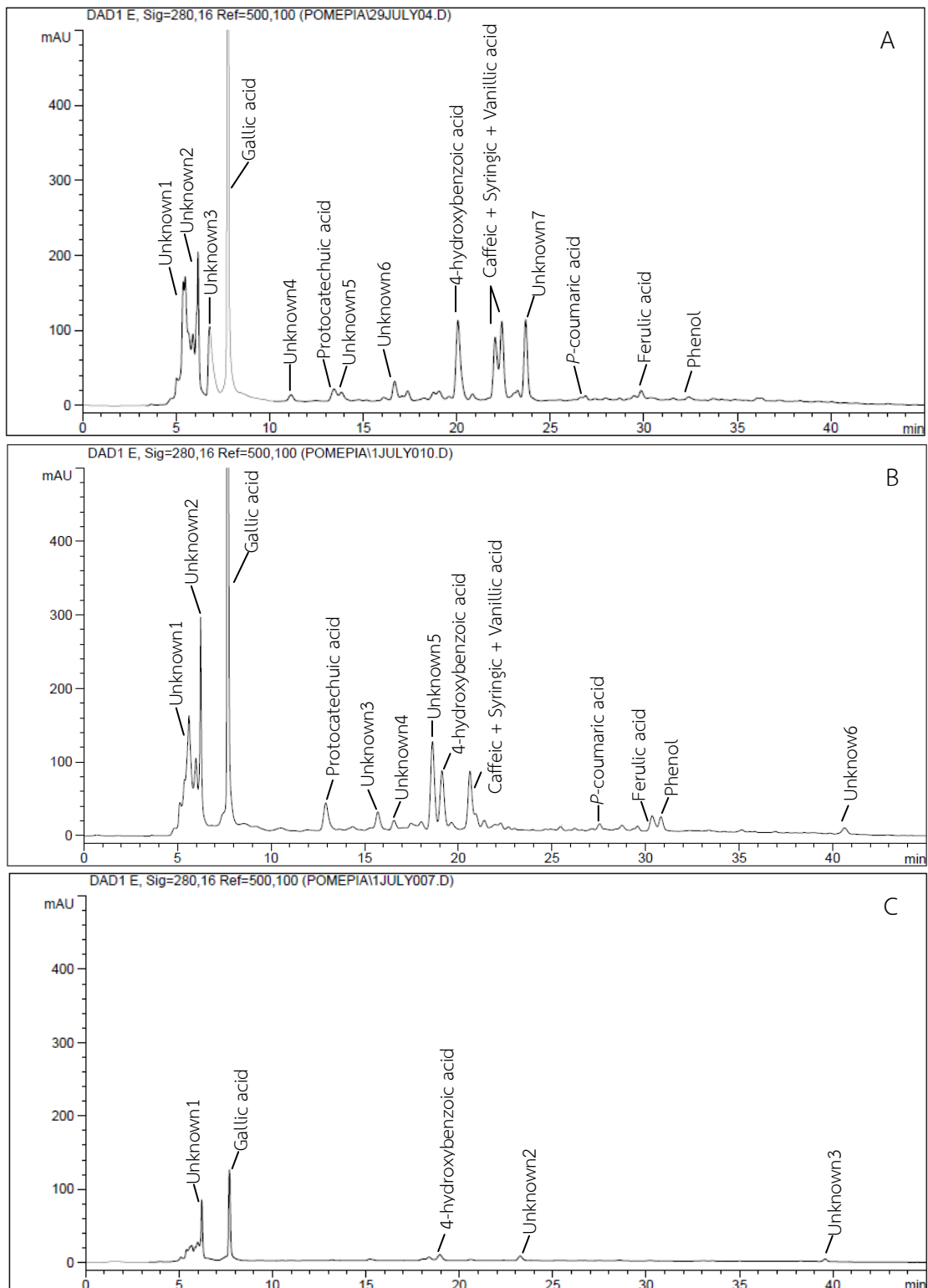
งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดชนิดของสารประกอบฟีนอลโดยใช้เครื่อง HPLC ในการวิเคราะห์ตัวอย่างโครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบ ฟีนอลจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรและแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงในรูปที่ 3-3 และ 3-4 สารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบ ได้แก่ (1) gallic acid (2) protocatechuic acid (3) 4-hydroxybenzoic acid (4) caffeic acid (5) syringic acid (6) vanillic acid (7) *p*-coumaric acid (8) ferulic acid (9) phenol ซึ่งสารประกอบฟีนอลทั้ง 9 ตัวนี้จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มโมโนไซคลิกฟีนอล (monocyclic phenols) ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยวงแหวนฟีนอล 1 วง สร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 1 หมู่หรือมากกว่า สารประกอบฟีนอลดังกล่าวทั้งหมดยกเว้นสารฟีนอลเป็นสารประกอบฟีนอลที่พบในผลปาล์มน้ำมัน (Maisarah *et al.*, 2013; Neo *et al.*, 2010) จากข้างต้นกล่าวได้ว่าสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสียนั้นตรงกันกับสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในผลปาล์มและสารเหล่านี้ถูกสกัดออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้พบว่า เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ (retention time; RT) ของสาร (4), (5) และ (6) มีค่าใกล้เคียงกันมากทำให้ไม่สามารถแยกพีคของสารดังกล่าวออกจากกันได้ ดังนั้นในการรายงานผลจึงรายงานเป็นผลรวมของสารทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังมีสารที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ (unknown) ซึ่งไม่สามารถที่จะระบุได้ว่าสารเหล่านี้เป็นสารในกลุ่มสารประกอบฟีนอลหรือไม่ เนื่องด้วยดีเทคเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างคือ ไดโอดอาร์เรย์ดีเทคเตอร์ สามารถตรวจวัดสารได้หลายประเภทไม่ใช่เฉพาะสารประกอบฟีนอล เช่น สารในกลุ่ม ester (-COOR), Aldehyde (-CHO), Nitro (-NO<sub>2</sub>), Amine (-NH<sub>2</sub>), Ethylene (-C=C-) เป็นต้น

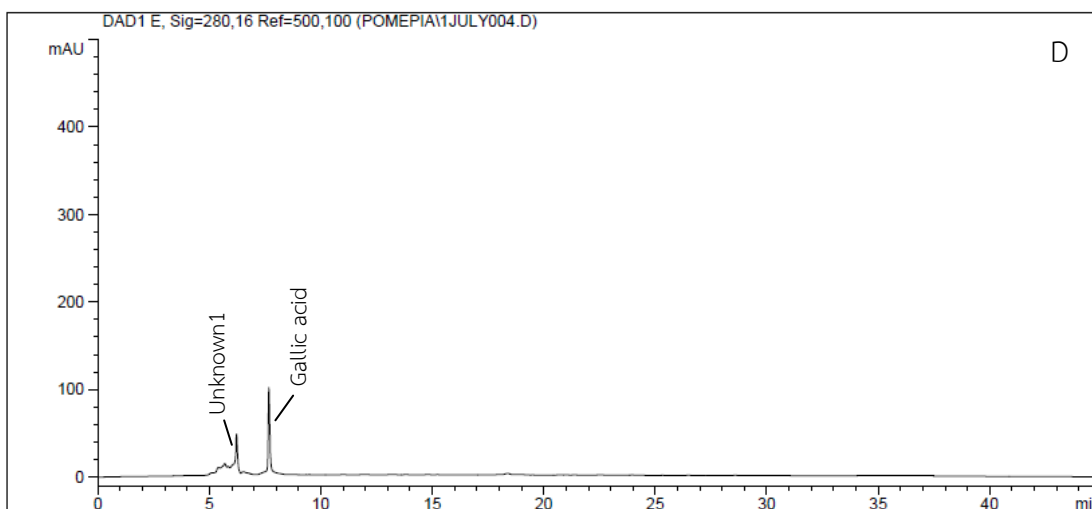


รูปที่ 3-3 โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย (A) และน้ำจากบ่อสุดท้าย (B) ที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

หมายเหตุ: LOD (limits of detection) ของ phenol = 1 mg/L; protocatechuic acid และ 4-hydroxybenzoic acid = 0.5 mg/L; gallic acid, caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, *p*-coumaric acid และ ferulic acid = 0.25 mg/L



รูปที่ 3-4 โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำเสี้ยว (A), น้ำเสี้ยวก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ (B), น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพ (C) จากระบบบำบัดน้ำเสี้ยวแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

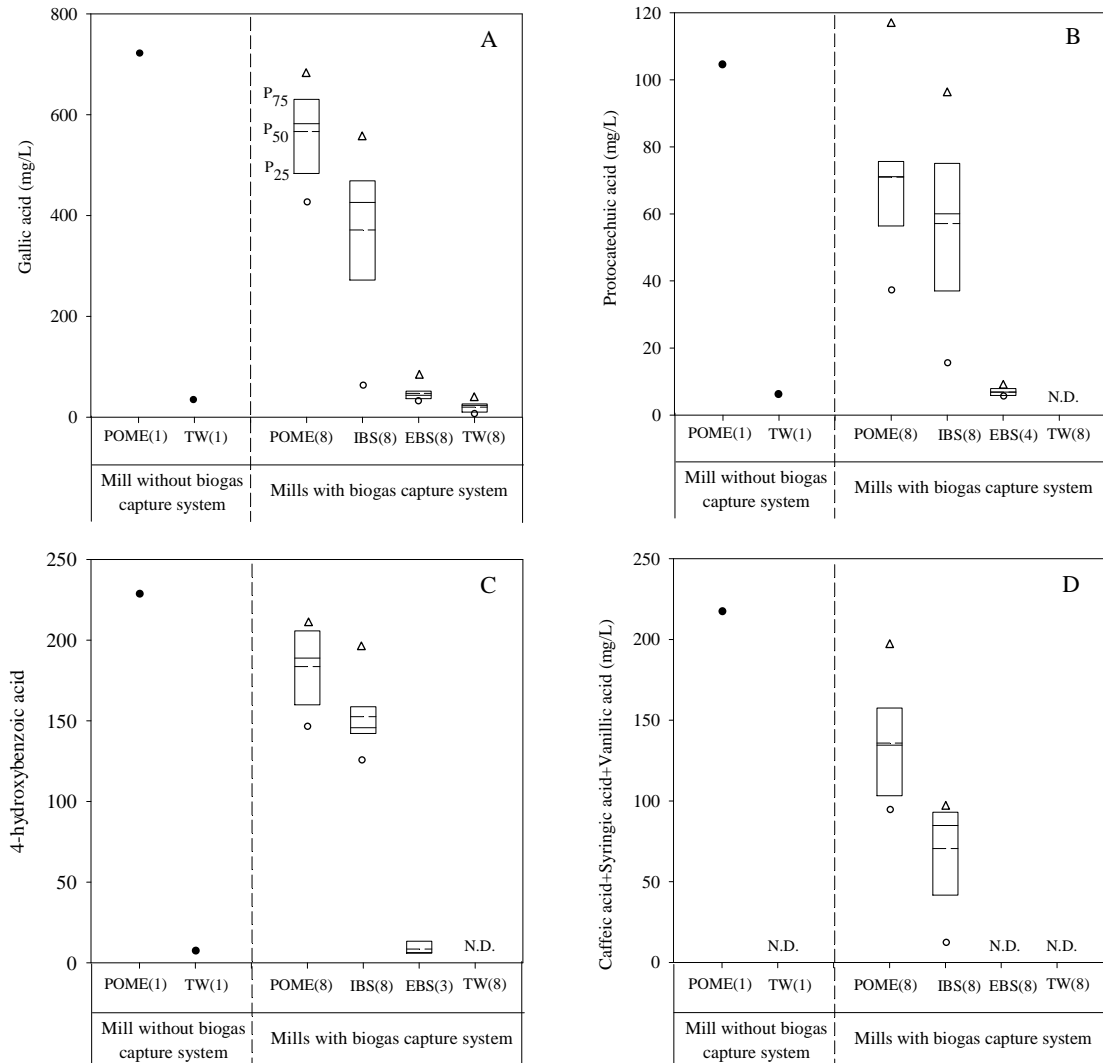


รูปที่ 3-4 โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลในน้ำจากบ่อสุดท้าย (D) ที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมัน

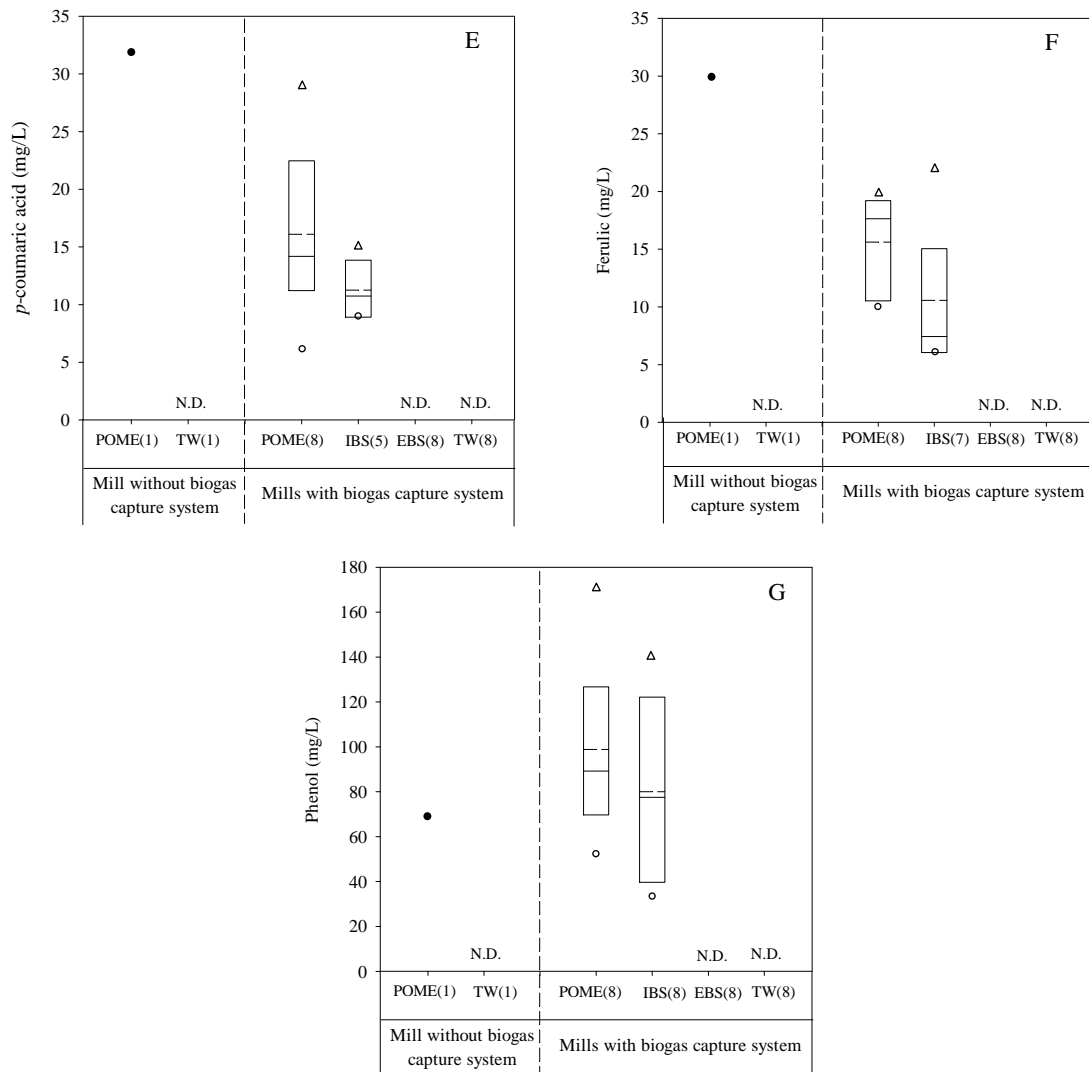
ผลการจำแนกชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแสดงดังรูปที่ 3-5 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรตรวจพบความเข้มข้น ของ gallic acid (726 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (229 mg/L) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (218 mg/L) > protocatechuic acid (105 mg/L) > phenol (69 mg/L) > *p*-coumaric acid (32 mg/L) > ferulic acid (30 mg/L) เมื่อผ่านการบำบัดน้ำจากบ่อสุดท้ายตรวจพบความเข้มข้นของ gallic acid (34 mg/L) > protocatechuic acid (6 mg/L) = 4-hydroxybenzoic acid (6 mg/L)

สำหรับชนิดของสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร ลำดับและความเข้มข้นที่ตรวจพบจากมากไปน้อย (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) ได้แก่ gallic acid (566 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (184 mg/L) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (136 mg/L) > phenol (99 mg/L) > protocatechuic acid (71 mg/L) > *p*-coumaric acid (16 mg/L) = ferulic acid (16 mg/L) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 434-686, 149-208, 93-199, 52-169, 38-118, 6-29, และ 10-20 mg/L ตามลำดับ บ่อแอนแอโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพลดค่าสารประกอบฟีนอลได้โดยตรวจพบสารประกอบฟีนอลในน้ำที่เข้าบ่อก๊าซชีวภาพจากมากไปน้อยได้แก่ (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) gallic acid (371 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (153 mg/L) > phenol (80 mg/L) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (71 mg/L) > protocatechuic acid (57 mg/L) > *p*-coumaric acid (11 mg/L, ค่าเฉลี่ยของโรงงาน 5 โรงงาน) > ferulic acid (11 mg/L, ค่าเฉลี่ยของโรงงาน 7 โรงงาน) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 68-566, 125-197, 33-140, 13-94, 16-96, 9-15 และ 6-22 mg/L ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าสารประกอบฟีนอลจากมากไปน้อย (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) คือ gallic acid (47 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (9 mg/L,

ค่าเฉลี่ยของโรงงาน 3 โรงงาน) > protocatechuic acid (6 mg/L, ค่าเฉลี่ยของโรงงาน 4 โรงงาน) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 34-80, 6-13 และ 6-8 mg/L ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายตรวจพบ gallic acid อยู่ในช่วง 4-31 mg/L คิดค่าเฉลี่ยได้ 20 mg/L



รูปที่ 3-5 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (A) gallic acid; (B) protocatechuic acid; (C) 4-hydroxybenzoic acid; (D) caffeic acid+syringic acid+vanillic acid



รูปที่ 3-5 ชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (E) *p*-coumaric acid; (F) ferulic acid; (G) phenol (ต่อ)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและชนิดของสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรและระบบแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร พบว่าลำดับและปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบมีความแตกต่างกัน จากงานวิจัยของ Neo *et al.*, (2010) ซึ่งตรวจวัดชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในผลปาล์มน้ำมันพันธุ์ *E. quineensis* ผลการศึกษาตรวจพบความเข้มข้นของ (หน่วยเป็น mg/g ของน้ำหนักแห้งของเนื้อปาล์มที่นำมาสกัด) 4-hydroxybenzoic acid > ferulic acid > *p*-coumaric acid > syringic acid > vanillic acid > caffeic acid > protocatechuic acid > gallic acid และจากการศึกษาของ Maisarah *et al.*, (2013) ซึ่งศึกษาชนิดและสารประกอบฟีนอลในผลปาล์มน้ำมันพันธุ์เทเนอราพันธุ์ลูกผสม PP24 และพันธุ์ลูกผสม PP29 พบว่าผลปาล์มน้ำมันของทั้งสองสายพันธุ์ลูกผสมตรวจพบความเข้มข้นของ (หน่วยเป็น mg/g ของน้ำหนักแห้งของเนื้อปาล์มที่นำมาสกัด)

syringic acid มากที่สุด รองลงมาคือ vanillic acid > gallic acid > ferulic acid > 4-hydroxybenzoic acid > caffeic acid > *p*-coumaric acid โดยที่พันธุ์ลูกผสม PP24 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลดังกล่าวข้างต้นมากกว่าพันธุ์ลูกผสม PP29

จากข้างจึงกล่าวได้ว่าปาล์มน้ำมันที่ต่างสายพันธุ์กัน หรือปาล์มน้ำมันพันธุ์เดียวกัน แต่ต่างพันธุ์ลูกผสมนั้น มีปริมาณและชนิดของสารประกอบฟีนอลในผลปาล์มที่ต่างกัน ดังนั้นสายพันธุ์ของปาล์มน้ำมันที่นำมาสกัดน้ำมันปาล์มดิบจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตรวจพบชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลที่ต่างกันได้ในน้ำเสียได้ โดยพันธุ์ปาล์มน้ำมันที่เพาะปลูกในแต่ละเขตพื้นที่ในภาคใต้ของประเทศไทยมีหลากหลายสายพันธุ์ เช่น พันธุ์ลูกผสมเทเนอรา พันธุ์ผสมสุราษฎร์ธานี 1-7 พันธุ์ดูรา เป็นต้น ดังนั้นในการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานแต่ละครั้งอาจจะใช้พันธุ์ปาล์มหลากหลายสายพันธุ์ที่อาจทำให้เกิดความแตกต่างของชนิดและความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

การย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฟีนอล โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเสียสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (aerobic) และไม่มีอากาศ (anaerobic) กระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (รูปที่ 2-7) เกิดตรงบริเวณผิวหน้าของน้ำที่มีการสัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศ ในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะที่มีอากาศจะได้น้ำ ( $H_2O$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ (Khalid and Naas, 2012) สำหรับกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่ไม่มีอากาศ (รูปที่ 2-8) ซึ่งเกิดจากกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ (Khalid and Naas, 2012)

อย่างไรก็ตามเมื่อมีหมู่แทนที่มาเกาะบนวงแหวนเบนซีนจะส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากขึ้น จากการศึกษาของ Hernandez and Edyvean, (2008) พบว่าปริมาณและชนิดของหมู่แทนที่บนวงแหวนเบนซีนมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ โดยชนิดของหมู่แทนที่ที่เกาะโดยตรงกับวงแหวนเบนซีนมีผลต่อความเป็นพิษ และการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันตามลำดับ คือ  $COOH > OH > CH_2-CH_2-OH$

เมื่อพิจารณาน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ตรวจพบปริมาณ gallic acid > protocatechuic acid = 4-hydroxybenzoic acid เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างโมเลกุล (ตารางที่ 2-3) พบว่าโครงสร้างโมเลกุลของสารดังกล่าวข้างต้นมีหมู่แทนที่เดียวกันคือ  $-COOH$  และ  $-OH$  โดย gallic acid มีความเป็นพิษมากที่สุดทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อยที่สุดจึงมีปริมาณตกค้างจากการบำบัดมากที่สุด เนื่องจากมีหมู่  $-OH$  เกาะอยู่บนวงแหวนเบนซีนถึง 3 แขน รองลงมาคือ protocatechuic acid และ 4-hydroxybenzoic acid ซึ่งมีหมู่  $-OH$  เกาะอยู่บนวงแหวนเบนซีน 2 และ 1 แขนตามลำดับ

สำหรับน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร มีปริมาณสารประกอบฟีนอลเรียงตามลำดับ ดังนี้ gallic acid > 4-hydroxybenzoic acid > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid > phenol > protocatechuic acid > *p*-coumaric acid > ferulic acid บ่อแอนแอโรบิกที่ใช้เพื่อลดอุณหภูมิก่อนเข้าสู่บ่อก๊าซชีวภาพ มี



ปริมาณสารประกอบฟีนอลเรียงตามลำดับ ดังนี้ gallic acid > 4-hydroxybenzoic acid > phenol > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid > protocatechuic acid > *p*-coumaric acid > ferulic acid บ่อแอนแอโรบิกสามารถลดปริมาณเฉลี่ยของ caffeic acid+syringic acid+vanillic acid ได้มากกว่าปริมาณเฉลี่ยของ phenol และปริมาณเฉลี่ยของ *p*-coumaric acid และ ferulic acid ที่ตรวจพบในน้ำจากบ่อดังกล่าวมีค่าน้อย เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างพบว่าสารดังกล่าวสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ได้ง่าย (*p*-coumaric acid เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายกว่า ferulic acid) เมื่อผ่านบ่อแอนแอโรบิกทำให้ปริมาณสาร *p*-coumaric acid และ ferulic acid ลดลง น้ำที่ออกจากบ่อก๊าซชีวภาพตรวจพบเจอปริมาณ gallic acid (ตรวจพบในทุกโรงงาน) > protocatechuic acid (ตรวจพบในทุกโรงงาน) > 4-hydroxybenzoic acid (ตรวจพบเจอ 3 โรงงาน) ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นพิษและการย่อยสลายได้ง่ายของหมู่แทนที่ที่เกาะบนวงแหวนเบนซีน ส่วนน้ำในบ่อสุดท้ายบ่อสุดท้ายตรวจพบ gallic acid ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายได้ง่าย

เมื่อพิจารณาปริมาณรวมและการกระจายตัวของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ดังแสดงดังรูปที่ 3-6 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรมีสารประกอบฟีนอลรวมเป็น 1,410 mg/L โดยประกอบด้วย gallic acid (52%) > 4-hydroxybenzoic acid (16%) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (15%) > protocatechuic acid (7%) > phenol (5%) > *p*-coumaric acid (2%) > ferulic acid (2%) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายมีค่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเท่ากับ 46 mg/L โดยประกอบด้วย gallic acid (74%) > protocatechuic acid (14%) > 4-hydroxybenzoic acid (13%) ประสิทธิภาพการรวมในการบำบัดสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 96.7%

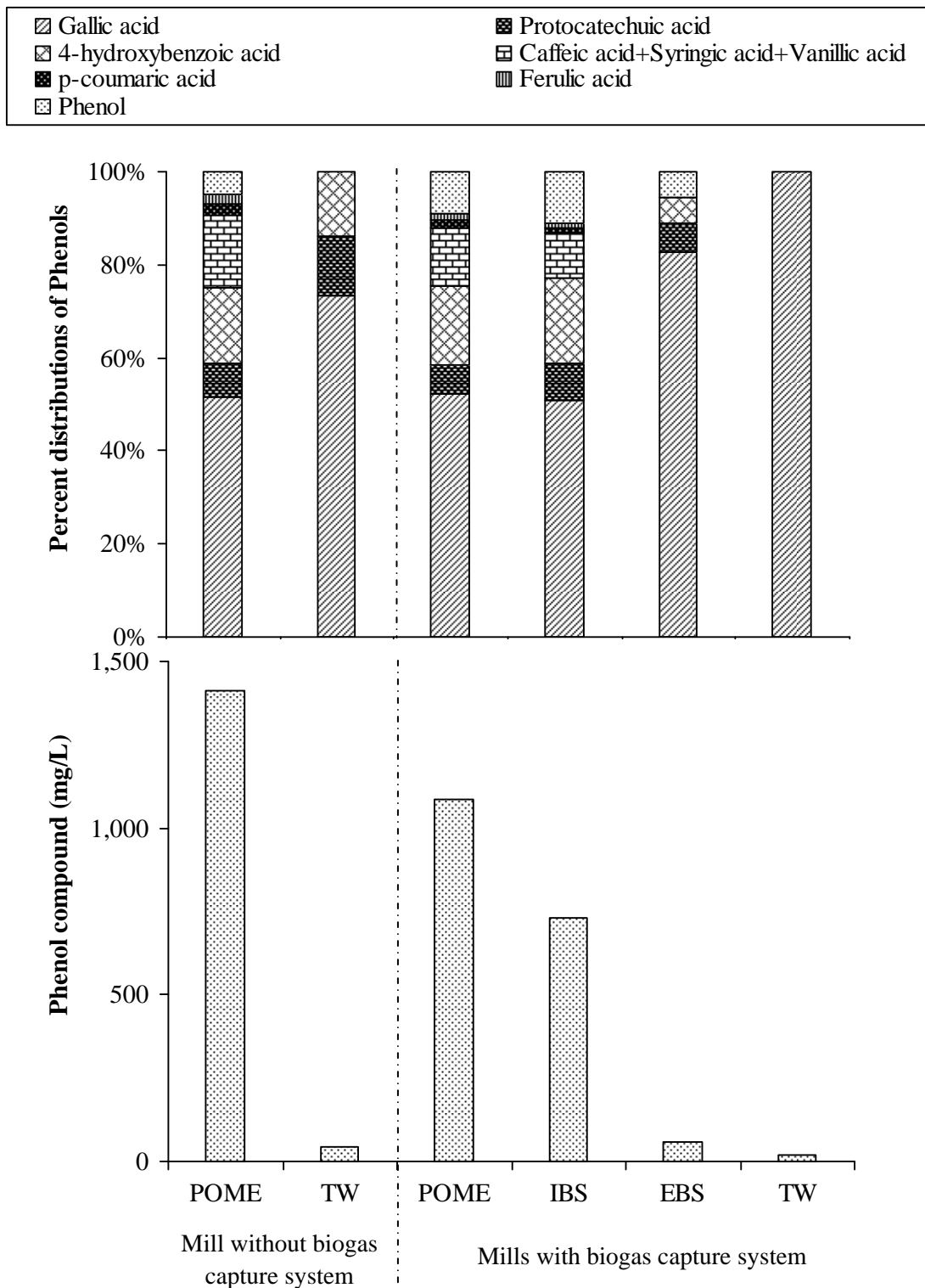
สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในน้ำเสียจากระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,087 mg/L ซึ่งประกอบด้วย (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) gallic acid (52%) > 4-hydroxybenzoic acid (17%) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (12%) > phenol (9%) > protocatechuic acid (7%) > *p*-coumaric acid (1%) > ferulic acid (1%) น้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงเฉลี่ยเป็น 754 mg/L ซึ่งประกอบด้วย (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) gallic acid (49%) > 4-hydroxybenzoic acid (20%) > phenol (11%) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (9%) > protocatechuic acid (8%) > *p*-coumaric acid (1%) > ferulic acid (1%) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมีค่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเฉลี่ยเป็น 62 mg/L ซึ่งประกอบด้วย (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) gallic acid (76%) > 4-hydroxybenzoic acid (14%) > protocatechuic acid (10%) น้ำจากบ่อสุดท้ายมีค่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเฉลี่ยเป็น 20 mg/L ซึ่งเป็น gallic acid ทั้งหมด

ประสิทธิภาพในการบำบัดชนิดของสารประกอบฟีนอล แสดงดังตารางที่ 3-7 ประสิทธิภาพการบำบัด gallic acid, protocatechuic acid และ 4-hydroxybenzoic acid ในน้ำเสียโดยระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร มีค่าเท่ากับ 94%, 95% และ 97% ตามลำดับ ไม่มีการตรวจพบ caffeic acid+syringic acid+vanillic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid และ phenol ใน

น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบดังกล่าว จึงกล่าวได้ว่าชนิดของสารประกอบฟีนอลดังกล่าวมีการย่อยสลายทางชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์

ส่วนน้ำเสียที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่าเฉลี่ยของ gallic acid เป็น 82% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 47-93% ประสิทธิภาพรวมในการลด gallic acid มีค่าเฉลี่ย 96% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 95-98.8% ประสิทธิภาพรวมในการลด gallic acid ของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบบ่อปรับเสถียรที่เพิ่มระบบบึงประดิษฐ์ เป็น 99.3% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของช่วงประสิทธิภาพการลดค่าดังกล่าว และมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย 3.3% เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลด protocatechuic acid พบว่าบ่อแอนแอโรบิกลดค่าเฉลี่ย protocatechuic acid ได้ 26% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 18-78% ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่า protocatechuic acid เฉลี่ยได้ 88% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 80-94% ไม่มีการตรวจพบ protocatechuic acid ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด

สำหรับประสิทธิภาพในการลด 4-hydroxybenzoic acid พบว่าระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักในการลดค่า 4-hydroxybenzoic acid โดยลดได้เฉลี่ย 95% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 93-96% ไม่มีการตรวจพบ 4-hydroxybenzoic acid ในน้ำที่ผ่านการบำบัด บ่อแอนแอโรบิกเป็นระบบหลักในการลดค่า caffeic acid+syringic acid+vanillic acid เฉลี่ยเป็น 45% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10-92% ไม่มีการตรวจพบ caffeic acid+syringic acid+vanillic acid ในน้ำเสียก่อนเข้าบ่อก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพรวมของระบบในการลดค่า *p*-coumaric acid และ ferulic acid พบว่าบ่อแอนแอโรบิกสามารถลดสารประกอบฟีนอลดังกล่าวได้เฉลี่ยเท่ากับ 40% และ 50% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 17-70 และ 10-68% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการลด phenol นั้นบ่อแอนแอโรบิกเป็นระบบหลักที่ลดสาร phenol ได้เฉลี่ยเป็น 32% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9-64%



รูปที่ 3-6 ความเข้มข้นและการกระจายตัวของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC

ตารางที่ 3-7 ประสิทธิภาพการบำบัดชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

สารประกอบฟีนอล	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (1 โรงงาน)	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (8 โรงงาน)					
		ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพแต่ละบ่อ (%)			ประสิทธิภาพสะสม (%)	
			บ่อปรับเสถียร	บ่อแอนแอรโรบิก	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*	บ่อก๊าซชีวภาพ
Gallic acid							
ช่วง	N.A.	1-89	47-93	27-89	88-94	95-98.8	
ค่าเฉลี่ย	94	32±31	82±16	47±22	92±2	96±1	
Protocatechuic acid							
ช่วง	N.A.	18-78	80-94	N.A.	88-95	N.A.	
ค่าเฉลี่ย	95	26±25	88±6	N.A.	34±4	N.A.	
4-hydroxybenzoic acid							
ช่วง	N.A.	6-23	93-96	N.A.	94-97	N.A.	
ค่าเฉลี่ย	97	13±7	95±2	N.A.	36±2	N.A.	
Caffeic acid + Syringic acid + Vanillic acid							
ช่วง	N.A.	10-92	N.D.	N.A.	N.D.	N.A.	
ค่าเฉลี่ย	N.A.	45±27	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

หมายเหตุ: N.A. = Not available, N.D. = Not detected, \*ประสิทธิภาพเฉลี่ยของ 7 โรงงาน

ตารางที่ 3-7 ประสิทธิภาพการบำบัดชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (ต่อ)

สารประกอบฟีนอล	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (1 โรงงาน)*	โรงงานที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร (8 โรงงาน)					
		ประสิทธิภาพแต่ละบ่อ (%)			ประสิทธิภาพสะสม (%)		
		บ่อปรับเสถียร	บ่อแอนแอรอบิก	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*	บ่อก๊าซชีวภาพ	บ่อปรับเสถียร*
<i>p</i> -coumaric acid							
ช่วง	N.A.	17-70	N.D.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ค่าเฉลี่ย	N.A.	40±27	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Ferulic acid							
ช่วง	N.A.	10-68	N.D.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ค่าเฉลี่ย	N.A.	50±25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Phenol							
ช่วง	N.A.	9-64	62-90	N.A.	76-92	N.A.	N.A.
ค่าเฉลี่ย	N.A.	32±20	19±20	N.A.	21±11	N.A.	N.A.

