



การจัดการน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
ด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์
Management of Treated Palm Oil Mill Effluent
by Napier Grass Plantation

อดิษฐ์ อนุศักดิ์
Adinun Anusak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การจัดการน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
ด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์

Management of Treated Palm Oil Mill Effluent
by Napier Grass Plantation

อดิฉันท์ อนุศักดิ์

Adinun Anusak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายอดิพันธ์ อนุศักดิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอดิพันธ์ อนุศักดิ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การจัดการน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์
ผู้เขียน	นายอดิพันธ์ อนุศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาการลดค่าสี ค่าสารอินทรีย์ และค่าสารประกอบฟีนอลิก ในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินในคอลัมน์ทดลอง (S) และการบำบัดโดยดิน ร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ (SG) โดยรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ทุกวันแบ่งเป็น 3 อัตราการรด ได้แก่ 5 (คอลัมน์ S5 และ SG5) 7 (คอลัมน์ S7 และ SG7) 10 cm/week (คอลัมน์ S10 และ SG10) และปลูก หญ้าเนเปียร์แบบมาตรฐานอัตราการรด 10 cm/week (คอลัมน์ SPG) แต่ละอัตราการรดทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยมีระยะเวลาทดลอง 16 สัปดาห์ น้ำทิ้งเข้าระบบทดลองมีค่าเฉลี่ยของ พีเอช สี ซีไอดี ทีเคเอ็น ทีไอซี และสารประกอบฟีนอลิกเป็น 8.6, 1,656 PtCo, 1,443 mg/L, 445 mg/L, 324 mg/L และ 134 mg GAE/L ตามลำดับ ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์มีค่าลดลงจากพีเอชเป็นเบสเป็น พีเอชเป็นกลาง มีค่าอยู่ระหว่าง 5.9-7.3 ค่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการลดค่าสีสูงที่สุดคิดเป็น 99.5% คอลัมน์ S5 มีประสิทธิภาพการลดค่า ซีไอดีสูงที่สุดคิดเป็น 95.6% คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพการลดค่าทีเคเอ็นสูงที่สุดคิดเป็น 94.8% คอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการลดค่าทีไอซีสูงที่สุดคิดเป็น 95.5% ส่วนประสิทธิภาพการลดค่า สารประกอบฟีนอลิกของแต่ละคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 94.6-96.7% ค่าคงที่การย่อยสลาย แบบปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของซีไอดี และสารประกอบฟีนอลิกของคอลัมน์ SG5 มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเป็น 2.081 และ 2.472 day⁻¹ ตามลำดับ ค่าพีเอชของดินในคอลัมน์ทดลองเปลี่ยนจากเป็นกรดเล็กน้อยเป็น กลาง ไนโตรเจนทั้งหมด สังกะสี อินทรีย์วัตถุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินมีค่า เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26.8 เป็น 31.3-59.2 mg/kg โพแทสเซียม ที่เป็นประโยชน์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 59.8 เป็น 218-330 mg/kg และสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 83-193 mg/kg ตัวอย่างดินในคอลัมน์ SG7 มีปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก มากที่สุดเป็น 12.8±1.5 log MPN/ดิน 1 กรัม แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดี ได้แก่ *Rhodococcus sp.* เมื่อพิจารณาคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ในด้านประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้ง การเจริญเติบโต และคุณภาพของหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG7 เป็นอัตราการรดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ คอลัมน์ดินอย่างเดียวคอลัมน์ S7 เป็นอัตราการรดที่เหมาะสมที่สุด การบำบัดน้ำทิ้งโดยดินที่ปลูกหญ้า เนเปียร์หนึ่งชั้นตอนไม่สามารถบำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้จึงต้อง ประยุกต์ใช้งานด้วยการบำบัดสองชั้นตอน ได้แก่ การนำน้ำทิ้งรดดินแปลงที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่มีการปูพื้น ด้วยแผ่น high density polyethylene รองด้านล่างเพื่อไม่ให้น้ำทิ้งไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน เก็บน้ำทิ้งที่ ผ่านการบำบัดมารดดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์หรือรดสวนปาล์มน้ำมัน การบำบัดแบบสองชั้นตอนบำบัด น้ำทิ้งให้ผ่านมาตรฐานได้ น้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำสำหรับกระบวนการผลิตต่างๆ หรือ ทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกโดยการรดน้ำทิ้งมีคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับการ ปลูกแบบมาตรฐาน สามารถจำหน่ายเพื่อเป็นอาหารสัตว์และเป็นวัตถุดิบของการผลิตก๊าซชีวภาพ

Thesis Title	Management of treated palm oil mill effluent by Napier grass plantation
Author	Mr. Adinun Anusak
Major Program	Environmental Engineering
Academic Year	2016

Abstract

This research is aimed at determining the reduction of color, organic matter, and phenolic compounds in treated palm oil mill effluent (POME) by land treatment in soil column (S) and soil column with plantation of Napier grass (SG). The treated POME was daily applied to soil columns. Three applied rates including 5 (column S5 and SG5), 7 (column S7 and SG7), 10 cm/weeks (column S10 and SG10) and standard Napier grass plantation rate of 10 cm/week (column SPG) were used to conduct the experiment for 16 weeks. Duplicated experiments were conducted for each applied rate. Average values of pH, color, chemical oxygen demand (COD), total kjeldah nitrogen (TKN), total organic carbon (TOC) and phenolic compounds were 8.6, 1,656 PtCo, 1,443 mg/L, 445 mg/L, 324 mg/L and 134 mg GAE/L, respectively. pH of treated water gradually increased from slightly acidic condition to neutral condition between 5.9 and 7.3. Color of treated water decreased gradually. At 16 weeks, column S7 had the highest percent reduction of color of 99.5%. Highest percent reductions of COD, TKN, and TOC of 95.6, 94.8, and 95.5% were obtained using column S5, SG7, and S10, respectively. The percent reduction of phenolic compounds between 94.6-96.7% was determined. Highest values of first order degradation rate constant of COD and phenolic compounds of column SG5 were 2.081 and 2.472 day⁻¹, respectively. pH of soil increased from slightly acidic condition to neutral condition. The percent of total nitrogen, zinc, organic matter and cation exchange capacity slightly changed in soil. The available phosphorus and potassium increased from 26.8 to 31.1-43.6 mg/kg and 59.8 to 218-330 mg/kg, respectively. Total phenolic compounds increased from 60 to 83-133 mg/kg. The soil sample in column SG7 had the highest amount of degradable phenolic compounds at 12.8 ± 1.5 log MPN/1 g soil. The dominant group of bacteria that can degrade phenolic compounds was *Rhodococcus sp.* When considering the column with Napier grass plantation in terms of efficiency, growth, and quality of Napier grass, the best condition was determined at the applied rate of 7 cm/week (SG7). For column without Napier plantation, the best condition was determined at the applied rate of 7 cm/week (S7). Treated water quality with one stage soil column with plantation of Napier grass could not meet industrial effluent standards. The two stage of land treatment was proposed. In the first stage, the treated POME was applied to the soil with plantation of Napier grass. The high density polyethylene liner was used for collecting the treated water and protection of groundwater contamination. The treated water from stage one was feed to land treatment without Napier grass plantation or oil palm garden in stage two. The final treated water can be used in processing or discharging to natural water sources. Napier grass planted with treated wastewater had nutritional value similar to standard planting and could be sold as animal feed and as raw material of biogas.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีจากอาจารย์หลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรมาศ สุทธินนท์ และ ดร.กรกช นาคคนอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ให้มุมมอง แง่คิด รวมถึงช่วยแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ในการทำวิจัย ตรวจสอบแก้ไขความถูกต้องเรียบร้อย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง ให้งานวิจัยมีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ทุนศิษย์ก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนจาก Kurita water and Environment Foundation ที่มอบทุนสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ดร.กรกช นาคคนอง และคณะทรัพยากรธรรมชาติที่อนุเคราะห์พื้นที่โรงเรือนเพาะปลูกสำหรับเป็นพื้นที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าไปเก็บตัวอย่างและให้ข้อมูลในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพลีษฐ์ จารุจารีต และคุณอนุกุล เกียรติขวัญบุตร ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือ สำหรับงานวิจัยด้านชีวโมเลกุล

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่สนับสนุนดูแลในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้การศึกษาระดับปริญญาโทสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อดิพนธ์ อนุศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คุณลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	5
2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	6
2.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ (anaerobic pond)	6
2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อหมักไร้อากาศ	6
2.3 สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)	9
2.3.1 แหล่งกำเนิดสารประกอบฟีนอลิก	9
2.3.2 สารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	9
2.3.3 การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกด้วยวิธีการทางชีวภาพ	10
2.4 การบำบัดโดยดิน (land treatment)	11
2.4.1 กระบวนการซึมช้า (slow rate process)	11
2.4.2 กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process)	12
2.4.3 กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process)	12
2.4.4 กลไกการบำบัดโดยดิน	13
2.4.5 คุณลักษณะของดิน	14
2.4.6 การดูซับของดิน	15
2.5 หญ้าเนเปียร์ (Napier grass)	24
2.5.1 การเก็บเกี่ยวผลผลิต	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2	25
2.5.3	26
2.6	26
2.7	27
2.8	28
2.9	29
บทที่ 3	33
3.1	33
3.2	33
3.2.1	33
3.2.2	33
3.2.3	33
3.2.4	34
3.2.5	34
3.3	35
3.3.1	35
3.3.2	36
3.4	36
3.4.1	39
3.4.2	40
3.4.3	41
3.4.4	41
3.4.5	42
3.5	42
3.5.1	42
3.5.2	45
3.5.3	49
บทที่ 4	52
4.1	53
4.1.1	53
4.1.2	53
4.1.3	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 การวิเคราะห์ผลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน	92
4.2 ลักษณะดิน	93
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน	93
4.2.2 ลักษณะทางเคมีของดิน	95
4.2.3 ลักษณะทางชีวภาพของดิน	101
4.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะดินเพื่อนำไปใช้งาน	111
4.3 คุณลักษณะหญ้าเนเปียร์	112
4.3.1 การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์	112
4.3.2 คุณภาพของหญ้าเนเปียร์	116
4.3.3 สรุปปริมาณและคุณภาพหญ้าเนเปียร์	117
4.4 สรุป	118
4.5 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์และการประยุกต์ใช้ประโยชน์	119
4.4.1 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์	119
4.4.2 การประยุกต์ใช้ประโยชน์	122
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	126
5.1 สรุปผลการทดลอง	126
5.2 ข้อเสนอแนะ	127
บรรณานุกรม	129
ภาคผนวก	141
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์	142
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์น้ำเข้าและน้ำออกระบบ	148
ภาคผนวก ค สมดุลมวลการบำบัดซีโอทีและสารประกอบฟีนอลิก	155
ภาคผนวก ง การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ	156
ประวัติผู้เขียน	157

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณลักษณะของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	5
2-2	คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	6
2-3	คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดก๊าซชีวภาพ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	7
2-4	ค่าซีโอดีของน้ำเสียและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพการลดซีโอดีและ ความสามารถในการลดปริมาณซีโอดีสะสมของโรงบำบัดน้ำเสียที่มีผลผลิตก๊าซชีวภาพ	8
2-5	ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท	9
2-6	สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	15
2-7	คุณค่าทางโภชนาของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 กับหญ้าอื่นๆ	26
3-1	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง จากโรงงานลาภทวี ปาล์ม จำกัด	36
3-2	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง	43
3-3	ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้ง	44
3-4	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน	45
3-5	ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน	46
3-6	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์	49
3-7	ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์	49
4-1	คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	53
4-2	ปริมาณน้ำรดคอกลั่นทดลองและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอกลั่นทดลอง	57
4-3	ค่าซีโอดีก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด	69
4-4	มวลในรูปซีโอดีก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด	71
4-5	อัตราการย่อยซีโอดีแบบปฏิกริยาลำดับที่ 1	72
4-6	ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก	80
4-7	มวลสารประกอบฟีนอลิกก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด	82
4-8	อัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกแบบปฏิกริยาลำดับที่ 1	83
4-9	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินและการบำบัดโดยดินร่วมกับการปลูกพืชชนิดต่างๆ	89
4-10	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโดยการปลูกพืชแบบบึงประดิษฐ์	91
4-11	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งเฉลี่ย	93
4-12	ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน	94
4-13	ลักษณะทางเคมีของดิน	95
4-14	ปริมาณเชื้อแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิกของชุดการทดลองต่าง ๆ	101
4-15	ลำดับของแถบดีเอ็นเอของตัวอย่างดินและน้ำ	106
4-16	ชนิดของแบคทีเรียในดิน	110
4-17	ความสูงของหญ้าเนเปียร์ที่เพาะในกระบะ	112

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-18	น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งหญ้าเนเปียร์	115
4-19	คุณลักษณะของหญ้าเนเปียร์	116
4-20	สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์	117
4-21	ค่าใช้จ่ายในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1	120
4-22	รายได้จากการปลูกหญ้าเนเปียร์	121
4-23	ค่าใช้จ่ายการปลูกปาล์มน้ำมัน	121
4-24	ประสิทธิภาพการบำบัดโดยดินแบบ 2 ขั้นตอน และลักษณะน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ	125
ข-1	ค่าพีเอชน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	148
ข-2	ค่าสีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	149
ข-3	ค่าซีโอดีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	150
ข-4	ค่าทีเคเอ็นน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	151
ข-5	ค่าทีโอดีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	152
ข-6	ค่าสารประกอบฟีนอลิกน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	153
ข-7	ค่ากรดแกลลิกน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน	154
ค-1	สมมูลมวลการบำบัดซีโอดี	155
ค-2	สารประกอบฟีนอลิก	155