หมายเหตุ: N.A. = Not available, N.D. = Not detected, \*ประสิทธิภาพเฉลี่ยของ 7 โรงงาน

### 3.3.5 การคำนวณค่าเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสารประกอบฟีนอลจากน้ำทิ้งบ่อสุดท้าย

ปัจจุบันน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ไม่สามารถที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากยังมีค่าความสกปรกสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด หากในอนาคตถ้าโรงงานมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจนทำให้น้ำที่ผ่านระบบบำบัดมีความสกปรกผ่านตามค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งได้แล้ว สารประกอบฟีนอลถือเป็นสารที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องด้วยค่ามาตรฐานที่ค่อนข้างต่ำ (สารประกอบฟีนอลตามมาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.005 mg/L)

หลักในการคำนวณเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ คือ น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้นั้น ต้องมีคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องด้วยทางโรงงานมีการนำน้ำผิวดินบริเวณใกล้เคียงมาใช้ในกระบวนการผลิต การประเมินค่าเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์จากน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัด จึงอ้างอิงค่าสารประกอบฟีนอลตามมาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.005 mg/L โดยเป็นมาตรฐานแหล่งน้ำที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (ตารางที่ จ-2) ค่าเกรียวอเตอร์ที่ได้บ่งชี้ถึงค่าความสกปรกในน้ำโดยแสดงอยู่ในรูปของปริมาณน้ำดีที่ใช้เจือจางน้ำทิ้งเหล่านั้นให้มีคุณภาพเท่ากับน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

การคำนวณค่าเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสารประกอบฟีนอลจากน้ำบ่อสุดท้าย ดำเนินการ 2 วิธี คือ 1) ไม่คิดการปันส่วนค่าเกรียวอเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ โดยคิดเทียบกับปริมาณมวลรวมของผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานเพียงอย่างเดียว คือ น้ำมันปาล์มดิบทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และ 2) คิดการปันส่วนค่าเกรียวอเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ โดยคิดจากมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละตัว จากขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ อันได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ กะลา และเมล็ดในปาล์ม ในการคำนวณแต่ละวิธีแบ่งเป็น 2 กรณี คือ 1) คำนวณโดยใช้ค่าสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำบ่อสุดท้ายของแต่ละโรงงานจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และ 2) คำนวณโดยกำหนดให้สารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายของทุกโรงงานมีค่าเท่ากับ 1 mg/L ซึ่งกรณีนี้เป็นกรณีที่คาดการณ์ว่าหากในอนาคตโรงงานสามารถพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้งได้

ค่าเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสารประกอบฟีนอล คำนวณโดยไม่คิดการปันส่วนค่าเกรียวอเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 3-8 กรณีที่ 1 ค่าเกรียวอเตอร์จากน้ำบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ทำการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 541-19,003 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าเฉลี่ยเป็น 9,357 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ สำหรับกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีที่โรงงานสามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง มีค่าเกรียวอเตอร์ฟุตพริ้นต์อยู่ในช่วง 219-655 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 447 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ โดยมีค่าลดลงจากกรณีแรกเฉลี่ยเป็น 94%

ตารางที่ 3-8 ค่าเกี่ยวอเตอร์พุตพรินต์ของสารประกอบฟีนอลคำนวณโดยไม่คิดการปันส่วนค่าเกี่ยวอเตอร์ให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ

โรงงาน	เกี่ยวอเตอร์พุตพรินต์ (ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ)	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
A	9,645	221
B	9,140	655
C	11,410	219
D	19,003	487
E	-	-
F	15,187	642
G	541	541
H	2,001	407
I	8,902	346
เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก	9,357	447

หมายเหตุ: - ไม่มีข้อมูล

สำหรับค่าเกี่ยวอเตอร์ของผลิตภัณฑ์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งปันส่วนโดยใช้ราคาให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ อันได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ กะลา และเมล็ดในปาล์ม แสดงดังตารางที่ 3-9 กรณีที่ 1 เกี่ยวอเตอร์ของผลิตภัณฑ์จากน้ำทิ้งป้อนสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ค่าเกี่ยวอเตอร์ของน้ำมันปาล์มดิบมีค่าสูงที่สุด รองลงมา คือ เกี่ยวอเตอร์ของเมล็ดในปาล์ม และเกี่ยวอเตอร์ของกะลาปาล์ม ตามลำดับ เนื่องด้วยน้ำมันปาล์มดิบเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และลำดับของผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการสกัด คือ เมล็ดในปาล์ม และกะลาปาล์ม ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าเกี่ยวอเตอร์ของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลผลิตที่ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ค่าเกี่ยวอเตอร์ของน้ำมันปาล์มดิบ เมล็ดใน และกะลาปาล์ม มีค่าอยู่ในช่วง 444-15,109 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ 357-9,698 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม และ 42-1,223 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม มีค่าเฉลี่ยเป็น 7,619 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ 5,076 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม และ 641 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม ตามลำดับ

สำหรับกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีที่โรงงานสามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง มีค่าเกี่ยวอเตอร์ของน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในช่วง 172-524 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักเป็น 364 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ เกี่ยวอเตอร์ของเมล็ดในมีค่าอยู่ในช่วง 119-361 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม มีค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักเป็น 243 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม และเกี่ยวอเตอร์ของกะลามีค่าอยู่ในช่วง 13-42 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม มีค่าเฉลี่ยเป็น 31 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม ค่าเกี่ยวอเตอร์ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงจากกรณีแรกเฉลี่ยเป็น 82%

ตารางที่ 3-9 ค่าแก็วอเตอร์พุตพรีนธ์ของสารประกอบฟีนอลคำนวณโดยคิดการป้อนส่วนค่าแก็วอเตอร์ให้กัับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ

โรงงาน	แก็วอเตอร์พุตพรีนธ์					
	กรณีที่ 1			กรณีที่ 2		
	น้ำมันปาล์มดิบ	เมล็ดใน	กะลา	น้ำมันปาล์มดิบ	เมล็ดใน	กะลา
A	7,597	5,229	559	174	120	13
B	7,315	5,035	538	524	361	39
C	8,987	6,186	661	172	119	13
D	15,109	9,698	1,223	387	249	31
E	-	-	-	-	-	-
F	12,179	7,817	986	515	330	42
G	444	357	42	444	357	42
H	1,672	1,346	158	340	274	32
I	7,792	3,138	837	303	122	33
เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก	7,619	5,076	641	364	243	31

หมายเหตุ: - ไม่มีข้อมูล, หน่วยแก็วอเตอร์พุตพรีนธ์ของน้ำมันปาล์มดิบ คือ ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ, หน่วยแก็วอเตอร์พุตพรีนธ์ของเมล็ดใน คือ ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม, หน่วยแก็วอเตอร์พุตพรีนธ์ของกะลา คือ ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าความสกปรกในน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 ระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละระบบ พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นฐานที่สามารถก่อสร้างได้ง่ายระบบดังกล่าวมีลักษณะเป็นบ่อดินแบบเปิดขนาดใหญ่เรียงต่อกันเป็นอนุกรมหลายๆบ่อ เป็นระบบบำบัดที่ควบคุมและดูแลรักษาได้ง่าย ทำให้ใช้ผู้ควบคุมระบบที่ไม่ต้องมีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน มีค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบต่ำเนื่องจากไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรกล และมีค่าการบำรุงรักษาต่ำ ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในน้ำสูงไม่ด้อยไปกว่าระบบอื่นๆ ข้อเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้ คือ ต้องใช้พื้นที่มากในการดำเนินการ อย่างไรก็ตามปัญหาข้างต้นไม่ได้เป็นปัญหาแก่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแต่อย่างใด เนื่องจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีพื้นที่กว้างขวางเพียงพอต่อการสร้างระบบบำบัดดังกล่าว ปัญหาหลักของระบบบำบัดนี้ คือ ปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นที่เกิดจากการหมักของน้ำเสียจึงเกิดความรำคาญแก่ชุมชนรอบข้างและผู้สัญจรผ่านในละแวกนั้น (สุเมธ ไซยประพัทธ์ และคณะ, 2550) นอกจากนี้การย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในบ่อภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ขึ้นสู่บรรยากาศ ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าก๊าซมีเทนจะก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการปล่อยก๊าซมีเทน 1 ตันเทียบเท่ากับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 ตัน (IPCC, 2007) และเนื่องจากก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก เป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยให้พลังงานความร้อนได้ถึง



ประมาณ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร และมีคุณสมบัติติดไฟได้ ก๊าซชีวภาพจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงาน เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 12-16 ลูกบาศก์เมตร ก๊าซชีวภาพที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-1.2 หน่วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

จากข้างต้นจึงมีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ โดยมีการก่อสร้างบ่อก๊าซชีวภาพเพิ่มเติมขึ้นจากระบบบำบัดเดิม ซึ่งมีลักษณะเป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดที่มีการรวบรวมก๊าซชีวภาพ เพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ข้อดีของระบบบำบัดดังกล่าว คือ ได้ก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน สามารถลดการปลดปล่อยของก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน สามารถลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นของน้ำเสียลงได้ ตะกอนอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบสามารถใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินได้ เป็นต้น ส่วนข้อเสียจากการดำเนินการ คือ ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานสำหรับการเดินระบบในครั้งแรก เนื่องจากต้องมีการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในระบบเพื่อให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ ต้องมีการควบคุมค่าพีเอชของระบบให้ดีเพื่อให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทนทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพ ระบบนี้จึงต้องการผู้ควบคุมระบบที่มีความรู้ความชำนาญในด้านการบำบัดน้ำเสีย และเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีคุณภาพดีขึ้นควรมีระบบเพิ่มเติมเพื่อบำบัดน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพ

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นระบบบำบัดที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบนิยมใช้ในปัจจุบัน ยังมีค่าความสกปรกสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งซึ่งไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ การบำบัดสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้ง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการกายภาพ เช่น การกรองด้วยเมมเบรน (Wah *et al.*, 2002; Ahmand *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007; Said *et al.*, 2013) ซึ่งมีความยุ่งยากในการดูแลรักษาและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการดำเนินการ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Santhy and Selvapathy, 2006; Ewansiha *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นเพียงแค่การเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำให้ไปเกาะติดที่วัสดุดูดซับ ซึ่งต้องนำตัวดูดซับดังกล่าวไปกำจัดต่อไป ส่วนวิธีการทางเคมี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม ปูนขาว หรือสารประกอบเหล็ก ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด (Badawy and Ali, 2006) การออกซิเดชันทางเคมี ได้แก่ กระบวนการเฟนตัน ต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (ธนภฤตพรหมทอง, 2552) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง (Wanida Chooaksorn, 2012) เทคโนโลยีที่กล่าวข้างต้นทั้งทางกายภาพ และเคมี ซึ่งล้วนแล้วแต่มีการใช้สารเคมีในการกำจัดสารอินทรีย์ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและก่อให้เกิดตะกอน ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม (โสภา

พรรณ รัตนพันธ์, 2547) วิธีการทางชีวภาพ โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย สาหร่าย และเชื้อรา ซึ่งสามารถกำจัดสารที่ย่อยสลายยากได้อย่างสมบูรณ์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนไม่สูงมาก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน ระยะเวลาในการเพาะพันธุ์เชื้อจุลินทรีย์ (Wanida Chooaksorn, 2012)

เนื่องด้วยข้อจำกัดของเทคโนโลยีต่างๆ และความยุ่งยากในการดำเนินการ ทางโรงงานจึงปล่อยน้ำทิ้งดังกล่าวให้ระเหยไปเองตามธรรมชาติ เพื่อเป็นการจัดสรรทรัพยากรน้ำให้คุ้มค่า ทางโรงงานจึงมีการประยุกต์โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายไปรดสวนปาล์มของโรงงาน การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายมาประยุกต์ใช้ในการรดสวนปาล์มเป็นวิธีการบำบัดโดยดิน (land treatment) และจัดเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานซึ่งเป็นวิธีการทางธรรมชาติ โดยอาศัยพืชช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียไปใช้ในการเจริญเติบโต ตลอดจนอาศัยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีขึ้น (โรสนา กาขอ และคณะ 2555; พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์, 2555; เพ็ญญา ทองประไพ, 2555; กาญจณี ชูทอง, 2556;) และจากการศึกษาของ เตือนใจ ปิยัง, (2555) พบว่า โรงงานร้อยละ 24 มีการกักเก็บน้ำทิ้งหลังการบำบัดไว้ภายในโรงงานโดยไม่มีการระบายออกนอกโรงงาน ร้อยละ 16 มีการนำน้ำเสียหลังการบำบัดแล้วมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ มีเพียงร้อยละ 4 ของโรงงานระบายน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และร้อยละ 84 ระบุว่ามีการสูบน้ำทิ้งดังกล่าวเพื่อใช้ประโยชน์ในสวนปาล์มน้ำมัน

การลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน ในกรณีที่ไม่มีการใช้พืชเข้ามาเกี่ยวข้องจะกล่าวในบทถัดไป

### 3.4 สรุปผลการทดลอง

น้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียรมีค่าหน่วยสี ของแข็งแขวนลอย ไขมันและน้ำมัน บีโอดี ซีโอดี และทีโอซี เป็น 12,417 PtCo, 38,025 mg/L, 16,650 mg/L, 80,250 mg/L, 128,000 mg/L และ 12,654 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบในการลดค่าความสกปรกดังกล่าวเป็น 46%, 95%, 94%, 97%, 96% และ 94% ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรมีค่าความสกปรกดังกล่าวเฉลี่ยเท่ากับ 12,477 PtCo, 35,033 mg/L และ 14,411 mg/L, 43,800 mg/L, 87,748 mg/L และ 13,656 mg/L ตามลำดับ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพรวมในการลดค่าความสกปรกดังกล่าวเฉลี่ยเป็น 70%, 96%, 99.1%, 98%, 97% และ 98% ตามลำดับ ระบบบำบัดที่มีบ่อก๊าซชีวภาพลดค่าหน่วยสี ไขมันและน้ำมัน และทีโอซีดีกว่าระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร 24%, 5% และ 4% ตามลำดับ ส่วนการลดค่าของแข็งแขวนลอย บีโอดี และซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกัน

การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-Ciocalteu พบว่าน้ำเสียมีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 323 mg/L และ 1,661 mg GAE/L ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลของระบบบ่อปรับเสถียรจากการตรวจวัดทั้ง 2 วิธีมีค่าเป็น 90% และ 86% ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรเมื่อตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-ciocalteu พบว่าน้ำเสียมีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับ 334 mg/L และ 1,274 mg GAE/L ประสิทธิภาพรวมของระบบดังกล่าวในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดทั้ง 2 วิธีมีค่าเฉลี่ยเป็น 94% และ 90% ตามลำดับ ระบบบ่อก๊าซชีวภาพเป็นระบบหลักที่ลดค่าสารประกอบฟีนอล ประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอลของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพสูงกว่าระบบบ่อปรับเสถียรประมาณ 5%

ชนิดของสารประกอบฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำเสียของโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร ได้แก่ gallic acid (726 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (229 mg/L) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (218 mg/L) > protocatechuic acid (105 mg/L) > phenol (69 mg/L) > *p*-coumaric acid (32 mg/L) > ferulic acid (30 mg/L) เมื่อผ่านการบำบัด น้ำจากบ่อสุดท้ายตรวจพบความเข้มข้นของ gallic acid (34 mg/L) > protocatechuic acid (6 mg/L) = 4-hydroxybenzoic acid (6 mg/L) สำหรับน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร ตรวจพบ (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย) gallic acid (566 mg/L) > 4-hydroxybenzoic acid (184 mg/L) > caffeic acid+syringic acid+vanillic acid (136 mg/L) > phenol (99 mg/L) > protocatechuic acid (71 mg/L) > *p*-coumaric acid (16 mg/L) = ferulic acid (16 mg/L) ชนิดของสารประกอบฟีนอลมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนของระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ และน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายตรวจพบ gallic acid คิดค่าเฉลี่ยได้ 20 mg/L

ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพรินต์ของสารประกอบฟีนอล กรณีที่ไม่คิดการป้อนส่วนให้กับผลิตภัณฑ์ร่วมอื่นๆ มีค่าเกรย์วอเตอร์จากน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตพรินต์กรณีที่ โรงงานสามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลผ่านตามมาตรฐานคุณภาพ

น้ำทิ้ง เฉลี่ยเป็น 9,357 และ 447 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ โดยมีค่าลดลงจากกรณีแรกเฉลี่ยเป็น 94%

ค่าแก็วอเตอร์พุทพริ้นต์ของสารประกอบฟีนอล กรณีที่คิดการปันส่วนให้กับผลิตภัณฑ์รวมอื่นๆ มีค่าแก็วอเตอร์ของผลิตภัณฑ์จากน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มดิบ เมล็ดใน และกะลาปาล์ม เป็น 7,619 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ 5,076 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม และ 641 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม ตามลำดับ กรณีที่โรงงานสามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง มีค่าแก็วอเตอร์เฉลี่ยของน้ำมันปาล์มดิบ เมล็ดใน และกะลาปาล์ม เป็น 364 ลบ.ม.ต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ 243 ลบ.ม.ต่อตันเมล็ดในปาล์ม และ 31 ลบ.ม.ต่อตันกะลาปาล์ม ตามลำดับ ค่าแก็วอเตอร์ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงจากกรณีแรกเฉลี่ยเป็น 82%

น้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้งสองระบบไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากมี สี ที่ไม่พึงประสงค์ และ ค่าซีไอดี สูงกว่ามาตรฐาน ปัจจุบันจึงมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายไปใช้รดสวนปาล์ม รดต้นไม้ภายในโรงงาน หรือให้มีการระเหยไปเองตามธรรมชาติ

## บทที่ 4

### การลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน

#### 4.1 บทนำ

การสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียก มีการใช้น้ำในปริมาณสูงเพื่อสกัดน้ำมันปาล์มดิบ และก่อให้เกิดน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตในปริมาณสูง โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 0.64 ลูกบาศก์เมตร ต่อตันทะลายปาล์มสด หรือ 3.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai *et al.*, 2012) น้ำเสียดังกล่าวมีลักษณะสีน้ำตาลแดง มีค่าความสกปรกสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าซีโอดี บีโอดี ไซมันและน้ำมัน ของแข็งทั้งหมด และสารประกอบฟีนอล (Alam *et al.*, 2009) การสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบต้องมีประสิทธิภาพดีเพียงพอในการลดค่าความสกปรกเหล่านี้ให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ภายในโรงงาน

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกที่ใช้ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (i) ระบบบ่อปรับเสถียร ซึ่งประกอบด้วย บ่อแอนแอโรบิก บ่อแพคคัลเททีฟ และบ่อป่ม (ii) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร โดยโรงงานจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากการดำเนินการซึ่งสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานงานหรือจำหน่ายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ โดยระบบดังกล่าวประกอบด้วย บ่อแอนแอโรบิก บ่อก๊าซชีวภาพ และบ่อปรับเสถียร

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้งสองระบบไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เนื่องจากมีสีที่ไม่พึงประสงค์ มีค่าของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น บีโอดี ซีโอดี และสารประกอบฟีนอลสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันทางโรงงานจึงมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายไปใช้รดสวนปาล์ม น้ำมัน รดต้นไม้ภายในโรงงาน หรือปล่อยให้มีการระเหยไปเองตามธรรมชาติ การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายไปใช้รดสวนปาล์มเป็นวิธีการบำบัดโดยดิน (land treatment) และจัดเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ วิธีการบำบัดโดยดินเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ดูแลรักษาง่าย ตลอดจนเป็นวิธีการทางธรรมชาติโดยอาศัยพืชช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียไปใช้ในการเจริญเติบโต อาศัยจุลินทรีย์ที่อยู่ในรากพืชหรือที่อยู่ในดินช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษเกี่ยวกับปริมาณและชนิดของสารประกอบฟีนอล ตลอดจนการกำจัดสารประกอบฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมันมีการดำเนินการค่อนข้างน้อย ทำให้ขาดองค์ความรู้ในเรื่องดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการลดปริมาณและชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นสุดท้ายด้วยวิธีการบำบัดโดยดินในกรณีที่ไม่มีพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้จึงเป็นองค์ความรู้ใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบเปียกต่อไป

## 4.2 วิธีการทดลอง

### 4.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ใส่ในคอลัมน์ทดลองเก็บที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจากพื้นดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2534) เนื่องจากบริเวณผิวดินด้านบนจะเป็นบริเวณที่มีการใส่ปุ๋ยให้แก่ต้นพืช ดินจึงมีความอุดมสมบูรณ์สูง ประกอบกับที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจากพื้นดินเป็นบริเวณที่รากพืชสามารถดูดซับแร่ธาตุที่อยู่ในดินไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ตัวอย่างดินที่ทำการเก็บเป็นตัวอย่างดินบริเวณสวนปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่เข้าร่วมโครงการวิจัยในครั้งนี้ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดกระบี่ นำตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อกำจัดอนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่ รากปาล์มหรือเศษวัชพืชต่างๆที่ปนเปื้อนมากับตัวอย่างดิน จากนั้นนำตัวอย่างดินมาผสมกัน บรรจุและบดอัดตัวอย่างดินลงในชุดทดลองคอลัมน์ดินที่ระดับความสูง 60 เซนติเมตรของคอลัมน์ดินซึ่งสูง 100 เซนติเมตร วิเคราะห์คุณลักษณะของดินก่อนและหลังการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 โดยส่งตัวอย่างดินวิเคราะห์ที่ศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะดิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ความเป็นกรด-ด่าง	Electrometric Method
เนื้อดิน	Hydrometer method
ความจุประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (cmol/kg)	Ammonium saturation method
อินทรีย์วัตถุ (g/kg)	Walkey & Black method
ไนโตรเจนทั้งหมด (g/kg)	Kjeldahl method
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	Bray no.II method
*ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้	Extraction Method
**ปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอล	Total plate count Method

ที่มา: \*Johnson *et al.*, (2007), \*\*Gaddeyya *et al.*, (2012)

การเก็บตัวอย่างดินหลังการทดลอง เก็บที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจากระดับผิวดินด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งระดับความลึกดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีกิจกรรมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นมากที่สุด在地 (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) และจากการทดลองพบว่าน้ำตัวอย่างที่รดผ่านคอลัมน์ดินสามารถซึมผ่านคอลัมน์ดินได้ทั้งหมด โดยไม่มีการขังอยู่บริเวณผิวดินด้านบนของคอลัมน์ จึงกล่าวได้ว่าการบำบัดโดยดินในการทดลองครั้งนี้เกิดขึ้นในสภาวะที่มีอากาศ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินส่วนใหญ่จึงเกิดภายใต้สภาวะมีอากาศ การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในดินหลังการทดลองจึงเป็นเชื้อแบคทีเรียที่ทำงานในสภาวะมีอากาศ โดยวิเคราะห์ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจากระดับผิวดินชั้นบนของคอลัมน์เช่นกัน การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน และจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างดิน ดำเนินการโดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Johnson and Pregitzer, (2007) และ Gaddeyya *et al.*, (2012) ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายที่ใช้ในการรดคอลัมน์ถูกเก็บจากโรงงาน

ดังกล่าวข้างต้นซึ่งใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร 2 ครั้ง คือ ในช่วงเดือนพฤษภาคม และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2556

#### การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Johnson *et al.*, (2007) ดำเนินการโดยนำตัวอย่างดินมา 5 กรัม สกัดโดยใช้น้ำ Milli-Q 25 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่สกัดได้ไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดอนุภาคดินที่อยู่ในน้ำตัวอย่าง นำน้ำตัวอย่างที่ได้มา 200 ไมโครลิตร เติม Folin-Ciocalteu's phenol reagent ซึ่งทำการเจือจาง 4 เท่าด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (20% w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่น เป็น blank ซึ่งทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteu phenol reagents และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกจะให้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในดินที่ละลายน้ำได้ ในหน่วย g/kg of dry soil

#### การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในดินที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอล

การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรียในดินที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอล โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Gaddeyya *et al.*, (2012) ซึ่งเป็นการนับจำนวนเซลล์ด้วยวิธี total plate count โดยการ drop plate ซึ่งใช้ตัวอย่าง 10 ไมโครลิตร บนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง carbon free mineral medium (CFMM) สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ CFMM อ้างอิงตามการศึกษาของพินดา โต๊ะสุ, (2554) อาหารเลี้ยงเชื้อดังกล่าวมีการเติมฟีนอลความเข้มข้น 1,000 mg/L เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนแก่แบคทีเรียในดิน เพื่อศึกษาถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ หลังจากนั้นนำเซลล์บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5-7 วัน ทำการนับโคโลนีในช่วง 3-10 โคโลนี คำนวณค่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในดิน ในหน่วย CFU/น้ำหนักดินที่ใช้ในการทดลอง (CFU/g of dry soil)

#### 4.2.2 การออกแบบชุดการทดลอง

การทดลองการบำบัดโดยดิน ดำเนินการโดยใช้ชุดทดลองคอลัมน์ดิน จำนวน 8 คอลัมน์ จัดทำโดยใช้ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร และบรรจุดินภายในคอลัมน์ที่ความสูง 60 เซนติเมตรของความสูงคอลัมน์ แสดงดังรูปที่ 4-1 การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) คอลัมน์ชุดควบคุม จำนวน 4 คอลัมน์ ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีการฆ่าเชื้อตัวอย่างดินด้วยเครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อก่อนการลงคอลัมน์ และฆ่าเชื้อตัวอย่างน้ำทิ้งที่ใช้ในการรดผ่านคอลัมน์ดังกล่าว เพื่อศึกษาถึงการลดลงของสารประกอบฟีนอลด้วยการดูดซับโดยดินในกรณีที่ไม่มีการปล่อยจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้อง 2) คอลัมน์ชุดทดลอง จำนวน 4 คอลัมน์ ซึ่งเป็นชุดที่ทำการทดลองตามปกติ (ไม่มีการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในตัวอย่างดินและน้ำ) การทดลองทั้ง 2 ชุด ทำการรดน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการรด 2 อัตราการรด ได้แก่ 3 และ 5 cm/week ดัง

แสดงในตารางที่ 4-2 โดยแต่ละอัตราการรดมีการรดน้ำ 2 แบบ คือ 1) รดน้ำผ่านคอแลมน์ทุกวัน อัตราการรดที่ 3 และ 5 cm/week ใช้ปริมาณน้ำในแต่ละวันเท่ากับ 0.217 และ 0.362 ลิตร/ครั้ง/วัน ตามลำดับ โดยรดน้ำครั้งเดียว 2) รดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง อัตราการรดที่ 3 และ 5 cm/week ใช้ปริมาณน้ำในการรดอาทิตย์ละ 1.521 และ 2.535 ลิตร/ครั้ง/สัปดาห์ ตามลำดับ โดยรดน้ำครั้งเดียว

ตารางที่ 4-2 ปริมาณน้ำที่รดผ่านคอแลมน์ทุกวันและอาทิตย์ละครั้ง

ประเภทคอแลมน์	Hydraulic loading rate (cm/week)	สัญลักษณ์	อัตราการรดน้ำ	COD loading*
ชุดควบคุม: ฆ่าเชื้อตัวอย่างดินและน้ำ				
- รดน้ำผ่านคอแลมน์ดินทุกวัน	3	DFS	0.217	9.72
- รดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง		WFS	1.520	68.0
ชุดทดลอง: ไม่ฆ่าเชื้อตัวอย่างดินและน้ำ				
- รดน้ำผ่านคอแลมน์ดินทุกวัน	5	DFNS	0.217	9.72
- รดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง		WSNS	1.520	68.0
ชุดควบคุม: ฆ่าเชื้อตัวอย่างดินและน้ำ				
- รดน้ำผ่านคอแลมน์ดินทุกวัน	5	DFS	0.362	16.2
- รดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง		WFS	2.534	113
ชุดทดลอง: ไม่ฆ่าเชื้อตัวอย่างดินและน้ำ				
- รดน้ำผ่านคอแลมน์ดินทุกวัน	5	DFNS	0.362	16.2
- รดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง		WSNS	2.534	113

หมายเหตุ: \*COD<sub>เฉลี่ย</sub> = 2,267 mg/L

อัตราการรดน้ำผ่านคอแลมน์ทุกวัน มีหน่วยเป็น ลิตร/ครั้ง/วัน โดยรดน้ำครั้งเดียว

อัตราการรดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง มีหน่วยเป็น ลิตร/ครั้ง/สัปดาห์ โดยรดน้ำครั้งเดียว

COD loading ของการรดน้ำผ่านคอแลมน์ทุกวัน มีหน่วยเป็น g COD/m<sup>2</sup>-day

COD loading ของการรดน้ำผ่านคอแลมน์อาทิตย์ละครั้ง มีหน่วยเป็น g COD/m<sup>2</sup>-week

น้ำที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อและนำมารดคอแลมน์ เรียกว่า Influent treated wastewater, non-sterilized into land treatment system (In TWNS)

น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อและนำมารดคอแลมน์ เรียกว่า Influent treated wastewater, sterilized into land treatment system (In TWS)

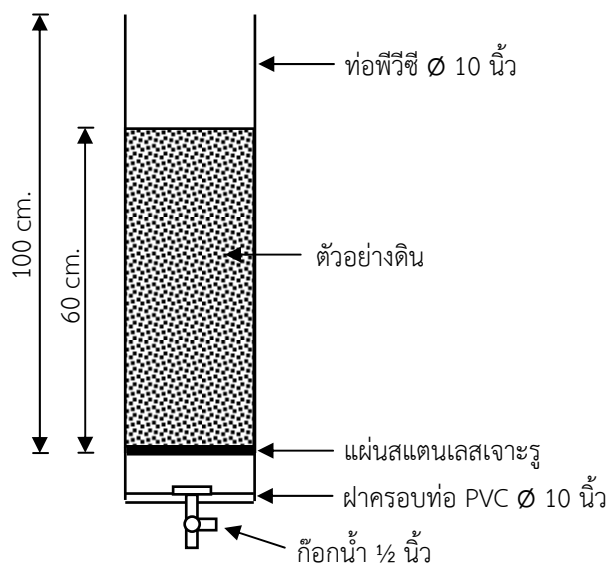
DFS คือ Daily feeding, sterilized soil and treated wastewater

WFS คือ Weekly feeding, sterilized soil and treated wastewater

DFNS คือ Daily feeding, non-sterilized soil and treated wastewater

WFNS คือ Weekly feeding, non-sterilized soil and treated wastewater





รูปที่ 4-1 ชุดทดลองคอลัมน์ดิน

#### 4.2.3 การเก็บและพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดทดลองคอลัมน์ดิน

การทดลองนี้เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแห่งหนึ่งในจังหวัดกระบี่ ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 45 ตันทะเลลายปาล์มสดต่อชั่วโมง โดยมีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นเฉลี่ยวันละ 445 ลูกบาศก์เมตร น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียรของโรงงาน ซึ่งประกอบด้วย 1) บ่อแอนแอโรบิก ซึ่งรับน้ำเสียจากโรงงานและลดอุณหภูมิของน้ำเสียให้มีความเหมาะสม 2) ระบบบ่อก๊าซชีวภาพ เป็นบ่อแอนแอโรบิกแบบปิดและมีระบบรวบรวมก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ 3) บ่อปรับเสถียร ซึ่งรับน้ำเสียจากระบบบ่อก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดด้วยระบบบ่อแอนแอโรบิก หลายๆบ่อ

การเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินดำเนินการทุกวัน โดยเก็บตัวอย่างไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อรักษาสภาพของน้ำตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าสี พีเอช ซีไอดี และสารประกอบฟีนอลในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดินอาทิตย์ละครั้ง การวิเคราะห์ค่าที่ไอซีดำเนินการทุก 2 สัปดาห์ สำหรับการหาชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ดำเนินการโดย 1) คอลัมน์ชุดควบคุม: ทำการวิเคราะห์ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์และสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด 2) คอลัมน์ชุดทดลอง: ทำการวิเคราะห์ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์, น้ำในสัปดาห์ที่มีค่าสารประกอบฟีนอลน้อยที่สุดจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และน้ำสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด ส่วนการหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลดำเนินการวิเคราะห์ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์และสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดำเนินการตามวิธีที่ระบุใน APHA, AWWA and WEF, (2005)

เนื่องจากตัวอย่างน้ำที่ทำการวิเคราะห์มีการปนเปื้อนของของแข็งแขวนลอยในปริมาณสูงทำให้ต้องมีการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.12 ไมโครเมตร ก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าที่ไอซี การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอล ดำเนินการโดย 1) ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 nm ด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine โดยใช้สารฟีนอลเป็นสารมาตรฐาน (mg/L) ตามวิธีที่ระบุใน APHA, AWWA and WEF, (2005) 2) ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 nm ด้วยวิธี Folin-ciocalteau โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (mg GAE/L) โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, (2011) สำหรับการจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC ประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Asses *et al.*, (2009)

#### ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดทดลองคอลัมน์ดิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่าง
สี	Colorimetric Method
พีเอช	Electrometric Method
ซีโอดี	Closed reflux, Titrimetric Method
*ทีไอซี	High-Temperature Combustion Method
ปริมาณสารประกอบฟีนอล	Colorimetric method
**ปริมาณสารประกอบฟีนอล	Colorimetric method
***ชนิดของสารประกอบฟีนอล	High Performance Liquid Chromatography
****ปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอล	Total plate count Method

ที่มา: APHA, AWWA and WEF, (2005), \*น้ำตัวอย่างที่วิเคราะห์ทีไอซีผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C, \*\*Ergul *et al.*, (2011), \*\*\* Asses *et al.*, (2009), \*\*\*\*Gaddeyya *et al.*, (2012)

#### การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Ergul *et al.*, (2011) ดำเนินการโดยนำตัวอย่างน้ำเสียไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอย แล้วทำการเจือจางตัวอย่างตามระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น นำน้ำตัวอย่างที่เจือจางแล้วมา 200 ไมโครลิตร เติม Folin - Ciocalteau's phenol reagent ซึ่งทำการเจือจาง 4 เท่าด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (20% w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่มีมืดเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น blank ซึ่งทำปฏิกิริยากับ Folin-Ciocalteau phenol reagents และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเปรียบเทียบกับ

กราฟมาตรฐานกรดแกลลิก และคำนวณค่าที่ได้ด้วยการคูณด้วยปริมาณเท่าที่ทำการเจือจางตัวอย่าง ด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในหน่วย mg GAE/L

#### การจำแนกลักษณะของสารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง HPLC

การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยนำตัวอย่างน้ำเสียไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอย แล้วทำการเจือจางตัวอย่างตามระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยเมทานอล/น้ำ Milli-Q (60:40 v/v) กรองตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าวผ่าน syringe nylon filter ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ผลิตภัณฑ์ของ Hewlett Packard รุ่น 1100 (HP 1100) ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ (Diode Array Detector, DAD) ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ คอลัมน์ RP-18 ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร หนา 5 ไมโครเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวทำละลาย 0.1% (v/v) phosphoric acid ในน้ำ Milli-Q (A) กับ 50% (v/v) acetonitrile ในน้ำ Milli-Q (B) การวิเคราะห์เป็นดำเนินการแบบแกรเดียนต์ใช้เวลา 45 นาที เริ่มต้นที่ตัวทำละลาย B 20% และเพิ่มเป็น 50% ที่เวลา 30 นาที หลังจากนั้นสารถูกชะต่อด้วยตัวทำละลาย B 50% เป็นเวลา 10 นาที และลดลงเหลือ 20% จนถึงสิ้นสุดการวิเคราะห์ การดำเนินการข้างต้นประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ของ Asses *et al.*, (2011) คำนวณค่าที่ได้ด้วยการคูณด้วยปริมาณเท่าที่ทำการเจือจางตัวอย่าง จะได้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลแต่ละตัวในหน่วย mg/L

สารมาตรฐานของสารประกอบฟีนอล อ้างอิงตามชนิดของสารประกอบฟีนอลที่มีการตรวจพบในผลปาล์ม (Maisarah *et al.*, 2013; Neo *et al.*, 2010) ได้แก่ (i) Gallic acid (ii) Protocatechuic acid (iii) 4-hydroxybenzoic acid (iv) Caffeic acid (v) Syringic acid (vi) Vanillic acid (vii) *p*-coumaric acid (viii) Ferulic acid และเพิ่มสารฟีนอล (ix) Phenol ลงไปอีกหนึ่งตัว เนื่องจากสารฟีนอลเป็นโมเลกุลพื้นฐานของสารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบทั่วไปในธรรมชาติ (Waterman *et al.*, 1994) และเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอล (Mahiudddin *et al.*, 1994)

#### 4.2.4 วัสดุและอุปกรณ์

##### วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

- (1) แกลลอนพลาสติกขนาด 35 ลิตร
- (2) กระบวยตักน้ำ

##### วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดิน

- (1) จอบ
- (2) กระจอบ
- (3) เชือกฟาง

##### วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- (1) ขวดน้ำพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย
- (2) กระจกตวง
- (3) กระบวยรดน้ำ

##### วัสดุและอุปกรณ์สำหรับสร้างชุดการทดลอง

- (1) ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว
- (2) ฝาครอบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว
- (3) PVC ข้อต่อเกลียวในและนอก 1/2"
- (4) PVC ข้อต่อเกลียวนอก 1/2"
- (5) PVC ข้องอ 90 องศา 1/2"
- (6) สกรู STL 3/8"
- (7) หัวน็อต STL 3/8"
- (8) กาวท่อน้ำไทย
- (9) ตาข่าย STL #60
- (10) แผ่นสแตนเลสเจาะรู
- (11) ก๊อคน้ำ 1/2"
- (12) สว่าน
- (13) เลื่อยเหล็ก

##### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) ตะแกรงร่อนเบอร์ 10
- (2) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ผลิตภัณท์ HACH รุ่น sension1
- (3) เตาย่อยซีโอดี (COD Reactor) ผลิตภัณท์ HACH รุ่น DRB 200
- (4) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuges) ผลิตภัณท์ Harmonic Series
- (5) เครื่องปั่นผสม (Vortex mixer) ผลิตภัณท์ Helldoiph รุ่น Vibramax 110

- (6) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ผลิตภัณท์ Shimadzu รุ่น UV 1601
- (7) โถดูดความชื้น (Desiccator) ผลิตภัณท์ DURAN
- (8) เตาเผา (Furnace) ผลิตภัณท์ GALLENKAMP
- (9) เครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อ (autoclave) ผลิตภัณท์ Tomy รุ่น SS-325
- (10) ตู้เขี่ย laminar flow ผลิตภัณท์ Super clean รุ่น 120 BSD
- (11) เครื่องเขย่าแบบหมุน (Shaker) ผลิตภัณท์ GALLENKAMP
- (12) ชุดกรอง (Filtration unit)
- (13) เครื่องปั๊มดูดสุญญากาศ (Vacuum pump) ผลิตภัณท์ GAST รุ่น 0823
- (14) ไมโครปิเปต (Micropipette) ผลิตภัณท์ Denville Scientific
- (15) กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- (16) กระดาษกรอง Membrane Nylon 0.2  $\mu\text{m}$ , 47 mm
- (17) หัวกรอง Syringe Nylon 0.2  $\mu\text{m}$ , 13 mm
- (18) เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์รวม (Total organic carbon) ผลิตภัณท์ Shimadzu
- (19) เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) ผลิตภัณท์ Hewlett Packard รุ่น 1100 (HP 1100)

### 4.3 ผลการทดลอง

#### 4.3.1 คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ในการทดลองทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งซึ่งเป็นน้ำเข้าระบบบำบัดโดยดินในทุกสัปดาห์ คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงในตารางที่ 4-4 ลักษณะสีของน้ำทิ้งมีสีน้ำตาลคล้ำ โดยมีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 6,398 หน่วยสี มีค่าพีเอชเป็นด่าง ค่าซีโอดี และทีโอซีเฉลี่ยเป็น 2,267 และ 361 mg/L ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และ วิธี Folin-Ciocalteu มีค่าเป็น 29 mg/L และ 162 mg GAE/L ตามลำดับ ปัจจุบันทางโรงงานไม่ได้มีการปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แต่นำน้ำดังกล่าวไปรดสวนปาล์มน้ำมันของโรงงาน

**ตารางที่ 4-4** คุณภาพน้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์		มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง*
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	
พีเอช	8.2-8.8	8.4±0.2	5.5-9.0
สี (PtCo)	5,933-6,667	6,398±188	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
ซีโอดี (mg/L)	2,049-2,462	2,267±116	120
*ทีโอซี (mg/L)	N.A.	361	-
สารประกอบฟีนอล			
- วิธี 4-aminoantipyrine (mg/L)	25-32	29±2	1
- วิธี Folin-Ciocalteu (mg GAE/L)	138-181	162±14	-

หมายเหตุ: \*น้ำตัวอย่างที่วิเคราะห์ทีโอซีผ่านการกรอง ด้วยกระดาษกรอง GF/C,

N.A. = Not available, - ไม่ได้กำหนด

ที่มา: \*ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539

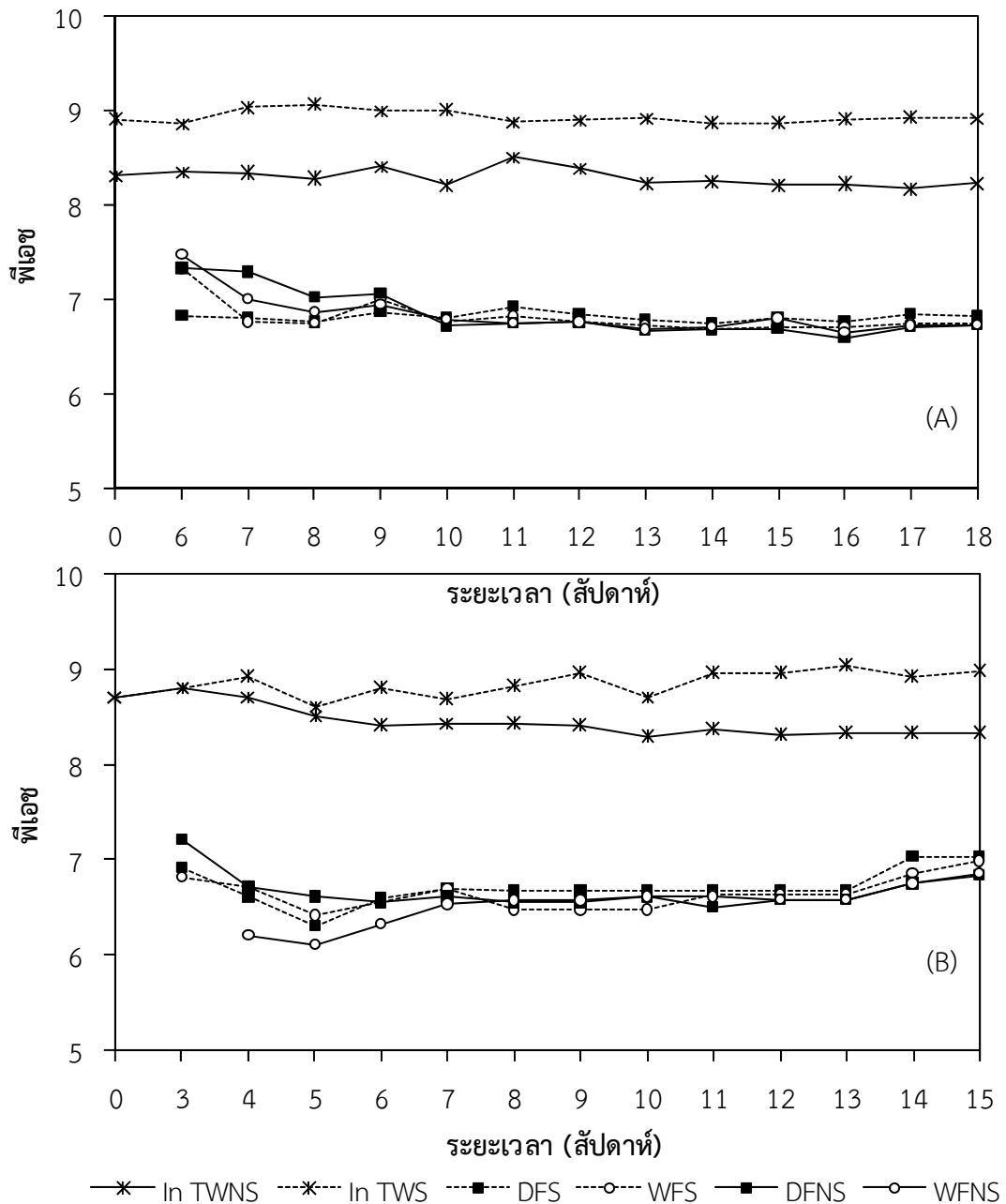
### 4.3.2 ผลการศึกษาการบำบัดโดยดิน

การทดลองระบบบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week ใช้ระยะเวลาในการดำเนินการทดลองทั้งสิ้น 18 สัปดาห์ โดยคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดซึ่งพิจารณาจากค่าซีโอดีเป็นหลัก เนื่องจากซีโอดีคือพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดในทุกคอลัมน์ที่อัตราการรดน้ำดังกล่าวมีค่าคงที่ในสัปดาห์ที่ 15 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ของการบำบัด ประสิทธิภาพในการบำบัดของคอลัมน์ DFS, WFS, DFNS และ WFNS ที่สัปดาห์การบำบัดดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยเป็น  $57 \pm 1.8\%$ ,  $77 \pm 1.0\%$ ,  $90 \pm 0.3\%$  และ  $87 \pm 0.6\%$  ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่าดินในคอลัมน์เกิดการอัดตัวส่งผลให้น้ำออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัด ส่วนอัตราการรดน้ำที่ 5 cm/week ใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น 15 สัปดาห์ โดยมีน้ำออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด ยกเว้นคอลัมน์ WFNS ที่มีน้ำออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 4 ของการบำบัด คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดที่อัตราการรดน้ำดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่าซีโอดีเป็นหลัก พบว่าคอลัมน์ชุดควบคุม DFS และ WFS มีค่าคงที่ในสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 12 และสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 13 ของการบำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดที่สัปดาห์ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยเป็น  $67 \pm 7\%$ ,  $67 \pm 5\%$  ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ชุดทดลอง DFNS และ WFNS มีค่าคงที่ในสัปดาห์ที่ 7 ถึงสัปดาห์ที่ 11 และสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 13 ของการบำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดที่สัปดาห์ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยเป็น  $97 \pm 1\%$ ,  $64 \pm 2\%$  ตามลำดับ หลังจากนั้นคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดังกล่าวเริ่มมีค่าความสกปรกเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

ระยะเวลาที่น้ำไหลออกจากคอลัมน์ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week เร็วกว่าอัตราการรดน้ำที่ 3 cm/week เนื่องจากปริมาณน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week มีค่ามากกว่าทำให้ดินเกิดการอัดตัวและมีน้ำออกจากคอลัมน์เร็วกว่าอัตราการรดน้ำที่ 3 cm/week เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่น้ำออกจากคอลัมน์จนถึงสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดพบว่าทั้ง 2 อัตราการรดน้ำใช้ระยะเวลาทดลองเท่ากันคือ 13 สัปดาห์

### ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-2 น้ำเข้าระบบบำบัดโดยดินทั้งคอลัมน์ชุดควบคุมและชุดทดลอง มีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นเบส โดยน้ำเข้าระบบคอลัมน์ชุดควบคุม (In TWS) ที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week มีค่าพีเอชเฉลี่ยเป็น 8.9 และ 8.8 ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.9-9.1 และ 8.6-9.0 ตามลำดับ สำหรับน้ำรดคอลัมน์ชุดทดลอง (In TWNS) มีค่าพีเอชเฉลี่ยเป็น 8.3 และ 8.4 ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.2-8.5 และ 8.3-8.8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาน้ำเข้าระบบที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อพบว่ามีค่าพีเอชสูงกว่าน้ำที่ปกติที่ไม่มีการฆ่าเชื้อ จึงกล่าวได้ว่าความร้อน (121 องศาเซลเซียส) และความดัน (15 ปอนด์/ตารางนิ้ว) จากการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของน้ำที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากทุกคอลัมน์ดินมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ DFS, WFS, DFNS และ WFNS ที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.7-6.9, 6.7-7.3, 6.6-7.3, 6.6-7.5 และ 6.3-7.0, 6.4-7.0, 6.5-7.2, 6.1-6.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4-2 ค่าพีเอชของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ตัวอย่างดินที่นำมาบรรจุในคอลัมน์เป็นดินที่มีความเป็นกรด (pH 5.2) ซึ่งมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่เป็นประจุอิสระอยู่ในอนุภาคดินในปริมาณสูง เมื่อรดตัวอย่างน้ำทิ้งที่มีช่วงค่าพีเอชเป็นด่าง ซึ่งมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ละลายอยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของตัวอย่างน้ำทิ้งผ่านตัวกรองดิน อาศัยการดูดซับทางเคมี คือการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างบริเวณผิวหน้าอนุภาคดินและน้ำ โดยที่  $H^+$  ที่อยู่ในอนุภาคดินสามารถจับตัวกับ  $OH^-$  ที่อยู่ในน้ำ เกิดเป็น  $H_2O$  เป็นผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดจากทุกคอลัมน์ดินมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง



ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับการทดลองของ พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ซึ่งนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำยางข้นซึ่งมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นด่าง คือมีค่าพีเอชเฉลี่ยเป็น  $8.0 \pm 0.3$  มาผ่านการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทุกระบบมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง Achak *et al.*, (2009) นำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกที่มีการเจือจางกับน้ำเสียชุมชนในอัตราส่วน 1:1 ที่มีค่าพีเอชเป็นกรด เท่ากับ 4.8 มาผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินทราย โดยค่าพีเอชของดินทรายมีค่าเป็น 8.8 ผลการศึกษาพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นด่าง จากข้างต้นกล่าวได้ว่าดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไอออนกับประจุไอออนในน้ำโดยการแลกเปลี่ยนดังกล่าวเกิดขึ้นได้บริเวณผิวหน้าของอนุภาคดินและการลดค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ อาศัยกระบวนการทางกายภาพที่เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมี โดยการแลกเปลี่ยนประจุไอออนระหว่างอนุภาคดินและน้ำได้

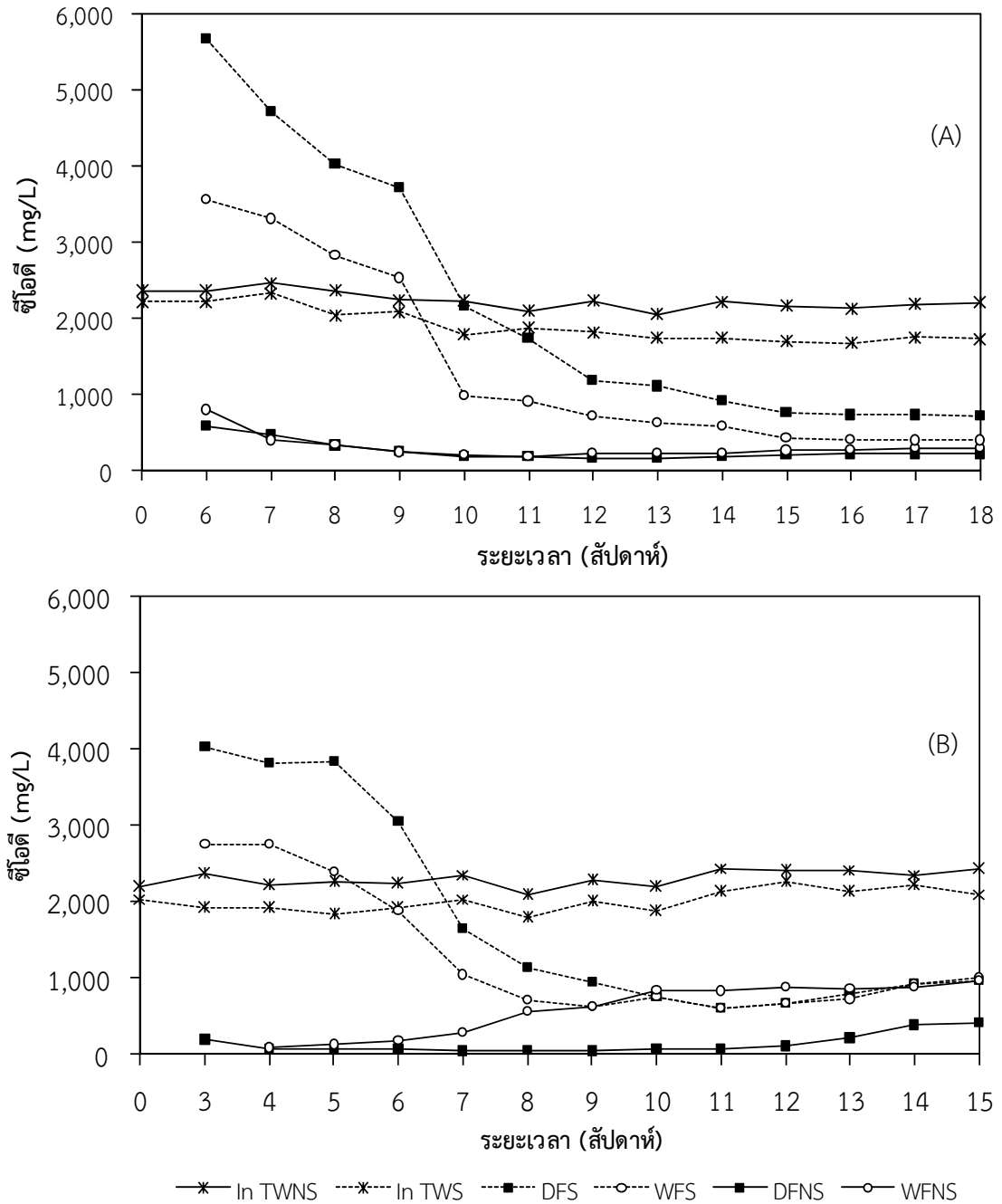
### ค่าซีโอดี

ค่าซีโอดีที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week แสดงดังรูป 4-3 ส่วนค่าประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีด้วยการบำบัดโดยดินแสดงในภาคผนวก ค รูปที่ ค-1 เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ (In TWS) มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 1,878 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,668-2,325 mg/L ที่สัปดาห์ที่ 6 น้ำจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าซีโอดีเป็น 5,657 และ 3,556 mg/L ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบ จากการทดลองหาค่าซีโอดีของน้ำชะจากตัวอย่างดินที่ผ่านและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อปริมาณ 5 กรัม โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวสกัด พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำชะจากตัวอย่างดินที่ผ่านและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าเป็น 186 และ 19 mg/L ตามลำดับ ค่าสารสีที่ละลายน้ำได้ในตัวอย่างดินที่ผ่านและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าเป็น 362 และ 46 PtCo ตามลำดับ จากข้างต้นกล่าวได้ว่า ซีโอดีและค่าสารสีที่ละลายน้ำได้ของน้ำชะจากตัวอย่างดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าสูงกว่าตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อประมาณ 10 และ 9 เท่าตามลำดับ

ดังนั้นการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในดินด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ความร้อนและความดันภายในตัวเครื่องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของดิน คือ เกิดการแตกตัวของโครงสร้างทางเคมีของอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดิน จากโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง เมื่อมีการรดน้ำผ่านชั้นดินทำให้โมเลกุลของสารเหล่านี้ถูกชะออกมากับน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การฆ่าเชื้อดินด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ยังมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของดินจากการเปรียบเทียบลักษณะดิน พบว่าดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีลักษณะเนื้อดินที่ละเอียดและมีลักษณะสีที่เข้มกว่าดินปกติที่ไม่มีการฆ่าเชื้อ จากการทดลองจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้มากนักน้อยเพียงใด

อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ชุดควบคุมมีแนวโน้มลดลง ที่สัปดาห์ที่ 11 คอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าซีโอดี เท่ากับ 1,739 และ 904 mg/L ตามลำดับ การบำบัดโดยดินด้วยคอลัมน์ DFS และ WFS ลดค่าซีโอดีได้ 7% และ 51% ตามลำดับ จากสัปดาห์ที่ 11 ถึง สัปดาห์ที่ 18 ค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่า

ลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 18 คอลัมน์ DFS และ WFS ลดค่าซีโอติได้ 59% และ 77% ตามลำดับ โดยค่าซีโอติของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าเป็น 706 และ 392 mg/L ตามลำดับ



รูปที่ 4-3 ค่าซีโอติของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

เนื่องจากการทดลองของคอลัมน์ชุดควบคุมในระยะแรกของการบำบัดเป็นระบบที่ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ แต่เนื่องด้วยการทดลองเป็นระบบเปิดเมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้เชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ในบรรยากาศมีการเจริญเติบโตตรงบริเวณผิวหน้าของชั้นดิน เมื่อทำการรดน้ำผ่านคอลัมน์จุลินทรีย์ต่างๆ เหล่านี้จึงมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็ว และแพร่กระจายไปทั่วคอลัมน์โดยอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเป็นแหล่งคาร์บอน จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายสัปดาห์กำจัดซีโอดีได้ดีกว่าคอลัมน์ DFS ที่เป็นการรดน้ำรายวัน

คอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWS มีค่าซีโอดีเฉลี่ย 2,015 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1,794-2,264 mg/L น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ที่สัปดาห์ที่ 3 มีค่า 4,035 และ 2,761 mg/L ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าค่าซีโอดีของน้ำเข้าระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week ในสัปดาห์ที่ 11 ของอัตราการรดน้ำที่ 5 cm/week คอลัมน์ DFS และ WFS ลดค่าซีโอดีได้สูงสุด น้ำออกจากคอลัมน์มีค่าซีโอดีเท่ากันคือ 604 mg/L มีค่าการลดเป็น 72% สัปดาห์ที่ 12, 13, 14 และ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีของทั้ง 2 คอลัมน์มีค่าลดลงเล็กน้อยและมีค่าใกล้เคียงกัน สัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าเป็น 963 และ 1,000 mg/L ตามลำดับ จากข้างต้นพบว่าคอลัมน์ DFS และ WFS มีประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลอง พบว่าน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS ทั้ง 2 อัตราการรดน้ำมีค่าซีโอดีสูงกว่าคอลัมน์ WFS เนื่องจากการรดน้ำแบบรายวัน ซึ่งเป็นการรดน้ำปริมาณน้อยๆ ในทุกๆ วัน โมเลกุลของน้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านชั้นดินในคอลัมน์อย่างช้าๆ เป็นผลให้เกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคดินกับโมเลกุลน้ำอย่างทั่วถึง ส่งผลให้โมเลกุลน้ำชะเอาโมเลกุลเล็กๆ ของสารอินทรีย์ที่ติดอยู่บนอนุภาคดินจากการแตกตัวในขั้นตอนการนิ่งฆ่าเชื้อได้ดีกว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำปริมาณมากๆ ในครั้งเดียว โมเลกุลน้ำจะไหลผ่านคอลัมน์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างโมเลกุลน้ำกับอนุภาคดินน้อยกว่าคอลัมน์ DFS ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

สำหรับคอลัมน์ชุดทดลองที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 2,219 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2,049-2,462 mg/L ที่สัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS มีค่าซีโอดีเท่ากับ 574 และ 793 mg/L ตามลำดับ คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าซีโอดีได้ 76% และ 66% ตามลำดับ เนื่องจากในระยะแรกของการบำบัด น้ำที่รดผ่านคอลัมน์มีการชะเอาสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในดินออกมากับน้ำที่ออกจากระบบทำให้ช่วงแรกของการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินจึงมีค่าซีโอดีสูง เมื่อระยะเวลาผ่านไปน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่สัปดาห์ที่ 18 คอลัมน์ DFNS และ WFNS มีค่าซีโอดีเป็น 215 และ 293 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าซีโอดีได้ 90% และ 87% ตามลำดับ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS มีประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีสูงกว่าคอลัมน์ WFNS เล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการบำบัดจากทั้งสองคอลัมน์ยังมีค่าซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

เมื่อพิจารณาที่อัตราการรด 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าซีโอดีเฉลี่ยเป็น 2,305 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2,093-2,438 mg/L น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ที่สัปดาห์ที่ 3 มีค่าซีโอดีเท่ากับ 193 mg/L ระบบลดค่าซีโอดีได้ 92% ที่สัปดาห์ที่ 4 ถึงสัปดาห์ที่ 12 น้ำที่ออกจาก

คอลัมน์ดังกล่าวมีค่าซีไอดีผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 45-107 mg/L โดยมีประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีอยู่ในช่วง 96%-98% สัปดาห์ที่ 13 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ มีค่าซีไอดี เท่ากับ 215 mg/L มีประสิทธิภาพการลดซีไอดีเป็น 91% ที่สัปดาห์ที่ 14 และ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีลดลงโดยมีประสิทธิภาพเป็น 84% และ 83% ตามลำดับ ในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าซีไอดี เป็น 415 mg/L ส่วนน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 4 มีค่าซีไอดี 85 mg/L ซึ่งผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีเป็น 96% และเมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีมีค่าลดลง เนื่องจากการรดน้ำให้ระบบเป็นการรดน้ำอาทิตย์ละครั้ง ซึ่งในการรดแต่ละครั้งใช้ปริมาณน้ำสูงถึง 2.534 L/week ปริมาณน้ำที่สูง เป็นผลให้น้ำไหลออกสู่ด้านล่างของคอลัมน์ได้อย่างรวดเร็ว จุลินทรีย์จึงไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีในปริมาณสูงได้ทั้งหมด จากข้างต้นกล่าวได้ว่า คอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันกำจัดซีไอดีได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดน้ำรายสัปดาห์

การลดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดโดยดิน เกิดขึ้นเมื่อมีการรดน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ดิน ดินจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองและเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำไปเกาะติดอยู่ตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดินซึ่งเป็นกลไกการบำบัดทางกายภาพ จากนั้นสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินซึ่งเป็นกลไกการบำบัดทางชีวภาพ เป็นผลให้น้ำที่ผ่านจากกระบวนการบำบัดโดยดินมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง ค่าซีไอดีในน้ำจึงมีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งระบบเริ่มเกิดการอึดตัวคือ จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เพิ่มเข้ามาอย่างต่อเนื่องได้ทั้งหมด ประกอบกับบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดินถูกเกาะติดไปด้วยสารอินทรีย์ ทำให้ดินมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ได้น้อยลง ส่งผลให้น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าซีไอดีเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเฉพาะการลดค่าซีไอดี สรุปได้ว่าการกำจัดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน ควรเลือกใช้อัตราการรดน้ำที่ 5 cm/week ของคอลัมน์ชุดทดลอง DFNS ซึ่งมีการรดน้ำทุกวัน เนื่องจากคอลัมน์ดังกล่าวสามารถบำบัดค่าซีไอดีในน้ำทิ้งให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด ซึ่งสามารถทำการบำบัดได้เพียงแค่ 12 สัปดาห์ของการบำบัด

พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดิน โดยนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำยางชันไปรดสวนปาล์มน้ำมัน โดยทดลองที่ 4 ภาระบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยรดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง น้ำเข้าระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยเป็น 5,246 mg/L จากการทดลองพบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในแต่ละแปลงมีค่าซีไอดีลดลง การลดลงของค่าซีไอดีเกิดขึ้นเมื่อน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นดินนั้นชั้นดินทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวกรองสารอินทรีย์ต่างๆ ให้มาสะสมอยู่ตรงบริเวณผิวหน้าและภายในชั้นดิน ประกอบกับรากของพืชซึ่งมีทั้งต้นปาล์มน้ำมันและต้นหญ้าขนาดเล็กช่วยดูดซับสารอินทรีย์เหล่านี้เอาไว้ และจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ โดยแปลงที่รดน้ำสัปดาห์ละครั้งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าแปลงที่รดน้ำทุกวัน โดยแปลงที่รดด้วยอัตรา 10.7 m<sup>3</sup>/week (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุด รองลงมาคือ แปลงที่รดด้วยอัตรา 56.1 m<sup>3</sup>/week

(hydraulic loading 3 cm/week) คิดประสิทธิภาพเฉลี่ยเป็น  $81.7 \pm 12.7\%$  และ  $80.6 \pm 16.9\%$  ตามลำดับ

โรสนา กาซอ และคณะ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดิน โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไปรดสวนปาล์มน้ำมัน โดยทดลองที่ 4 ภาระบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยรดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง น้ำเข้าระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยเป็น 1,332 mg/L จากการทดลองพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะใสขึ้น และมีค่าซีไอดีลดลง โดยเกิดจากชั้นดินและรากของพืชจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรอง คอยกรองพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้ง เป็นผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีไอดีลดลง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีในแต่ละแปลงการทดลอง พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน โดยแปลงที่รดด้วยอัตรา  $2.2 \text{ m}^3/2\text{d}$  (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุดมีค่าเฉลี่ยเป็น  $70.2 \pm 12.3\%$

กาญจณี ชูทอง (2556) ศึกษาการบำบัดโดยดินจากชุดการทดลองคอลัมน์ดิน โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาบำบัดผ่านคอลัมน์ดิน โดยทดลองที่ 4 ภาระบรรทุก คือ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week และแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ คอลัมน์ที่รดน้ำ 2 วัน/ครั้ง และสัปดาห์ละครั้ง น้ำเข้าระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยเป็น 441 mg/L จากการทดลอง พบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุดการทดลองมีค่าซีไอดีลดลงน้อยกว่าน้ำเข้าระบบ และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์มีค่าซีไอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งที่ระบบเริ่มเสถียรค่าซีไอดีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่เติมเข้าไปได้ทั้งหมด การบำบัดค่าซีไอดีโดยคอลัมน์ดินเกิดขึ้นได้โดยชั้นดินเป็นตัวกรอง คอยกรองพวกสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ต่างๆ ให้ตกสะสมตรงบริเวณผิวหน้าของชั้นดิน สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน โดยคอลัมน์ที่มีอัตราการรด  $0.14 \text{ L}/2\text{d}$  (hydraulic loading 1 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีสูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น  $97.8 \pm 0.6\%$

Achak *et al.*, (2009) ศึกษาการบำบัดโดยดินจากชุดการทดลองคอลัมน์ดิน โดยนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกซึ่งทำการเจือจางกับน้ำเสียชุมชนในอัตราส่วน 1:1 มาบำบัดผ่านคอลัมน์ดินโดยใช้ระยะเวลาในการบำบัดทั้งสิ้น 10 สัปดาห์ น้ำเข้าระบบมีค่าซีไอดีเฉลี่ยเป็น 30,830 mg/L จากการทดลองพบว่าใน 4 สัปดาห์แรกของการบำบัดระบบลดค่าซีไอดีได้สูงถึง 70% ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในสัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัดมีประสิทธิผลการลดค่าซีไอดีสูงสุดเป็น 90% โดยน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีไอดีเป็น 3,080 g/L หลังจากนั้นประสิทธิผลการลดค่าซีไอดีของระบบมีค่าลดลงเล็กน้อย

ผลการศึกษา ของพัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555), โรสนา กาซอ และคณะ (2555) และกาญจณี ชูทอง (2556) แสดงให้เห็นว่าภาระบรรทุกที่ต่ำมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีได้สูงกว่าภาระบรรทุกที่สูง ซึ่งไม่เป็นไปตามผลการทดลองในครั้งนี้ เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในครั้งนี้กับการทดลองของ กาญจณี ชูทอง (2556) ซึ่งเป็นการทดลองโดยใช้ชุดคอลัมน์การทดลองที่ไม่มีพืชมาเกี่ยวข้องเหมือนกัน ผลการทดลองที่ไม่สอดคล้องกันอาจเนื่องมาจาก ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างดินคนละสถานที่ จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ต่างกัน และคุณสมบัติของจุลินทรีย์