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกชนิดต่าง ๆ (A) phenol, (B) flavonoids, และ (C) melanins	10
2-2	ประเภทไอโซโทมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	18
2-3	ประเภทไอโซโทมของการดูดซับของ IUPAC	18
3-1	การเก็บตัวอย่างดิน	35
3-2	การเก็บตัวอย่างน้ำ	36
3-3	ขั้นตอนทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกโดยดินร่วมกับ การปลูกหญ้าเนเปียร์ในเรือนกระจก	37
3-4	ชุดการทดลอง	38
3-5	ชุดการทดลองการบำบัดโดยดิน	39
3-6	การเตรียมคอลัมน์ทดลอง	40
3-7	ลักษณะดินสวนปาล์มและการทำ Quartering	40
3-8	การเพาะหญ้าเนเปียร์ในกระบะดิน (A) สัปดาห์ที่ 1 และ (B) สัปดาห์ที่ 5	41
3-9	การปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ทดลอง	42
3-10	(A) ส่วนสูงหญ้าเนเปียร์ที่ 75 วัน และ (B) หญ้าเนเปียร์ที่ถูกตัดรอบแรกที่ 75 วัน	50
3-11	(A) หญ้าเนเปียร์หลังอบ (B) หญ้าเนเปียร์หลังบด และ (C) ตัวอย่างที่สกัดใน หลอดทดลอง	51
4-1	ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ (A) น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน (B) น้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และ (C) น้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดิน ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์	55
4-2	ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (A) น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน (B) น้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และ (C) น้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดิน ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์	60
4-3	ค่าพีเอชของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง (A) น้ำทิ้งที่ผ่าน การบำบัดโดยคอลัมน์ดิน (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดิน ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ (C) และน้ำประปาที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและ คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์	62
4-4	ค่าสี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพ การบำบัด	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-5	สีของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง	64
4-6	การกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผิวหน้าของดินในคอลัมน์ทดลอง	66
4-7	ค่าซีไอดี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด	67
4-8	ตัวอย่างสมมูลมวลของการบำบัดซีไอดี	70
4-9	ค่าทีเคเอ็น (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด	73
4-10	ค่าทีไอซีของน้ำประปาและน้ำประปาที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง	75
4-11	ค่าทีไอซี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด	76
4-12	ค่าสารประกอบฟีนอลิก (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด	78
4-13	ตัวอย่างสมมูลมวลของการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก	81
4-14	โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกของน้ำทิ้งเข้าระบบทดลอง	84
4-15	ค่ากรดแกลลิก (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด	84
4-16	มวลสะสมของซีไอดีและสารประกอบฟีนอลิกที่ผ่านคอลัมน์ (A) คอลัมน์ดินและ (B) คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์	87
4-17	Genomic DNA ของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน เรียงลำดับดังนี้ 1) น้ำเข้าระบบ 2) ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง 3) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S5 4) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S7 5) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S10 6) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG5 7) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG7 8) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG9 9) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SPG 10) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T5 11) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T7 12) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T10	102

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-18	ผลิตภัณฑ์จาก Genomic DNA ของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน เรียงลำดับดังนี้ 1) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 2) น้ำเข้าระบบ 3) ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง 4) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S5 5) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S7 6) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S10 7) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG5 8) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 9) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG7 10) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG10 11) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SPG 12) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T5 13) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T7 14) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 15) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T10	104
4-19	โปรไฟล์ของ DGGE ในพอลิอะคริลาไมด์เจลที่ใช้เกรเดียนท์ของความเข้มข้น denaturant 40-60% เรียงลำดับดังนี้ 1) น้ำเข้าระบบ 2) ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง 3) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S5 4) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S7 5) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S10 6) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG5 7) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG7 8) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG9 9) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SPG 10) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T5 11) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T7 12) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T10	105
4-20	(A) หล้าเนเปียร์ที่เพาะในการะบะพลาสติกสัปดาห์ที่ 1 และ (B) สัปดาห์ที่ 5	112
4-21	หล้าเนเปียร์ที่ปลูกในคอลัมน์ทดลองในสัปดาห์ที่ (A) 1 (B) 3 (C) 10 และ (D) สัปดาห์ที่ 16	113
4-22	ความสูง (A) หล้าเนเปียร์ก่อนตัดรอบแรก และ (B) ก่อนตัดรอบที่สอง	114
4-23	ลักษณะ (A) หล้าเนเปียร์สด และ (B) หล้าเนเปียร์อบแห้ง	116
4-24	สรุปผลการบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหล้าเนเปียร์	118
4-25	การบำบัดด้วยดินแบบ 2 ขั้นตอน	124
ก-1	กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกด้วย วิธี Folin-ciocalteau (A) ที่ความเข้มข้น 0-30 และ (B) 0-300 mg GAE/L ตามลำดับ	142
ก-2	กราฟมาตรฐานของสารแพลทตินัมโคบอลต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สี (A) ที่ความเข้มข้น 0-150 และ (B) 0-1,500 PtCo ตามลำดับ	143
ก-3	กราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ที่ไอซี (A) ที่ระดับความเข้มข้น 0-50 และ (B) 0-500 mg/L ตามลำดับ	144
ก-4	กราฟมาตรฐานของ (A) gallic acid, (B) protocatechuic acid, (C) 4-hydroxybenzoic acid, (D) caffeic acid, (E) syringic acid, (F) vanilic acid, (G) <i>p</i> -coumaric acid, (H) ferulic acid และ (I) phenol	145

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

POME	=	Palm oil mill effluent
CFU	=	Colony forming unit
CFMM	=	Carbon free mineral medium mg
GAE/L	=	Milligram Gallic acid equivalent per litre
MPN	=	Most probable number
COD	=	Chemical oxygen demand
TKN	=	Total kjeldahl nitrogen
TOC	=	Total organic carbon
PCR	=	Polymerase chain reaction
DGGE	=	Denaturing gradient gel electrophoresis
Inf	=	Influent (น้ำเข้าระบบ)
Eff	=	Effluent (น้ำออกระบบ)
T5	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 5 cm/week
T7	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 7 cm/week
T10	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 10 cm/week
S5	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 cm/week
S5	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 7 cm/week
S10	=	คอลัมน์ทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 10 cm/week
SG5	=	คอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 cm/week
SG7	=	คอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 7 cm/week
SG10	=	คอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 10 cm/week
SPG	=	คอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ตามวิธีมาตรฐาน อัตราการรด 10 cm/week

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันได้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่เกี่ยวผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 4.52 ล้านไร่ ผลผลิตปาล์มสดได้ 11.7 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) ผลิตภัณฑ์หลักจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันสำหรับการประกอบอาหารและน้ำมันไบโอดีเซล การสกัดน้ำมันปาล์มดิบใช้น้ำในปริมาณสูงโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.31 และ 4.59 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai et al., 2012; 2013) หรือ 0.5-1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของทะเลสาปาล์มสด (พูนสุข ประเสริฐสรณ์ และคณะ, 2554) น้ำใช้ดังกล่าวก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าซีไอดีสูง มีสีน้ำตาลคล้ำ มีสารอินทรีย์ต่างๆปนเปื้อนสูง ทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงและส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของพืชและสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบพวกโพลีฟีนอลิก แทนนิน และโพลีแอลกอฮอล์ โดยพบว่าน้ำทิ้งจากหม้อหนึ่งฆ่าเชื้อมีปริมาณโพลีฟีนอลิกเท่ากับ 2.0 กรัมต่อลิตร (Barker et al., 1981 อ้างอิงใน พูนสุข ประเสริฐสรณ์ และคณะ, 2544)

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) เป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่พบในผลปาล์มน้ำมัน สารกลุ่มนี้ถือเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ น้ำเสียเกิดสีคล้ำ (Sayadi et al., 2000) มีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสียลดลง (Mosse et al., 2011) รวมถึงมีความเป็นพิษต่อพืช (phytotoxicity) บางชนิดในสิ่งแวดล้อม (Mekki et al., 2007) สารประกอบฟีนอลิกถูกสกัดออกมาเมื่อเซลล์ผลปาล์มน้ำมันถูกทำลายจากกระบวนการผลิต โดยออกมาพร้อมกับน้ำมันและไอน้ำ เป็นผลให้สารประกอบฟีนอลิกปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากกระบวนการผลิต มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานกำหนดให้น้ำทิ้งจากโรงงานมีสารประกอบฟีนอลิกได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในมาตรฐานน้ำทิ้งวิเคราะห์จากผลรวมของปริมาณอนุพันธ์ของสารฟีนอลทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

กุสุมาลย์ ล่องแก้ว และคณะ (2556) พบว่า น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อหมักไร้อากาศมีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 323 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 33 mg/L ส่วนน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อหมักไร้อากาศ ระบบก๊าซชีวภาพ และบ่อปรับเสถียรของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 326 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าค่าสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก ดังนั้นต้องให้ความสำคัญต่อการลดสารประกอบฟีนอลิกให้ต่ำกว่ามาตรฐานกรณีที่ต้องการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงาน สารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมบำบัดได้หลายวิธี เช่น

การกรองด้วยเมมเบรน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการตกตะกอนด้วยสารเคมี วิธีดังกล่าวเหล่านี้มีความยุ่งยากในการใช้งานและดูแลรักษา รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง และอาจก่อให้เกิดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้

จากข้อจำกัดในการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกข้างต้นนำไปสู่ทางเลือกในการใช้วิธีการทางชีวภาพในการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก โดยอาศัยจุลินทรีย์และพืช ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้อย่างสมบูรณ์ ต้นทุนไม่สูง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นการจัดการกับปัญหาที่ยั่งยืนไม่มีผลกระทบย้อนกลับมายังสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์มีผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการย่อยสลาย คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การบำบัดสารมลพิษด้วยจุลินทรีย์บริเวณรากพืช (rhizoremediation) เป็นวิธีการที่น่าสนใจ เนื่องจากมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาระบบต่ำ และจุลินทรีย์บริเวณรากพืชเป็นจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ (Gerhardt et al., 2010) วิธีการบำบัดสารมลพิษด้วยจุลินทรีย์บริเวณรากพืชนี้สามารถเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในดินผ่านทางรากพืช กระบวนการเมตาโบลิซึมของจุลินทรีย์ทำให้ออกซิเจนแพร่ผ่านดินได้ดี ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างและคุณภาพโดยรวมของดิน นอกจากนี้รากพืชยังช่วยลดการถูกชะล้างพังทลายของดินอีกด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการลดปริมาณและชนิดสารประกอบฟีนอลิกด้วยการบำบัดโดยดินในคอลัมน์ทดลองและไม่มีการปลูกพืชเพื่อช่วยลดค่าสารอินทรีย์ จากการศึกษาดังกล่าว คอลัมน์ดินลดค่าสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกได้ดี น้ำที่ออกจากคอลัมน์ยังคงมีค่าสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย (กฤษมาลย์ ล่องแก้ว, 2557) การศึกษาการดูดซับสารประกอบฟีนอลิกโดยดิน การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกโดยจุลินทรีย์ที่งอกขึ้นในดิน ตลอดจนการปลูกพืชเพื่อใช้จุลินทรีย์ที่รากพืชในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกนั้นเป็นงานวิจัยที่จะสร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้ ปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาในการศึกษาคือชนิดของพืชที่นำมาปลูกนั้นต้องมีการสร้างมูลค่าอย่างชัดเจน ตลอดจนต้องลดมลสารในน้ำทิ้งได้อีกทางหนึ่งจึงจะสร้างแรงจูงใจในการนำไปใช้งานจริงในโรงงานได้

ปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยส่วนใหญ่ให้นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมัน เนื่องจากน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าพารามิเตอร์บางค่าไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมไม่สามารถปล่อยทิ้งได้ อุดมผล พีชนิไพบูลย์ และคณะ (2556) พบว่า อัตราการรดน้ำทิ้ง 0.5 cm/week ที่รดน้ำทิ้ง 2 วันต่อครั้ง ลดค่าซีไอทีและทีเคเอ็นในน้ำทิ้งได้โดยเฉลี่ย 70.6 และ 68.0% ตามลำดับ กระบวนการดูดซับโดยดินและการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินเป็นกลไกหลักในการบำบัด น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่ปลูกปาล์มน้ำมันมีค่าซีไอทีไม่ผ่านมาตรฐาน การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมันไม่ส่งผลต่อคุณภาพดินและการปลูกต้นปาล์มน้ำมัน และทำให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าแปลงที่ไม่รดน้ำทิ้งเล็กน้อย

การรดน้ำทั้งในสวนปาล์มน้ำมันหาครดน้ำทั้งด้วยอัตราการรดสูง เมื่อระยะเวลาการรดน้ำทั้งมากขึ้นส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น สารแขวนลอยในน้ำที่อุดตันช่องว่างของดินน้ำไม่สามารถไหลซึมผ่านชั้นดินได้ เกิดการสะสมมลพิษในดิน เช่น เกิดการสะสมสารจำพวกโซเดียม ก่อให้เกิดปัญหาดินเค็มส่งผลให้ปาล์มน้ำมันดูดสารอาหารบางชนิดได้น้อยลง และอาจเกิดการชะน้ำทั้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้งไม่สามารถปรับหน้าดินได้ เนื่องจากจำเป็นต้องหมอบการปลูกปาล์มน้ำมันแต่ละรอบ ซึ่งรอบการปลูกปาล์มน้ำมันใช้เวลานานประมาณ 20-25 ปี การหาพืชที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวสั้น สามารถปรับหน้าดินได้และบำบัดน้ำเสียได้เป็นงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

หญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าที่มีรากยาว โด่ง่าย ดอกไม่ติดเมล็ดจึงไม่เป็นวัชพืช ตอบสนองต่อการให้น้ำดีมาก ต้องการน้ำประมาณ 1,000 มิลลิเมตร/ปี เป็นพืชชอบแสง มีผลผลิตสูงเฉลี่ย 40-80 ตันสดต่อไร่ต่อปี และมีคุณค่าทางอาหารสูง หญ้าเนเปียร์ทำเป็นหญ้าหมักโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเสริมใดๆ โดยพืชตระกูลหญ้าสามารถปล่อยกรดเพื่อดึงดูดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกสูงเมื่อทำงานร่วมกันการบำบัดโดยดิน (Khongkhaem et al., 2011) โดยหญ้าจะช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายได้ทั้งหมดในดิน และเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าดินที่ไม่ปลูกพืช (Anokhina et al., 2004; Huang et al., 2004) และมีโครงสร้างสารอาหารเหมาะต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่น ปัจจุบันมีการประกันราคาไร่ซื้อ 300 บาทต่อตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559) จากข้างต้นหญ้าเนเปียร์สามารถส่งเสริมการเจริญและกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ตลอดจนสารประกอบฟีนอลิกของจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่อยู่บริเวณรากพืชได้ดี อีกทั้งหญ้าเนเปียร์ใช้เป็นชีวมวลในการนำไปผลิตเป็นพลังงานหรือจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้แก่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการลดค่าซีไอดีและการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกโดยจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดิน การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยอาศัยการบำบัดโดยดินร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ การประเมินปริมาณชีวมวลของหญ้าเนเปียร์จากแปลงที่รดด้วยทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยทำการศึกษาจากระบบทดลองภายในโรงเรือนเพาะปลูก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้เสนอรูปแบบที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ สำหรับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีกำลังการผลิตที่แตกต่างกันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการลดค่าสารอินทรีย์ ซี และสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับหญ้าเนเปียร์ของระบบทดลองในโรงเรือนเพาะปลูก