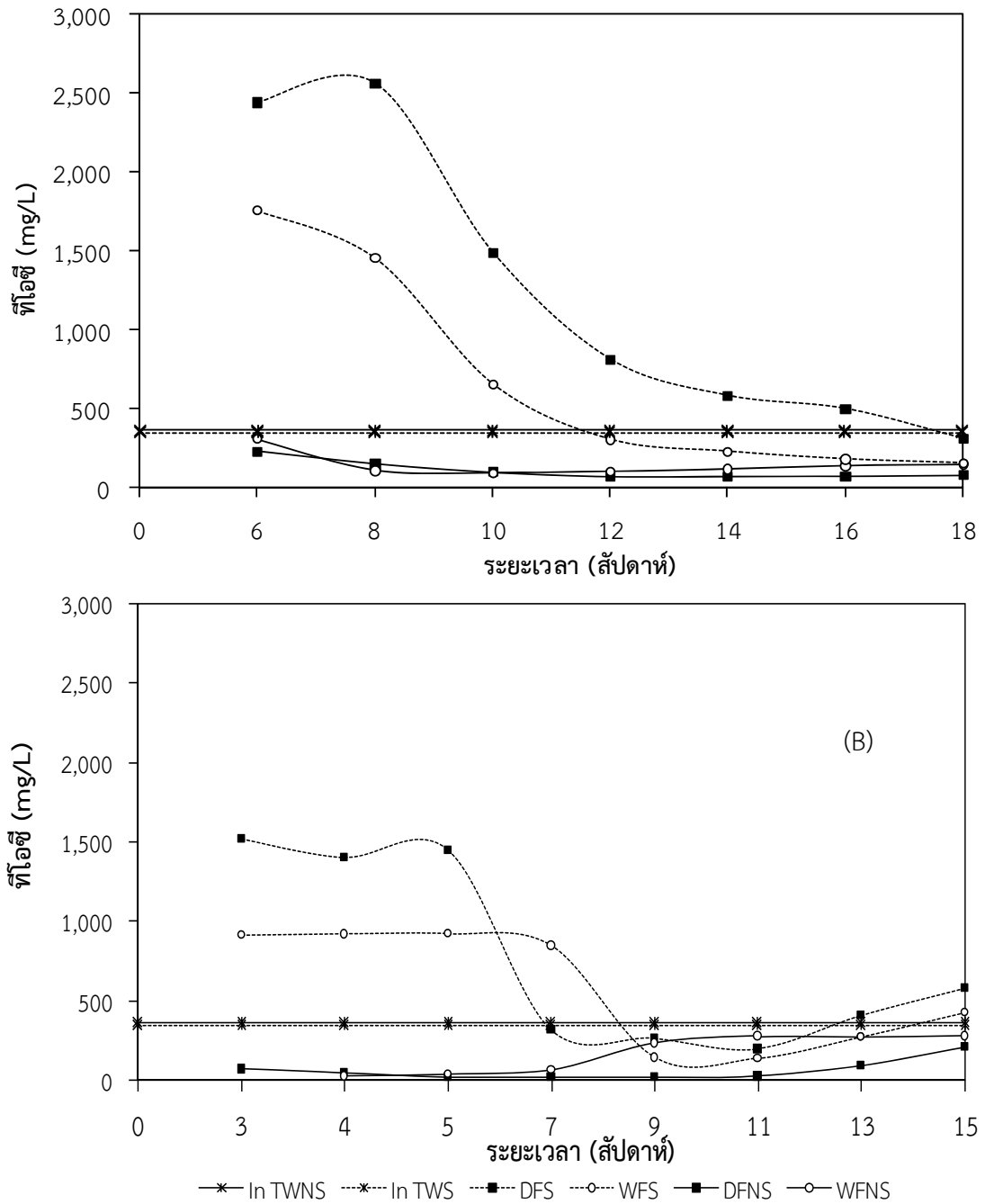
ในดินที่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่างกัน ประกอบกับคุณภาพน้ำทิ้งที่ใช้ในการบำบัดมีค่าความสกปรกไม่เท่ากัน ซึ่งน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าความสกปรกสูงกว่างานวิจัยของ กาญจนี ชูทอง (2556) นอกจากนี้การทดลองของ โรสนา กาซอ และคณะ (2555); พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) เป็นการทดลองในแปลงจากสวนปาล์มน้ำมันทำให้เพิ่มตัวแปรที่ต่างกันมากขึ้น เช่น ลักษณะสภาพอากาศ การมีต้นไม้อื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นต้น ในการทดลองครั้งนี้พบว่าอัตราการรดน้ำที่ 5 cm/week ของ คอลัมน์ชุดทดลอง DFNS ซึ่งมีการรดน้ำทุกวัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น  $94.0 \pm 5.2$  และคอลัมน์ดังกล่าวสามารถบำบัดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัด ซึ่งสามารถทำการบำบัดได้เพียง 12 สัปดาห์

### ค่าทีโอซี

ค่าซีโอดีในตัวอย่งน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของการใช้ออกซิเจนในการแปรรูปหรือย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ให้อยู่ในสภาพที่เสถียร (คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ) ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารที่มีในตัวอย่งน้ำเสีย การวิเคราะห์ซีโอดีเป็นการวิเคราะห์ปริมาณสารคาร์บอนทางอ้อม และเป็นผลรวมของสารคาร์บอนอินทรีย์และอนินทรีย์ ในการทดลองครั้งนี้ได้วิเคราะห์ค่าทีโอซีเพิ่มเติม เพื่อต้องการทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้โดยระบบบำบัดโดยดิน นอกจากนี้กรณีที่มีการทิ้งน้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งเป็นแหล่งน้ำสะอาด การวิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์ในน้ำนิยมใช้ค่าทีโอซี ดังนั้นการแสดงผลค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดโดยดินสามารถใช้เปรียบเทียบกับค่าทีโอซีของน้ำธรรมชาติในแหล่งน้ำผิวดินหรือน้ำบาดาลได้

ทีโอซี (total organic carbon) คือ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตัวอย่าง ซึ่งวิเคราะห์โดยการเผาตัวอย่างจนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาจะบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง ตัวอย่างน้ำที่นำมาวิเคราะห์ค่าทีโอซีในงานวิจัยนี้ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 1.12 ไมโครเมตร เพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่มีปริมาณสูงออกจากรูน้ำ

เมื่อพิจารณาการเข้าระบบบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week พบว่าน้ำตัวอย่าง In TWS และ In TWNS มีค่าทีโอซีประมาณ 346 และ 361 mg/L ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าทีโอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดินทำการวิเคราะห์ทุก 2 สัปดาห์ เพื่อที่ศึกษาแนวโน้มของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำทั้งหมด หรือค่าทีโอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 4-4 ส่วนค่าประสิทธิภาพการลดค่าทีโอซีด้วยการบำบัดโดยดินแสดงใน ภาคผนวก รูปที่ ค-2



รูปที่ 4-4 ค่าที่ไอซีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุม ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week วิเคราะห์ค่าที่ไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดิน ในสัปดาห์ที่ 6 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ของการบำบัด น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ในสัปดาห์ที่ 6 มีค่าที่ไอซีเป็น 2,439 และ 1,752 mg/L ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบ เป็นผลมาจากการฆ่าเชื้อดินด้วยหมอนึ่งฆ่าเชื้อ น้ำที่รดผ่านคอลัมน์จึงสะอาดอนุภาคสารอินทรีย์ไมเลกุลเล็กๆ ที่อยู่ในดินออกมากับน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ ซึ่งสารอินทรีย์

คาร์บอนเป็นหนึ่งในสารอินทรีย์นั้น เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS ที่สัปดาห์ที่ 6 ถึงสัปดาห์ที่ 18 มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าค่าที่ไอซีของน้ำเข้าระบบ ทำให้ไม่สามารถหาประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีได้ ที่สัปดาห์ที่ 18 ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS มีค่า 307 mg/L มีประสิทธิภาพการลด 11% ส่วนคอลัมน์ WFS ที่สัปดาห์ที่ 6 ถึงสัปดาห์ที่ 10 ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบ ที่สัปดาห์ที่ 12 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซี เท่ากับ 303 mg/L คิดเป็นการลดที่ไอซี 12% เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดค่าที่ไอซีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ที่สัปดาห์ที่ 18 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFS มีค่าที่ไอซี เป็น 153 mg/L โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการลดที่ไอซี 56 % จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายสัปดาห์ กำจัดค่าที่ไอซีได้ดีกว่าคอลัมน์ DFS ที่เป็นการรดรายวัน

คอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรด 5 cm/week น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินถูกนำมาวิเคราะห์ค่าที่ไอซีในสัปดาห์ที่ 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ตามลำดับ น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าที่ไอซีเป็น 1,517 และ 916 mg/L ตามลำดับ ค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบ เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าลดลงตามลำดับ ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS ในสัปดาห์ที่ 4 และ 5 มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ค่าที่ไอซีของน้ำออกจากคอลัมน์ยังคงสูงกว่าค่าที่ไอซีของน้ำเข้าระบบ ในสัปดาห์ที่ 11 ของการบำบัดน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีต่ำสุด เป็น 198 mg/L ลดค่าที่ไอซีได้ 43% ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวในสัปดาห์ที่ 13 และ 15 เพิ่มสูงขึ้นกว่าน้ำเข้าระบบโดยมีค่าเป็น 406 และ 578 mg/L ตามลำดับ ส่วนค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFS ที่สัปดาห์ที่ 4, 5 และ 7 มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ค่าดังกล่าวยังสูงกว่าค่าที่ไอซีของน้ำเข้าระบบ ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีสูงสุดในสัปดาห์ที่ 11 ของการบำบัดคิดเป็น 60% มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 137 mg/L ในสัปดาห์ที่ 13 ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีลดลงเป็น 21% และในสัปดาห์ที่ 15 ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าน้ำเข้าระบบ ซึ่งมีค่าที่ไอซีเป็น 427 mg/L จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายสัปดาห์โดยมีการฆ่าเชื้อในดินและน้ำลดค่าที่ไอซีได้ดีกว่าคอลัมน์ DFS ที่เป็นการรดรายวัน

เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดทดลอง ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS ในสัปดาห์ที่ 6 มีค่าที่ไอซีเป็น 225 และ 301 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าที่ไอซีได้ 38% และ 17% ตามลำดับ เนื่องจากในระยะแรกของการบำบัด น้ำที่รดผ่านคอลัมน์มีการชะเอาสารอินทรีย์ละลายน้ำต่างๆ ที่อยู่ในดินออกมา ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นหนึ่งในสารอินทรีย์นั้น น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินจึงมีค่าที่ไอซีสูง เมื่อระยะเวลาผ่านไปน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีลดลงอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีในน้ำที่ผ่านการบำบัดคงที่ที่สัปดาห์ที่ 14 ซึ่งลดค่าที่ไอซีได้ 81% สัปดาห์ที่ 16 และสัปดาห์ที่ 18 ประสิทธิภาพการลดที่ไอซีลดลงเล็กน้อย โดยสัปดาห์ที่ 18 มีประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีเป็น 79% น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 74 mg/L สำหรับคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 8 และสัปดาห์ที่ 10 ที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสัปดาห์ที่ 10 มีค่าการลดที่ไอซี เป็น 75% มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 89 mg/L ในสัปดาห์ที่ 12, 14, 16 และ 18 ประสิทธิภาพการลดที่ไอซีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่าเป็น 73%,



69%, 63% และ 61% ตามลำดับ ที่สัปดาห์ที่ 18 มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 141 mg/L จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันลดค่าที่ไอซีได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดน้ำรายสัปดาห์

คอลัมน์ชุดทดลองที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week คอลัมน์ DFNS มีค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 3 เท่ากับ 70 mg/L ซึ่งลดค่าที่ไอซีได้ 81% ที่สัปดาห์ที่ 4 และ 5 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 7 และสัปดาห์ที่ 9 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีคงที่ โดยมีประสิทธิภาพการลดเป็น 95% สัปดาห์ที่ 11, 13 และ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีมีค่าลดลงเป็น 93%, 73% และ 41% ตามลำดับ ที่สัปดาห์ที่ 15 ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเป็น 212 mg/L สำหรับคอลัมน์ WFNS ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่สัปดาห์ที่ 4 มีค่า 26 mg/L ระบบลดค่าที่ไอซี 93% เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่ม ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบดังกล่าวเป็นการรดน้ำอาทิตย์ละครั้ง ซึ่งในการรดแต่ละครั้งใช้ปริมาณน้ำสูงถึง 2.534 L/week ปริมาณน้ำที่สูงเป็นผลให้น้ำไหลออกสู่ด้านล่างของคอลัมน์ได้อย่างรวดเร็ว จุลินทรีย์จึงไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีในปริมาณสูงได้ทั้งหมด จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันลดค่าที่ไอซีได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์

กลไกการบำบัดที่ไอซีที่เกิดขึ้นในระบบการบำบัดโดยดิน เกิดจากดินทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ซึ่งคอยดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ ให้เกาะติดอยู่ตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดิน จากนั้นสารอินทรีย์คาร์บอนดังกล่าวถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน เป็นผลให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยดินมีค่าที่ไอซีลดลง และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งระบบเริ่มเกิดการอึดตัวคือ จุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เพิ่มเข้ามาอย่างต่อเนื่องได้ทั้งหมด ประกอบกับบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดินถูกเกาะติดไปด้วยสารอินทรีย์ ทำให้ดินมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ได้น้อยลง ส่งผลให้น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีเพิ่มขึ้น

เนื่องจากค่าที่ไอซีไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม จึงพิจารณาการเลือกจากคอลัมน์ที่สามารถบำบัดค่าที่ไอซีได้ดีที่สุด ในส่วนนี้สรุปได้ว่าการกำจัดค่าที่ไอซีของน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบควรเลือกใช้ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week ของชุดการทดลองแบบ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวัน

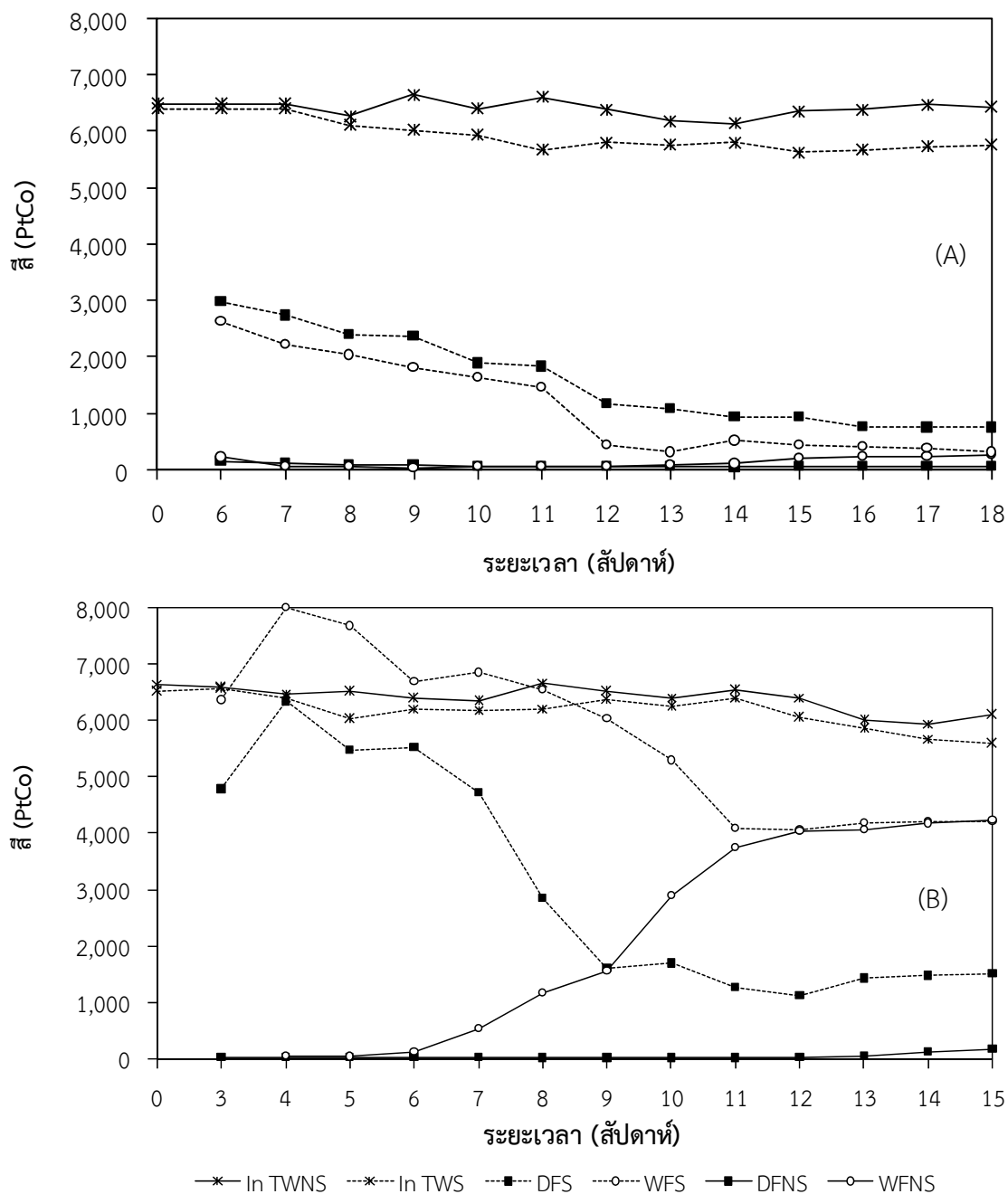
ค่าซีไอดีและที่ไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในภาคผนวก ข รูปที่ ข-3 แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นตรงดังกล่าวได้ เนื่องจากมีความแตกต่างในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ กล่าวคือ ในการศึกษาครั้งนี้ค่าที่ไอซีที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเป็นค่าที่ไอซีที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตัวอย่างมีการปนเปื้อนสารแขวนลอยในปริมาณสูงอาจจะส่งผลต่อการทำงานของเครื่องที่ไอซี ในทางกลับกันค่าซีไอดีที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเป็นค่าซีไอดีของตัวอย่างน้ำทั้งหมดซึ่งไม่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C

## ค่าหน่วยสี

ค่าหน่วยสีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัด ด้วยการบำบัดโดยดิน ที่อัตราการรด 3 และ 5 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-5 ส่วนค่าประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีด้วยการบำบัดโดยดินแสดงใน ภาคผนวก ค รูปที่ ค-3 โดยลักษณะสีของน้ำทิ้งที่เข้าระบบมีสีดำคล้ำ เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุม ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำทิ้งที่เข้าระบบ In TWS มีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 5,933 PtCo โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,622-6,400 PtCo ในสัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อนแกมส้ม ลักษณะสีที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการนิ่งมาเชื้อดิน ทำให้สารประกอบฮิวมัสที่อยู่ในดิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาลจนถึงดำเกิดการแตกตัว และชะลงมากับน้ำรดคอลัมน์ โดยคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าหน่วยสีเป็น 2,978 และ 2,633 PtCo ตามลำดับ

เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าหน่วยสีที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีค่าลดลง ในสัปดาห์ที่ 12 ของการบำบัดคอลัมน์ DFS และ WFS ลดค่าหน่วยสีได้ 80% และ 92% ตามลำดับ จากสัปดาห์ที่ 12 ถึง สัปดาห์ที่ 18 คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าหน่วยสีได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในสัปดาห์ที่ 18 คอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าหน่วยสีเป็น 757 และ 321 PtCo โดยลดค่าหน่วยสีได้ 87% และ 94% ตามลำดับ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายสัปดาห์ลดค่าหน่วยสีได้ดีกว่าคอลัมน์ DFS ที่เป็นการรดรายวัน

สำหรับคอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรด 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWS มีค่าหน่วยสีเฉลี่ย 6,156 PtCo มีค่าอยู่ในช่วง 5,578-6,556 PtCo น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ที่สัปดาห์ที่ 3 มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มแกมส้ม โดยมีค่าหน่วยสีเป็น 4,778 และ 6,356 PtCo ตามลำดับ ค่าดังกล่าวของคอลัมน์ WFS มีค่าสูงกว่าค่าหน่วยสีของน้ำเข้าระบบ เนื่องจากคอลัมน์ดังกล่าวมีอัตราการรดน้ำสูง โมเลกุลน้ำจะไหลผ่านคอลัมน์ได้อย่างรวดเร็วทำให้เกิดการชะล้างเอาอนุภาคสารสีที่เกาะติดบนผิวดินออกมาได้มาก เป็นผลให้ค่าสีน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถบอกได้ว่าคอลัมน์ชุดควบคุมมีการดูดติดสารสีได้มากหรือน้อยเพียงใด เนื่องจากในระยะแรกของการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีการชะเอาสารประกอบฮิวมัสที่อยู่ในดินออกมาด้วย น้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 9 มีค่าหน่วยสี 6,022 PtCo ซึ่งลดค่าหน่วยสีได้ 5% จากสัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 12 ค่าหน่วยสีลดลงได้อย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีจึงมีค่าเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 13-15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าหน่วยสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 15 ค่าหน่วยสีที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเป็น 4,211 PtCo คิดเป็นการลดค่าหน่วยสี 25% ส่วนคอลัมน์ DFS ค่าหน่วยสีมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 12 โดยมีประสิทธิภาพการลดเป็น 82% ที่สัปดาห์ที่ 13 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีลดลงเล็กน้อย ประสิทธิภาพการลดหน่วยสีที่สัปดาห์ที่ 15 มีค่าเป็น 73% โดยมีค่าหน่วยสีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 1,500 PtCo จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันลดค่าหน่วยสีได้ดีกว่า คอลัมน์ WFS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์



รูปที่ 4-5 ค่าหน่วยสีของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรด 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ส่วนคอลัมน์ชุดทดลอง ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 6,406 PtCo โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6,133-6,644 PtCo น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS ในสัปดาห์ที่ 6 มีค่าหน่วยสีเป็น 149 และ 227 PtCo ซึ่งลดค่าหน่วยสีได้ 98% และ 97% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการลดค่าหน่วยสีโดยคอลัมน์ DFNS พบว่า ลักษณะสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 6 มีสีเหลืองอ่อน สีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ถัดไปค่อยๆจางกลายเป็น

สีใสไม่มีสีตลอดระยะเวลาในการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าหน่วยสีพบว่า เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดค่าหน่วยสีมีค่าคงที่ โดยที่สัปดาห์ที่ 18 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีมีค่าเป็น 99.0% โดยน้ำที่ออกจากระบบมีค่าหน่วยสีเป็น 64 PtCo สำหรับลักษณะสีน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFNS ในสัปดาห์ที่ 6 มีสีเหลืองอ่อน สีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ถัดไปเป็นสีใสไม่มีสี และที่สัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์เริ่มมีลักษณะสีเหลืองอ่อน เมื่อพิจารณาการลดค่าหน่วยสีของคอลัมน์ดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีมีค่าคงที่ถึงสัปดาห์ที่ 14 โดยมีค่าประสิทธิภาพการลดเป็น 98% ที่สัปดาห์ที่ 15 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีลดลงเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 18 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีเป็น 95.8% โดยมีค่าหน่วยสีเป็น 272 PtCo จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันลดค่าหน่วยสีได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์

คอลัมน์ชุดทดลองที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเท่ากับ 6,389 PtCo โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5,933-6,667 PtCo น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าสีเท่ากับ 21 PtCo โดยลดค่าหน่วยสีได้ 99.7% น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีลักษณะสีใสไม่มีสี น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าหน่วยสีคงที่อย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 12 ซึ่งมีค่าหน่วยสีเป็น 19 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการลด 99.7% ในสัปดาห์ที่ 13 ลักษณะสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เริ่มมีสีเหลืองอ่อน สัปดาห์ที่ 13 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีลดลงเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าหน่วยสี 161 PtCo สำหรับคอลัมน์ WFNS น้ำที่ออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 4 มีลักษณะสีใสไม่มีสีโดยมีค่าหน่วยสีเท่ากับ 44 PtCo ลดค่าหน่วยสีได้ 99.3% ที่สัปดาห์ที่ 6 ลักษณะสีน้ำที่ออกจากเริ่มมีสีเหลือง และเริ่มมีสีเข้มขึ้นจนถึงสีน้ำตาลอ่อนแกมส้มในช่วงสุดท้ายของการบำบัด จากข้างต้นเห็นได้ว่าค่าหน่วยสีที่สัปดาห์ที่ 6 ถึงสัปดาห์ที่ 15 มีค่าหน่วยสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคอลัมน์ดังกล่าวมีการรดน้ำในอัตราการรดที่สูง และเป็นการรดแบบอาทิตย์ละครั้ง อนุภาคดินในคอลัมน์จึงไม่สามารถกรองสีในน้ำทิ้งในปริมาณมากๆ ได้ทั้งหมด จึงทำให้น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีสีเข้มขึ้นเรื่อยๆ โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าว มีค่าหน่วยสีเป็น 4,222 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการลดได้ 31% จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันลดค่าหน่วยสีได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์

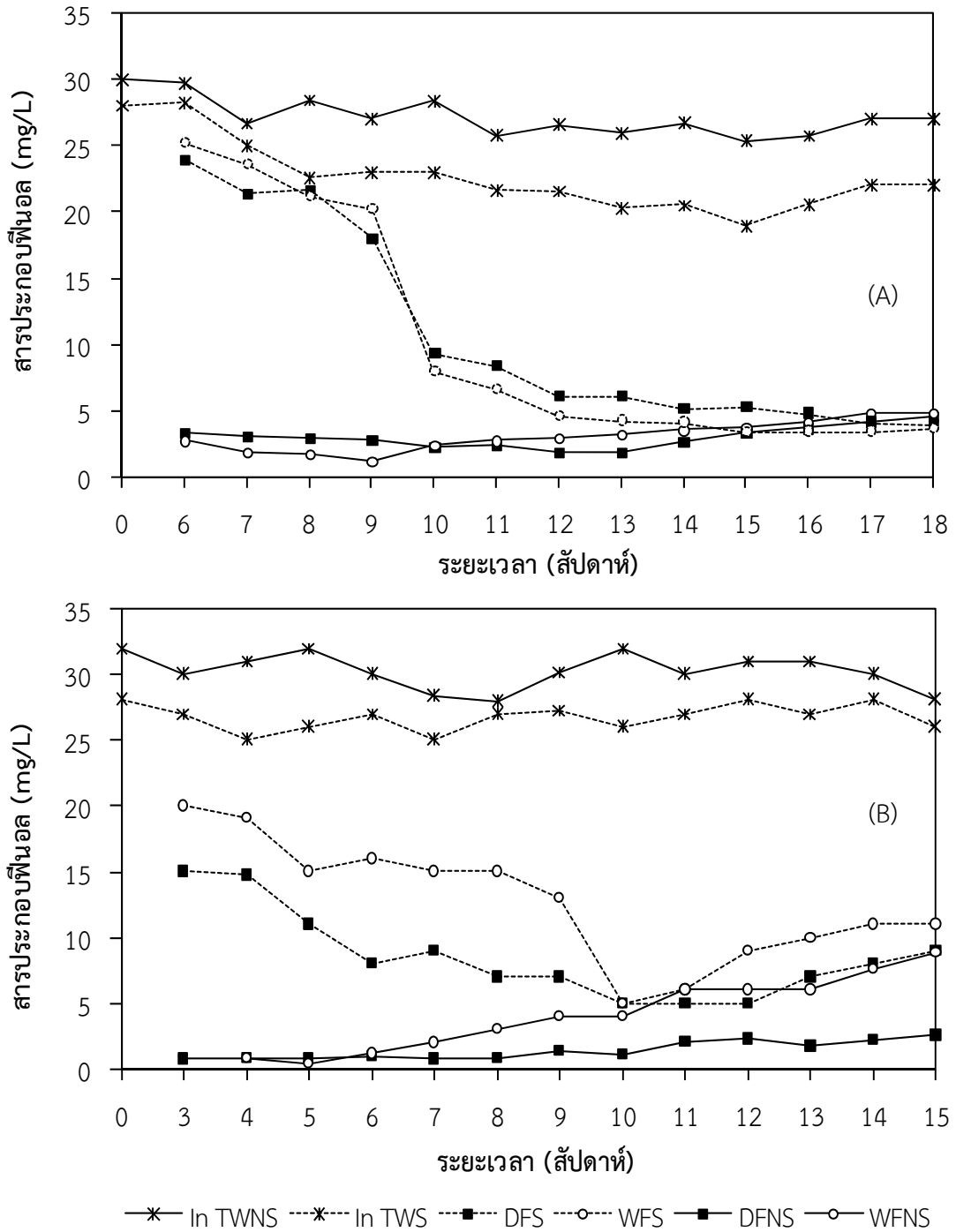
เนื่องด้วยมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้สีของน้ำที่สามารถทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้นั้น ต้องเป็นสีที่ไม่พึงรังเกียจ จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week ของคอลัมน์ DFNS และ WFNS และที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week ของคอลัมน์ DFNS ลักษณะสีน้ำที่ผ่านการบำบัด เป็นสีที่ใสไม่มีสี ซึ่งเป็นสีที่ไม่พึงรังเกียจและคาดการณ์ว่าผ่านตามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดพบว่าคอลัมน์ DFNS ที่อัตราการรด 3 cm/week และที่อัตราการรด 5 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ใกล้เคียงกัน ในส่วนนี้สรุปได้ว่าการกำจัดสีของน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเลือกใช้ได้ทั้งที่อัตราการรด 3 และ 5 cm/week ของชุดการทดลองแบบ DFNS กลไกการบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน เกิดขึ้นโดยดินทำหน้าที่เป็นตัวกรองที่คอยดูดซับสารสีต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้งให้มาเกาะติดตรงบริเวณผิวหน้าดินซึ่งเป็นกลไกการบำบัดทางกายภาพ จากนั้น

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสารสีในน้ำทิ้ง เช่น สารประกอบฟีนอล แทนนิน เมลานอยดิน แคโรทีน เป็นต้น จะถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินซึ่งเป็นกลไกการบำบัดทางกายภาพ เป็นผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีสีและค่าหน่วยสีลดลง แต่เมื่อระยะเวลาการบำบัดผ่านไปดินเกิดการอิ่มตัวจากการดูดซับสารสี ทำให้ประสิทธิภาพการกรองของดินลดลงเป็นผลให้น้ำมีสีและค่าหน่วยสีเพิ่มขึ้น

### ค่าสารประกอบฟีนอล

ค่าสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์ด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-6 ส่วนค่าประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดินแสดงใน ภาคผนวก ค รูปที่ ค-4 เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 22 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 19-28 mg/L ในสัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 24 และ 25 mg/L ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าสารประกอบฟีนอลที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ทั้ง 2 มีค่าลดลงตามลำดับ ที่สัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ค่าสารประกอบฟีนอลที่ออกจากคอลัมน์มีค่าลดลงอย่างคงที่ โดยในสัปดาห์ที่ 18 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 3.9 และ 3.7 mg/L ตามลำดับ โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอล 82% และ 83% ตามลำดับ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFS และ WFS มีประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ใกล้เคียงกัน

คอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week น้ำเข้าระบบบำบัด In TWS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ย 27 mg/L มีค่าอยู่ในช่วง 25-28 mg/L น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 15 และ 20 mg/L ตามลำดับ น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS มีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 12 โดยน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS มีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 5 mg/L ประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอลเป็น 82% จากนั้นในสัปดาห์ที่ 13 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS มีค่าสารประกอบฟีนอล 9 mg/L และค่าการลดเป็น 65% ส่วนน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFS มีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 10 ซึ่งมีค่าการลดเป็น 81% มีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 5 mg/L สัปดาห์ที่ 11 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในสัปดาห์ที่ 15 ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 11 mg/L มีประสิทธิภาพการลด 58% จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันมีการกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ WFS ที่เป็นการรดน้ำรายสัปดาห์



รูปที่ 4-6 ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

สำหรับคอลัมน์ชุดทดลอง ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 27 mg/L ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 25-30 mg/L ในสัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 3.3 และ 2.7 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 89% และ 91% ตามลำดับ น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ที่สัปดาห์ที่ 6 จนถึงสัปดาห์ที่ 13 มีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 14 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS มีค่าสารประกอบฟีนอล 4.5 mg/L ซึ่งลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 83% สำหรับน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 6 จนถึงสัปดาห์ที่ 9 มีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอล 4.8 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 82% จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS และ WFNS มีประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ใกล้เคียง

คอลัมน์ชุดทดลองที่อัตราการรด 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับ 30 mg/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 28-32 mg/L ในสัปดาห์ที่ 3 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 0.8 mg/L ลดค่าสารประกอบฟีนอลได้เท่ากับ 97% ประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลมีค่าคงที่จนถึงสัปดาห์ที่ 10 ที่สัปดาห์ที่ 11 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลลดลงเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 91% ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 2.6 mg/L สำหรับน้ำที่ออกจากระบบบำบัดโดยดินในคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 4 และ สัปดาห์ที่ 5 มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 0.8 และ 0.45 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอล 98% และ 99% ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 6 ถึงสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 9 mg/L คิดเป็นการลดสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 68% จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์

จากข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดในระยะแรกของทั้ง 2 อัตราการรดมีค่าสารประกอบฟีนอลต่ำกว่าน้ำเข้าระบบ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน (ตารางที่ 4-7) พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินหลังการทดลองของคอลัมน์ชุดควบคุมทั้ง 2 อัตราการรดน้ำ และ 2 วิธีการรดน้ำ มีค่าน้อยกว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินก่อนการทดลอง ผลที่ได้จึงสรุปได้ว่าน้ำที่ชะผ่านคอลัมน์ดังกล่าวมีการชะเอาสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในดินออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าดินมีการดูดซับสารประกอบฟีนอลไว้ได้มากหรือน้อยเพียงใด

การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine เป็นวิธีมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจวัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำทั้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินของคอลัมน์ชุดทดลอง พบว่าคอลัมน์ที่รดด้วยอัตราการรด 3 cm/week ทั้ง 2 คอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินสูงกว่าค่ามาตรฐานสารประกอบฟีนอลในน้ำทั้งโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับอัตราการรดที่ 5

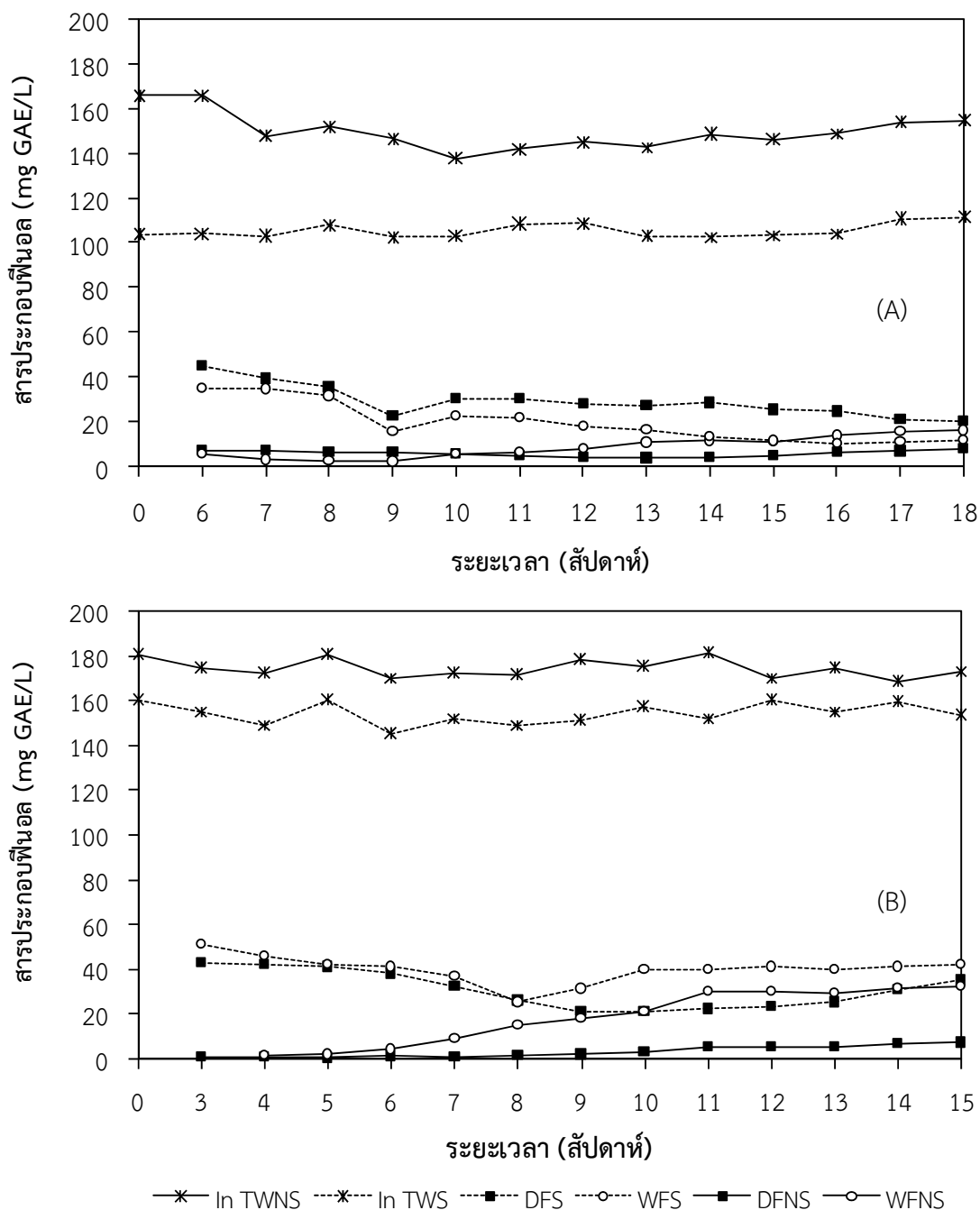
cm/week น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ในสัปดาห์แรก (สัปดาห์ที่ 3) ถึงสัปดาห์ที่ 8 และคอลัมน์ WFNS ในสัปดาห์ที่น้ำออกจากคอลัมน์ (สัปดาห์ที่ 4) ถึงสัปดาห์ที่ 5 มีค่าสารประกอบฟีนอลผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

สรุปในการกำจัดสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำจากบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ควรเลือกใช้ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week ของชุดการทดลองแบบ DFNS ที่มีการรดน้ำรายวัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ดีที่สุด และสามารถบำบัดสารประกอบฟีนอลให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัดซึ่งสามารถทำการบำบัดได้เพียงแค่ 8 สัปดาห์ของการบำบัด

ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำเข้าระบบ และน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 และ 5 cm/week แสดงดังรูป 4-7 ส่วนค่าประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดินแสดงใน ภาคผนวก ค รูปที่ ค-5 เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 106 mg GAE/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 103-112 mg GAE/L ในสัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 45 และ 35 mg GAE/L ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงตามระยะเวลาในการบำบัด โดยในสัปดาห์ที่ 18 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 20 และ 12 mg GAE/L ตามลำดับ โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 82% และ 89% ตามลำดับ จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าคอลัมน์ WFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายสัปดาห์กำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ DFS ที่เป็นการรดรายวัน

สำหรับคอลัมน์ชุดควบคุมที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ย 154 mg GAE/L มีค่าอยู่ในช่วง 145-160 mg GAE/L น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS และ WFS ที่สัปดาห์ที่ 3 มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 43 และ 51 mg/L ตามลำดับ น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFS มีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 10 โดยน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 21 mg GAE/L มีค่าการลดเป็น 87% จากนั้นในสัปดาห์ที่ 11 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ค่าสารประกอบฟีนอลที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่สัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ มีค่าสารประกอบฟีนอล 35 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอล 77% ในส่วนของคอลัมน์ WFS น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 8 ซึ่งมีค่าการลดเป็น 83% มีค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 25 mg/L สัปดาห์ที่ 9 ถึงสัปดาห์ที่ 15 ค่าการลดของสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าคงที่ โดยที่สัปดาห์ที่ 15 ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเป็น 42 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอล 73 % จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ WFS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์





รูปที่ 4-7 ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำเข้าระบบและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดทดลองที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเป็น 150 mg GAE/L ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 138-166 mg GAE/L ส่วนน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 6 มีค่าสารประกอบฟีนอล เป็น 7.3 และ

5.8 mg GAE/L ตามลำดับ คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 96% และ 97% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคอลัมน์ DFNS พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่สัปดาห์ที่ 13 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 4 mg GAE/L ลดค่าสารประกอบฟีนอลได้เท่ากับ 97.2% สัปดาห์ที่ 14 จนถึงสัปดาห์ที่ 18 ค่าการลดสารประกอบฟีนอลมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยในสัปดาห์ที่ 18 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 7.9 mg GAE/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 95% ในส่วนของคอลัมน์ WFNS ในสัปดาห์ที่ 7 ถึงสัปดาห์ที่ 9 น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 10 ถึงสัปดาห์ที่ 18 ค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอล 16 mg GAE/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ 90% จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์

คอลัมน์ชุดทดลองที่ 5 cm/week น้ำเข้าระบบ In TWNS มีค่าสารประกอบฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับ 174 mg GAE/L โดยมีค่าอยู่ในช่วง 168-181 mg GAE/L น้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ในสัปดาห์ที่ 3 มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 0.52 mg GAE/L มีค่าการลดเท่ากับ 99.7% ประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลมีค่าคงที่จนถึงสัปดาห์ที่ 10 ในสัปดาห์ที่ 11 จนถึงสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลลดลงเล็กน้อย โดยสัปดาห์ที่ 15 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลมีค่าเป็น 96% ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ 7 mg GAE/L สำหรับน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 4 และ สัปดาห์ที่ 5 มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 1.5 และ 1.9 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอล 99.1% และ 98.9% ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 6 จนถึงสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในสัปดาห์ที่ 15 น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลเป็น 32 mg GAE/L ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 82% จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าคอลัมน์ DFNS ซึ่งเป็นการรดน้ำในรายวันกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดีกว่าคอลัมน์ WFNS ที่เป็นการรดรายสัปดาห์ เนื่องด้วยการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม จึงเลือกโดยพิจารณาจากคอลัมน์ที่ให้ประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลได้ดีที่สุด ได้แก่ คอลัมน์ชุดการทดลอง DFNS ที่มีการรดน้ำรายวันที่อัตราการรด 5 cm/week

เนื่องด้วยการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการดังกล่าวจึงเป็นวิธีการที่นิยมใช้การวิเคราะห์หาค่าสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำ แต่การตรวจวัดด้วยวิธีดังกล่าวไม่สามารถตรวจวัดสารประกอบฟีนอลที่มีหมู่แทนที่ในตำแหน่ง พวรา-ฟีนอลได้ (APHA, AWWA and WEF, 2005) จึงให้ค่าสารประกอบฟีนอลที่น้อยกว่าการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu สามารถตรวจวัดกลุ่มสารประกอบฟีนอลได้ทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำตัวอย่าง จึงได้ค่าของสารประกอบฟีนอลที่แท้จริงที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำ จากการทดลองเห็นได้ว่าแนวโน้มจากการตรวจวัดค่าสารประกอบฟีนอล

ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine

งานวิจัยนี้ได้หาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine และวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน เฉพาะส่วนที่เป็นคอลัมน์ชุดทดลอง สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ได้คือ (ภาคผนวก ข รูปที่ ข-4) ค่าสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu =  $3.4446 \times$ ค่าสารประกอบฟีนอลวิเคราะห์ด้วยวิธี 4-aminoantipyrine (จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 51 ตัวอย่าง  $R^2$  เป็น 0.7959 และ significant level เป็น 0.01)

กลไกการบำบัดสารประกอบฟีนอลด้วยการบำบัดโดยดินเกิดขึ้นโดยเมื่อรดตัวอย่างน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลลงไปในดิน อนุภาคดินจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองและดูดซับสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในน้ำที่เข้ามาเกาะติดตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดิน สารประกอบฟีนอลส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายได้ด้วยกลุ่มเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในดินทั้งกลุ่มที่ใช้และไม่ใช้อากาศ (Franco *et al.*, 2005; Shi *et al.*, 2005; Mutabaruka *et al.*, 2007; Aresta *et al.*, 2010) โดยกระบวนการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลภายใต้สภาวะที่ใช้และไม่ใช้อากาศแสดงในรูปที่ 2-7 และ 2-8 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ตัวอย่างน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ดินสามารถซึมผ่านคอลัมน์ดินได้ทั้งหมด โดยไม่มีการขังอยู่บริเวณผิวหน้าดินด้านบนของคอลัมน์ จึงกล่าวได้ว่าการบำบัดโดยดินในการทดลองครั้งนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีอากาศ จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในตัวอย่างดินที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่าเชื้อแบคทีเรียหลังการทดลองมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีกิจกรรมของกลุ่มเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลเกิดขึ้นภายในระบบ และเมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบฟีนอลในดินดังแสดงในตารางที่ 4-7 พบว่าปริมาณฟีนอลในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าดินสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างได้ สารประกอบฟีนอลส่วนที่ถูกดูดซับไว้ในดินจะเกิดการตกตะกอนและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกลายเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน (Buondonno *et al.*, 2014) และเมื่อระยะเวลาผ่านไปอินทรีย์วัตถุเหล่านี้เกิดการย่อยสลายกลายเป็นฮิวมัสในดิน (Hattenschwiler and Vitousek, 2000) ดังนั้นการบำบัดสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบอาศัยทั้งกระบวนการการดูดซับโดยดิน และการย่อยสลายทางชีวภาพของแบคทีเรียที่อยู่ในดิน

### ปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำและดิน

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดิน แสดงดังตารางที่ 4-5 ปริมาณแบคทีเรียที่ตรวจพบแสดงให้เห็นว่าน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ดินมีการชะเอาแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ในดินออกมา กับน้ำที่ผ่านการบำบัด เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุม DFS และ WFS ซึ่งมีการฆ่าเชื้อตัวอย่างดิน พบว่ามีการตรวจพบปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ในสัปดาห์แรกที่น้ำไหลออกจากคอลัมน์ เนื่องจากการทดลองเป็นระบบเปิดจึงทำให้เชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในบรรยากาศมีการเจริญเติบโตในคอลัมน์ดินได้ ปริมาณเชื้อแบคทีเรียจากตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินในสัปดาห์สุดท้าย มีมากกว่าในสัปดาห์แรกที่น้ำไหลออกจากคอลัมน์ แสดงให้เห็นว่าภายในระบบมี

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้น้ำที่รดผ่านคอลัมน์ชะแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ออกมาได้ในปริมาณที่สูง

**ตารางที่ 4-5** จำนวนเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดิน

ตัวอย่าง	อัตราการรด (cm/week)	จำนวนแบคทีเรีย ( $\times 10^5$ CFU/mL)	
		ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดิน	
		สัปดาห์แรกที่น้ำไหลออกจากคอลัมน์	สัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด
In TWS	-	0	-
In TWNS	-	2	-
DFS	3	0.37	30
WFS		0.33	36.7
DFNS		1.33	56.7
WFNS		2.0	85
DFS	5	0.5	26.7
WFS		0.27	43.3
DFNS		1.67	60
WFNS		2.33	40

เมื่อการทดลองการบำบัดโดยดินยุติลงได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้ในตัวอย่างดิน โดยทำการขูดตัวอย่างดินที่ระดับความลึกจากบริเวณหน้าดินในคอลัมน์ 15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีกิจกรรมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นมากที่สุด โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-6 จำนวนเชื้อแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นหลังการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีกิจกรรมของกลุ่มเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลเกิดขึ้นภายในระบบ โดยคอลัมน์ขูดทดลอง DFNS ที่อัตราการรด 5 cm/week มีจำนวนแบคทีเรียในดินหลังการทดลองที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการลดค่าสารประกอบฟีนอลที่ดีที่สุด จึงกล่าวได้ว่าจำนวนแบคทีเรียที่เพิ่มมากขึ้นหลังการทดลองของคอลัมน์ขูดทดลองสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำทิ้ง สำหรับคอลัมน์ขูดควบคุมแสดงให้เห็นว่ามี การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นในระหว่างการเดินระบบ

ตารางที่ 4-6 ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในตัวอย่างดินที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลก่อนและหลังการทดลอง

ตัวอย่าง	อัตราการรด (cm/week)	จำนวนแบคทีเรีย ( $\times 10^5$ CFU/g of dry soil)	
		ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
DFS	3	0	120
WFS		0	90
DFNS		93.3	200
WFNS		93.3	180
DFS	5	0	100
WFS		0	130
DFNS		93.3	260
WFNS		93.3	160

#### ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน แสดงดังตารางที่ 4-7 เมื่อพิจารณาตัวอย่างดินก่อนการทดลอง จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อซึ่งเป็นคอสม์นชุดควบคุมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้สูงกว่าตัวอย่างดินของคอสม์นชุดทดลองซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ความร้อนและความดันจากการฆ่าเชื้อตัวอย่างดินส่งผลให้สารประกอบชีวโมเลกุลที่อยู่ในดินซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนและละลายน้ำได้ยาก เกิดการแตกตัวจากโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างขนาดเล็กลงกลายเป็นสารประกอบฟีนอลตัวอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้ (อรรวรรณ ฉัตรสิริรุ่ง, 2551) เป็นผลให้ดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้สูงกว่าดินที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ และพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้หลังการทดลองของคอสม์นดังกล่าว (DFS และ WFS) มีค่าน้อยกว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ก่อนการทดลอง จึงสรุปได้ว่าน้ำที่ชะผ่านคอสม์นดังกล่าวมีการชะเอาสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในดินออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด สำหรับคอสม์นชุดทดลอง จะเห็นได้ว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินหลังการทดลองมีปริมาณสูงกว่าสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินก่อนการทดลอง จึงสรุปได้ว่าดินสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่างได้

เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินหลังการทดลองในชุดการทดลองเดียวกัน พบว่า ที่อัตราการรดเดียวกันการรดน้ำรายวันมีการก่อดัของสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ การรดน้ำรายวันปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทั้ง สำหรับการรดน้ำในรายสัปดาห์พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินมีค่าลดลงตามอัตราการรดน้ำทั้งที่สูงขึ้น เนื่องจากการรดน้ำในรายสัปดาห์เป็นการรดน้ำในปริมาณมาก เป็นผลทำให้สารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินเกิดการชะออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงกว่าการรดน้ำในรายวัน จากข้างต้นกล่าวได้ว่า DFNS ที่อัตราการ

รดน้ำ 5 cm/week มีปริมาณการก่ตัวของสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดินหลังการทดลองมากที่สุด

ตารางที่ 4-7 ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน

อัตราการรดน้ำ (cm/week)	สารประกอบฟีนอลที่ละลายน้ำได้ในดิน (g/kg)					
	ก่อนการทดลอง			หลังการทดลอง		
	คอลัมน์ชุด ควบคุม	คอลัมน์ชุด ทดลอง	DFS	WFS	DFNS	WFNS
3	0.62	0.12	0.39	0.20	0.76	0.62
5			0.43	0.33	0.86	0.52

#### ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน แสดงดังตารางที่ 4-8 ในการทดลองทำการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินของคอลัมน์ชุดควบคุม DFS และ WFS ในสัปดาห์แรกและสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด และทำการตรวจวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ชุดทดลอง DFNS และ WFNS ในสัปดาห์แรก, สัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด ตลอดจนในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดที่มีค่าสารประกอบฟีนอลน้อยที่สุดจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu

ผลการตรวจวัดชนิดของสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่นำมาบำบัดด้วยคอลัมน์ดิน พบว่าน้ำรดคอลัมน์ In TWNS มีปริมาณกรดแกลลิกเป็น 22 mg/L และเมื่อทำการวัดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งไอน้ำ (In TWS) พบว่า มีกรดแกลลิกเท่ากับ 20 mg/L (จุดเดือดของกรดแกลลิก เท่ากับ 260°C) จากการศึกษาของ จิราพร เพลินจิตต์ และคณะ (2554) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนสามารถทำให้กรดฟีนอลิคสลายตัวมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่ 250 องศาเซลเซียส หลังจากให้ความร้อน 30 นาที จึงกล่าวได้ว่าการฆ่าเชื้อตัวอย่างน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีที่มีผลต่อการสลายตัวของกรดแกลลิก

เมื่อพิจารณาการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week คอลัมน์ชุดควบคุม DFS และ WFS ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์ พบว่ามีปริมาณกรดแกลลิกสูงกว่าน้ำเข้าระบบ จึงสามารถสรุปได้ว่าน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ดินมีการชะเอาสารประกอบฟีนอลในดินออกมากับน้ำชะผ่านคอลัมน์ คอลัมน์ DFS ตรวจพบสารประกอบฟีนอลรวม เท่ากับ 40 mg/L โดยประกอบด้วยกรดแกลลิก 33 mg/L และฟีนอล 7 mg/L สารฟีนอลที่ตรวจพบในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดังกล่าว ผลมาจากการนึ่งฆ่าเชื้อดิน ความร้อนและความดันที่ใช้ในการฆ่าเชื้อส่งผลให้สารประกอบฟีนอลในดินเกิดการแตกตัวกลายเป็นสารฟีนอล และชะมากับน้ำรดผ่านคอลัมน์ ส่วนคอลัมน์ WFS น้ำที่ออกจากคอลัมน์ตรวจพบกรดแกลลิก 33 mg/L เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นระบบสามารถบำบัดสารประกอบฟีนอลได้ดีขึ้น ในสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดคอลัมน์ DFS และ WFS ตรวจพบกรด

แกลลิกในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ดังกล่าวได้ 15 และ 7 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดค่าสารประกอบฟีนอลรวมได้ 63% และ 79% ตามลำดับ ไม่มีการตรวจพบชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS ในสัปดาห์ที่ 6, 9 และ 13 ส่วนสัปดาห์ที่ 18 ซึ่งเป็นสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด ไม่มีการตรวจพบชนิดของสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ส่วนคอลัมน์ WFNS ตรวจพบกรดแกลลิก 5 mg/L

การตรวจวัดชนิดสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week คอลัมน์ชุดควบคุม DFS และ WFS ทำการตรวจวัดในสัปดาห์ที่ 3 และสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัด คือสัปดาห์ที่ 15 คอลัมน์ DFS ในสัปดาห์แรกที่น้ำออกจากคอลัมน์ตรวจพบกรดแกลลิก 40 mg/L และที่สัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดตรวจพบกรดแกลลิก 19 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดปริมาณกรดแกลลิกได้ 53% คอลัมน์ WFS น้ำที่ออกจากคอลัมน์ดังกล่าวสัปดาห์แรกตรวจพบกรดแกลลิก 24 mg/L และที่สัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดตรวจพบกรดแกลลิก 20 mg/L คอลัมน์ดังกล่าวลดปริมาณกรดแกลลิกได้ 17% สำหรับคอลัมน์ชุดทดลอง DFNS ตรวจวัดที่สัปดาห์ที่ 3, 4, 5 และ 15 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ WFNS ตรวจวัดที่สัปดาห์ที่ 4, 5 และ 15 ตามลำดับ ไม่มีการตรวจพบชนิดของสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS ที่สัปดาห์ที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ และไม่มีการตรวจพบชนิดของสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ WFNS ที่สัปดาห์ที่ 4 และ 5 ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 18 ซึ่งเป็นสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดตรวจพบชนิดของสารประกอบฟีนอลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ DFNS และ WFNS ได้แก่ กรดแกลลิก 8 และ 12 mg/L ตามลำดับ

จากข้างต้นจึงสรุปได้ว่า สารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเมื่อผ่านการบำบัดโดยดิน ดินสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลไว้ได้ส่วนหนึ่ง และสารประกอบฟีนอลอีกส่วนหนึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในดิน จากการทดลองมีการตรวจพบสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดในสัปดาห์สุดท้าย ถึงกล่าวได้ว่าดินสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลไว้ได้ดี ส่งผลให้ระบบเกิดการอิมิตัวทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-8 ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน

อัตราการรดน้ำ	กรดแกลลิก	ฟีนอล	สารประกอบฟีนอลรวม
In TWS	20	N.D.	22
In TWNS	22	N.D.	20
<u>3 cm/week</u>			
- สัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัด			
- DFS	33	7	40
- WFS	33	N.D.	33
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	N.D.	-	N.D.

หมายเหตุ: N.D. = Not detected

ตารางที่ 4-8 ชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยการบำบัดโดยดิน (ต่อ)

อัตราการรดน้ำ	กรดแกลลิก	ฟีนอล	สารประกอบฟีนอลรวม
<u>3 cm/week</u>			
- สัปดาห์ที่ 9 ของการบำบัด			
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	N.D.	-	N.D.
- สัปดาห์ที่ 13 ของการบำบัด			
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	N.D.	-	N.D.
- สัปดาห์ที่ 18 ของการบำบัด			
- DFS	15	-	15
- WFS	7	-	7
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	5	-	5
<u>5 cm/week</u>			
- สัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด			
- DFS	40	-	40
- WFS	24	N.D.	24
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- สัปดาห์ที่ 4 ของการบำบัด			
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	N.D.	-	N.D.
- สัปดาห์ที่ 5 ของการบำบัด			
- DFNS	N.D.	-	N.D.
- WFNS	N.D.	-	N.D.
- สัปดาห์ที่ 15 ของการบำบัด			
- DFS	19	-	19
- WFS	20	-	20
- DFNS	8	-	8
- WFNS	12	-	12

หมายเหตุ: N.D. = Not detected



### 4.3.3 ผลการศึกษาคุณภาพดินก่อนและหลังการทดลอง

#### ลักษณะเนื้อดิน

ลักษณะเนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง วิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินร่วนเหนียว (clay), ดินทรายแป้ง (silt) และดินทราย (sand) ดังแสดงดังตารางที่ 4-9 ลักษณะเนื้อดินก่อนการทดลองเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) โดยมีเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคดินร่วนเหนียว, ดินทรายแป้ง และดินทรายเป็น 15.6%, 17.6% และ 66.8% ตามลำดับ หลังการทดลองลักษณะดินในคอลัมน์ DFS, WFS และ WFNS ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week มีลักษณะเนื้อดินเหมือนเดิม สอดคล้องกับการทดลองของ เพ็ญญา ทองประไพ (2555) ซึ่งศึกษาลักษณะดินในสวนปาล์มจากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำยางข้น พบว่า แปลงที่มีลักษณะเนื้อดินแบบดินร่วนปนทราย เมื่อพิจารณาเนื้อดินระหว่างการทดลอง (4 เดือน) และหลังจากการทดลอง (9 เดือน) พบว่าลักษณะเนื้อดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ กาญจณี ชูทอง (2556) ซึ่งศึกษาลักษณะเนื้อดินก่อนและหลังการบำบัดโดยพบว่า คอลัมน์ที่มีลักษณะเนื้อดินก่อนการทดลองเป็นแบบดินร่วนปนทราย เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ลักษณะเนื้อดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ส่วนลักษณะดินหลังการทดลองของคอลัมน์ DFS, WFS, DFNS และ WFNS ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week และคอลัมน์ DFNS ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week มีเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคดินร่วนเหนียว และดินทรายแป้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลักษณะเนื้อดินของคอลัมน์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เนื่องจากเมื่อรดตัวอย่างน้ำผ่านคอลัมน์ที่มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย ส่งผลให้ดินเกิดการยุบตัวและอัดตัวแน่นขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินร่วนเหนียว และดินทรายแป้งเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินทรายลดลง ลักษณะดินจากคอลัมน์ดังกล่าวจึงกลายเป็นแบบดินร่วนเหนียวปนทราย การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อดินจากดินร่วนเหนียวปนทรายกลายเป็นดินร่วนปนทราย หรือจากดินร่วนปนทรายกลายเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายสามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากลักษณะเนื้อดินทั้ง 2 ประเภทจัดอยู่ในกลุ่มเนื้อดินปานกลาง (medium-textured soil) ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว, ดินทรายแป้ง และดินทรายไม่มากนัก

ตารางที่ 4-9 ลักษณะเนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง

ตัวอย่าง	อัตราการรด (cm/week)	ขนาดของอนุภาค (%)			ลักษณะเนื้อดิน
		ดินร่วนเหนียว	ดินทรายแป้ง	ดินทราย	
ก่อนการทดลอง		15.6	17.6	66.8	ดินร่วนปนทราย
DFS	3	22.8	24.9	52.3	ดินร่วนเหนียวปนทราย
WFS		20.2	20.5	59.3	ดินร่วนเหนียวปนทราย
DFNS		24.2	21.7	54.1	ดินร่วนเหนียวปนทราย
WFNS		24.3	16.8	58.9	ดินร่วนเหนียวปนทราย

ตารางที่ 4-9 ลักษณะเนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง (ต่อ)

ตัวอย่าง	อัตราการรด (cm/week)	ขนาดของอนุภาค (%)			ลักษณะเนื้อดิน
		ดินร่วนเหนียว	ดินทรายแป้ง	ดินทราย	
DFS	5	18.1	14.4	67.6	ดินร่วนปนทราย
WFS		16.0	12.5	71.5	ดินร่วนปนทราย
DFNS		26.2	23.0	50.8	ดินร่วนเหนียวปนทราย
WFNS		16.2	19.2	64.6	ดินร่วนปนทราย

### ค่าพีเอชในดิน

ค่าพีเอชในดินก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-10 ดินก่อนการทดลองมีค่าพีเอชเป็นกรด ค่าพีเอชในดินหลังการบำบัดของทุกคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการรดตัวอย่างน้ำที่มีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นด่าง เมื่อรดผ่านคอลัมน์ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่อยู่ในดินจะจับตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ที่อยู่ในน้ำทิ้งส่งผลให้ปริมาณ  $H^+$  ที่อยู่ในดินมีค่าลดลง และเมื่อมีรดน้ำผ่านคอลัมน์ดินซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณ  $OH^-$  เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง  $OH^-$  ที่อยู่ในน้ำทิ้งจะเข้าแทนที่  $H^+$  ที่อยู่ในอนุภาคดินส่งผลให้ค่าพีเอชในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ เพ็ญญา ทองประไพ (2555) และกาญจณี ชูทอง (2556) ซึ่งพบว่าค่าพีเอชในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบำบัด

ตารางที่ 4-10 ค่าพีเอชในดินก่อนและหลังการทดลอง

Hydraulic loading (cm/week)	ก่อนการทดลอง	ค่าพีเอชในดิน			
		หลังการทดลอง			
		คอลัมน์ชุดควบคุม		คอลัมน์ชุดทดลอง	
		DFS	WFS	DFNS	WFNS
3	5.2	8.8	8.5	8.3	8.6
5		8.8	8.6	8.4	8.5

### ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-11 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินก่อนและหลังการทดลองมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ เพ็ญญา ทองประไพ (2555) และกาญจณี ชูทอง (2556) ซึ่งไม่พบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนของอัตราการรดน้ำทิ้งในดินก่อนและหลังการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกับการทดลองของ Lim Kim Huan (1986) ที่พบว่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดและมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทิ้ง

ตารางที่ 4-11 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินก่อนและหลังการทดลอง

Hydraulic loading (cm/week)	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cmol/kg)				
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง			
		DFS	WFS	DFNS	WFNS
3	4.42	10.2	11.6	9.34	11.9
5		4.05	3.27	7.76	3.47

### อินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดินและถือเป็นแหล่งสำรองของธาตุอาหารของพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เหล็ก กำมะถัน เป็นต้น อินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าดินก่อนการทดลองมีปริมาณของอินทรีย์วัตถุต่ำ และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ เพ็ญนภา ทองประไพ (2555) และ กาญจนี ชูทอง (2556) ซึ่งพบว่าอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์วัตถุในดิน เกิดจากการทับถมของเซลล์จุลินทรีย์ที่ตายแล้วในดินและเกิดจากการรุดตัวอย่างน้ำทิ้งที่มีปริมาณสารอินทรีย์ละลายอยู่ ซึ่งถือเป็นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน โดยสารอินทรีย์ดังกล่าวจะถูกดูดซับและเกิดการสะสมอยู่ตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคดินส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์วัตถุในดินเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่อนุภาคดิน ส่งผลให้อนุภาคดินสามารถดูดซับตัวอย่างน้ำที่รดผ่านคอลัมน์ได้ในปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้อนุภาคดินมีการเรียงชิดติดกันมากขึ้นส่งผลให้แรงดูดซับระหว่างอนุภาคดินที่กระทำต่อโมเลกุลของน้ำ (adsorptive force) มีค่าลดลง ทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์มีค่าลดลง และเมื่อรดน้ำผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานจะทำให้คอลัมน์เกิดการอุดตันได้ในที่สุด

เมื่อพิจารณาคอลัมน์ชุดควบคุม พบว่าปริมาณสารอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการนั่งฆ่าเชื้อดินทำให้อินทรีย์วัตถุในดินถูกชะออกมากับน้ำรดคอลัมน์ เป็นผลให้อินทรีย์วัตถุในดินมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการบำบัดผ่านไปปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากการรุดตัวอย่างน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ลงไปคอลัมน์ สำหรับ

เมื่อพิจารณาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองในชุดการทดลองเดียวกัน พบว่า ที่อัตราการรดเดียวกันการรดน้ำรายวันมีการก่ตัวของอินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ การรดน้ำรายวันปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทิ้ง สำหรับการรดน้ำในรายสัปดาห์พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าลดลงตามอัตราการรดน้ำทิ้งที่สูงขึ้น เนื่องจากการรดน้ำในรายสัปดาห์เป็นการรดน้ำในปริมาณมาก เป็นผลทำให้อินทรีย์วัตถุในดินเกิดการชะออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงกว่าการรดน้ำในรายวัน จากข้างต้นกล่าวได้ว่า DFNS ที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week มีปริมาณการก่ตัวของอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองมากที่สุด ผลการทดลองที่ได้ต่างกับการทดลองของ เพ็ญนภา ทองประไพ (2555) ที่พบว่าแนวโน้มของค่าอินทรีย์วัตถุมีค่าลดลง

เมื่อ Hydraulic loading สูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาดินก่อนการทดลองในงานวิจัยดังกล่าวพบว่าค่าอินทรีย์วัตถุในดินของแต่ละชุดการทดลองมีค่าสูงกว่าการทดลองในครั้งนี้อยู่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 11.3-27.4 g/kg ส่วนค่าอินทรีย์วัตถุในดินก่อนการทดลองในครั้งนี้มีค่าเป็น 8.8 g/kg ค่าอินทรีย์วัตถุที่ต่ำกว่าแสดงให้เห็นว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ซึ่งมีปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ในดินน้อย เมื่อทำการรดน้ำทิ้งที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงลงไปในดิน เป็นผลให้ดินสามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวอย่างน้ำทิ้งเอาไว้ได้มากกว่าดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงกว่า และการรดน้ำที่อัตราการรดที่สูงกว่าย่อมเป็นผลทำให้ดินมีค่าอินทรีย์วัตถุที่มากกว่า

ตารางที่ 4-12 อินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการทดลอง

Hydraulic loading (cm/week)	อินทรีย์วัตถุในดิน (g/kg)				
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง			
		คอลัมน์ชุดควบคุม	คอลัมน์ชุดทดลอง	DFNS	WFNS
3	8.8	9.4	9.1	21.2	11.8
5		11.2	7.6	24.0	11.3

#### ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

ไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-13 จะเห็นว่าดินก่อนการทดลองมีปริมาณไนโตรเจนต่ำ และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในการรดตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของปริมาณไนโตรเจนในดิน เป็นผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่พบในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-13 ไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการทดลอง

Hydraulic loading (cm/week)	ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (g/kg)				
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง			
		คอลัมน์ชุดควบคุม	คอลัมน์ชุดทดลอง	DFNS	WFNS
3	0.5	0.7	0.6	1.4	1.1
5		0.9	0.5	1.5	0.9

ลักษณะการเกิดไนโตรเจนทั้งหมดในดินหลังการทดลอง ให้ผลเช่นเดียวกับการก่อตัวของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน กล่าวคือ ที่อัตราการรดเดียวกันการรดน้ำรายวันมีการปริมาณการเกิดไนโตรเจนในดินหลังการทดลองสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ การรดน้ำรายวันมีปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทิ้ง สำหรับการรดน้ำในรายสัปดาห์มีปริมาณไนโตรเจนในดินลดลงตามอัตราการรดน้ำทิ้งที่สูงขึ้น จากข้างต้นกล่าวได้ว่า DFNS ที่อัตราการรด 5 cm/week มีปริมาณ

การก่ตัวของไนโตรเจนในดินหลังการทดลองมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ เพ็ญภา ทองประไพ (2555) ซึ่งพบว่า ปริมาณการเกิดไนโตรเจนทั้งหมดในดินของแปลงที่รดน้ำทิ้งทุกวันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการศึกษา และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ hydraulic loading เพิ่มขึ้น

#### ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-14 จะเห็นได้ว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) ที่พบว่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง

การรดน้ำทิ้งที่มีฟอสฟอรัสละลายอยู่ในน้ำทิ้ง เมื่อรดน้ำทิ้งดังกล่าวผ่านคอลัมน์ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจะเกิดการย่อยสลายและปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ให้แก่พืช ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

ลักษณะการเกิดฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลอง ให้ผลเช่นเดียวกับการก่ตัวของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และการเกิดไนโตรเจนทั้งหมดในดินกล่าวคือ ที่อัตราการรดน้ำรายวันมีการปริมาณการเกิดฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลองสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ เมื่อพิจารณาการรดน้ำรายวันปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทิ้ง สำหรับการรดน้ำในรายสัปดาห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าลดลงตามอัตราการรดน้ำทิ้งที่สูงขึ้น จากข้างต้นกล่าวได้ว่า DFNS ที่อัตราการรด 5 cm/week มีปริมาณการเกิดฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลองมากที่สุด

ตารางที่ 4-14 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการทดลอง

Hydraulic loading (cm/week)	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน(mg/kg)				
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง			
		DFS	WFS	DFNS	WFNS
3	5.57	7.95	7.51	8.89	7.78
5		8.23	5.76	10.89	7.32

การรดตัวอย่างน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบผ่านคอลัมน์ดินไม่ทำให้คุณภาพของดินเสื่อมโทรมลง แต่กลับเป็นการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ให้แก่ดิน เป็นผลให้คุณภาพดินหลังการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งพืชสามารถนำสารอินทรีย์เหล่านี้ไปใช้เป็นแหล่งอาหารในการเจริญเติบโต จากการทดลองพบว่าลักษณะการเกิดอินทรีย์วัตถุ, ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด การรดน้ำรายวันมีการก่ตัวของอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ การรดน้ำรายวันมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทิ้ง เนื่องด้วยคุณภาพดินก่อนการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ ดินจึงมีความสามารถในการดูดซับ

ปริมาณสารอินทรีย์ไว้ได้ดีในภาวะบรรทุกที่สูง จากการทดลองพบว่าการรดน้ำแบบรายวันที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week มีปริมาณการก่ตัวของอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองมากที่สุด ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดินถือเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การรดน้ำแบบรายวันที่อัตราการรด 5 cm/week มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุดในตารางที่ 4-15 ในการทดลองของโรสนา กาชอ และคณะ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดินโดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไปรดสวนปาล์มน้ำมัน พบว่าแปลงที่รดด้วยอัตรา 2.2 m<sup>3</sup>/2d (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TSS สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 70.2±12.3% และ 48.0±20.6% ตามลำดับ และแปลงที่รดด้วยอัตรา 4.6 m<sup>3</sup>/2d (hydraulic loading 1 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN, TP และ Sulfate สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 67.8±13.1%, 65.8±14.6% และ 51.8±17.0% ตามลำดับ การทดลองของพัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ศึกษาการบำบัดโดยดิน โดยนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำยางชั้นไปรดสวนปาล์มน้ำมัน พบว่าแปลงที่รดด้วยอัตรา 10.7 m<sup>3</sup>/week (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TKN สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 81.7±12.7% และ 74.1±18.3% ตามลำดับ แปลงที่รดด้วยอัตรา 56.1 m<sup>3</sup>/week (hydraulic loading 3 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด SS สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 82.6±15.5% การทดลองของกาญจณี ชูทอง (2556) ศึกษาการบำบัดโดยดินจากชุดการทดลองคอลัมน์ดิน โดยนำน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาบำบัดผ่านคอลัมน์ดิน พบว่าคอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา 0.14 L/2d (hydraulic loading 1 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TP สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 97.8±0.6% และ 99.1±0.8% ตามลำดับ และ คอลัมน์ที่รดด้วยอัตรา 0.25 L/week (hydraulic loading 0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 98.9±0.9%

จากการทดลองของ โรสนา กาชอ และคณะ (2555), พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) และกาญจณี ชูทอง (2556) พบว่า ภาวะบรรทุกที่ต่ำมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกในน้ำได้ดีกว่าภาวะบรรทุกที่สูง ซึ่งไม่เป็นไปตามผลการทดลองในครั้งนี้ เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ กาญจณี ชูทอง (2556) ซึ่งเป็นการทดลองโดยใช้ชุดคอลัมน์การทดลองที่ไม่มีพืชมาเกี่ยวข้องเช่นเดียวกับการทดลองในครั้งนี้ ผลที่ไม่สอดคล้องกันอาจเนื่องมาจากตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างดินคนละสถานที่ จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ต่างกัน ซึ่งดินในการทดลองครั้งนี้มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำกว่างานวิจัยดังกล่าวจึงทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้ในภาวะบรรทุกที่สูง เป็นผลให้การบำบัดค่าความสกปรกเพิ่มขึ้นตามภาวะบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในดินที่ต่างกัน โรสนา กาชอ และคณะ (2555), พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์ (2555) ซึ่งเป็นการทดลองในแปลงจากสวนปาล์มน้ำมันทำให้เพิ่มตัวแปรที่ต่างกันมากขึ้น เช่น ลักษณะสภาพอากาศ การมีต้นไม้อื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นต้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่าอัตราการรดน้ำที่ 5 cm/week ของคอลัมน์ชุดทดลอง DFNS ซึ่งมีการรดน้ำทุกวัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกสูงสุด

ตารางที่ 4-15 เกณฑ์การบำบัดที่เหมาะสมของระบบบำบัดโดยดินโดยใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

พารามิเตอร์	อัตราการรดที่เหมาะสม	ความถี่ในการรด	ประสิทธิภาพการบำบัด	ค่า	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง*
พีเอช	5 cm/week	รายวัน	-	6.7±0.2	5.5-9.0
ซีโอดี	5 cm/week	รายวัน	94.0±5.2	141±127	120
ทีโอซี	5 cm/week	รายวัน	82±18	65±66	-
สี	5 cm/week	รายวัน	99.4±0.8	37±47	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
สารประกอบฟีนอล					
- ตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine	5 cm/week	รายวัน	95.3±2.4	1.4±0.7	1
- ตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu	5 cm/week	รายวัน	98.3±1.4	3±2	-

ที่มา: \*\*ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539

#### 4.3.4 แนวทางการประยุกต์ใช้งานในสวนปาล์มน้ำมัน

เกณฑ์การบำบัดที่เหมาะสมของระบบบำบัดโดยดินโดยใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ คือการรดน้ำรายวันที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week จากการสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ศึกษาพบว่า โรงงานดังกล่าวมีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นเฉลี่ยวันละ 445 ลูกบาศก์เมตร กล่าวได้ว่าปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นคือปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดนั่นเอง แต่เนื่องด้วยระบบบำบัดเป็นแบบบ่อฝัง ปริมาณน้ำเสียส่วนหนึ่งจึงเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นจึงประมาณให้น้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเฉลี่ยวันละ 430 ลูกบาศก์เมตร หากโรงงานต้องการระบายน้ำทั้งปริมาณดังกล่าวให้หมดไปในแต่ละวันที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week โดยพิจารณาจากขนาดพื้นที่ของสวนปาล์มน้ำมันเป็นหลัก ทางโรงงานต้องใช้พื้นที่สวนปาล์มน้ำมันประมาณ 38 ไร่ในการรองรับปริมาณน้ำดังกล่าว โดย 1 ไร่สามารถรองรับปริมาณน้ำได้ประมาณ 11 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสวนปาล์มสามารถรองรับและบำบัดน้ำเสียได้ไร่ละ 8 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาในการบำบัดทางโรงงานควรที่หยุดระบบการบำบัดโดยดินของสวนนั้นๆ เพื่อให้ดินมีการปรับสภาพ และควรทำการเปลี่ยนการบำบัดน้ำทิ้งไปยังสวนปาล์มน้ำมันสวนอื่นๆ ซึ่งเกณฑ์การบำบัดที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโรงงานอื่นๆ ที่มีการปลูกสวนปาล์มน้ำมันได้ โดยต้องคำนึงถึงค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานนั้นๆ และปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน เช่น ถ้าค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ควรเลือกใช้อัตราการรดที่ต่ำกว่า คือ การรดน้ำรายวันที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week

น้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบซึ่งยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์และธาตุอาหารต่างๆหลงเหลืออยู่ในน้ำ เมื่อรดน้ำดังกล่าวลงดินจึงเปรียบเสมือนเป็นการเติมปริมาณสารอินทรีย์และสารอาหารต่างๆ ลงสู่ดิน ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งต้นปาล์มน้ำมันสามารถนำแร่ธาตุและสารอินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในดินไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ลงผลให้ผลผลิตของต้นปาล์มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย และลดปริมาณในการใช้ปุ๋ยเคมีได้อีกด้วย

เพ็ญญา ทองประไพ (2555) พบว่าดินหลังการทดลองที่มีการรดด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางชั้นมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น การนำน้ำทิ้งมารดสวนปาล์มน้ำมันทำให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าแปลงที่ไม่มีการรดด้วยน้ำทิ้ง การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมารดสวนปาล์มน้ำมันนอกจากจะเป็นการจัดการทรัพยากรน้ำให้คุ้มค่าแล้วยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และเป็นการเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกรอีกด้วย

Chavalparit *et al.*, (2006) พบว่าการนำน้ำบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบไปประยุกต์ใช้ในการรดสวนปาล์มนอกจากจะเป็นการประยุกต์ใช้ทรัพยากรน้ำอย่างคุ้มค่าแล้วยังสามารถลดต้นทุนจากการซื้อปุ๋ยได้ เนื่องจากในน้ำบ่อสุดท้ายยังมีสารอาหารพวกไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารที่ต้นปาล์มน้ำมันต้องการ



#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

การรดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินไม่ทำให้คุณภาพของดินเสื่อมโทรมลง แต่กลับเป็นการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์จากตัวอย่างน้ำที่รดผ่านชั้นดินให้แก่ดิน เป็นผลให้คุณภาพดินหลังการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ลักษณะการเกิดอินทรีย์วัตถุ, ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัด การรดน้ำรายวันมีการก่อตัวของอินทรีย์วัตถุในดินหลังการทดลองสูงกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ ในการรดน้ำรายวันมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการรดน้ำทั้ง

การบำบัดโดยดินของคอลัมน์ชุดควบคุม ไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าดินมีการดูดซับปริมาณสารอินทรีย์ไว้ได้มากนักน้อยเพียงใด เนื่องจากการฆ่าเชื้อดินด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน เป็นผลให้สารอินทรีย์วัตถุในดินถูกชะออกมากับน้ำที่ผ่านการบำบัด ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดในระยะแรกมีความสกปรกสูงกว่าน้ำเข้าระบบ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง

การบำบัดโดยดินของคอลัมน์ชุดทดลอง เมื่อพิจารณาที่อัตราการรดน้ำเดียวกัน พบว่าการรดน้ำรายวันมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกดีกว่าการรดน้ำในรายสัปดาห์ การรดน้ำรายวันที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week สามารถบำบัดค่าความสกปรกในน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้ดีที่สุด โดยพบว่า i) การปรับค่าพีเอช น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบดังกล่าวมีค่าพีเอชผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมตลอดระยะเวลาการทดลอง ii) การลดค่าหน่วยสี น้ำที่เข้าระบบบำบัดมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำ โดยมีค่าหน่วยสีเฉลี่ยเป็น 6,389 PtCo ตลอดระยะเวลาการทดลองน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบดังกล่าวมีลักษณะใสไม่มีสี ซึ่งผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดเป็น  $99.4 \pm 0.8\%$  iii) การลดค่าซีโอดีและทีโอซี น้ำที่เข้าระบบบำบัดมีค่าซีโอดีและทีโอซีเฉลี่ยเป็น 2,305 mg/L และ 361 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบในการลดค่าความสกปรกดังกล่าวเป็น  $94.0 \pm 5.2\%$  และ  $82 \pm 18$  ตามลำดับ โดยระบบดังกล่าวสามารถบำบัดค่าซีโอดีในน้ำให้ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัดซึ่งสามารถทำการบำบัดได้เพียงแค่ 12 สัปดาห์ของการทดลองในครั้งนี้อย่างน้อย iv) การลดค่าสารประกอบฟีนอล น้ำเข้าระบบบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine และ วิธี Folin-Ciocalteu เฉลี่ยเป็น 30 mg/L และ 174 mg GAE/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดทั้ง 2 วิธีเฉลี่ยเป็น  $95.3 \pm 2.4\%$  และ  $98.3 \pm 1.4\%$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการตรวจวัดสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine ซึ่งถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าระบบดังกล่าวสามารถบำบัดค่าสารประกอบฟีนอลในน้ำให้ผ่านตามมาตรฐานได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะเวลาในการบำบัดซึ่งสามารถทำการบำบัดได้เพียงแค่ 8 สัปดาห์ของการทดลองในครั้งนี้อย่างน้อย และระบบดังกล่าวมีการตรวจพบเจอปริมาณกรดแกลลิกในสัปดาห์สุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 8 mg/L

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (i) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร และ (ii) ระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพ จากผลการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของทั้ง 2 ระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในส่วนของ การศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน ส่งผลให้คุณภาพดินหลังการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น อินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน เป็นต้น ซึ่งพืชสามารถนำธาตุอาหารดังกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ สำหรับสถานะที่เหมาะสมจากการทดลองครั้งนี้ คือ การรด ตัวอย่างน้ำรายวันที่อัตราการรดน้ำ 5 cm/week เพื่อเป็นการบริหารจัดการน้ำอย่างคุ้มค่าและเพื่อให้คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีคุณภาพผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบสามารถนำสถานะดังกล่าวที่ได้ไปทดลองใช้จริงในพื้นที่สวนปาล์มน้ำมันของโรงงานได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาถึงชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ งานวิจัยนี้จึงถือเป็นงานวิจัยใหม่ในการศึกษาชนิดของสารประกอบฟีนอล โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC โดยสารมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงตามชนิดของสารประกอบฟีนอลที่มีการตรวจพบในผลปาล์ม ผลการศึกษาพบว่าไม่มีพีคของ Unknown เกิดขึ้นหลายพีค การหาสาร Unknown จากงานวิจัยนี้จึงถือเป็นงานวิจัยที่ต่อยอดได้สำหรับผู้สนใจในการศึกษาหาชนิดของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

2. ในการวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าสี สารอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลโดยดินในกรณีที่ไม่มีพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง อาจนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาโดยการปลูกพืชในแปลงการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการลดค่าดังกล่าว

### บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2554. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1) (9 พฤศจิกายน 2554).
- กรมควบคุมมลพิษ. 2554. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water05.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html) (9 พฤศจิกายน 2554).
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2534. คู่มือการใช้แผนที่กลุ่มดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจ. กองสำรวจและจำแนกดิน. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2549. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจในเว็บบนอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. กรุงเทพฯ.
- กาญจณี ชูทอง. 2556. กลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- จิราพร เพลินจิตต์ และปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ. 2554. ความคงตัวของกรดฟีนอลิกในน้ำกึ่งวิกฤต. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาศิลปากรระดับชาติ ครั้งที่ 1, 10-11 พฤษภาคม 2554, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.
- จุฑารัตน์ หนูสุข. 2546. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สาม สำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญวิทย์ สายหยุดทอง. 2537. การลดค่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำชะขยะโดยดินจากแหล่งต่างๆ ในจังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เตือนใจ ปิยง. 2555. การประเมินการประยุกต์ใช้วิธีการจัดการสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบกรณีศึกษาในภาคใต้ของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ชนกฤต พรหมทอง. 2552. การบำบัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเพนตันรีเอเจนต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชนารักษ์ พงษ์เกตรา, 2543. ข้อมูลเทคโนโลยีสำหรับการจัดการของเสียโรงงานปาล์มน้ำมัน. เอกสารประกอบการบรรยายสำหรับการฝึกอบรม เรื่อง เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดและการป้องกันมลพิษของโรงงานอุตสาหกรรม. 10-12 พฤษภาคม 2543 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี.
- ชนาววัฒน์ รักกมล. 2549. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเอเอสปีอาร์ แบบเทอร์โมฟิลิก และมีโซฟิลิก ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีระ เกรอต. 2539. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดทางชีวภาพ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พนิดา ไต้ะสุ. 2555. การย่อยสลายฟีนอลโดยเชื้อผสม *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1 ที่ตรึงบนวัสดุเศษเหลือปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์. 2555. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานนํ้ายางชั้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรพร และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล. 2554. การประยุกต์ใช้เอนไซม์ทางการค้าและจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้ในการเก็บเกี่ยวน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรพร, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล. 2533. กระบวนการผลิตการใช้ประโยชน์วัสดุเศษเหลือทิ้งและคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม. วารสารสงขลานครินทร์. 12(2): 169-176.
- พูนสุข ประเสริฐสรพร, อรัญ หันพงศ์กิตติกุล และโสภา จันทภาโส. 2544. เปรียบเทียบการกำจัดสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีการทางชีวภาพ ทางเคมี และทางกายภาพ. วารสารสงขลานครินทร์. 23: 807-819.

- เพชรดา สัตยากุล. 2557. การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เพ็ญภา ทองประไพ. 2555. ลักษณะดินและน้ำท่าจากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำตาลข้างชันด้วยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ภาคภูมิ ชัยสวัสดิ์. 2552. สมรรถนะของการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยระบบจัดเรียงดินหลายชั้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เกษัชรรัตน์ กชกรจารุพงศ์. 2550. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งด้วยการบำบัดโดยดิน. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรสนา กาชอ, อุดมผล พิชนไพบูลย์, สมทิพย์ ต่านธีรวินิชย์, พรทิพย์ ศรีแดง, พนาลี ชีวกิตาการ และเจิดจรรย์ ศิริวงศ์. 2555. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์ม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 11. 21-23 มีนาคม 2555. เชียงราย.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2556. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี ๒๕๕๖. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.
- สุเมธ ไชยประพัทธ์, พนาลี ชีวกิตาการ, ภัทรธร เอื้อภักดาธิการ และพรทิพย์ ศรีแดง. 2550. การบูรณาการเทคโนโลยีเคมีกายภาพขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบำบัดชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- โสภภาพรณ รัตนพันธุ์. 2547. การบำบัดและกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเส้นใยเห็ด *Lentinus spp.* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- อนุกุล เกียรติขวัญบุตร. 2556. การกำจัดสีและการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยราไวท์รอตที่ตรึงบนวัสดุเศษเหลือปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรรณณ ฉัตรสีรุ่ง. 2551. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษ์ศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Achak, M., Mandi, L. and Ouazzani, N. 2009. Removal of organic pollutants and nutrients from olive mill wastewater by a sand filter. *Journal of Environmental Management* 90: 2771–2779.
- Ahmad, A.L., Chong, M.F., Bhatia, S. and Ismail, S. 2006. Drinking water from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination*. 191: 35-44.
- Alam, Md.Z., Ameer, E.S., Muyibi, S.A. and Kabbashi, N.A. 2009. The factors affecting the performance of activated carbon prepared from oil palm empty fruit bunches for adsorption of phenol. *Chemical Engineering Journal*. 155: 191–198.
- Amornprasertsook, K. and Polprasert, C. 1996. Toxicity and removal of phenol by a land treatment system. *Environmental Technology*. 17: 783-788.
- APHA, AWWA and WEF, 2005. Standard Method for the Examination of the Water and Wastewater, 21<sup>st</sup> edition. American Public Health Association. Washington, D.C.
- Aresta, M., Acquaviva, M.I., Baruzzi, F., Noce, R.M.L., Matarante, A., Narracci, M., Stabili, L. and Cavallo, R.A. 2010. Isolation and characterization of polyphenols-degrading bacteria from olive-mill wastewaters polluted soil. *World Journal of Microbiology Biotechnology*. 26: 639-647.
- Asses, N., Ayed, L., Bouallagui, H., Sayadi, S. and Hamdi, M. 2009. Biodegradation of different molecular-mass polyphenols derived from olive mill wastewater by *Geotrichum candidum*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 63: 407-413.

- Badawy, M.I. and Ali, M.E.M. 2006. Fenton's peroxidation and coagulation processes for the treatment of combined industrial and domestic wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 136: 961–966.
- Balasundram, N., Sundram, K. and Samman, S. 2006. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*. 99: 191-203.
- Baker, T.W. and Worgan, J.T. 1981. The utilization of palm oil processing effluent as substrate of microbial protein by fungus *Aspergillus oryzae*. *European Journal of Applied Microbiology*. 11: 234-240.
- Bunrung, S., Prasertsan, S. and Prasertsan, P. 2011. Decolourisation of Biogas Effluent of Palm Oil Mill using Palm Ash. TICHe International Conference 2011, November 10-11, Songkhla, Thailand.
- Buondonno, A., Capra, G.F., Coppola, E., Dazzi, C., Grilli, E., Odierna, P., Rubino, M. and Vacca, S. 2014. Aspects of soil phenolic matter (SPM): An explorative investigation in agricultural, agroforestry, and wood ecosystems. *Geoderma*. 213: 235–244.
- Cardinali, A., Cicco, N., Linsalata, V., Minervini, F., Pati, S., Peralice, M., Tursi, N. and Lattanzio, F. 2010. Biological Activity of High Molecular Weight Phenolics from Olive Mill Wastewater. *Agricultural and Food Chemistry* 58: 8585-8590.
- Chan, Y.J., Chong, M.F. and Law, C.L. 2010. Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a Lab-Scale Sequencing Batch Reactor (SBR). *Journal of Environmental Management*. 91: 1738-1746.
- Cheng, J., Zhu, X., Ni, J. and Borthwick, A. 2010. Palm oil mill effluent treatment using a two-stage Microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresource Technology*. 101: 2729–2734.

- Chantho, P., Musikavong, C. and Suttinun, O. 2013. Pretreatment of phenolic compounds in palm oil mill wastewater by the thermophilic *Bacillus thermoleovorans* strain A2 for enhancement of biogas production. The 2<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, March 27-29, 2013, Khon Kaen, Thailand.
- Chavalparit, O. (2006). Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand. PhD Thesis Wageningen University- with references- with summaries in English and Dutch.
- Dilallo, R. and Albertson, O.E., 2012. Volatile acid by direct titration. Water Pollution Control Federation. 33: 356-365.
- Ergul, F.E., Sagin, S., Ongen, G. and Sukan F.V. 2011. Dephenolization and decolorization of olive mill wastewater through sequential batch and co-culture application. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 27: 107-114.
- Ewansiha, C.J., Ekebafé, L.O. and Jatto, O.E. 2012. Treatment of Palm Oil Mill Effluent Using Modified Powdered Cherry (*Chrysophyllum albidum*) Seed Shell Carbon. International Journal of Environmental Sciences. 1: 235-238.
- Franco, A.R., Calheiros, C.S.C., Pacheco, C.C., Marco, P.D., Manaia, C.M. and Castro, P.M.L. 2005. Isolation and Characterization of Polymeric Galloyl-Ester-Degrading Bacteria from a Tannery Discharge Place. Microbial Ecology. 50: 550-556.
- Gaddeyya, G., Niharika, P.S., Bharathi, P. and Kumar, P.K.R. 2012. Isolation and identification of soil mycoflora in different crop fields at Salur Mandal. International Journal of Advances in Applied Science Research. 3: 2020-2026.
- Gobi, K., Mashitah, M. D. and Vadivelu, V.M. 2011. Development and utilization of aerobic granules for the palm oil mill (POM) wastewater treatment. Chemical Engineering Journal 174: 213– 220.



- Hartley, C.W.S. 1977. Oil palm selection and breeding In *The Oil Palm*. Longman. Inc., New York.
- Hattenschwiler, S. and Vitousek, P.M. 2000. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. *Tree*. 15: 238-243.
- He, R., Liu, X.W., Zhang, Z.J. and Shen, D.S. 2007. Characteristics of the bioreactor landfill system using an anaerobic-aerobic process for nitrogen removal. *Bioresource Technology*. 98: 2526-2532.
- Hernandez, J.E. and Edyvean, R.G.J. 2008. Inhibition of biogas production and biodegradability by substituted phenolic compounds in anaerobic sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 160: 20-28.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual*. Washington, DC. London.
- Holmes, D.E., Risso, C., Smith, J.A. and Lovley, D.R. 2012. Genome-scale analysis of anaerobic benzoate and phenol metabolism in the hyperthermophilic archaeon *Ferroglobus placidus*. *The ISME Journal*. 6: 146-157.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Solomon, S., Qin, D.M., Manning, Z., Chen, M.M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Johnson, R.M. and Pregitzer, K.S. 2007. Concentration of sugars, phenolic acids, and amino acids in forest soils exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. *Soil Biology & Biochemistry*. 39:3159-3166.
- Kaewmai, R., Kittikun, A.H. and Musikavong, C. 2012. Greenhouse gas emissions of palm oil mills in Thailand. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 11: 141-151.

- Kaewmai, R., Kittikun, A.H., Suksaroj, C. and Musikavong, C. 2013. Alternative Technologies for the Reduction of Greenhouse gas Emissions from Palm Oil Mills in Thailand. *Environmental Science and Technology*. 47. 12417-12425.
- Khalid, T.A. and Naas, M.H.E. 2012. Aerobic Biodegradation of Phenols: A Comprehensive Review. *Environmental Science and Technology*, 42:1631–1690.
- Kietkwanboot, A., Hanh, T.T.M. and Suttinun, O. 2013. Decolorization and Biodegradation of Phenolic Compounds in Palm Oil Mill Effluent by White Rot Fungi Immobilized on Oil Palm Residues. The 2<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, March 27-29, 2013, Khon Kaen, Thailand.
- Lim Kim Huan. 1986. Optimising Land Application of Digested Palm Oil Mill Effluent. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor in Agricultural Sciences to the Faculty of Agricultural Sciences, State University of Ghent, Belgium.
- Madaki, Y.S. and Seng, L. 2013. Palm Oil Mill Effluent (POME) from Malaysia Palm Oil Mill: Waste or Resource. *International Journal of Science, Environment and Technology*. 2: 1138-1155.
- Madaki, Y.S. and Seng, L. 2013. Pollution Control: How Feasible is Zero Discharge Concepts in Malaysia Palm Oil Mills. *American Journal of Engineering Research*. 2: 239-252.
- Magnaye, F.A., Gaspillo, P.A.D. and Auresenia, J.L. 2009. Biological Nitrogen and COD Removal of Nutrient-Rich Wastewater Using Aerobic and Anaerobic Reactors. *Journal of Water Resource and Protection*. 1: 376-380.
- Mahiudddin, Md., Fakhruddin, A.N.M. and Mahin, A.Al. 2012. Degradation of Phenol via Meta Cleavage Pathway by *Pseudomonas fluorescens* PU1. *International Scholarly Research Network Microbiology*. 2012: 1-6.

- Maisarah, M.H., Noriham, A. and Zainon, M.N. 2013. Quantification of Polyphenolic Acids and Antioxidant Capacity of Palm Puree from Different Tenera Breeds of *Elaeis Guineensis*. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics. 3: 349-353.
- Marco, E.D., Savarese, M., Paduano, A. and Sacchi, R. 2007. Characterization and fractionation of phenolic compounds extracted from olive oil mill wastewater. Food Chemistry 104: 858-867.
- Mohammed, R.R., Ketabchi, M.R. and McKay, G. 2014. Combined magnetic field and adsorption process for treatment of biologically treated palm oil mill effluent (POME). 243: 31-42.
- Musikavong, C., Wattanachira, S., Marhaba, T.F. and Pavasant, P. 2005. Reduction of organic matter and trihalomethane formation potential in reclaimed water from treated industrial estate wastewater by coagulation. 127: 58-67.
- Mutabaruka, R., Hairiah, K. and Cadisch, G. 2007. Microbial degradation of hydrolysable and condensed tannin polyphenol-protein complexes in soils from different land-use histories. Soil Biology & Biochemistry. 39: 1479-1492.
- Neo, Y.P., Ariffin, A., Tan, C.P. and Tan, Y. A., 2010. Phenolic acid analysis and antioxidant activity assessment of oil palm (*E. guineensis*) fruit extracts. Food Chemistry 122: 353-359.
- Poh, P.E., Yong, W.J. and Chong, M.F. 2010. Palm Oil Mill Effluent (POME) Characteristic in High Crop Season and the Applicability of High-Rate Anaerobic Bioreactors for the Treatment of POME. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 49: 11732-11740.
- Rakamthong, C. and Prasertsan, P. 2011. Decolorization and Phenol Removal of Anaerobic Palm Oil Mill Effluent by *Phanerochaete chrysosporium* ATCC 24725. TIChE International Conference 2011, November 10-11, Songkhla, Thailand.

- Rupani, P.F., Singh, R.P., Ibrahim, M.H. and Esa, N. 2010. Review of Current Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Methods: Vermicomposting as a Sustainable Practice. *World Applied Sciences Journal*. 11: 70-81.
- Said, M., Ahmad, A. and Mohammad, A.W. 2013. Removal of phenol during ultrafiltration of Palm oil mill effluent (POME): Effect of pH, ionic strength, pressure and temperature. *Scholars Research Library*. 5: 190-196.
- Santhy, K. and Selvapathy, P. 2006. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. *Bioresource Technology*. 97: 1329–1336.
- Schie, P.M.V. and Young, L.Y. 2000. Biodegradation of Phenol: Mechanisms and Applications. *Bioremediation Journal*. 4: 1-18.
- Shi, B., He, Q., Yao, K., Huang, W. and Li, Q. 2005. Production of ellagic acid from degradation of valonea tannins by *Aspergillus niger* and *Candida utilis*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 80: 1154-1159.
- Sapers, G. M. and Miller, R.L. 1993. Control of enzymatic browning in pre-peeled potatoes by surface digestion. *Journal Food sci*. 58:1076-1078.
- Thani, M.I., Hussin, R., Ibrahim, W.R.B.W. and Sulaiman, M.S. 1999. Industrial Processes & The Environment: Crude Palm Oil Industry. Department of Environment, Ministry of Science, Technology and Environment. Malaysia.
- Thong, S.O., Prasertsan, P., Intrasungkha, N., Dhamwichukorn, S. and Birkeland, N.K. 2008. Optimization of simultaneous thermophilic fermentative hydrogen production and COD reduction from palm oil mill effluent by Thermoanaerobacterium-rich sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*. 33: 1221-1231.
- Torrecilla, J.S. 2010. Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention: Phenolic Compounds in Olive Oil Mill Wastewater. Department of Chemical Engineering, Universidad Complutense de Madrid, Spain.

U.S. EPA. 1976. Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents. Design Factor-1. EPA-625/4-76-010. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Vijayaraghavan, K., Ahmad, D. and Aziz, M.E.B.A. 2007. Aerobic treatment of palm oil mill effluent. Journal of Environmental Management. 82: 24-31.

Wah, W.P., Sulaiman, N.M., Nachiappan, M. and Varadaraj, B. 2003. Pre-treatment and membrane ultrafiltration using treated palm oil mill effluent (POME). Journal of Science Education and Technology. 24: 891-898.

Wanida Chooakson. 2012. Color Removal Technology in Industrial Wastewater. Burapha science journal. 1: 181-191.

Waterman, P.G. and Mole, S. 1994. Analysis of phenolics plant metabolites. Oxford: Blackwell Scientific Publication. Edinburgh Boston, London.

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Caffeic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Caffeic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ferulic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferulic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/4-Hydroxybenzoic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/P-Coumaric\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/P-Coumaric_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/Phenol> (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Protocatechuic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Syringic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Syringic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tannin> (8 เมษายน 2557)

Wikipedia (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Vanillic_acid) (8 เมษายน 2557)

Wu, T.Y., Mohammad, A.W., Jahim, J.Md. and Anuar, N. 2007. Palm oil mill effluent (POME) treatment and bioresources recovery using ultrafiltration membrane: Effect of pressure on membrane fouling. *Biochemical Engineering Journal*. 35: 309-317.