2. เพื่อหาค่าปริมาณชีวมวลของหญ้าเนเปียร์จากการปลูกตามมาตรฐานและการปลูกโดยการรดน้ำทั้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ทำการศึกษาคือบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิด
2. ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์แบบกระบวนการซึมซาบ ที่ 3 อัตราการรดน้ำ ได้แก่ อัตราการรด 5 7 และ 10 เซนติเมตรต่อสัปดาห์
3. สายพันธุ์หญ้าเนเปียร์ที่นำมาปลูกในการทดลองคือ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1
4. น้ำตัวอย่างที่นำมาทดสอบทดลอง คือ น้ำทิ้งจากบ่อบำบัดสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
5. วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง วิเคราะห์ สี พีเอช บีโอดี ซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ความเป็นต่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งระเหยง่าย ทีเคเอ็น ทีโอดี ฟีนอลรวม การจำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลิก จำนวนแบคทีเรีย และโครงสร้างแบคทีเรีย
6. วิเคราะห์ลักษณะหญ้าเนเปียร์ได้แก่ วิเคราะห์ ความสูง น้ำหนัก โปรตีน ไฟเบอร์ Acid Detergent Fiber (ADF) Neutral Detergent Fiber (NDF) และสารประกอบฟีนอลิกของหญ้าเนเปียร์
7. การทดลองการลดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินและดินร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ดำเนินการในโรงเรือนเพาะชำ
8. การวิเคราะห์หาปริมาณรวมของสารประกอบฟีนอลิกดำเนินการด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Method (Waterman & Mole, 1994) โดยใช้กรดแกลลิก (gallic acid) เป็นสารมาตรฐาน
9. การวิเคราะห์หาอนุพันธ์สารประกอบฟีนอลิกดำเนินการโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)
10. วิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิกด้วยวิธี Most Probable Number (MPN) วิเคราะห์โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์กลุ่มเด่นโดยใช้เทคนิค Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้ทำให้ได้มาซึ่งการลดค่าสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับหญ้าเนเปียร์และศึกษาปริมาณชีวมวลของหญ้าเนเปียร์จากการปลูกตามธรรมชาติและการปลูกโดยการรดน้ำทั้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ นอกจากนี้ผลการศึกษานำไปสู่การกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการบำบัดโดยดินร่วมกับหญ้าเนเปียร์สำหรับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณลักษณะน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำทิ้งและวิธีการสกัดน้ำมันปาล์ม ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดในระหว่างกระบวนการผลิตซึ่งมีประมาณ 5.31 และ 4.59 ลูกบาศก์เมตรต่อตันน้ำมันปาล์มดิบ (Kaewmai et al., 2012; 2013) หรือ 0.5 - 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของทะลายปาล์มสด (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2554) น้ำเสียส่วนใหญ่มาจากน้ำนึ่งปาล์มหรือน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ (sterilizer-condensate) มีอัตราการเกิดน้ำเสียประมาณ 0.15 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด และน้ำทิ้งจากเครื่องตีแคนเตอร์หรือเครื่องเซพพาเรเตอร์ ซึ่งมีอัตราการเกิดน้ำเสียระหว่าง 0.48-0.74 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะลายปาล์มสด (ธนารักษ์ พงษ์เกษตรรา, 2543)

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบเป็นกระบวนการที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหาทางด้านน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นปัญหาสำคัญ โดยที่คุณภาพน้ำหลังบำบัดไม่ผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ เนื่องจากมีปริมาณและความสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์ สี ในปริมาณสูง ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (แสดงเป็นค่าเฉลี่ย)

คุณลักษณะ	น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อ	น้ำเสียจากเครื่องสกัดแยกน้ำมัน	น้ำเสียจากเครื่องเหวี่ยง	สลัดจ์	บ่อรวบรวมน้ำเสีย
สี	น้ำตาลดำ	น้ำตาล	น้ำตาลดำ	น้ำตาล	น้ำตาลคล้ำ
พีเอช (pH)	5.1	4.6	4.9	4.8	4.1-4.6
บีโอดี	31,620	21,000	45,375	66,550	50,000-60,000
ซีโอดี	65,969	38,246	67,567	105,955	80,000-150,000
กรดระเหย (ในรูปกรดอะซีติก)	3,150	1,638	2,273	5,355	3,100-5,800
ความเป็นด่าง	1,576	480	86	200	68-200
ไขมัน (Oil&Grease)	20	-	4	1,130	15-2,500
ปริมาณของแข็ง	54,546	25,634	47,242	448,570	49,000-88,500
ของแข็งระเหยได้	44,354	23,056	39,617	108,590	4,200-82,000
ของแข็งแขวนลอย	2,600	2,900	20,300	40,000	18,500-52,000
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	43	23	22	61	23-61
สารอินทรีย์	22	-	518	1,352	550-1,400

ค่าทุกค่ามีหน่วย mg/L ยกเว้นสีและพีเอช ที่มา : พูนสุข ประเสริฐสรรพและคณะ (2543)

2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีระบบบำบัดน้ำเสีย จำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ (anaerobic pond)

บ่อหมักไร้อากาศสามารถรับน้ำเสียที่มีภาระอินทรีย์ (organic loading rate) ได้มากหรือมีค่าบีโอดีสูงๆ โดยทั่วไปบ่อหมักไร้อากาศเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ขนาดและจำนวนบ่อบำบัดขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของแต่ละโรงงานและปริมาณน้ำเสีย โดยทั่วไปมีความลึกประมาณ 2-4 เมตร บ่อหมักไร้อากาศมีความลึกค่อนข้างมากส่งผลให้สาหร่ายและการเติมออกซิเจนที่ผิวน้ำไม่สามารถผลิตและป้อนออกซิเจนได้ทันเนื่องจากน้ำเสียที่มีความสกปรกและความลึกส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถละลายน้ำได้ สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาเคมี ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นจากการหมักอันเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารประกอบซัลไฟด์อื่นๆ โดยส่วนใหญ่สารอินทรีย์เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ Rakamthong et al. (2011) แสดงคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักไร้อากาศ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

คุณลักษณะ	ค่า
สี	น้ำตาลเข้ม
พีเอช	9.5
ซีโอดี	1,586
ปริมาณของแข็ง	3,840
ของแข็งแขวนลอย	2,170
ปริมาณฟีนอล	43.0

ค่าทุกค่ามีหน่วย mg/L ยกเว้นสีและพีเอช

ที่มา : Rakamthong et al. (2011)

2.2.2. ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อหมักไร้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบก๊าซชีวภาพ (biogas) มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเนื่องจากน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตมีภาระอินทรีย์สูง การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digestion) สารอินทรีย์เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH₄) ประมาณ 60-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 28-38% และก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และไนโตรเจน (N₂) เป็นต้น ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงโดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงถึงประมาณ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร สามารถติดไฟได้ ก๊าซมีเทนจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อน

โดยตรง หรือสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น แต่หากปล่อยให้ก๊าซมีเทนระเหยไปตามธรรมชาติหรือไม่ใช้ประโยชน์จากที่กล่าวข้างต้นจะก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ก๊าซมีเทนมีผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบมากกว่าถึง 25 เท่า น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 12-16 ลูกบาศก์เมตร ก๊าซชีวภาพนำไปใช้ในการผลิตพลังงานเป็นกระแสไฟฟ้าและขายให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1-1.2 หน่วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) ตารางที่ 2-3 แสดงถึงคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดก๊าซชีวภาพ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Bunrung et al., 2011)

ตารางที่ 2-3 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดก๊าซชีวภาพ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

คุณลักษณะ	ค่า
สี	น้ำตาล
พีเอช	7.5
ซีโอดี	1,832
ปริมาณของแข็ง	4,340
ของแข็งแขวนลอย	2,370
ปริมาณฟีนอล	21.0

ค่าทุกค่ามีหน่วย mg/L ยกเว้นสีและพีเอช

ที่มา : Bunrung et al. (2011)

จากงานวิจัยของ Kaewmai et al. (2013) สํารวจโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย 4 โรงงาน พบว่าปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil; CPO) มีค่าระหว่าง 11,840-46,251 ton/year มีค่าเฉลี่ยเป็น 31,297 ton/year ก่อให้เกิดน้ำเสียระหว่าง 33,075-107,000 m³/year มีค่าเฉลี่ยเป็น 75,929 m³/year ค่าซีโอดีของน้ำเสียและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดประสิทธิภาพการบำบัดแต่ละบ่อและประสิทธิภาพการบำบัดรวมของระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงดังในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ค่าซีไอดีของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัด ประสิทธิภาพการลดซีไอดีในแต่ละบ่อและประสิทธิภาพในการลดปริมาณซีไอดีรวมของระบบบำบัดน้ำเสียที่มีผลิตภัณฑ์ชีวภาพ (n=4)

	ค่าเฉลี่ย	ช่วงน้อยสุดถึงมากที่สุด
ลักษณะน้ำเสีย (mg/L)		
ซีไอดีน้ำเสีย	93,044	53,082-124,342
ซีไอดีเข้าระบบไบโอแก๊ส	73,027	52,576-92,516
ซีไอดีออกจากระบบไบโอแก๊ส	16,085	3,902-31,982
ซีไอดีที่ออกจากบ่อบำบัดสุดท้าย	4,694	488-13,437
ประสิทธิภาพการลดซีไอดี (%)		
บ่อเปิดลดความร้อน	27	13-40
ระบบไบโอแก๊ส	81	65-93
บ่อปรับเสถียร	71	44-91
ประสิทธิภาพการลดซีไอดีรวม (%)		
บ่อเปิดลดความร้อน	27	13-40
ระบบไบโอแก๊ส	83	74-96
บ่อปรับเสถียร	96	89-99

ที่มา : Kaewmai et al. (2013)

สีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

สีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มส่วนมากจะเป็นสีแท้หรือสีจริง (true color) ซึ่งเป็นสีที่เกิดจากสารต่างๆ ที่ละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่ก่อให้เกิดเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยาก ประเภทกรดฮิวมิก และฟัลวิค (humic acid and fulvic acid) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายและผลผลิตจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต การกำจัดสีแท้ทำได้ยาก เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ (กัณฑ์ศรี ศรีพงษ์พันธุ์, 2547 ; สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

รูปแบบการบำบัดสีมีหลายประเภท ได้แก่ การกรองด้วยเยื่อแผ่นเมมเบรน การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ การออกซิเดชันทางเคมี การสร้างรวมตะกอน การดูดซับด้วยสาหร่าย การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย การย่อยสลายโดยเชื้อรา ซึ่งการบำบัดส่วนใหญ่มีราคาแพงสำหรับการวิจัยใช้การบำบัดสีด้วยการดูดซับด้วยดินในคอลัมน์ทดลองซึ่งจัดเป็นการบำบัดสีทางกายภาพรวมกับการบำบัดสีโดยการปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อสามารถดูดน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณน้ำทิ้งและเพิ่มอัตราการคายระเหย และยังส่งเสริมให้ปริมาณจุลินทรีย์ดินในบริเวณรากพืชเพิ่มมากขึ้น

2.3 สารประกอบฟีนอลิก

2.3.1 แหล่งกำเนิดสารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกที่ปนเปื้อนในธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดการการปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ โรงงานปิโตรเคมี โรงงานผลิตน้ำมันมะกอก โรงงานถ่านหิน (Aksu, 2005; Yang et al., 2006; Bai et al., 2007) โรงงานเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสารกำจัดศัตรูพืช โรงงานเคลือบสี (Diez et al., 1999; Jung et al., 2001; Aleksieva et al., 2002)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารมลพิษ เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์รวมทั้งแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้นๆ และส่งผลกระทบต่อมนุษย์หากมีสารประกอบฟีนอลิกปนเปื้อนในสัตว์หรือพืชที่มนุษย์กินเป็นอาหาร ส่งผลให้เกิดอาการคลื่นไส้ ถ้าปนเปื้อนสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิตจากการล้มเหลวของทางเดินหายใจ ส่วนมากพบสารประกอบฟีนอลิกมีความเข้มข้นตั้งแต่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pan and Kurumada, 2008) ส่วนน้ำทิ้งที่ออกจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบปนเปื้อนสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 5 ถึง 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 2-5) (Alam et al., 2009) ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ให้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจำเป็นต้องบำบัดเพื่อให้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำต่อไป

ตารางที่ 2-5 ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

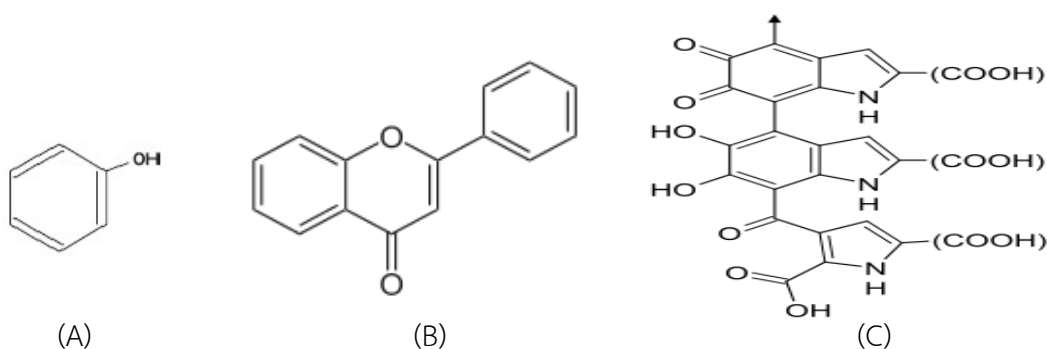
อุตสาหกรรม	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เยื่อกระดาษและกระดาษ	268
สิ่งทอ	12.3
ปิโตรเคมี	33.5
ถ่านหิน	4-4,780
น้ำมันมะกอก	3,000- 10,000
สกัดน้ำมันปาล์มดิบ	มากกว่า 1,000

ดัดแปลงจาก พนิดา ไต้ะสุ (2555)

2.3.2 สารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

สารประกอบฟีนอลิกอยู่ในส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้น ผล ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ของพืช มีลักษณะเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่และพืชแต่ละชนิดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกแตกต่างกัน (Bodini et al., 2010) สารประกอบฟีนอลิกมีลักษณะโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH-group) ต่ออยู่เป็นหลัก โดยสารประกอบฟีนอลิกจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ตามจำนวนวงแหวนอะโรมาติกของโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ 1) Monocyclic phenols มีวงแหวนอะโรมาติก 1 วงสามารถพบได้ทั่วไปในพืช เช่น phenol (รูปที่ 2-1A), catechol, hydroquinone และ p-hydroxycinnamic acid 2) Dicyclic phenols มีวงแหวนอะโรมาติก 2 วง เช่น

flavonoids (รูปที่ 2-1B) และ lignans 3) Polycyclic phenols หรือ polyphenol มีวงแหวนอะโรมาติกมากกว่า 2 วง ได้แก่ lignins, catechol, melanins (รูปที่ 2-1C) และ tannins ทั้งนี้แต่ละโรงงานมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าแตกต่างกันและโรงงานส่วนใหญ่มีค่าสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ๆ เนื่องจากสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีและความเข้มข้นในน้ำทิ้งสูง จึงส่งผลให้น้ำทิ้งเกิดเป็นสีน้ำตาล โดยเกิดจากปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) กรณีที่สารประกอบฟีนอลิกมีระดับความเข้มข้น 5 - 25 มิลลิกรัมต่อลิตร หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (Brown et al., 1967) ทั้งยังมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพ (Meyer et al., 1984) นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกมีความเป็นพิษสูงและสามารถแพร่เข้าสู่ร่างกาย โดยซึมผ่านทางผิวหนังได้ง่าย ส่งผลให้เกิดอาการปวดหัว หน้ามืด สารฟีนอลในสถานะของแข็งส่งผลให้ผิวหนังถูกเผาไหม้หากมีการสัมผัส และไอของสารฟีนอลซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและระบบทางเดินหายใจ



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกชนิดต่าง ๆ (A) phenol, (B), flavonoids และ (C) melanins

ที่มา : Quideau et al., (2011)

2.3.3 การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกด้วยวิธีการทางชีวภาพ

การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกในปัจจุบันใช้องค์ความรู้และเทคโนโลยีต่าง ๆ ประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม โดยจำแนกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ (Merkel et al., 2005) การบำบัดทางกายภาพมีหลักการ คือ การแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยมีการนำน้ำที่มีการปนเปื้อนสารมลพิษมากรองผ่านแผ่นกรองชนิดต่างๆ เช่น การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) การกรองโดยใช้เยื่อแผ่น (membrane) ข้อดีของวิธีการทางกายภาพ คือ สามารถกำจัดสารแขวนลอยได้ดี และมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถกำจัดสารที่ละลายปนมากับน้ำได้ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนการบำบัดทางเคมีมีหลักการ คือ การใช้สารเคมีเติมลงไปในการเปลี่ยนแปลงรูปของสารมลพิษให้อยู่ในรูปที่กำจัดได้ง่ายและปรับสภาพให้เป็นกลาง เช่น การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) การสะเทิน (neutralization) ข้อดีของวิธีการทาง

เคมี คือ สามารถกำจัดสารมลพิษได้อย่างรวดเร็ว และมีข้อจำกัด คือ ก่อให้เกิดสารตกค้างในระบบบำบัด ค่าใช้จ่ายสูง ส่วนวิธีการทางชีวภาพนั้นมีหลักการ คือ การใช้สิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย และ/หรือพืช เพื่อบำบัดสารมลพิษ เป็นวิธีการที่ไม่เหลือสารตกค้างในระบบบำบัดส่งผลให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ทำลายระบบนิเวศน์ มีต้นทุนและค่าดำเนินการไม่สูงมากนัก อีกทั้งเป็นวิธีที่มีการยอมรับและถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษอย่างแพร่หลาย เทคนิคในการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพซึ่งเป็นที่นิยมใช้ ได้แก่ การส่งเสริมการเจริญและการทำงานของแบคทีเรียในพื้นที่ (indigenous microorganisms) โดยการเติมปัจจัยที่จำกัด (limiting factor) เช่น สารอาหาร อากาศลงไปในพื้นที่ปนเปื้อนหรือเรียกว่าการกระตุ้นทางชีวภาพ (biostimulation) ส่งให้การย่อยสลายมลพิษทำได้ดีขึ้นและการปลูกพืชที่มีความเฉพาะเจาะจงสำหรับการบำบัดเพื่อเป็นแหล่งอาศัยของแบคทีเรียในดิน ส่งผลให้มีการเจริญของแบคทีเรียจำนวนมาก ประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีขึ้น นอกจากเป็นการเพิ่มศักยภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกแล้ว ยังมีผลผลิตเป็นชีวมวลของพืชอีกทางหนึ่ง

2.4 การบำบัดโดยดิน (land treatment)

การบำบัดน้ำเสียโดยดินเป็นการเปลี่ยนแหล่งปนเปื้อนจากน้ำทิ้งสู่การปนเปื้อนในดิน โดยใช้ดินเป็นตัวดูดซับมลสารไว้และเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน การใช้น้ำเสียดฟืชเกษตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดโดยดิน โดยดินและพืชจะเป็นตัวกรองในการดูดซับสารพิษและสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยผ่านกระบวนการบำบัดทางธรรมชาติในกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในดิน โดยพืชและน้ำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การบำบัดวิธีนี้ควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาง่าย เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ใช้พลังงานต่ำ แต่ต้องใช้พื้นที่มากในการดำเนินการ เหมาะกับลักษณะน้ำเสียที่มีแร่ธาตุอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่พืช แต่ถ้าเป็นน้ำเสียที่มีสารพิษปนเปื้อน ต้องคำนึงถึงปริมาณและชนิดของสารพิษด้วย การบำบัดโดยดินยังมีผลพลอยได้เป็นการเพิ่มรายได้จากการขายพืชผลทางการเกษตร ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและใช้พลังงานน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น ระบบตะกอนเร่ง ระบบโปรยกรอง ระบบสระเติมอากาศ เป็นต้น ลดการใช้ปุ๋ยเคมี ตลอดจนยังเป็นการพัฒนาและอนุรักษ์พื้นที่ที่ปลูกต้นไม้และเกิดความยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรให้เกิดความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น (เกศษรรัตน์, 2550 อ้างถึงเสนีย์ กาญจนวงศ์ และคณะ, 2545 ; Thongnuekhang et al., 2004)

2.4.1. กระบวนการซึมช้า (slow rate process)

กระบวนการซึมช้าเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยการรดน้ำสำหรับเกษตรกรรมซึ่งมีการปลูกพืชร่วมด้วย โดยใช้วิธีการฉีดพ่นกระจายน้ำให้เป็นฝอย (sprinkler System) หรือวิธีการขุดร่องแล้วกระจายน้ำเสียดตามร่องน้ำ การบำบัดอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยการระเหยตามธรรมชาติ ดูดติดผิวดูดซับโดยดิน การดูดสารอินทรีย์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช การย่อยสลายด้วยแบคทีเรียและไหลซึมลงใต้ดิน ดินที่ใช้รดน้ำดินต้องเป็นดินที่น้ำซึมผ่านได้ดี กระบวนการซึมช้าสามารถรับน้ำได้ในอัตรา 0.6-6.0 m/year โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 1.3-10.0 cm/week และควรมีความลาดของพื้นที่ต่ำเนื่องจากน้ำทิ้งจะได้ไหลลงผ่านชั้น

ดินไม่ไหลบนผิวน้ำดิน (US.EPA., 1981) การบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการซึมเข้าส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนการใช้น้ำผลผลิตของพืช และการเปลี่ยนน้ำทิ้งให้กลายเป็นน้ำใช้สำหรับการเกษตรในฤดูแล้งซึ่งเป็นการอนุรักษ์น้ำ รวมทั้งมีศักยภาพการกำจัดมลสารได้ดี การกระจายของมลสารมีผลต่อดินและพืชน้อยมาก แต่ต้องการพื้นที่กว้างหากน้ำทิ้งมีปริมาณมาก วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการซึมเข้า ได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้ง การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในทางเกษตรกรรมแทนน้ำทิ้ง การใช้ประโยชน์จากสารอาหารในน้ำเสียและเป็นการอนุรักษ์น้ำ (เกสซ์ชรัตน์, 2550)

2.4.2 กระบวนการซึมเร็ว (rapid infiltration process)

กระบวนการซึมเร็วเป็นการปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น เหมาะสำหรับโรงงานที่มีน้ำทิ้งปริมาณมากหรือมีพื้นที่สำหรับการรดจำกัด กระบวนการซึมเร็วน้ำจะซึมผ่านผิวดินอย่างรวดเร็ว โดยการกระจายลงในบ่อโดยดินที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นดินที่มีความพรุนสูง เช่นทราย หรือดินร่วนปนทราย มีระบบท่อรองรับน้ำภายใต้บ่อเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ต่อไป การปลูกพืชไม่เหมาะสำหรับกระบวนการซึมเร็ว เนื่องจากพืชรับปริมาณน้ำทิ้งมากเกินไป กระบวนการซึมเร็วสามารถรับภาระบรรทุกได้มากกว่ากระบวนการซึมช้า โดยสามารถรับน้ำทิ้งได้ในอัตรา 6-125 m/year โดยปกติจะปล่อยน้ำทิ้งในอัตรา 10-240 cm/week และควรมีความลาดของพื้นที่ต่ำ เพื่อให้ น้ำซึมผ่านชั้นดินได้ดี (US.EPA., 1981) ระบบนี้มีศักยภาพการกำจัดมลสารต่ำ วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการซึมเร็ว ได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้ง การเติมน้ำใต้ดิน (ground recharge) การฟื้นฟูน้ำที่ผ่านการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (เกสซ์ชรัตน์, 2550)

2.4.3 กระบวนการไหลล้นผิว (overland flow process)

กระบวนการไหลล้นผิวเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีการปลูกพืช มีกลไกการบำบัดส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างที่น้ำไหลผ่านพืชที่มีการเพาะปลูกไว้ เช่น ปฏิกริยาชีวเคมี การดูดซับ การตกตะกอน และการกรองโดยหญ้า กระบวนการไหลล้นผิวเป็นการปล่อยให้น้ำเสียไหลลงไปตามพื้นที่ที่มีการปลูกพืช พื้นที่ควรมีความลาดชันประมาณ 2-8% เหมาะสำหรับดินที่ความพรุนน้อย เช่น ดินเหนียว น้ำลงดินซึมลงดินได้เพียงเล็กน้อย สามารถรับน้ำได้ในอัตรา 3-20 m/year โดยปกติจะรดน้ำในอัตรา 6-40 cm/week (US.EPA., 1981) วัตถุประสงค์ของกระบวนการไหลล้นผิว ได้แก่ เพื่อผลิตหญ้าซึ่งเป็นอาหารสัตว์และเพื่อการอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว (เกสซ์ชรัตน์, 2550)

วัตถุประสงค์ของกระบวนการรดน้ำทิ้งสามกระบวนการมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำที่ต้องการ รวมทั้งการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของน้ำ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ พื้นที่สำหรับรดน้ำ ปริมาณน้ำที่รด ชนิดของดินและอัตราภาระบรรทุกของน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยดินแบบต่างๆ

2.4.4 กลไกการบำบัดโดยดิน

กลไกการบำบัดโดยดินมีองค์ประกอบ 4 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ พีช ชั้นดิน แบคทีเรีย และน้ำ โดยมีกลไกการบำบัดดังนี้

1) พีช ทำหน้าที่สร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมให้แบคทีเรีย ลำต้นและใบช่วยให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอน รากพืชดูดน้ำไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตช่วยชะลอความเร็วของน้ำให้ช้าลง และพีชยังเป็นที่อยู่อาศัยของแบคทีเรีย พีชสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนในดินให้เพิ่มขึ้น โดยนำออกซิเจนในอากาศลงไปยังรากและรากฝอย ส่งผลให้บริเวณรากพืชมีปริมาณจุลินทรีย์ที่ใช้ในอากาศเพิ่มมากขึ้น ส่วนบริเวณที่มีความลึกมากกว่าบริเวณรากพืชจะเป็นบริเวณที่ไร้ออกซิเจน ปฏิกิริยาของธาตุไนโตรเจน เกิดขึ้นที่บริเวณที่อยู่ระหว่างพื้นที่ที่มีออกซิเจนและพื้นที่ที่ไร้ออกซิเจน บริเวณนี้จึงมีความสำคัญเนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนธาตุ

2) ชั้นดิน ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของพีช เป็นที่อยู่ของพีช เป็นส่วนที่รากพืชยึดเกาะ และเป็นพื้นที่สำหรับประสารเชิงซ้อน สารประกอบต่างๆ มาทำปฏิกิริยากัน เมื่อนำน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมารดดินอนุภาคของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำทิ้งจะถูกดูดซับไว้บริเวณผิวดิน เนื่องจากช่องว่างของอนุภาคดินทำหน้าที่เป็นตัวกรอง รวมทั้งเกิดการดูดติดและการดูดซับโดยดิน

3) แบคทีเรีย ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเพื่อเป็นอาหารและพลังงานในการดำรงชีวิต (พีชร สนั่นพัฒน์พงศ์, 2555) หน้าที่หลักของแบคทีเรียมี 2 ส่วน คือ (1) การย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียจะย่อยสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป ซีโอดี และ สารแขวนลอย เมื่อรดน้ำทิ้งลงในดินจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ ฮิวมัส และ สารอาหารพืช ฮิวมัสช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยให้อนุภาคดินจับตัวกันเป็นเม็ดดิน ทำให้ดินมีช่องว่างมากขึ้น การซึบน้ำและระบายอากาศทำได้ดีขึ้น พีชได้รับประโยชน์โดยตรงจากสารอาหารที่เกิดขึ้น เช่น ไนเตรต แอมโมเนีย ฟอสเฟต เป็นต้น ผลสุดท้ายน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดโดยดินมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง (2) การตรึงไนโตรเจน แบคทีเรียในดินบางชนิดสามารถเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีทั้งชนิดที่ตรึงไนโตรเจนได้โดยอิสระด้วยกระบวนการทางเคมีและตรึงไนโตรเจนได้เมื่ออาศัยสิ่งมีชีวิตอื่น โดยขั้นแรกก๊าซไนโตรเจนจะถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนีย และมีเอนไซม์ไนโตรจีเนสเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับกรดอินทรีย์กลายเป็นกรดอะมิโน และเปลี่ยนเป็นโปรตีนเมื่อแบคทีเรียตายและถูกย่อยสลาย สารประกอบไนโตรเจนภายในเซลล์จะกลายเป็นอาหารพืช

4) น้ำ ก๊าซและสารต่างๆในน้ำทิ้งที่ไหลผ่านชั้นดิน ส่งผลให้แบคทีเรียในชั้นดินย่อยสลายสารอินทรีย์ โมเลกุลของสารที่ปนเปื้อนกับน้ำทิ้งจึงมีขนาดเล็กลง และช่วยในการเจริญเติบโตของพีช สร้างสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการการเจริญเติบโตของพืชส่งผลให้พีชสามารถดูดสารอาหารได้ง่ายขึ้น และแบคทีเรียสามารถดำรงชีวิตได้เนื่องจากมีสารอาหารจากน้ำทิ้งอย่างสม่ำเสมอ

กลไกการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินมี 3 กลไก คือ (1) กลไกทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง การกรอง การดูดติดผิวและการระเหย (2) กลไกทางเคมี ได้แก่ การพอร์ม

ตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ การดูดซับสารอาหาร การย่อยสลาย และการเปลี่ยนแปลงของสารที่ไม่เสถียร (3) กลไกทางชีวภาพ การบำบัดสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ละลายน้ำ การสลายตัวตามธรรมชาติ

2.4.5 คุณลักษณะของดิน

ดินมีลักษณะร่วนไม่ติดเป็นก้อนเดียวกัน เป็นวัตถุประสงค์ตามธรรมชาติที่เกิดจากการผุพังสลายตัว การทับถมของหิน ทราย และแร่ธาตุอื่นๆ เกิดการผสมกับอนินทรีย์สารและอินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่มาจากการย่อยสลายของแร่ธาตุต่างๆ และซากพืชซากสัตว์จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน รากของพืชสามารถซอนไซไปในดินได้อย่างอิสระทั้งในด้านแนวขวางและในแนวราบ ดินที่มีชั้นดินลึกพืชสามารถยึดเกาะและมีความแข็งแรงสูง ด้านทานลมพายุที่มีความรุนแรงได้ ดินจึงเป็นที่ยึดเหนี่ยวของต้นพืชในการเจริญเติบโต อีกทั้งดินมีอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์สาร ที่รากพืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ ดินจึงเป็นแหล่งอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช (เพ็ญญา ทองประไพ, 2555) โดยสามารถแบ่งองค์ประกอบของดินออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1) อนินทรีย์สาร มีปริมาณในดินประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นสารที่เกิดจากหินต่างๆ และแร่ธาตุต่างๆ ที่สลายตัวทั้งในด้าน กายภาพ เคมีและชีวภาพ อนินทรีย์สารเป็นแหล่งธาตุอาหารที่สำคัญ ควบคุมลักษณะเนื้อดิน ความหยاب ความละเอียดของดิน รวมทั้งการเกิดขบวนการทางเคมีในดิน อนินทรีย์สารจึงเป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช

2) อินทรีย์วัตถุ มีปริมาณประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยเกิดการทับถมกันของซากพืชซากสัตว์ที่ย่อยสลายแล้ว อินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งธาตุอาหารหลักสำหรับการเจริญเติบโตของพืช โดยมีธาตุอาหารที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและกำมะถัน เป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรีย อีกทั้งยังส่งเสริมสมบัติทางกายภาพของดิน ทำให้ดินร่วนขึ้น ระบายน้ำและอากาศได้ดีขึ้น ส่งผลให้อินทรีย์วัตถุมีความสำคัญกับการเจริญเติบโตของพืชและการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรีย

3) น้ำ ในดินมีปริมาณน้ำประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำสามารถอยู่ในช่องระหว่างเม็ดดิน (aggregate) หรืออนุภาคดิน ถ้าน้ำในดินมีปริมาณน้อยลงแรงยึดเหนี่ยวที่มีต่อน้ำจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ธาตุอาหารสามารถเคลื่อนย้ายไปยังรากพืชได้ง่ายขึ้นเนื่องจากน้ำในดินละลายธาตุอาหารพืช แต่เมื่อน้ำปริมาณน้อยเกินไปแรงยึดเหนี่ยวของดินจะเพิ่มขึ้น น้ำในอนุภาคดินพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด เนื่องจากพืชไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของดินได้ ทั้งนี้หากน้ำในดินมีปริมาณมากพืชสามารถนำน้ำในดินไปใช้ประโยชน์ต่อพืชได้ง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวของดินต่ำ

4) อากาศ มีปริมาณอากาศในดินประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยอากาศที่พบในดิน ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอากาศจะแทรกอยู่ตามช่องว่างในชั้นดิน อากาศจะมีความสำคัญกับแบคทีเรียในดินเป็นอย่างมาก ทำให้แบคทีเรียที่ใช้อากาศสามารถอาศัยในดิน และย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ และรากพืชจำเป็นต้องใช้อากาศในการหายใจและดึงดูตน้ำและธาตุอาหาร รวมทั้งกระบวนการแปรสภาพของธาตุต่างๆ ในดิน

2.4.6 การดูดซับของดิน

การดูดซับ คือ การเคลื่อนย้ายจากแก๊สหรือของเหลวมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว โดยของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนที่มาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายสารจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมในพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นที่ผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยรูปแบบการดูดซับจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) เป็นแรงดึงดูดที่ค่อนข้างอ่อน ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และคุณสมบัติทางเคมีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลพื้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับซ้อนกันหลายชั้น และจำนวนชั้นของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนแรงดึงดูดลดลงจนไม่สามารถตัวดูดซับต่อไปได้ การกระจายตัว การเหนี่ยวนำ ของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ ระบบจะมีความเสถียรหากการดูดซับเกิดขึ้นในอุณหภูมิต่ำ

2) การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เป็นแรงที่เกิดจากตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดยการสร้างพันธะเคมี มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (พันธะโควาเลนต์) หรือมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (พันธะไอออนิก) แรงยึดเหนี่ยวจะสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ส่งผลให้การดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน) การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นเฉพาะเจาะจงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับจะมีลักษณะเป็นชั้นเดียว ถ้าอุณหภูมิของระบบสูงการดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้ดี (จตุพรและนุรักษ์, 2547) ดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

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

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้วยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับ

เป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม โดยเป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณพื้นผิว และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล พฤติกรรมการดูดซับจะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพ และเคมี ตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ

2.4.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีความแตกต่างกัน ซึ่งสภาพของปัจจัยต่างๆ ต้องมีความเหมาะสมจึงจะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถแบ่งได้ 5 ส่วน ได้แก่

1) ธรรมชาติของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวดูดซับ โดยปริมาณการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยจะมีการดูดซับได้น้อย แต่หากตัวดูดซับมีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะสามารถดูดซับได้มาก การดูดซับจะแปรผกผันตรงกันพื้นที่ผิวสัมผัส หากดูดซับมีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะทำให้การดูดซับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยต่างๆ ทำได้ดีขึ้น และรูพรุนเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญหากตัวดูดซับมีรูพรุนมากแสดงว่ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น โดยดูดซับไว้ในรูพรุนในตัวดูดซับหากตัวดูดซับมีรูพรุนน้อยพื้นที่ผิวจะมีน้อยเช่นเดียวกับการดูดซับจะทำได้น้อยกว่าตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากกว่า เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ ตัวดูดซับที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ, 2546)

2) ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ การถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ การถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงหากตัวดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากการดูดซับจำเป็นต้องทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแยกออกจากน้ำไปยึดเกาะยังพื้นผิวของตัวดูดซับแทน หากโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีขนาดใหญ่ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลง ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดติดพื้นผิวได้มากขึ้น (ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ, 2546)

3) อุณหภูมิ อุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการดูดซับทางกายภาพจะเป็นกระบวนการคายความร้อน และเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับจะลดลงส่งผลให้ตัวดูดซับดูดซับโมเลกุลหรือสารแขวนลอยต่างๆ ได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงการดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้น้อยลง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีจะดูดซับได้ดีในอุณหภูมิสูง

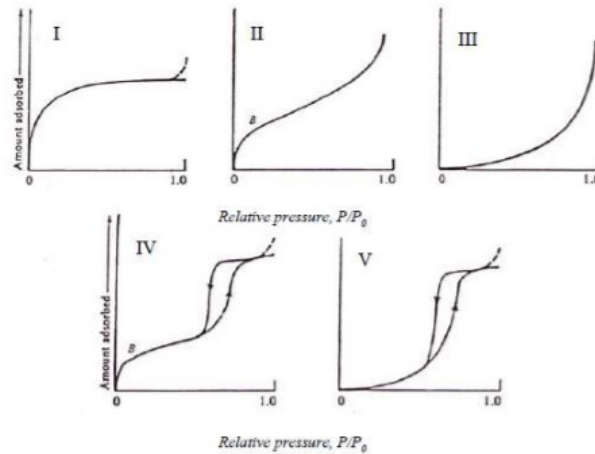
4) พีเอช เมื่อสารละลายที่มีความเป็นเบสไหลลงไปยังตัวดูดซับจะทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดไอออนบวกได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายที่มีความเป็นกรดไหลลงไปยังตัวดูดซับจะส่งผลให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) บนพื้นที่

ผิวของตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดไอออนลบได้มากขึ้น (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2550)

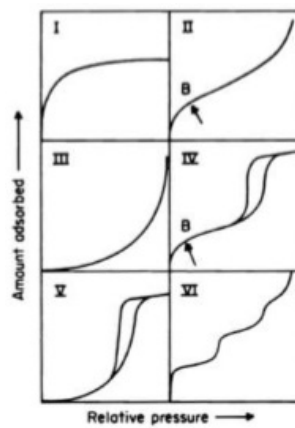
5) ความปั่นป่วนของระบบ กลไกการทำงานของ การดูดซับ คือ การแพร่ผ่านฟิล์ม และการแพร่เข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อระบบมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากส่งผลให้ตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้น้อย แต่หากระบบมีความปั่นป่วนสูงชั้นฟิล์มที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับจะถูกทำลายเสถียรภาพ ทำให้ชั้นฟิล์มมีความบางมาก ตัวถูกดูดซับต่างๆสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (ประรัชกรณ สาคิตคุณ, 2546)

2.4.6.2 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในรูปของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในรูปของแข็ง โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคาย การดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และส่งผลให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อน สูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะบ่งบอกเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอม การดูดซับของสมดุลแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2-2 (Wang et al., 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอม และการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่ง ทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังรูปที่ 2-3 (IUPAC, 1985)



รูปที่ 2-2 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด (Wang et al., 2012)



รูปที่ 2-3 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หากแกน P/P_0 การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย การดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอิมมิดีที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้ง เรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) หรือไม่มีรูพรุน (nonporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ต่อมาจากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (break through) บ่งบอกถึงการดูดซับแบบ

ชั้นเดียว จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรก ไอโซเทอมลักษณะนี้เรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)

แบบ III เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมากแต่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะอ่อน จากกรณีนี้จะส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัดซึ่งเป็นแบบพิเศษ

แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมาก เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนตัวดูดซับอีกครั้ง

แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงใกล้เคียงกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III

แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้นๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้นๆ

2.4.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของตัวถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่สมดุล (adsorbate) โดยการดูดซับในอุณหภูมิคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) มีโครงสร้างไอโซเทอมแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐาน คือ

- เหมาะสำหรับการดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีตำแหน่งของการดูดซับและมีจำนวนที่แน่นอน
- ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าเท่ากันและคงที่ ตำแหน่งใกล้เคียงกันไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

● โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง อย่างไรก็ตามสมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่าค่าการดูดซับที่สมดุล q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \dots (2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad \dots (2.3)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L=1$ การดูดซับ เป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L=0$ การดูดซับเกิดการผันกลับได้ (irreversible)

2) ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm) สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ พื้นที่ผิวและพลังงานมีการ

กระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลังใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots (2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \dots (2.5)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L) q_e คือปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล K_F คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g) n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมี จุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ถ้าเส้นกราฟที่ได้มีความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับและหากน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

3) ทฤษฎีการดูดซับของ BET ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อไป โมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ ซึ่งเปรียบเสมือนอยู่ในภาวะอิมิตัวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

$$\frac{1}{W \left(\frac{P_0}{P} \right) - 1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1 \left(\frac{P_0}{P} \right)}{W_m C} \quad \dots (2.6)$$

เมื่อ

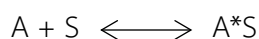
P	คือ ความดันของการดูดซับ
P_0	คือ ความดันอิมิตัว
W	คือ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ
W_m	คือ น้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง
C	คือ ค่าคงที่

ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้นคูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น สมการ BET นี้ ใช้ได้ดีในช่วงความดันสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.2 การหาพื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี BET เป็นการวัด พื้นที่ผิวโดยการคำนวณการดูดซับของแก๊ส คือการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ สภาวะที่เกิดการดูดซับทางกายภาพ โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นเส้นตรงความชันและจุดตัดบนแกนจะให้ปริมาณของแก๊สซึ่งใช้เพื่อจัดโมโนเลเยอร์ เมื่อรู้พื้นที่ของแต่ละโมเลกุลสามารถคำนวณพื้นที่ของการดูดซับได้

2.4.6.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับหนึ่ง (pseudo-first order) และลำดับสอง (pseudo-second order) เป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับหนึ่ง จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \dots (2.7)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับหนึ่ง (นาที่⁻¹) q_t คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g) q_e คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g) เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.7) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้ สมการคือ

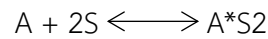
$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots (2.8)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับสอง สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับสองบนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \dots (2.10)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมลำดับสอง (นาที่⁻¹) เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.10) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้ สมการคือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad \dots (2.11)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \dots (2.12)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

3) การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จลนพลศาสตร์การดูดซับ นอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับ อาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย สมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_1 t^{0.5} + C \quad \dots (2.13)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min) เมื่อเขียนระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ k_i และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

2.5 หญ้าเนเปียร์ (Napier grass)

การทดลองครั้งนี้ใช้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ซึ่งเป็นหญ้าลูกผสมเนเปียร์สายพันธุ์หนึ่งที่เกิดจากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าเนเปียร์ไข่มุก หญ้าเนเปียร์ เป็นหญ้าที่มีรากยาว โตง่าย ดอกไม่ติดเมล็ดจึงไม่เป็นวัชพืช ทบสนองต่อการให้น้ำดีมาก ต้องการน้ำประมาณ 1,000 มิลลิเมตร/ปี เป็นพืชชอบแสง มีผลผลิตสูงเฉลี่ย 40-80 ตันสดต่อไร่ต่อปี และมีคุณค่าทางอาหารสูง ดังแสดงในตารางที่ 2-7 หญ้าเนเปียร์ทำเป็นหญ้าหมักโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเสริมใดๆ โดยพืชตระกูลหญ้าสามารถปล่อยกรดเพื่อดึงดูดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกสูงเมื่อทำงานร่วมกับการบำบัดโดยดิน (Khongkhaem et al., 2011) โดยหญ้าจะช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก เพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายได้ทั้งหมดในดิน และเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าดินที่ไม่ปลูกพืช (Anokhina et al., 2004; Huang et al., 2004) และมีโครงสร้างสารอาหารเหมาะต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่น ปัจจุบันมีการประกันราคาข้าว 300 บาทต่อตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559) จากข้างต้นหญ้าเนเปียร์สามารถส่งเสริมการเจริญและกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ตลอดจนสารประกอบฟีนอลิกของจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่อยู่บริเวณรากพืชได้ดี อีกทั้งหญ้าเนเปียร์ใช้เป็นชีวมวลในการนำไปผลิตเป็นพลังงานหรือจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้แก่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอีกด้วย

2.5.1 การเก็บเกี่ยวผลผลิต

การตัดหญ้าที่พัฒนาเจริญเติบโตและแข็งแรงเต็มที่ให้ตัดครั้งแรกหลังปลูกประมาณ 75 วัน จากนั้นให้ตัดทุกๆ 45-60 วัน การเก็บเกี่ยวหญ้าเนเปียร์ต้องตัดลำต้นให้ชิดดินที่สุดเพื่อให้ลำต้นสามารถแตกหน่อใหม่จากใต้ดินจะส่งผลให้ลำต้นมีขนาดโตวบอ้วนให้ผลผลิตสูง ถ้าตัดสูงเหลือข้อไว้จะมีแขนงออกมาจากข้อข้อส่งผลให้ลำต้นเล็กและได้ผลผลิตต่ำ

การปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในเขตที่มีปริมาณการให้น้ำเพียงพอ มีการใส่ปุ๋ยสม่ำเสมอ สามารถตัดหญ้าเนเปียร์ได้ปีละ 5-6 ครั้ง ให้ผลผลิตน้ำหนัสดประมาณ 100 ตัน/ไร่/ปี การปลูกในพื้นที่ 1 ไร่ พบว่าสามารถเลี้ยงโคได้ 7-8 ตัว ตลอดทั้งปี