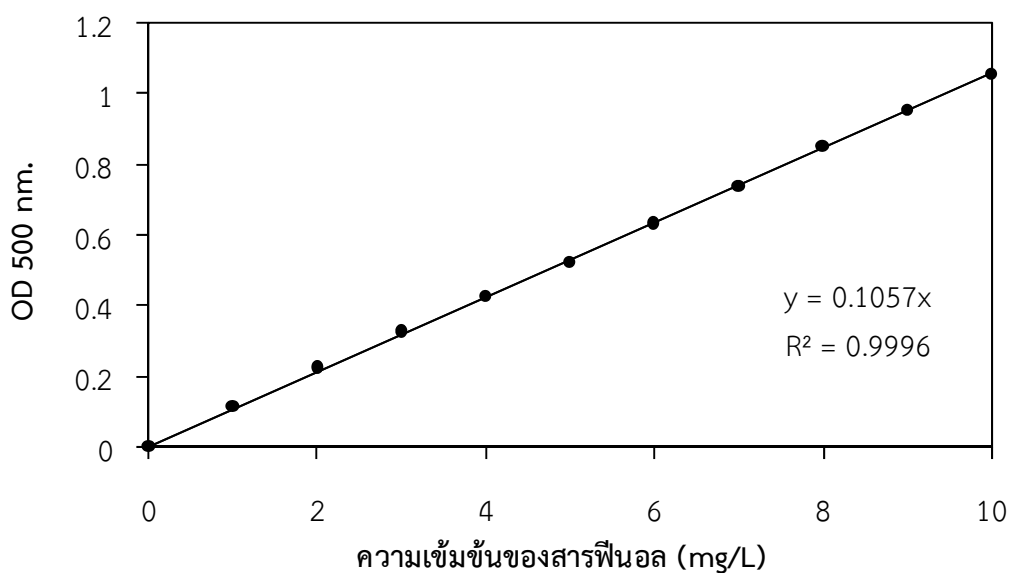
Zahrim, A.Y., Rachel, F.M., Menaka, S., Su, S.Y., Melvin, F. and Chan, E.S. 2009. Decolourisation of Anaerobic Palm Oil Mill Effluent via Activated Sludge-Granular Activated Carbon. *World Applied Science Journal*. 5: 126-129.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

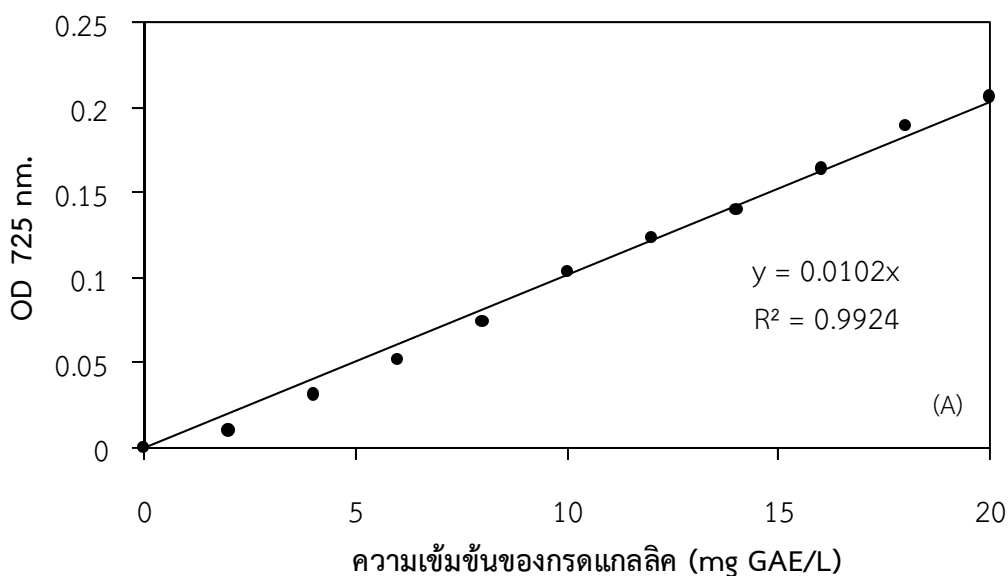
## กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

ก-1 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine



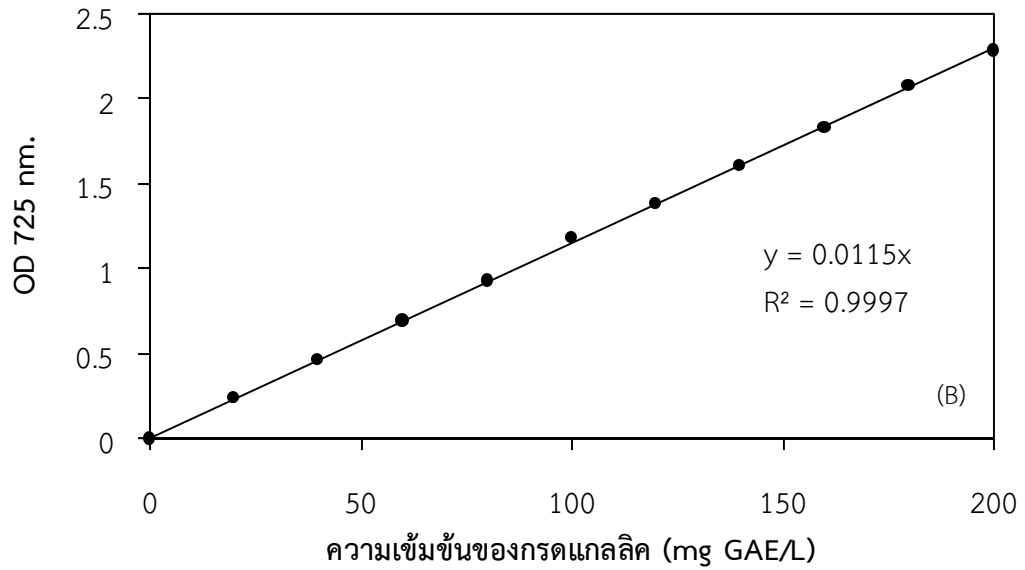
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของสารฟีนอลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี 4-aminoantipyrine

ก-2 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu



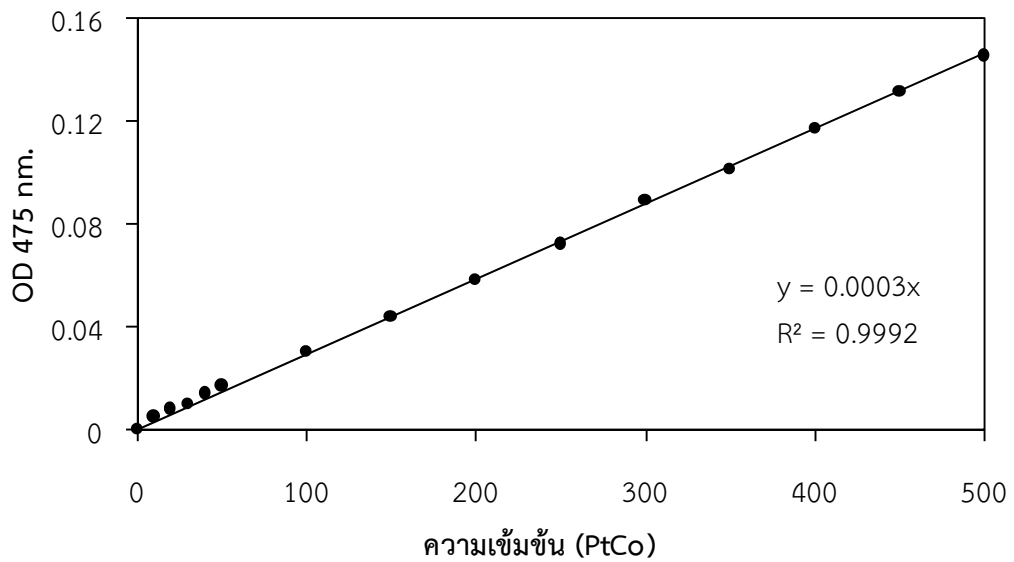
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของของกรดแกลลิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ที่ความเข้มข้น 0-20 (A) และ 0-200 (B) mg/L ตามลำดับ





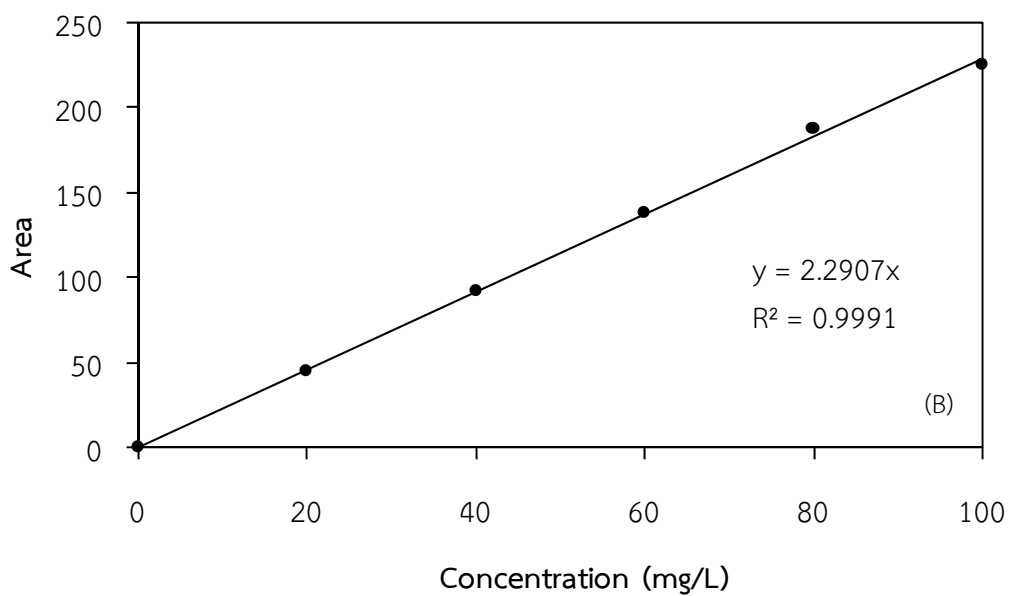
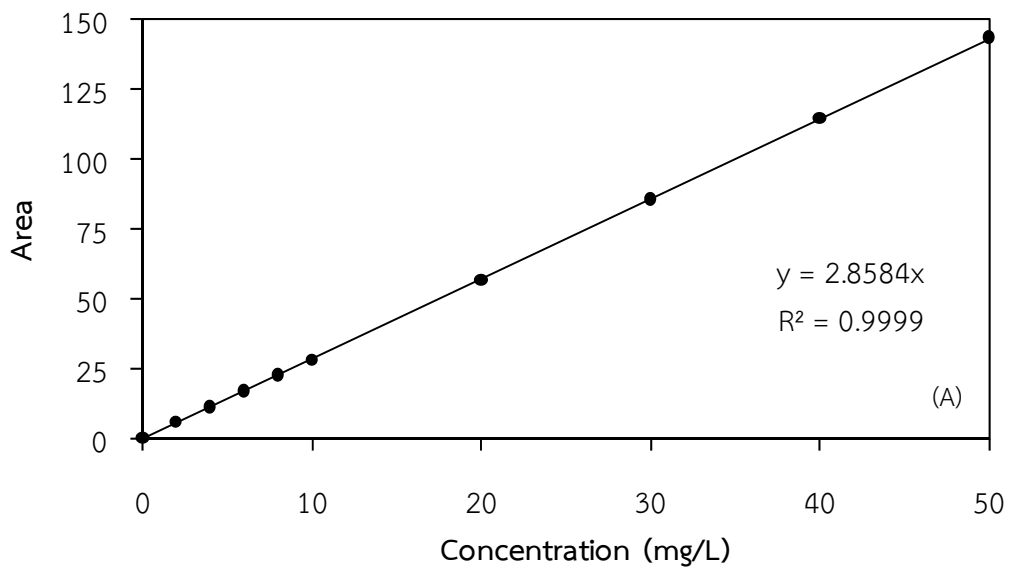
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของของกรดแกลลิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ที่ความเข้มข้น 0-20 (A) และ 0-200 (B) mg/L ตามลำดับ (ต่อ)

ก-3 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สี

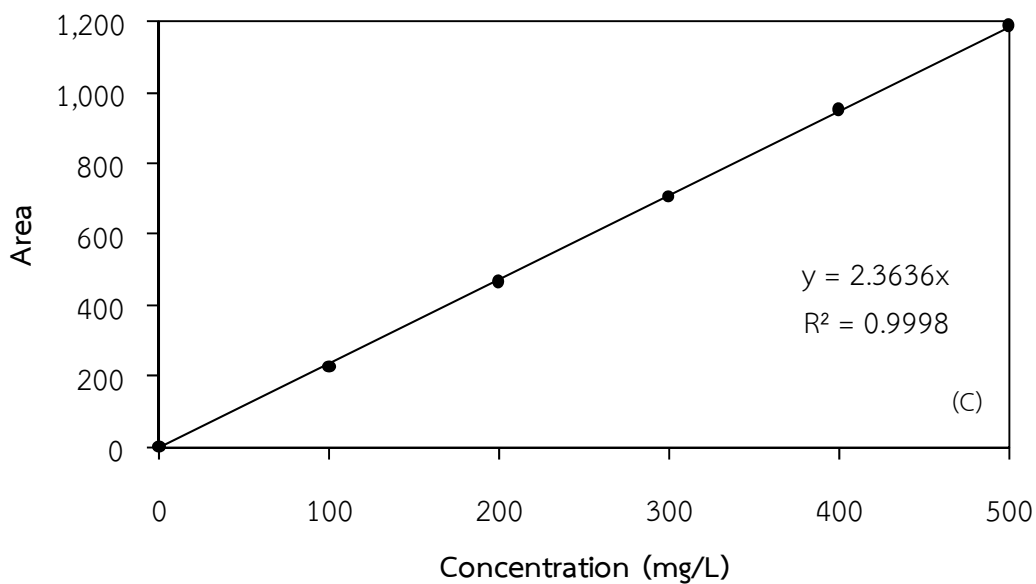


รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานของสารแพลทตินัมโคบอลต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สี

ก-4 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ทีโอซี

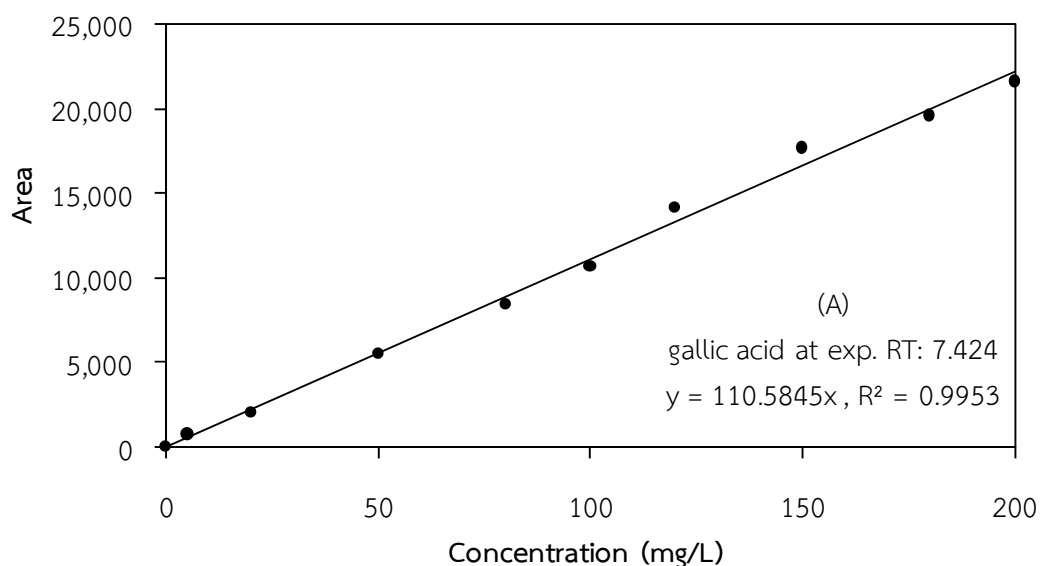


รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์ทีโอซี ที่ระดับความเข้มข้น 0-50 mg/L (A), 0-100 mg/L (B) และ 0-500 mg/L (C) ตามลำดับ

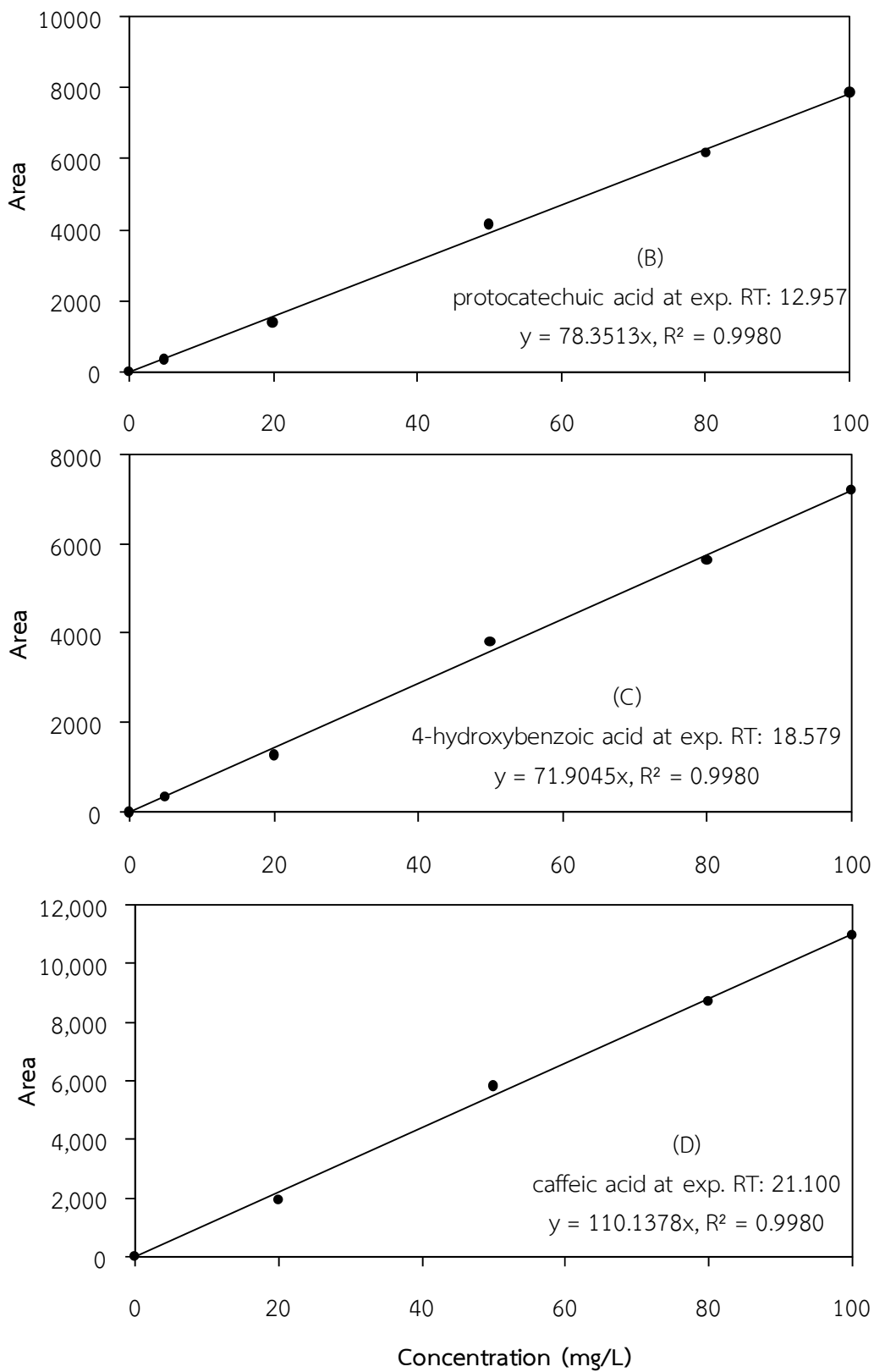


รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์ทีโอซี ที่ระดับความเข้มข้น 0-50 mg/L (A), 0-100 mg/L (B), 0-500 mg/L (C) ตามลำดับ (ต่อ)

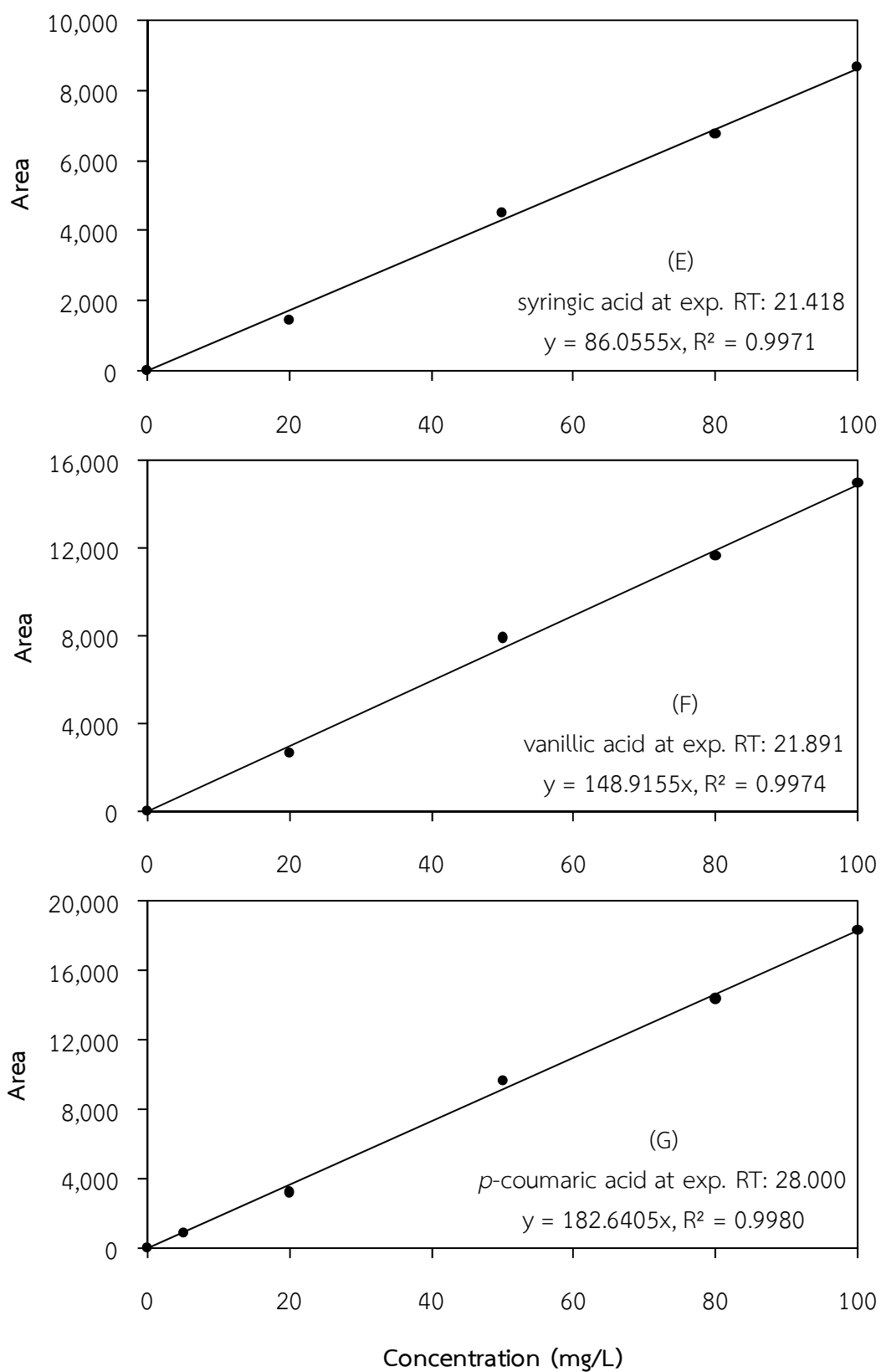
ก-5 กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)



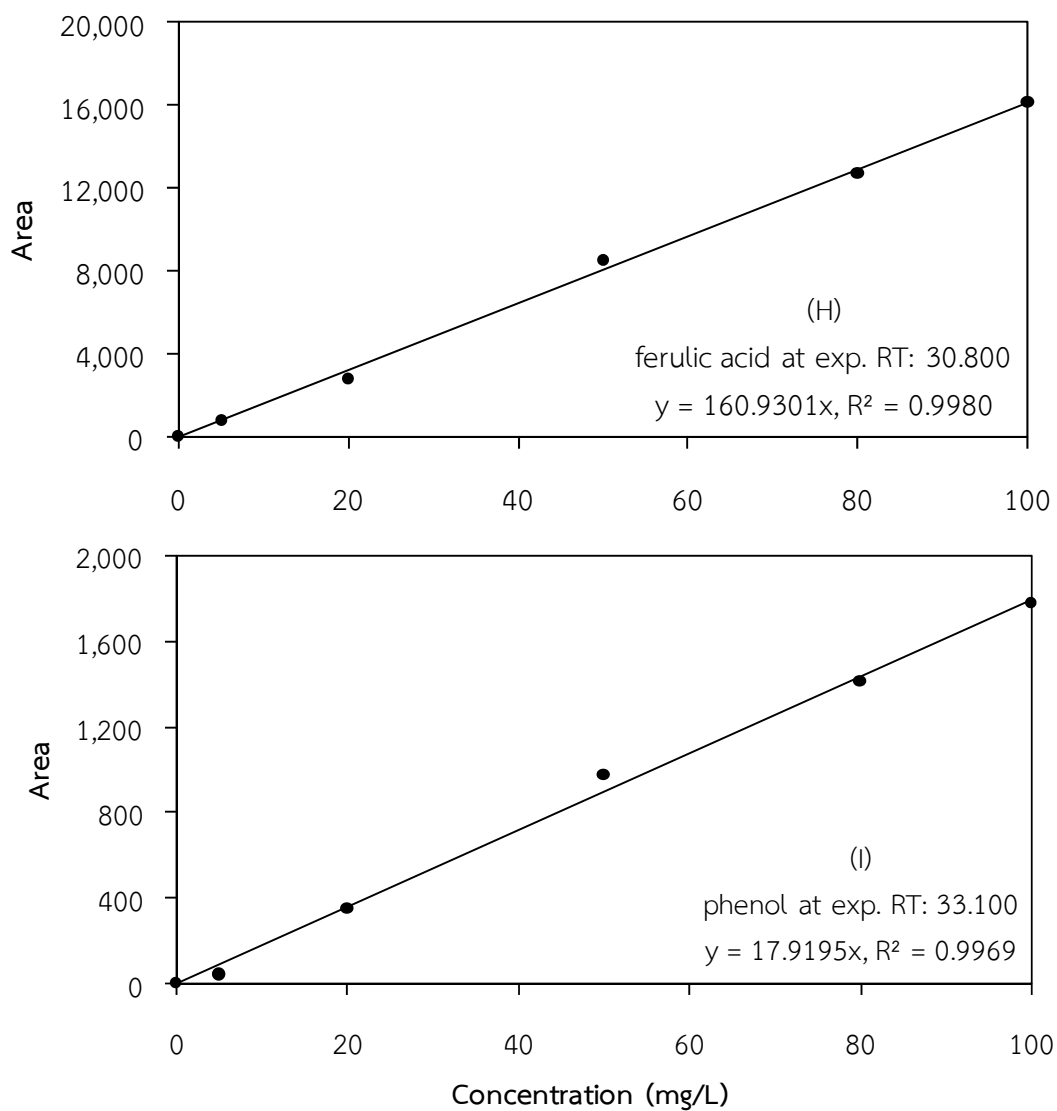
รูปที่ ก-5 กราฟมาตรฐานของ gallic acid (A), protocatechuic acid (B), 4-hydroxybenzoic acid (C), caffeic acid (D), syringic acid (E), vanillic acid (F), *p*-coumaric acid (G), ferulic acid (H) และ phenol (I)



รูปที่ ๓-5 กราฟมาตรฐานของ gallic acid (A), protocatechuic acid (B), 4-hydroxybenzoic acid (C), caffeic acid (D), syringic acid (E), vanillic acid (F), *p*-coumaric acid (G), ferulic acid (H) และ phenol (I) (ต่อ)



รูปที่ ก-5 กราฟมาตรฐานของ gallic acid (A), protocatechuic acid (B), 4-hydroxybenzoic acid (C), caffeic acid (D), syringic acid (E), vanillic acid (F), *p*-coumaric acid (G), ferulic acid (H) และ phenol (I) (ต่อ)

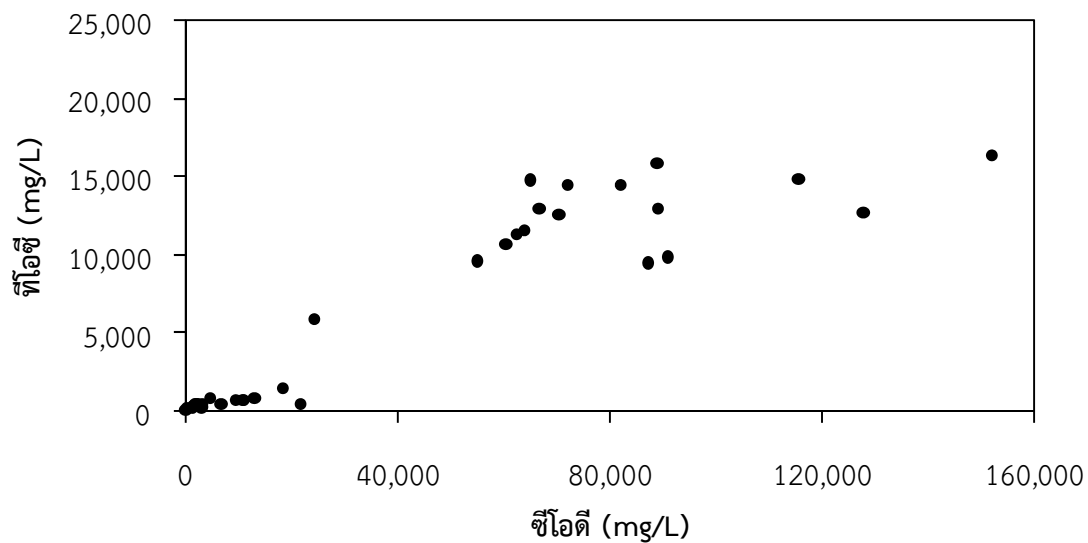


รูปที่ ๓-5 กราฟมาตรฐานของ gallic acid (A), protocatechuic acid (B), 4-hydroxybenzoic acid (C), caffeic acid (D), syringic acid (E), vanillic acid (F), *p*-coumaric acid (G), ferulic acid (H) และ phenol (I) (ต่อ)

## ภาคผนวก ข

## กราฟความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์

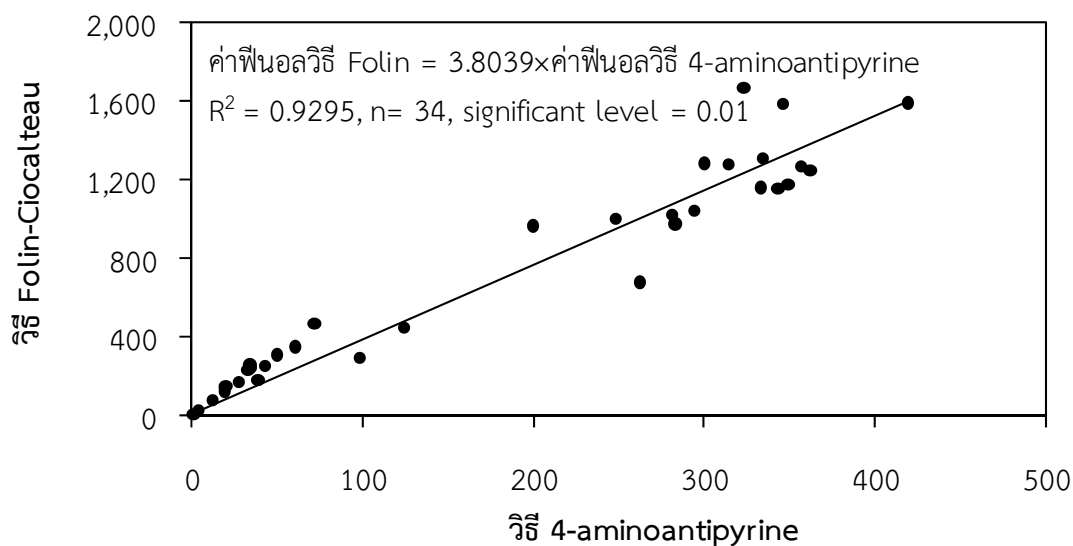
ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีและทีไอซี ของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ



รูปที่ ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีและทีไอซีของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

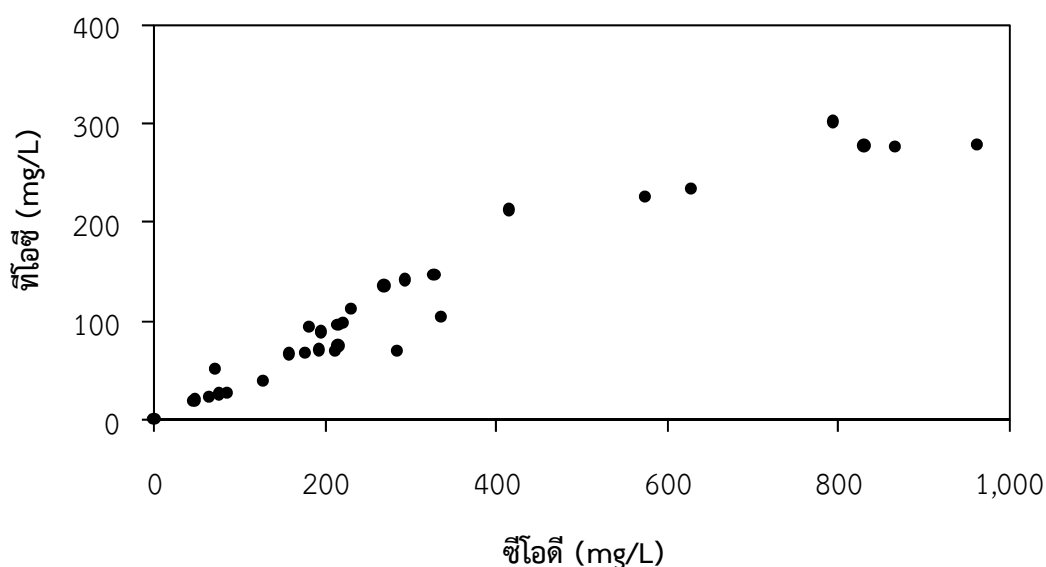
หมายเหตุ: ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นโดยตรงได้ เนื่องจากมีความแตกต่างในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ดังได้อธิบายในหน้าที่ 60

ข-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ



รูปที่ ข-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ข-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีและทีไอซี ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

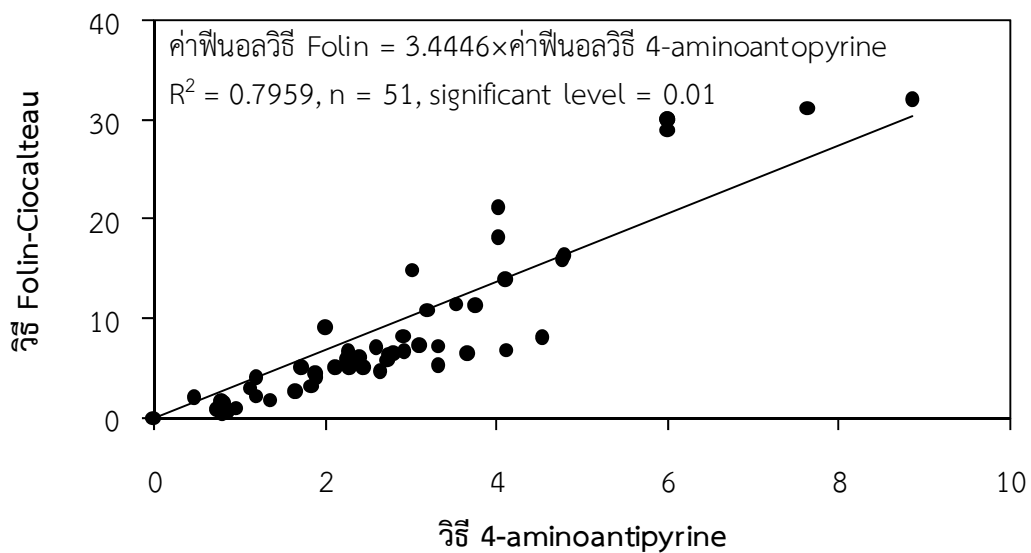


รูปที่ ข-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีและทีไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

หมายเหตุ: ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นโดยตรงได้ เนื่องจากมีความแตกต่างในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ดังได้อธิบายในหน้าที่ 105



ข-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

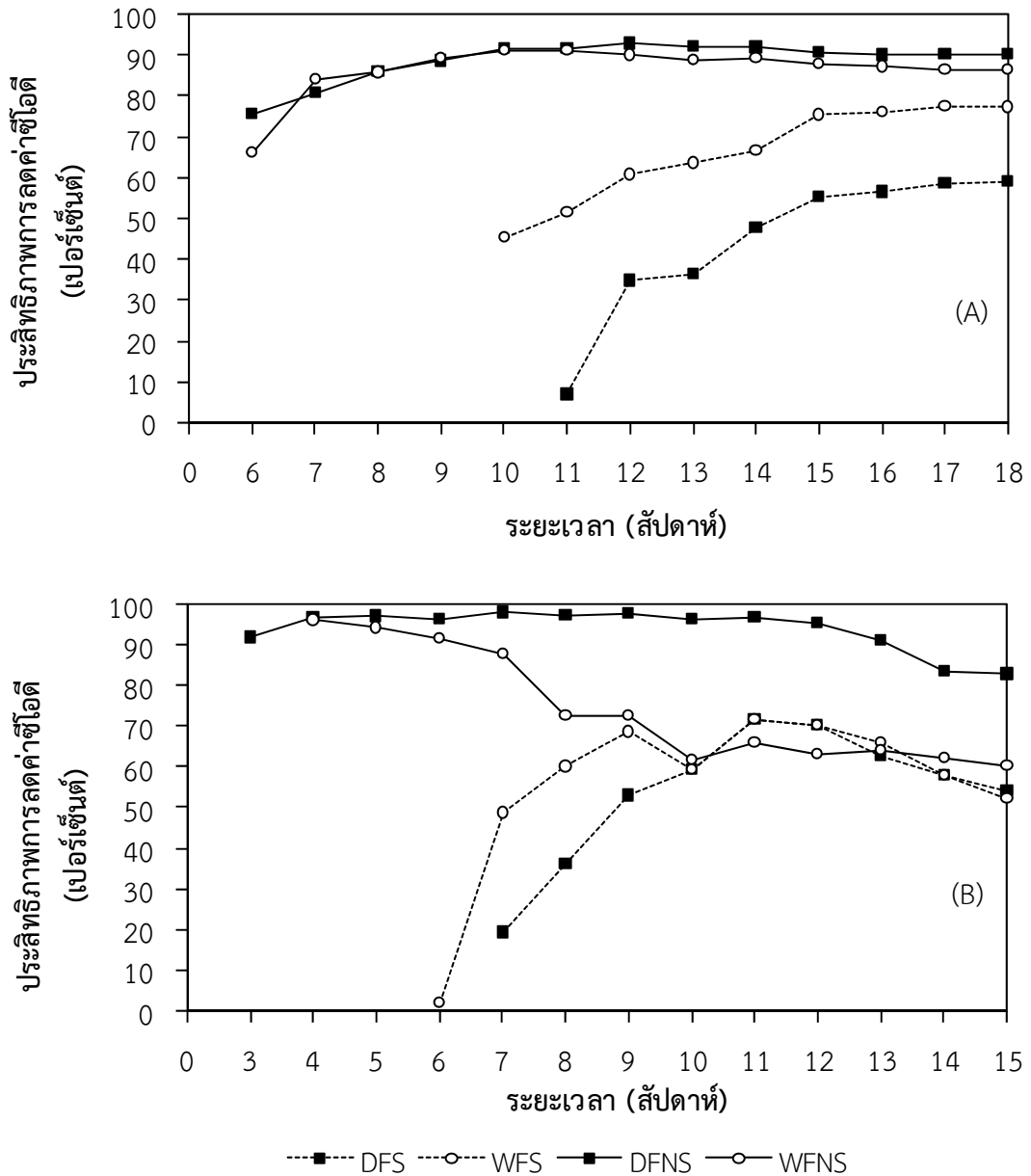


รูปที่ ข-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu และวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

ภาคผนวก ค

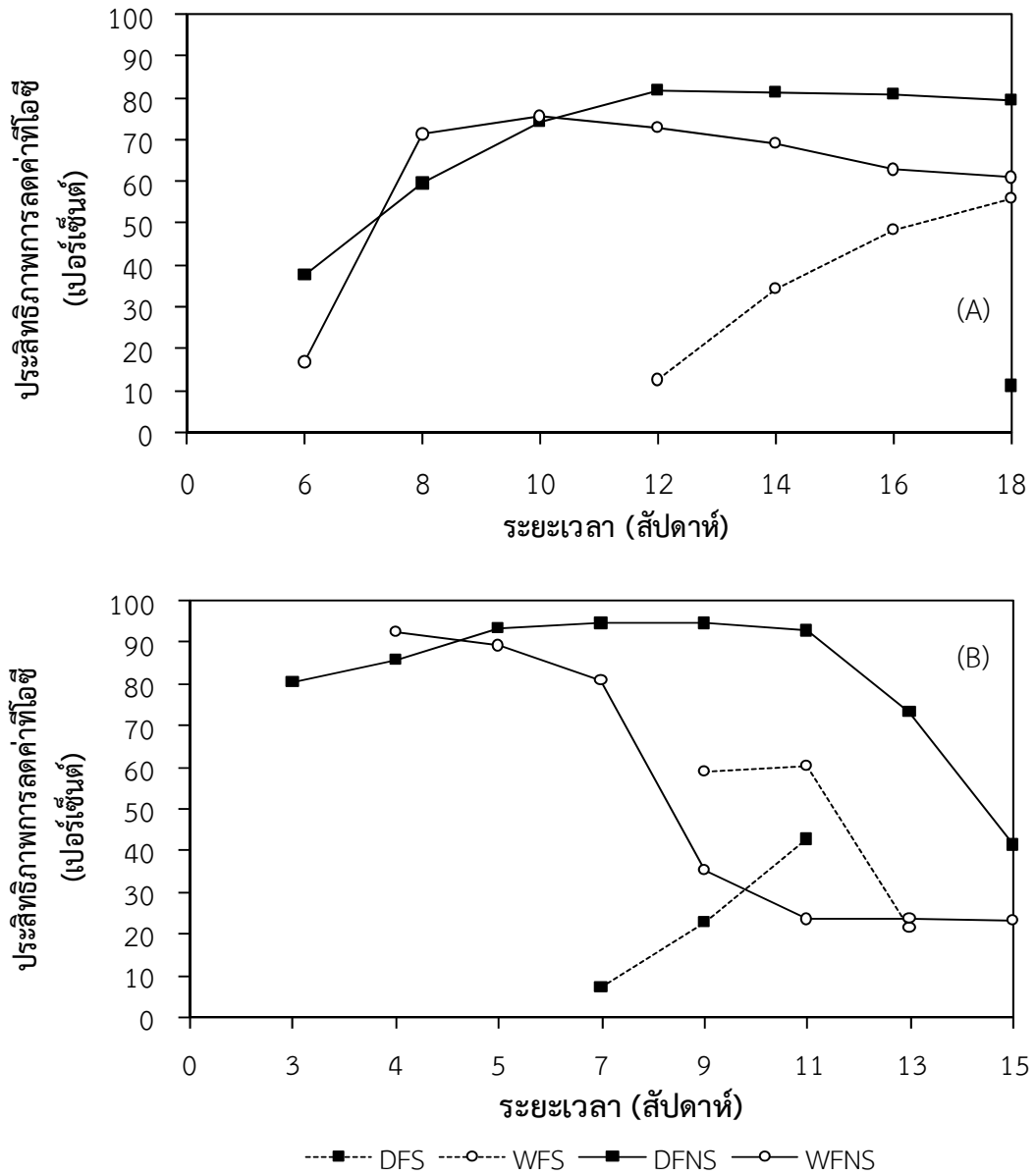
ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน

ค-1 ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน



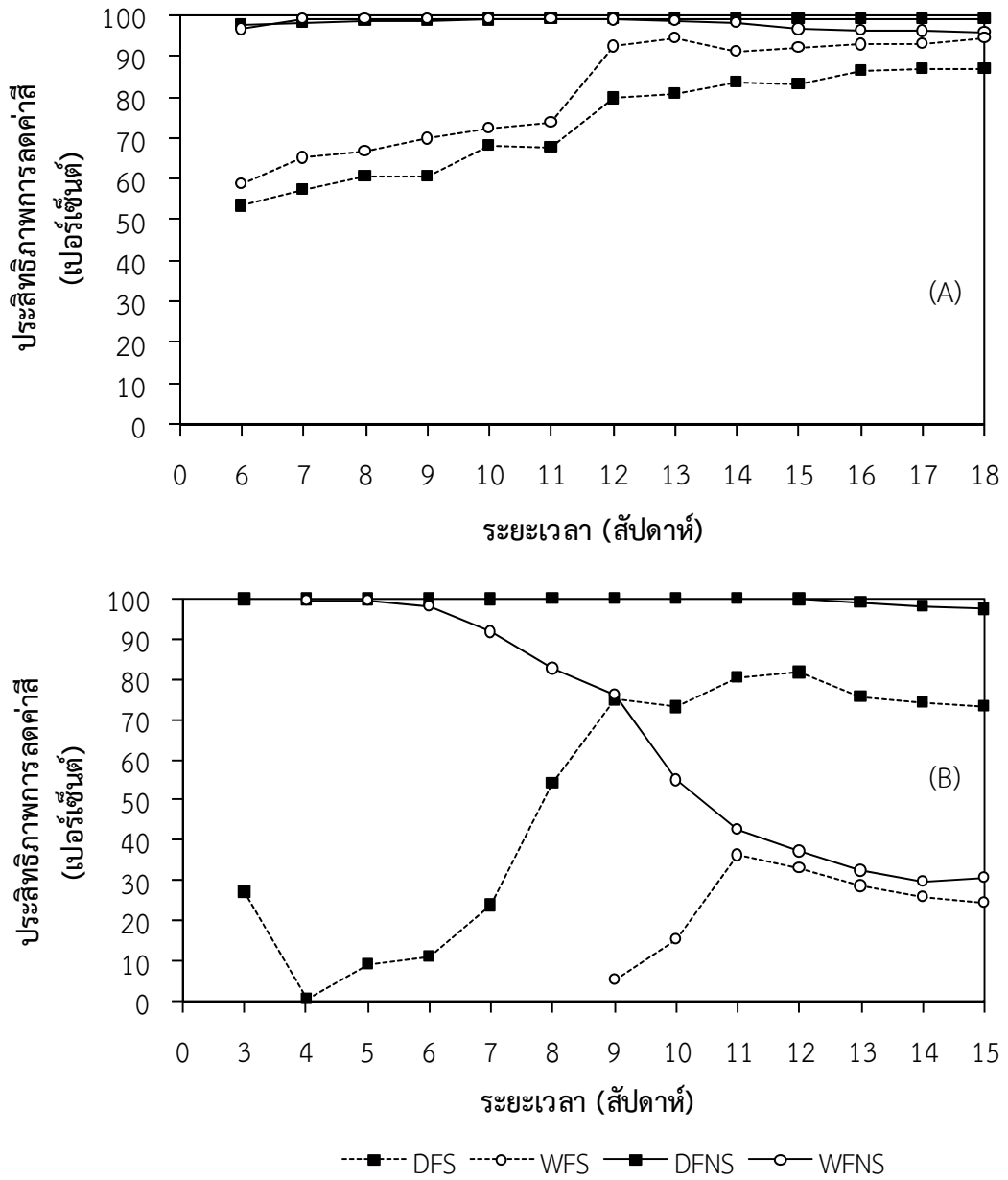
รูปที่ ค-1 ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการร่อนน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ค-2 ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน



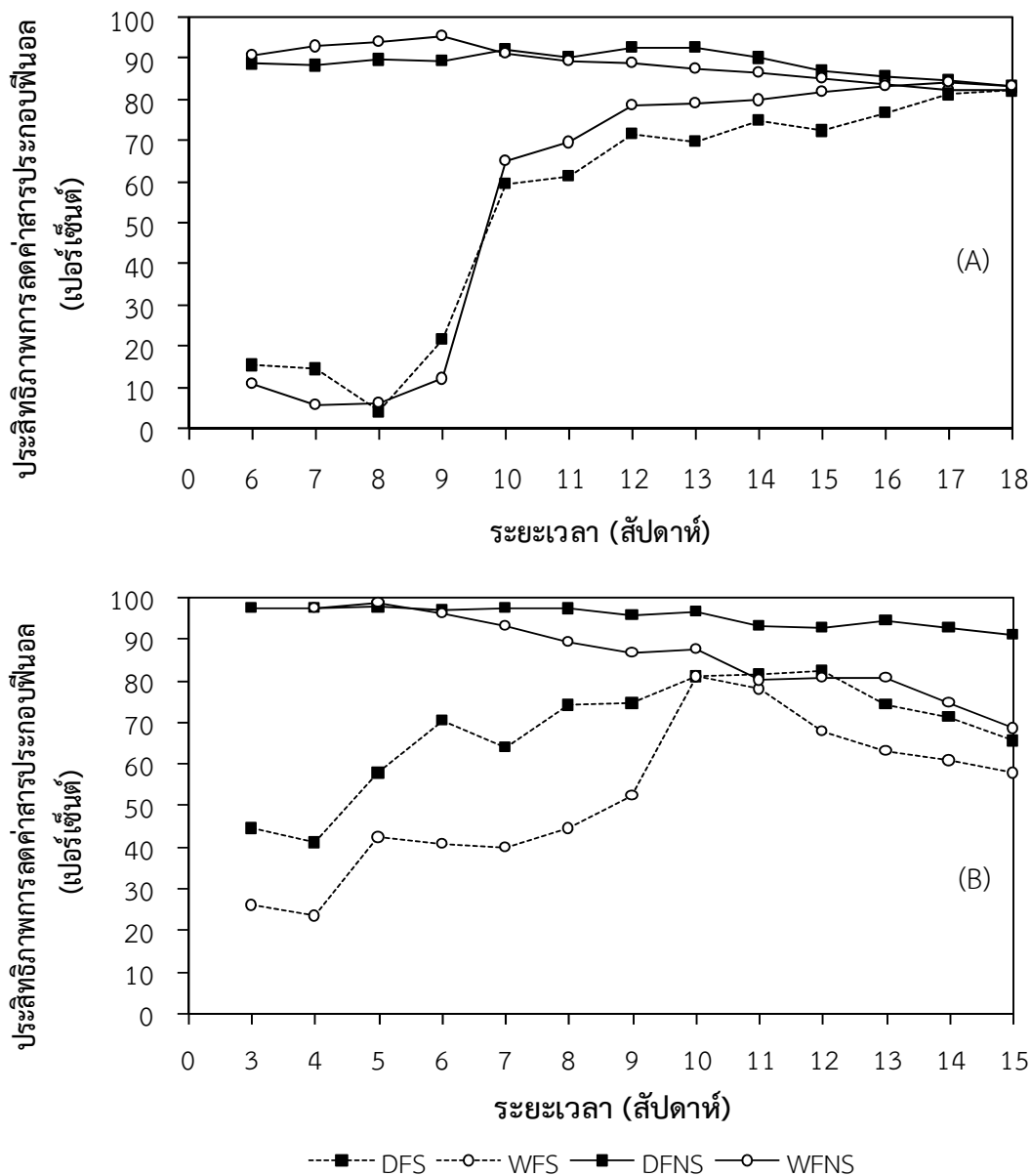
รูปที่ ค-2 ประสิทธิภาพการลดค่าที่ไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ค-3 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน



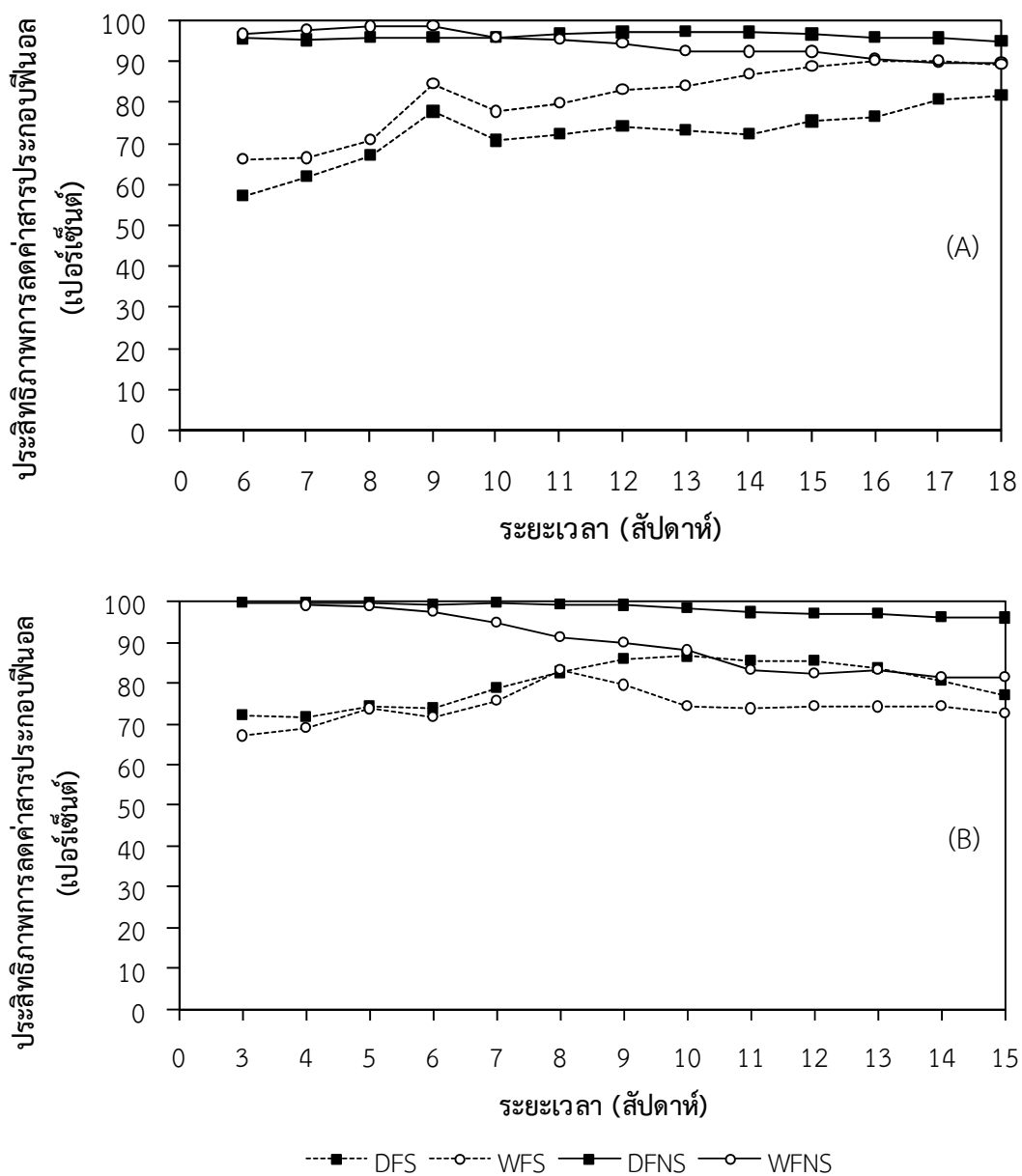
รูปที่ ค-3 ประสิทธิภาพการลดค่าหน่วยสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ค-4 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน



รูปที่ ค-4 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantipyrine ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ค-5 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน



รูปที่ ค-5 ประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดิน ที่อัตราการรดน้ำ 3 cm/week (A) และ 5 cm/week (B)

ภาคผนวก ง  
ผลการวิเคราะห์น้ำเข้าและออกจากระบบ

ตารางที่ ง-1 ค่าพีเอชของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ

ระยะเวลา (สัปดาห์)	อัตราการรดที่ 3 cm/week						อัตราการรดที่ 5 cm/week						
	คอลัมน์			คอลัมน์			คอลัมน์			คอลัมน์			
	In TWNS	DFNS	WFNS	In TWS	DFS	WFS	In TWNS	DFNS	WFNS	In TWS	DFS	WFS	
6	8.3	7.3	7.5	8.9	6.8	7.3	3	8.8	7.2	-	8.8	6.9	6.8
7	8.3	7.3	7.0	9.0	6.8	6.8	4	8.7	6.7	6.2	8.9	6.6	6.7
8	8.3	7.0	6.9	9.1	6.8	6.7	5	8.5	6.6	6.1	8.6	6.3	6.4
9	8.4	7.1	6.9	9.0	6.9	7.0	6	8.4	6.5	6.3	8.8	6.6	6.5
10	8.2	6.7	6.8	9.0	6.8	6.8	7	8.4	6.6	6.5	8.7	6.7	6.7
11	8.5	6.7	6.7	8.9	6.9	6.8	8	8.4	6.5	6.6	8.8	6.7	6.5
12	8.4	6.8	6.8	8.9	6.8	6.8	9	8.4	6.5	6.6	8.9	6.7	6.5
13	8.2	6.7	6.7	8.9	6.8	6.7	10	8.3	6.6	6.6	8.7	6.7	6.5
14	8.2	6.7	6.7	8.9	6.7	6.7	11	8.4	6.5	6.6	8.9	6.7	6.6
15	8.2	6.7	6.8	8.9	6.8	6.7	12	8.3	6.6	6.6	8.9	6.7	6.6
16	8.2	6.6	6.6	8.9	6.8	6.7	13	8.3	6.6	6.6	9.0	6.7	6.6
17	8.2	6.7	6.7	8.9	6.8	6.7	14	8.3	6.7	6.7	8.9	7.0	6.8
18	8.2	6.7	6.7	8.9	6.8	6.7	15	8.3	6.8	6.8	9.0	7.0	7.0

หมายเหตุ: - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์

ตารางที่ ง-2 ค่าหน่วยสีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ

อัตราการรดที่ 3 cm/week							อัตราการรดที่ 5 cm/week								
ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์			ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์			ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์			ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์		
	In	DFNS	WFNS		In	DFS	WFS		In	DFNS	WFNS		In	DFS	WFS
	TWNS			TWS				TWNS			TWS				
6	6,489	149	227	6,400	2,978	2,633	3	6,578	21	-	6,556	4,778	6,356		
7	6,489	117	63	6,400	2,733	2,233	4	6,467	16	44	6,378	6,333	8,000		
8	6,267	94	62	6,111	2,411	2,033	5	6,511	18	34	6,022	5,467	7,667		
9	6,644	91	50	6,022	2,367	1,822	6	6,378	17	126	6,200	5,511	6,689		
10	6,400	77	61	5,933	1,889	1,644	7	6,333	15	534	6,178	4,711	6,844		
11	6,600	68	68	5,667	1,833	1,478	8	6,667	12	1,167	6,200	2,844	6,533		
12	6,378	66	76	5,800	1,182	444	9	6,511	12	1,556	6,356	1,600	6,022		
13	6,178	64	92	5,756	1,100	322	10	6,400	13	2,889	6,244	1,686	5,289		
14	6,133	60	111	5,800	944	522	11	6,533	13	3,750	6,400	1,267	4,089		
15	6,356	63	220	5,622	940	453	12	6,400	19	4,028	6,044	1,111	4,044		
16	6,378	64	238	5,667	768	412	13	6,000	53	4,056	5,844	1,422	4,178		
17	6,467	63	250	5,733	754	397	14	5,933	114	4,167	5,667	1,467	4,200		
18	6,422	64	272	5,756	757	321	15	6,089	161	4,222	5,578	1,500	4,211		

หมายเหตุ: ค่าหน่วยสีมีหน่วยเป็น PtCo, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์



ตารางที่ ง-3 ค่าซีไอดีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ

อัตราการรอดที่ 3 cm/week							อัตราการรอดที่ 5 cm/week						
ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์			ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์								
	In TWNS	DFNS	WFNS		In TWS	DFS	WFS	In TWNS	DFNS	WFNS	In TWS	DFS	WFS
6	2,355	574	793	2,216	5,657	3,556	3	2,370	193	-	1,926	4,035	2,761
7	2,462	471	392	2,325	4,706	3,294	4	2,222	71	85	1,926	3,823	2,761
8	2,353	327	335	2,039	4,019	2,828	5	2,265	64	128	1,840	3,840	2,400
9	2,233	252	237	2,084	3,704	2,519	6	2,240	78	188	1,920	3,059	1,882
10	2,222	181	195	1,778	2,157	974	7	2,353	45	284	2,039	1,645	1,047
11	2,087	174	181	1,864	1,739	904	8	2,093	57	571	1,794	1,143	714
12	2,226	158	221	1,809	1,182	709	9	2,286	47	627	2,000	941	627
13	2,049	158	229	1,734	1,103	631	10	2,196	76	838	1,882	762	762
14	2,207	177	231	1,734	908	577	11	2,438	75	830	2,133	604	604
15	2,154	197	258	1,692	758	417	12	2,415	107	889	2,264	676	676
16	2,123	211	269	1,668	727	400	13	2,418	215	866	2,133	797	727
17	2,182	212	290	1,745	722	392	14	2,355	388	889	2,216	929	929
18	2,196	215	293	1,725	706	392	15	2,424	415	963	2,101	963	1,000

หมายเหตุ: ค่าซีไอดีมีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์

ตารางที่ ง-4 ค่าที่ไอซีของน้ำออกจากระบบ

ระยะเวลา(สัปดาห์)	อัตราการรอดที่ 3 cm/week				ระยะเวลา(สัปดาห์)	อัตราการรอดที่ 5 cm/week			
	คอรัสน์					คอรัสน์			
	DFNS	WFNS	DFS	WFS		DFNS	WFNS	DFS	WFS
6	225	301	2,439	1,752	3	70	-	1,517	916
8	147	104	2,556	1,451	4	51	26	1,400	918
10	93	89	1,485	654	5	23	39	1,447	921
12	66	98	809	303	7	19	69	322	847
14	68	112	579	227	9	19	233	267	142
16	69	135	495	178	11	26	277	198	137
18	74	141	307	153	13	96	276	406	272
					15	212	277	578	427

หมายเหตุ: ค่าที่ไอซีมีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอรัสน์

ตารางที่ ง-5 ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantiptrine

ระยะเวลา (สัปดาห์)	อัตราการรอดที่ 3 cm/week						อัตราการรอดที่ 5 cm/week						
	คอสมัน			คอสมัน			คอสมัน			คอสมัน			
	In	DFNS	WFNS	In	DFS	WFS	In	DFNS	WFNS	In	DFS	WFS	
	TWNS			TWS				TWNS			TWS		
6	30	3.3	2.7	28	24	25	3	30	0.8	-	27	15	20
7	27	3.1	1.8	25	21	24	4	31	0.9	0.8	25	15	19
8	28	2.9	1.7	23	22	21	5	32	0.8	0.4	26	11	15
9	27	2.8	1.2	23	18	20	6	30	0.9	1.2	27	8	16
10	28	2.2	2.4	23	9	8	7	28	0.7	2.0	25	9	15
11	26	2.4	2.7	22	8	7	8	28	0.8	3.0	27	7	15
12	27	1.9	2.9	22	6	5	9	30	1.3	4.0	27	7	13
13	26	1.9	3.2	20	6	4	10	32	1.1	4.0	26	5	5
14	27	2.6	3.5	20	5	4	11	30	2.1	6.0	27	5	6
15	25	3.3	3.8	19	5	3	12	31	2.3	6.0	28	5	9
16	26	3.7	4.1	21	5	3	13	31	1.7	6.0	27	7	10
17	27	4.1	4.8	22	4	3	14	30	2.3	7.6	28	8	11
18	27	4.5	4.8	22	4	4	15	28	2.6	8.8	26	9	11

หมายเหตุ: ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี 4-aminoantiptrine มีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอสมัน

ตารางที่ ง-6 ค่าสารประกอบฟีนอลของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu

ระยะเวลา (สัปดาห์)	อัตราการรอดที่ 3 cm/week						อัตราการรอดที่ 5 cm/week						
	คอลัมน์			คอลัมน์			ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอลัมน์			คอลัมน์		
	In	DFNS	WFNS	In	DFS	WFS		In	DFNS	WFNS	In	DFS	WFS
TWNS	TWS		TWS		TWNS	TWS		TWS		TWS			
6	166	7.3	5.8	104	45	35	3	174	0.5	-	155	43	51
7	148	7.2	3.2	103	39	35	4	172	0.5	1.5	149	42	46
8	152	7.6	2.5	108	36	32	5	180	0.3	1.9	160	41	42
9	147	6.4	2.2	103	35	30	6	170	1.0	4.0	145	38	41
10	138	5.7	5.9	103	30	23	7	172	0.7	9.0	152	32	37
11	142	5.0	6.5	108	30	22	8	171	1.4	14.9	149	26	25
12	145	4.4	8.3	109	28	18	9	178	1.8	18.0	151	21	31
13	143	4.0	10.9	103	28	17	10	175	3.0	21.0	157	21	40
14	148	4.5	11.5	103	29	14	11	181	5.0	30.0	152	22	40
15	146	5.1	11.2	103	26	12	12	170	5.0	30.0	160	23	41
16	149	6.4	13.8	104	25	10	13	174	5.0	29.0	155	25	40
17	154	6.9	15.8	111	21	11	14	168	6.5	31.3	159	31	41
18	155	7.9	16.2	112	20	12	15	173	7.0	32.0	153	35	42

หมายเหตุ: ค่าสารประกอบฟีนอลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu มีหน่วยเป็น mg GAE/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์

## ภาคผนวก จ

## มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ จ-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล.</li> <li>น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.</li> </ul>
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease) สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือ สัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด

ตารางที่ จ-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิตั้งที่ 20°C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)	
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539

ตารางที่ จ-2 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ลำดับ	คุณภาพน้ำ <sup>2/</sup>	ค่าทางสถิติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด <sup>3/</sup> ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์ <sup>1/</sup>				
				ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
1.	สี กลิ่น และรส (Coloir Odour and Taste)		-	๐	๐'	๐'	๐'	-
2.	อุณหภูมิ (Temperature)		°ซ	๐	๐'	๐'	๐'	-
3.	ความเป็นกรดและด่าง (pH)		-	๐	5.0 - 9.0	5.0 - 9.0	5.0 - 9.0	-
4.	ออกซิเจนละลาย (DO) <sup>3/</sup>	P20	มก./ล.(mg/l)	๐	6.0	4.0	2.0	-
5.	บีโอดี (BOD)	P80	มก./ล.(mg/l)	๐	1.5	2.0	4.0	-
6.	แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)	P80	เอ็ม.พี.เอ็น/100มล. (MPN/100 ml)	๐	5,000	20,000	-	-
7.	แบคทีเรียกลุ่มฟีโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria)	P80	เอ็ม.พี.เอ็น/100มล. (MPN/100 ml)	๐	1,000	4,000	-	-
8.	ไนเตรต (NO <sub>3</sub> ) ในหน่วยไนโตรเจน		มก./ล. (mg/l)	๐	5.0	5.0	5.0	-
9.	แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> ) ในหน่วยไนโตรเจน		มก./ล. (mg/l)	๐	0.5	0.5	0.5	-
10.	ฟีนอล (Phenols)		มก./ล. (mg/l)	๐	0.005	0.005	0.005	-
11.	ทองแดง (Cu)		มก./ล. (mg/l)	๐	0.1	0.1	0.1	-
12.	นิกเกิล (Ni)		มก./ล. (mg/l)	๐	0.1	0.1	0.1	-
13.	แมงกานีส (Mn)		มก./ล. (mg/l)	๐	1.0	1.0	1.0	-

ตารางที่ จ-2 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (ต่อ)

ลำดับ	คุณภาพน้ำ <sup>2/</sup>	ค่าทางสถิติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด <sup>3/</sup> ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์ <sup>1/</sup>				
				ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
14.	สังกะสี (Zn)		มก./ล. (mg/l)	๕	1.0	1.0	1.0	-
15.	แคดเมียม (Cd)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.005*	0.005*	0.005*	-
					0.05*	0.05*	0.05*	-
16.	โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Cr Hexavalent)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.05	0.05	0.05	-
17.	ตะกั่ว (Pb)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.05	0.05	0.05	-
18.	ปรอททั้งหมด (Total Hg)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.002	0.002	0.002	-
19.	สารหนู (As)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.01	0.01	0.01	-
20.	ไซยาไนด์ (Cyanide)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.005	0.005	0.005	-
21.	กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)							
	- ค่ารังสีแอลฟา (Alpha)		เบเคอเรล/ล.	๕	0.1	0.1	0.1	-
	- ค่ารังสีเบตา (Beta)		เบเคอเรล/ล.	๕	1.0	1.0	1.0	-
22.	สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดมีคลอรีนทั้งหมด (Total Organochlorine Pesticides)		มก./ล. (mg/l)	๕	0.05	0.05	0.05	-
23.	ดีดีที (DDT)		ไมโครกรัม/ล.	๕	1.0	1.0	1.0	-



ตารางที่ จ-2 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (ต่อ)

ลำดับ	คุณภาพน้ำ <sup>2/</sup>	ค่าทางสถิติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด <sup>3/</sup> ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์ <sup>1/</sup>				
				ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
24.	บีเอชซีชนิดแอลฟา (Alpha-BHC)		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.02	0.02	0.02	-
25.	ดีลดริน (Dieldrin)		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.2	0.2	0.2	-
26.	อัลดริน (Aldrin)		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.1	0.1	0.1	-
27.	เฮปตาคลอร์และเฮปตาคลอร์อีพอกไซด์ (Heptachlor & Heptachlor epoxide)		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.2	0.2	0.2	-
28.	เอนดริน (Endrin)		ไมโครกรัม/ล.	๕	ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด			-

ที่มา : ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 111 ตอนที่ 16 ง ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537 (ภาคผนวก ฐ)

**หมายเหตุ:**

1/ การแบ่งประเภทแหล่งน้ำผิวดิน

**ประเภทที่ 1** ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- (1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน
- (2) การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน
- (3) การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ

**ประเภทที่ 2** ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- (1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการ ปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
- (2) การอนุรักษ์สัตว์น้ำ
- (3) การประมง
- (4) การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

**ประเภทที่ 3** ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- (1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
- (2) การเกษตร

**ประเภทที่ 4** ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- (1) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
- (2) การอุตสาหกรรม

**ประเภทที่ 5** ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

2/ กำหนดค่ามาตรฐานเฉพาะในแหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 สำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 1 ให้เป็นไปตามธรรมชาติ และแหล่งน้ำประเภทที่ 5 ไม่กำหนดค่า

3/ ค่า DO เป็นเกณฑ์มาตรฐานต่ำสุด

ธ เป็นไปตามธรรมชาติ

ธ' อุณหภูมิของน้ำจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติ เกิน 3 องศาเซลเซียส

\* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

\*\* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

๐ซ องศาเซลเซียส

P20 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 20 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง

P80 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 80 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง

มก./ล. มิลลิกรัมต่อลิตร

มล. มิลลิลิตร

MPN เอ็ม.พี.เอ็น หรือ Most Probable Number