2.5.2 ข้อเปรียบเทียบกับหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์อื่นๆ

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการปลูกหญ้าเนเปียร์หลายสายพันธุ์ เช่น หญ้าบาน่า หญ้าอาลาฟิล หญ้าเนเปียร์ยักษ์ ซึ่งลักษณะประจำพันธุ์ดังนี้

- หญ้าบาน่า เติบโตเร็ว ลำต้นใหญ่อวบ ให้ผลผลิตสูง แต่การตอบสนองต่อการให้น้ำไม่ดีนักในฤดูหนาวที่มีความชื้นต่ำ ผลผลิตในฤดูหนาวจึงต่ำกว่าฤดูอื่นๆ และทำให้เกิดการคั่นคายเป็นเมื่อสัมผัสเนื่องจากมีขนที่ไอบามาก

- หญ้าอาลาฟิล เติบโตเร็ว ใบดกนุ่ม ให้ผลผลิตสูง แต่ถ้ากระทบอากาศหนาวจะออกดอกทันที ถึงแม้จะตัดแล้วให้น้ำให้ปุ๋ยต้นที่แตกออกมาใหม่ก็จะออกดอกจึงให้ผลผลิตต่ำในฤดูหนาว

- หญ้าเนเปียร์ยักษ์ เติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง ลำต้นใหญ่อวบ มีขนที่ไอบามาก ทำให้เกิดการคั่นคายเป็นเมื่อสัมผัส แก่เร็ว ลำต้นและใบแข็งเมื่ออายุมาก

ตารางที่ 2-7 คุณค่าทางโภชนาของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 กับหญ้าอื่นๆ

ชนิดหญ้า	วัตถุแห้ง (%)	% วัตถุแห้ง				
		โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใยรวม	เถา	คาร์โบไฮเดรต
เนเปียร์ปากช่อง 1						
ตัดที่อายุ 45 วัน	14.9	15.9	1.3	35.8	14.5	36.5
ตัดที่อายุ 60 วัน	18.3	12.6	1.2	42.6	12.3	33.3
รัฐ						
ตัดที่อายุ 45 วัน	21.2	8.6	1.8	30.0	8.8	50.8
ตัดที่อายุ 60 วัน	25.6	6.6	1.4	31.9	9.0	51.1
กินนีสีม่วง						
ตัดที่อายุ 45 วัน	22.6	7.9	1.2	35.5	10.7	44.7
ตัดที่อายุ 60 วัน	24.6	7.1	1.2	33.4	10.0	48.3
แพงโกล่า						
ตัดที่อายุ 45 วัน	25.2	7.8	1.6	32.3	8.1	50.2
ตัดที่อายุ 60 วัน	27.9	7.5	1.6	35.1	8.8	47.0

ฉลา พัทธ์สินสุข และคณะ (2553)

2.5.3 คุณสมบัติในการผลิตก๊าซชีวภาพ

หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีโครงสร้างสารอาหารเหมาะต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ เมื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่น โดยเฉลี่ยมีส่วนประกอบเป็น ลิกนิน 30.40% เซลลูโลส 36.34% เฮมิเซลลูโลส 34.12% (Andreia de Araújo Morandim-Giannetti et al., 2013) โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 6,860 – 7,840 ลบ.ม./ไร่/ปี สามารถนำไปผลิตก๊าซไบโอมีเทนอัดมีค่าความร้อนประมาณ 14 – 18 MJ/kg ที่สามารถทดแทนก๊าซ NGV ได้ประมาณ 3,118 - 3,563 กก./ปี เหมาะสมต่อการนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนมากกว่าหญ้าชนิดอื่น หญ้าเนเปียร์สดอายุประมาณ 60 วัน เมื่อทำการเก็บเกี่ยวและผ่านกระบวนการหมัก จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ โดยหญ้าเนเปียร์สด 1 ตัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 90 ลูกบาศก์เมตร เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 170 กิโลวัตต์ต่อวัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559)

2.6 การบำบัดสารไฮโดรคาร์บอนโดยรากพืช (rhizoremediation)

กลไกการบำบัดสารมลพิษโดยพืช (phytoremediation) มีหลายรูปแบบ ได้แก่ การสกัด/สะสมโดยพืช (phytoextraction หรือ phytoaccumulation) คือ การดูดซับสารปนเปื้อนและย้ายตำแหน่งของสารปนเปื้อนในดินโดยรากพืชไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืช และการทำให้เสถียรโดยพืช (phytostabilization) เป็นการดูดซับเพื่อลดการแพร่กระจายการปนเปื้อนโดยใช้พืช เกิดการสะสมหรือการตกตะกอนซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรากพืช โดยรากพืชอาจมีการผลิตสารบางชนิดที่ช่วยลดการละลายน้ำของสารมลพิษทำให้กระจายตัวได้น้อยลง ทั้งนี้กลไกทั้ง 2 รูปแบบเป็นกระบวนการที่สำคัญในการบำบัดโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเป็นการเปลี่ยนแหล่งที่อยู่ของโลหะหนักให้อยู่ในพืชเพื่อการจัดการที่ง่ายขึ้น ส่วนกลไกในการบำบัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญ ได้แก่ การย่อยสลายโดยพืช (phytodegradation) เกิดขึ้นได้ทั้งภายในต้นพืชหรือบริเวณรากพืช โดยอาศัยแบคทีเรียในการย่อยสลายสารมลพิษ ซึ่งพืชสามารถผลิตเอนไซม์ หลายชนิด เพื่อสร้างความจำเพาะในการบำบัดสารมลพิษแต่ละชนิด (Cunningham et al., 1995) และการบำบัดโดยรากพืช (rhizoremediation) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญเช่น การกรองโดยรากพืช (rhizofiltration) และการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียบริเวณรากพืช (rhizodegradation) การบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียบริเวณรากพืชเป็นกลไกที่สำคัญในการใช้พืชเพื่อบำบัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Gaskin and Bentham, 2010) ปัจจุบันการบำบัดโดยพืชได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น โดยนำมาใช้บำบัดสารมลพิษชนิดต่างๆ เช่น ปิโตรเลียม ยาฆ่าแมลง โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน เนื่องจากมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาระบบต่ำ และยังสามารถเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ สารอาหาร และออกซิเจนในดินผ่านทางพืชได้ ตลอดจนกระบวนการเมตาโบลิซึมของแบคทีเรียจะส่งผลต่อโครงสร้างและคุณภาพโดยรวมของดิน อีกทั้งรากพืชยังช่วยลดการถูกชะล้างพังทลายของดินได้อีกด้วย

การย่อยสลายสารมลพิษที่เกิดขึ้นบริเวณรากพืชอาศัยการทำงานของแบคทีเรียบริเวณรากพืชเป็นสำคัญ โดยพืชให้สารอาหารและที่ว่างสำหรับส่งเสริมการเจริญและอัตราการอยู่

รอดของแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้สารเปลี่ยนรูปไปและมีความเป็นพิษน้อยลง อีกทั้งพืชบางกลุ่มมีศักยภาพปลดปล่อยสารบางประเภทออกมาทางราก ได้แก่ น้ำตาล กรดอินทรีย์ คาร์โบไฮเดรต และสารอินทรีย์อื่น ๆ เช่น เทอร์ปีน ฟลาโวนอยด์ และสารที่มีองค์ประกอบของลิกนิน (Kumar et al. 2006; Singer et al., 2003) ที่ช่วยส่งเสริมการเจริญและชักนำเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนของแบคทีเรียท้องถิ่นและแบคทีเรียที่เติมลงไปบริเวณรากพืชได้ดี ในขณะที่แบคทีเรียช่วยลดความเป็นพิษในดินด้วยการย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนอย่างสมบูรณ์ (mineralization) ช่วยให้ธาตุอาหารในดินอยู่ในรูปสารละลายน้ำและพร้อมใช้มากขึ้นลดความเป็นพิษต่อพืชและการคายระเหยของพืช และผลิตภัณฑ์โมโนส่งเสริมการเจริญของพืช อีกทั้งเพิ่มชีวภาพพร้อมใช้ (bioavailability) ของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยการผลิตสารลดแรงตึงผิวทำให้การละลายน้ำของสารเพิ่มขึ้น (Khan et al., 2013; Pacwa-Plociniczak et al., 2011) นอกจากนี้สารตัวกลางที่ได้จากการย่อยสลายสารฟลาโวนอยด์โดยแบคทีเรียบริเวณรากพืช เช่น resorsinol, phloroglucinol phenylacetic acid, cinnamic acid และ protocatechuic acid ทำให้แบคทีเรียปรับตัวได้ดีและย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนผ่านวิธีการย่อยสลายแบบเดียวกันได้ดี (Kim et al., 2008)

2.7 การใช้พืชร่วมกับจุลินทรีย์ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก

การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืช (phytoremediation) เป็นการใช้ระบบการทำงานตามธรรมชาติของพืชเพื่อกำจัดสารพิษออกจากสิ่งแวดล้อม การประยุกต์ใช้งานมี 2 ประเภท คือการใช้พืชเพียงลำพัง และการใช้พืชร่วมกับแบคทีเรียซึ่งพืชจะช่วยส่งเสริมให้แบคทีเรียทำงานได้ดีขึ้น (Chouychai et al., 2009; Huang et al. 2005) การใช้พืชร่วมกับแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก โดยพืชจะช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก เพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายได้ทั้งหมดในดิน และเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าดินที่ไม่ปลูกพืช โดยเฉพาะในบริเวณไรโซสเฟียร์ของพืช (Anokhina et al., 2004; Huang et al., 2004) การใช้พืชร่วมกับแบคทีเรียในการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นกระบวนการที่เรียกว่าการกระตุ้นด้วยพืช (phytostimulation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่รากพืชยังมีชีวิตอยู่หลังสารออกมาหรือจากการสลายตัวของรากพืชที่ตายแล้ว หรือกระบวนการอื่นๆ ที่ให้สารอาหารเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน หรือเชื้อราไมคอร์ไรซา ทำให้แบคทีเรียเหล่านี้ย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น (McCutcheon and Schnoor, 2003) การทำงานร่วมกันระหว่างพืชกับแบคทีเรียในการบำบัดสารมลพิษ โดยทั่วไปแล้วแบ่งได้เป็นสองแบบคือความสัมพันธ์ระหว่างพืชกับแบคทีเรียแบบจำเพาะและไม่จำเพาะ ความสัมพันธ์แบบจำเพาะเป็นความสัมพันธ์ที่พืชเลือกกลุ่มแบคทีเรียเฉพาะเพื่อประโยชน์ในการกำจัดสารมลพิษ ตัวอย่างเช่น สารอินทรีย์กลุ่มโพลีฟีนอลที่หลังจากรากพืชกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษของแบคทีเรีย ส่งผลให้แบคทีเรียย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น การคัดเลือกพืชที่สร้างสารกลุ่มโพลีฟีนอลที่สนับสนุนการเจริญของแบคทีเรียที่ย่อยสลายโพลีคลอรีเนตเตตไบฟีนิล (polychlorinated biphenyl; PCB) เช่น หม่อนสามารถกระตุ้นการย่อยสลายของ

แบคทีเรียที่สามารถย่อยสลาย PCB ที่ปนเปื้อนในดินได้ดี ส่วนความสัมพันธ์แบบไม่จำเพาะนั้นเป็นการที่พืชปล่อยสารอาหารสำหรับแบคทีเรียออกมาทางราก ส่วนมากเป็นกรดอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำทำให้ชีวมวลของจุลินทรีย์ในดินเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์จำเพาะในการย่อยสลายสารมลพิษ (Siciliano and Germida, 1998)

ในกรณีของการบำบัดสารประกอบพีนอลิกสารที่หลังจากรากพืชมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการเปลี่ยนรูปและการย่อยสลายที่สมบูรณ์โดยการทำงานของแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่น สารที่หลังจากรากข้าวโพดสามารถเพิ่มการย่อยสลายที่สมบูรณ์ของ ^{14}C -pyrene ได้ (Yoshitomi and Shann, 2001) นอกจากนี้ยังพบแบคทีเรียที่มีถิ่นที่อยู่สำหรับย่อยสลายสารประกอบพีนอลิกในไรโซสเฟียร์ของพืช (Siciliano et al., 2003) สารกลุ่มอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนบางตัวที่ได้จากการสลายตัวของลิกนินเป็นสารที่ดึงดูดแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบพีนอลิกให้เคลื่อนที่เข้าหาได้ ตัวอย่างเช่น benzoate, 4-chlorobenzoate และ β -phenylpyruvate ชักนำการเคลื่อนที่เข้าหาของ *Pseudomonas putida* PRS2000 สารบางชนิดในสารที่หลั่งจากรากพืชมีผลทางบวกต่อแบคทีเรียในรูปของตัวส่งสัญญาณชักนำการแสดงออกของยีน (Parales and Harwood, 2002) รากพืชอาจหลั่งสารกลุ่มกรดอินทรีย์ เช่น กรดออกซาลิกและกรดมาโลนิก ซึ่งสารเหล่านี้จะเพิ่มการย่อยสลายที่สมบูรณ์ของพีแนทรีนและไพรีนในไรโซสเฟียร์ ของพืชบางชนิด เช่น ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor*) และหญ้าเบอร์มิวดา (*Cynodon dactylon*) (Gramss, 2000) รากพืชบางชนิดจะหลั่งสารลดแรงตึงผิวเพื่อหล่อลื่นรากพืชระหว่างการเจริญเติบโตในดินสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะช่วยลดแรงตึงผิวและเพิ่มการละลายของสารมลพิษ ทำให้สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้มากขึ้น (Siciliano and Germida, 1998)

2.8 ผลของสารประกอบพีนอลิกต่อการบำบัดน้ำทิ้งด้วยพืช

เนื่องจากบทบาทหลักในการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารประกอบพีนอลิกด้วยพืชเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างพืชกับแบคทีเรีย โดยพืชจะส่งเสริมการย่อยสลายสารประกอบพีนอลิกของแบคทีเรียให้เพิ่มขึ้นมากกว่าดินที่ไม่ได้ปลูกพืช ดังนั้นผลกระทบของสารประกอบพีนอลิกต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารประกอบพีนอลิกของแบคทีเรียจึงมีความสำคัญต่อผลสำเร็จที่ได้ สารประกอบพีนอลิกมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยมีกลไกที่เกี่ยวข้องกับระบบทางสรีรวิทยาได้ตั้งแต่หนึ่งกลไกหรือมากกว่า ความทนทานต่อสารประกอบพีนอลิกของแบคทีเรียขึ้นกับความสามารถในการเข้าสู่เซลล์ของสารประกอบพีนอลิก โดยทั่วไปแบคทีเรียแกรมบวกจะไวต่อสารประกอบพีนอลิกมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ สารประกอบพีนอลิกส่งผลยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจนได้หลายชนิดทั้ง เบนโซเอต อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน การยับยั้งการย่อยสลายของโลหะเป็นไปได้ 2 แบบ คือ (1) กระตุ้นการย่อยสลายในความเข้มข้นที่ต่ำแต่ยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้น (2) ยับยั้งการย่อยสลายที่ความเข้มข้นต่ำแต่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปยับยั้งลดลง การปนเปื้อนของสารประกอบพีนอลิกในปริมาณที่สูง จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของ

สารประกอบฟีนอลิกของแบคทีเรียส่งผลให้ย่อยสลายได้ช้าลง (Sandrin and Maier, 2003) และส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียที่ไม่สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายและการรอดชีวิตของแบคทีเรีย (Somtrakoon et al., 2009) การเติมแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงลงในดินที่มีการปนเปื้อนจะมีประโยชน์ในกรณีที่แบคทีเรียธรรมชาติทำงานได้ช้าหรือขาดแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย การเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียที่เติมลงในดินและการเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการศึกษา พืชที่จัดเป็นพืชที่ทนทานต่อสารประกอบฟีนอลิกและนำมาใช้ในการศึกษาทางด้านการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งมักเป็นพืชตระกูลถั่วและตระกูลหญ้า

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจณี ชูทอง (2556) ศึกษาเรื่องกลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดินแบบอัตราไหลช้า ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบบ่อสุดท้ายที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแต่ยังมีคุณภาพไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง มารดคอลลัมน์ดินโดยมีอัตราการรดที่ 0.5, 1, 2 และ 3 cm/week ตามลำดับ แบ่งการทดลองเป็นสองชุด คือ รดคอลลัมน์ดิน 2 วัน/ครั้ง และรดคอลลัมน์ดินสัปดาห์ละครั้ง พบว่า คอลลัมน์ดินที่มีการรดน้ำทิ้งในอัตรา 0.14 L/2d (1 cm/week) มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด อยู่ในช่วง 96.5-98.3% และ 97.7-99.9% ตามลำดับ คอลลัมน์ดินที่มีการรดน้ำทิ้งในอัตรา 0.25 L/week (0.5 cm/week) มีประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 97.8-99.8% โดยกลไกการบำบัดหลักมี 2 กลไก ได้แก่ กลไกการดูดซับสารอินทรีย์ของดินในคอลลัมน์ทดลอง และกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพ

กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ศึกษาการลดสารประกอบฟีนอลิกด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการบำบัดโดยดิน การบำบัดโดยใช้คอลลัมน์ดิน รดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีระบบบำบัดแบบมีบ่อก๊าซชีวภาพร่วมกับบ่อปรับเสถียร ด้วยอัตราการรดที่ 3 และ 5 cm/week โดยวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก โดยใช้วิธี 4-Aminoantipyrine และ Folin-Ciocalteu ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกเข้าระบบมีค่า 29 mg/L และ 162 mg GAE/L ตามลำดับ โดยมีการรดน้ำ 2 รูปแบบคือ รดน้ำทิ้งทุกวันกับรดน้ำทิ้งสัปดาห์ละครั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ที่อัตราการรด 5 cm/week ที่มีรดน้ำทิ้งการรดน้ำทิ้งทุกวันและไม่มีการฆ่าเชื้อตัวอย่างดินและตัวอย่างน้ำทิ้ง เป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพที่วัดจากวิธี 4-Aminoantipyrine และ Folin-Ciocalteu ซึ่งน้ำที่ออกจากคอลลัมน์ทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ $95.3 \pm 2.4\%$ และ $98.3 \pm 1.4\%$ ตามลำดับ

พลิชฐ์ จารุจารีต (2559) ศึกษาการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกและสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินที่ ปลุกหญ้าชิกแนลเลื้อยร่วมกับการเติมเชื้อแบคทีเรีย พบว่าการเติมแบคทีเรียบริเวณรากหญ้าตั้งแต่เริ่มปลูก ช่วยให้แบคทีเรียเจริญและอยู่รอดได้ดีกว่าการเติมแบคทีเรีย

ในดินตั้งแต่วันที่ 0 วันที่ 20 และวันที่ 35 ของการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและสารประกอบฟีนอลิกภายในโรงเรือนเพาะปลูก ดินที่ปลูกหญ้าร่วมกับการเติมแบคทีเรียบริเวณรากหญ้า ลดสีและสารประกอบฟีนอลิกได้ดีที่สุด 36-72% และ 57- 78% ตามลำดับ รองลงมาคือดินที่เติมแบคทีเรีย ดินที่ปลูกหญ้า ดิน และดินที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ทั้งนี้การชะล้างดินด้วยน้ำเปล่า ช่วยคงความสามารถในการบำบัดได้ดี ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับปริมาณแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างประชากรแบคทีเรียโดยวิธี Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) พบกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกและทนทานต่อสภาพของน้ำทิ้งตลอดการทดลอง รวมทั้งพบว่าน้ำหนักแห้งของหญ้าที่รดด้วยน้ำทิ้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับน้ำหนักแห้งของหญ้าที่รดด้วยน้ำเปล่า อย่างไรก็ตามการใช้หญ้าบำบัดน้ำทิ้งส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเพิ่มสูงขึ้น กว่าหญ้าที่รดด้วยน้ำเปล่า สำหรับการบำบัดสีและสารประกอบฟีนอลิกในแปลงทดลองที่ปลูกหญ้าร่วมกับการเติมแบคทีเรียบริเวณรากหญ้าในระบบที่ไม่มีการชะล้างดินด้วยน้ำเปล่า พบว่าให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงเท่าเทียมกับระบบที่มีการชะล้างดิน โดยลดสีและสารประกอบฟีนอลิกได้ 30-52% และ 34-56% และสามารถรองรับน้ำได้ $0.025 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ นอกจากนี้พบว่าหญ้าที่เติมแบคทีเรีย ผ่านการบำบัดน้ำทิ้งมีปริมาณโปรตีนและเส้นใยที่สามารถนำไปใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ได้

Tosu et al., (2015) ศึกษาการย่อยสลายฟีนอลิกโดยใช้แบคทีเรียย่อยสลายฟีนอล ได้แก่ *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1 ที่ตรึงอยู่ในเศษผลปาล์ม เพื่อบำบัดฟีนอลในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แบคทีเรียทั้งสองชนิดหลังสาร exopolysaccharides ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียยึดติดกับเศษผลปาล์มได้ แบคทีเรียที่ตรึงเหล่านี้สามารถกำจัดฟีนอลได้ถึง 5,000 mg/L ในอาหารที่ไม่มีคาร์บอน (carbon free mineral medium; CFMM) ซึ่งมีประสิทธิภาพการย่อยสลายและอัตราการย่อยสลายสูงกว่าเชื้อแบคทีเรียที่แขวนลอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของแบคทีเรียที่ตรึงให้มากขึ้น มี 3 วิธี ได้แก่ การกระตุ้น การปรับตัว และการกระตุ้นและการปรับตัวร่วมกัน วิธีการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพมากที่สุดพบได้เมื่อแบคทีเรียตรึงรูปถูกกระตุ้นในอาหาร CFMM ที่มีฟีนอลเจือปนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าฟีนอลเป็น 33 mg/L แบคทีเรียตรึงที่ถูกกระตุ้นสามารถลดฟีนอลในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบได้ 63.4% ในขณะที่เชื้อแบคทีเรียตรึงที่ไม่มีการกระตุ้นและ/หรือปรับตัว ลดฟีนอลได้เพียง 35.0% แบคทีเรียตรึงรูปที่ถูกกระตุ้นสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างน้อย 10 ครั้งและเก็บไว้เป็นเวลา 4 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การใช้ประโยชน์จากเศษผลปาล์มยังช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับของเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเป็นวิธีการบำบัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Kietkwanboot et al., (2015) ศึกษาเชื้อราสีขาว 10 ชนิด ในรูปของแข็งและของเหลวที่มีศักยภาพลดฟีนอลและลดค่าสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยในกลุ่มเชื้อราดังกล่าว พบว่า *Trametes hirsute* strain AK 04 มีความทนทานต่อน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

ที่มีความเข้มข้นสูง และแสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าฟีนอลิกและค่าสีได้มากที่สุด เชื้อราสายพันธุ์นี้ตรึงอยู่บนกากเยื่อใยปาล์มและต้านทานการยับยั้งของสาร ตัวอย่างเช่น ฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ การตรึงเชื้อราด้วยกากเยื่อใยปาล์มส่งผลให้เชื้อรามีความทนทานการยับยั้งมากกว่าการเพาะเลี้ยงเชื้อราแบบอิสระ การตรึงเชื้อราด้วยกากเยื่อใยปาล์มมีประสิทธิภาพบำบัดฟีนอลิกและสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โดยไม่มีการเจือจางน้ำทิ้งและเพิ่มสารอาหารแก่เชื้อรา พบว่า *laccase* และ *manganese peroxidase* สามารถลดค่าฟีนอลและค่าสีได้ นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายของเชื้อราอาจเร่งให้เพิ่มขึ้นโดยการบำบัดฟีนอลิกขั้นต้น ด้วยแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิก วิธีการนี้ทำให้เชื้อราลดค่าฟีนอลิกและค่าสีได้ร้อยละ 82.2 ± 3.8 และ 87.1 ± 1.1 หลังจากการบ่ม ดังนั้นกระบวนการทางชีวภาพสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลและการตรึงเชื้อราด้วยกากเยื่อใยปาล์มเป็นวิธีที่มีความเป็นไปได้และประหยัดสำหรับการปรับปรุงการลดค่าฟีนอลและค่าสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Khongkhaem et al., (2016) ศึกษาการกำจัดสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้การตรึงแบคทีเรียด้วยซิลิกา (silica-immobilized) ร่วมกับการใช้แบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก 2 ชนิด ได้แก่ *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1 โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากบ่อบำบัดบ่อสุดท้ายของ 2 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย การตรึงแบคทีเรียด้วยซิลิกาสามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลิกได้ดีที่ความเข้มข้นระหว่าง 100-500 mg/L ในน้ำเสียสังเคราะห์และลดค่าสารประกอบฟีนอลิกได้มากกว่า 1,000 mg/L เมื่อบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของทั้ง 2 โรงงาน เมื่อใช้การตรึงแบคทีเรียด้วย ซิลิกาบำบัดสารประกอบฟีนอลิกที่ความเข้มข้น 25 g/L โดยบำบัดในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ใช้เวลากักเก็บน้ำที่ 5 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดที่ 83.0 และ 60.0% มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 26.7 และ 112 mg/L ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 1,200 ชั่วโมง และใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อดูแบคทีเรียที่หลงเหลืออยู่ในถังซิลิกา ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพอาจจะเป็นการบำบัดขั้นสุดท้ายของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ การใช้การตรึงด้วยซิลิการ่วมกับ *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อลดสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้ง มีความเสถียรสำหรับน้ำทิ้งในระยะยาว เนื่องจากการทดลองง่ายต่อการปรับเปลี่ยนใช้จริงของการบำบัดน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

Phenrat et al., (2016) ศึกษาการปลูกหญ้าแฝกในระบบเติมอากาศเพื่อลดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยกระบวนการใช้สารเคมีในพืช (phytochemical) และจุลินทรีย์บริเวณรากพืช (rhizomicrobial) การทดลองจะประเมินความเป็นไปได้ของการใช้ต้นกล้าหญ้าบนแทนลอยน้ำที่มีการเติมอากาศในการย่อยสลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 500 mg/L ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม การย่อยสลายโดยการปลูกหญ้าแฝกมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ ระยะที่ 1 เกิดกระบวนการปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ (phytopolymerization) และปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (phyto-

oxidation) จาการากผลิตเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ระยะที่ 2 เกิดกระบวนการย่อยสลายร่วมกับระยะที่ 1 ด้วยจุลินทรีย์บริเวณรากหญ้าแฝก ใน 15 วันแรกของการบำบัดฟีนอลสามารถลดฟีนอลเหลือประมาณ 145 mg/L การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บริเวณรากหญ้าแฝกเพิ่มมากขึ้นประมาณ 100 เท่าและมีส่วนร่วมในการย่อยสลายฟีนอล เมื่อฟีนอลมีความเข้มข้นต่ำการบำบัดด้วยจุลินทรีย์จะมีความสามารถเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า การทำงานร่วมกันของกระบวนการใช้สารเคมีในพืชร่วมกับจุลินทรีย์ในรากพืช สามารถกำจัดฟีนอลโดยใช้เวลาน้อยกว่า 32 วัน แต่หากไม่มีการปลูกหญ้าแฝก การบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวอาจใช้เวลานานถึง 235 วัน แสดงให้เห็นว่าการปลูกหญ้าแฝกสามารถบำบัดฟีนอลได้เร็วขึ้นประมาณ 7 เท่า

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างและดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เก็บน้ำตัวอย่างน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดของ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบซึ่งเป็นบ่อบำบัดประเภทบ่อฝิ่งที่มีหลายบ่อติดต่อกัน ทำให้น้ำเสียไหลไปเรื่อยๆและมีความสะอาดเพิ่มมากขึ้นโดยการย่อยสลายตามธรรมชาติ และการระเหย โดยเก็บน้ำทิ้งจากบ่อฝิ่งบ่อสุดท้าย และการเก็บตัวอย่างดินที่นำมาบรรจุในคอลัมน์จากสวนปาล์มน้ำมันในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงโรงงาน ในส่วนของการดำเนินการวิจัยทำการทดลองที่โรงเรียนคณะทรัพยากรธรรมชาติ การวิเคราะห์ค่าสี พีเอช บีโอดี ซีโอดี วีเอฟเอ ความเป็นต่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งระเหยง่าย ทีเคเอ็น ทีโอดี ดำเนินการที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และการวิเคราะห์ สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์ โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์กลุ่มเด่นโดยใช้วิธี Polymerase Chain Reaction Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) ดำเนินการที่คณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลรวมการจำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลิก โดยใช้วิธี Folin-Ciocalteu ด้วยเครื่อง HPLC (High-performance liquid chromatography) ดำเนินการที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

- (1) จอบ
- (2) กระจอบ
- (3) เชือกฟาง

3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง

- (1) กระจอบตักน้ำ
- (2) แกลลอนขนาด 40 ลิตร

3.2.3 ชุดการทดลอง

- (1) จอบ
- (2) พลาสติก
- (3) ถังพลาสติกขนาด 70 ลิตร
- (4) โครงเหล็กทรงถังพลาสติก 4 ชุด

- (5) ท่อพีวีซี 2 นิ้ว
- (6) วาล์วเปิด-ปิด 1/2 นิ้ว
- (7) ท่อพีวีซี 1/2 นิ้ว
- (8) พีวีซีเกลียวใน 1/2 นิ้ว
- (9) พีวีซีเกลียวนอก 1/2 นิ้ว
- (10) พีวีซีข้องอ 90 องศา 1/2 นิ้ว
- (11) กาว
- (12) ปืนยิงกาว
- (13) ท่อพีวีซี 1/2 นิ้ว
- (14) เลื่อยเหล็ก
- (15) กระบะพลาสติกขนาด 35 ลิตร
- (16) สว่าน

3.2.4 การดำเนินการทดลอง

- (1) ขวดน้ำ 1.25 ลิตร
- (2) แกลลอนขนาด 40 ลิตร
- (3) กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร
- (4) ถังขนาด 10 ลิตร

3.2.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

- (1) เตาย่อยสลายตัวอย่างซีโอดี ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น DRB200
- (2) ชุดกลั่นแอมโมเนีย ผลิตภัณฑ์ VELP SCIENTIFICA รุ่น UDK126D
- (3) ชุดย่อยไนโตรเจน ผลิตภัณฑ์ VELP SCIENTIFICA รุ่น DK20
- (4) ชุดกรองบุคเนอร์
- (5) กระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร
- (6) กระดาษกรอง GF/F ขนาด 47 มิลลิเมตร
- (7) กล้องดูดความชื้น
- (8) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น sensation 1
- (9) ตู้อบความร้อนแห้ง ผลิตภัณฑ์ Memmert
- (10) ตู้บ่มซีโอดี
- (11) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- (12) พาราฟิล์ม
- (13) เครื่องวัดทีโอซี
- (14) เครื่อง High Performance Liquid Chromatography; HPLC ผลิตภัณฑ์

Hewlett Packard รุ่น HP1100

- (15) เครื่อง Microplate reader ผลิตภัณท์ Biotek รุ่น PowerWaveX
- (16) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuges) ผลิตภัณท์ Harmonic Series
- (17) เครื่องแยกทางไฟฟ้าโดยใช้เจล Gel electrophoresis
- (18) เครื่องเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอรุ่น TC-5000 ผลิตภัณท์ Techne
- (19) ไมโครเพลท 96 หลุม
- (20) ตัวกรอง Syringe Nylon 0.2 ไมโครเมตร ขนาด 13 มิลลิเมตร
- (21) กระดาษกรอง Membrane Nylon 0.2 ไมโครเมตร ขนาด 47 มิลลิเมตร

3.3 การเก็บตัวอย่าง

3.3.1 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อบรรจุคอัลมันท์ทดลอง

เก็บตัวอย่างดินจากสวนปาล์มบริเวณพื้นที่สวนปาล์มข้างโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เก็บดินจากผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 50 เซนติเมตร โดยเก็บดินในวันที่ 20 มกราคม 2558 จำนวน 25 กระสอบ ปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร และวันที่ 22 มกราคม 2558 ปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรเช่นกัน รวมทั้งสิ้น 2 ลูกบาศก์เมตร หาค่าความหนาแน่นดินด้วยการชั่ง หลุมขนาดประมาณ 2 ลิตร 2 หลุม เททรายที่รู้น้ำหนักและความหนาแน่นลงไป ในดิน ทั้งสองหลุมวัด ปริมาตรของทรายที่เทลงไป และน้ำดินที่ซูดออกมาไปชั่งน้ำหนัก ได้ความหนาแน่นของดินสวนปาล์ม เท่ากับ 1.635 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การเก็บตัวอย่างดินแสดงดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 การเก็บตัวอย่างดิน

3.3.2 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อเดินระบบบำบัดโดยใช้คอลัมน์ทดลอง

เก็บน้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งหลังบำบัดบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังรูปที่ 3-2 โดยบ่อมีลักษณะเป็นแบบเปิดมีความลึกประมาณ 1 เมตร เก็บตัวอย่างในวันที่ 14 มีนาคม 2558 เก็บโดยการตักใส่แกลลอน แกลลอนละ 40 ลิตรทั้งหมด 10 แกลลอน รวมปริมาตรทั้งหมด 400 ลิตร นำตัวอย่างน้ำแช่ในห้องเย็นคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม โดยใช้น้ำทิ้งรดคอลัมน์วันละ 11.1 ลิตร การเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละครั้งใช้ร่นน้ำได้ประมาณ 30 วัน ดังนั้นตลอดการทดลองต้องเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 วันที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง จากโรงงานลาภทวี ปาล์ม จำกัด

ครั้งที่	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำ
1	14 มีนาคม 2558
2	6 เมษายน 2558
3	4 พฤษภาคม 2558
4	1 กรกฎาคม, 2558
5	29 กรกฎาคม 2558



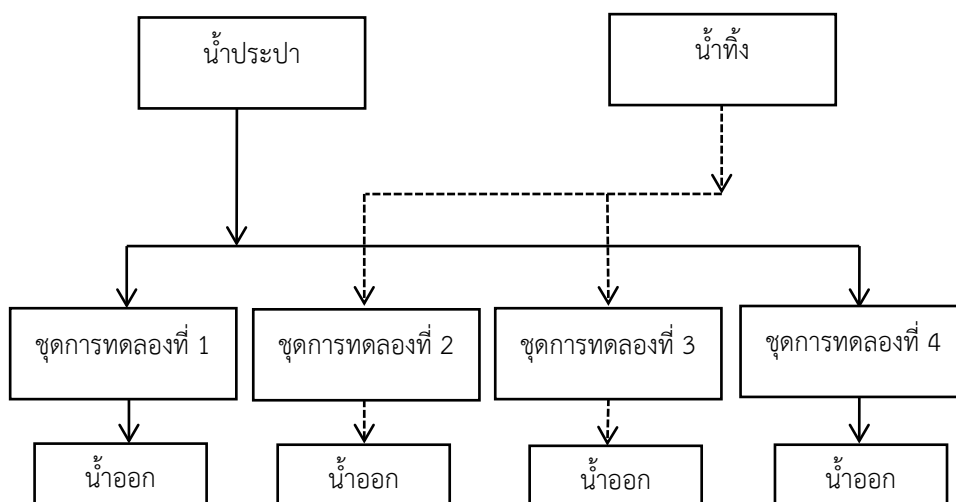
รูปที่ 3-2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

3.4 การดำเนินการทดลอง

การทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกโดยดินร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ในโรงเรือนเพาะชำ มีแผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3-3 ซึ่งวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

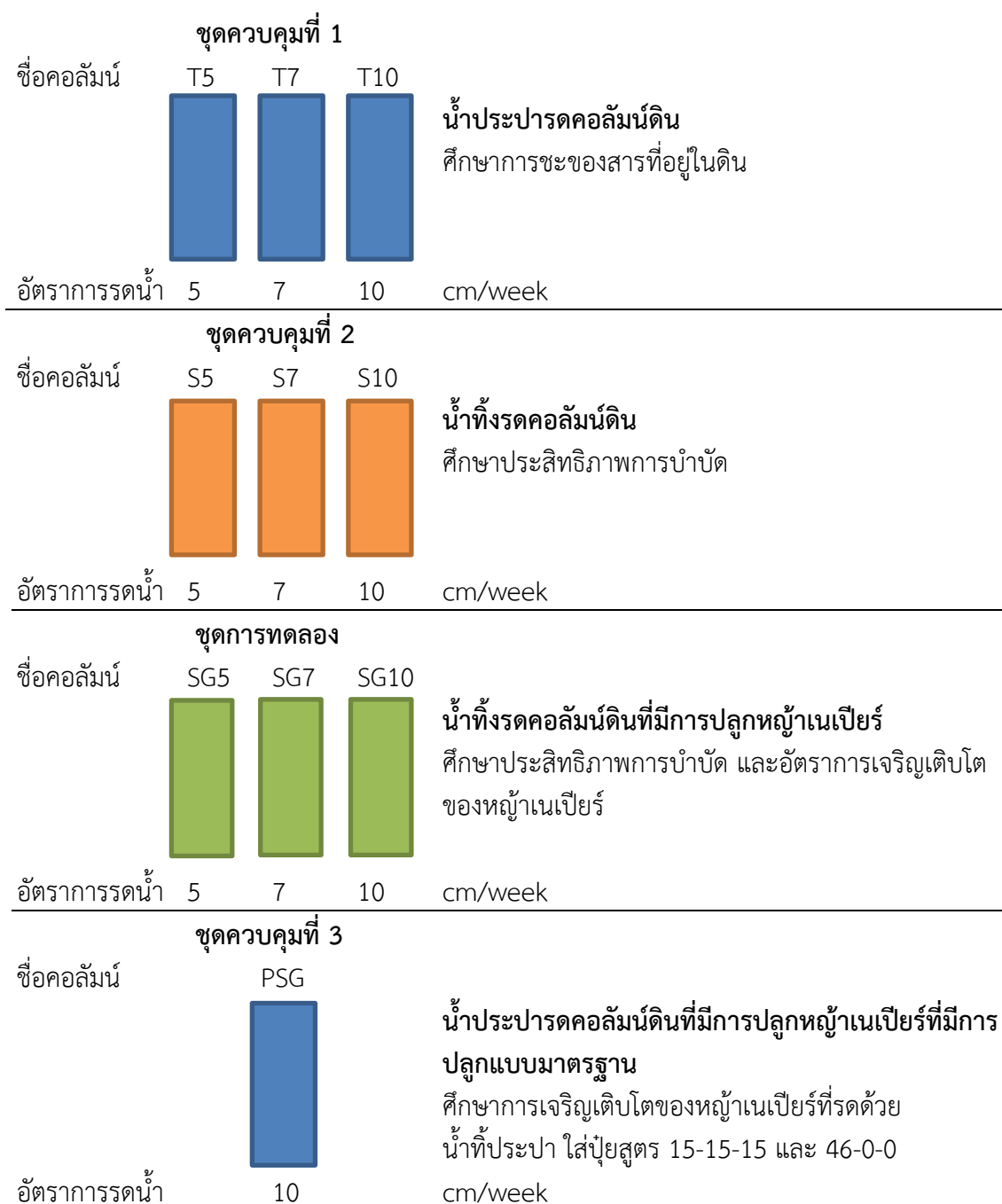
- น้ำทิ้ง (น้ำรดคอลัมน์ดิน) วิเคราะห์ สี พีเอช บีโอดี ซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ความเป็นต่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งระเหยง่าย ทีเคเอ็น ทีโอดี ฟีนอลรวม การจำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลิก จำนวนแบคทีเรีย และโครงสร้างแบคทีเรีย

- น้ำประปา (น้ำรดคอลลัมน์ดิน) วิเคราะห์ สี พีเอช
- น้ำออก วิเคราะห์ สี พีเอช ซีไอดี วีเอฟเอ ทีเคเอ็น ทีไอซี ฟีนอลรวม การจำแนก ลักษณะสารประกอบฟีนอลิก
- ดินในคอลลัมน์ทดลอง วิเคราะห์ เนื้อดิน พีเอช ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุและ อินทรีย์คาร์บอน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม สังกะสี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก สารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแบคทีเรีย และชนิดของ จุลินทรีย์ในดิน
- หย้าเนเปียร์ (ชุดการทดลองที่ 3 และ 4) วิเคราะห์ ความสูง น้ำหนัก โปรตีน ไฟเบอร์ Acid Detergent Fiber (ADF) Neutral Detergent Fiber (NDF) และ สารประกอบฟีนอลิกของหย้าเนเปียร์



รูปที่ 3-3 ขั้นตอนทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิกโดยดินร่วมกับการปลูก หย้าเนเปียร์ในเรือนกระจก

การดำเนินการทดลองแบ่งคอลลัมน์ทดลองออกเป็น 4 ประเภท (รูปที่ 3-4) ได้แก่ คอลลัมน์ดินที่รดน้ำประปา 3 อัตราการรด คอลลัมน์ที่รดน้ำทิ้ง 3 อัตราการรด คอลลัมน์ดินปลูกหย้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้ง 3 อัตราการรด และคอลลัมน์ดินปลูกหย้าเนเปียร์ที่มีการรดน้ำประปาและใส่ปุ๋ย เหมือนการปลูกหย้าเนเปียร์แบบมาตรฐาน รวมทั้งสิ้น 10 คอลลัมน์ แต่ละอัตราการรดทำการทดลอง 2 ซ้ำ



รูปที่ 3-4 ชุดการทดลอง

การออกแบบมีคอลัมน์ทั้งหมด 10 ถัง (2 ชั้น) แบ่งเป็น

ชุดควบคุมที่ 1 มี 3 คอลัมน์ (คอลัมน์ T5 T7 และ T10) ดำเนินการโดยการใช้ตัวอย่างดินจากสวนปาล์มมารดด้วยน้ำประปาตามอัตราการรดที่ศึกษา เพื่อศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ สีส สารประกอบ ฟีนอลิกที่มีอยู่ในดิน

ชุดควบคุมที่ 2 มี 3 คอลัมน์ (คอลัมน์ S5 S7 และ S10) ดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างดินจากสวนปาล์มและรดด้วยน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบตามอัตราการรดที่ศึกษา เพื่อศึกษาความสามารถในการลดสารอินทรีย์ สี สารประกอบฟีนอลิกของระบบบำบัดโดยดินธรรมชาติ

ชุดการทดลอง มี 3 คอลัมน์ (คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10) ดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างดินจากสวนปาล์มมาปลูกหญ้าเนเปียร์และรดด้วยน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบตามอัตราการรดที่ศึกษา เพื่อศึกษาความสามารถในการลดสารอินทรีย์ สี สารประกอบฟีนอลิกของระบบบำบัดโดยดินธรรมชาติ ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและน้ำหนักของหญ้าเนเปียร์ที่ตัดครั้งแรกที่ 75 วัน และครั้งที่สองที่ 120 วัน

ชุดควบคุมที่ 3 มี 1 คอลัมน์ (คอลัมน์ PSG) โดยปลูกหญ้าเนเปียร์ตามวิธีมาตรฐานในการปลูกโดยวิธีทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญของหญ้าเนเปียร์ น้ำหนักของหญ้าเนเปียร์ที่ตัดครั้งแรกที่ 75 วัน และครั้งที่สอง ที่ 120 วัน และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์เมื่อเทียบกับการรดด้วยน้ำทิ้ง

3.4.1 การออกแบบชุดการทดลอง

การออกแบบและจัดทำชุดทดลองสำหรับทดลองการบำบัดโดยดินและการบำบัดโดยดินร่วมกับหญ้าเนเปียร์แสดงดังรูปที่ 3-5 ทำการทดลองในถังพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 44 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 33 เซนติเมตร สูง 63 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 20 ถัง โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยแต่ละชุดมีถังจำนวน 10 ถัง แบ่งออกเป็น น้ำประปารดคอลัมน์ดิน 3 คอลัมน์ น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดิน 3 คอลัมน์ น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ 3 คอลัมน์ และน้ำประปารดคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ที่มีการปลูกแบบมาตรฐาน 1 คอลัมน์



รูปที่ 3-5 ชุดการทดลองการบำบัดโดยดิน

ในแต่ละคอลัมน์ทดลองใส่หิน 3/4" ปริมาณ 15 กิโลกรัมเพื่อรองรับบริเวณด้านล่างเพื่อไม่ให้เกิดการอุดตัน มีปริมาตรประมาณ 9.3 ลิตร สูง 10 เซนติเมตร ใส่ทราย 6 กิโลกรัม เป็นชั้นที่ 2 รองจากหิน เพื่อลดการอุดตันและทำให้น้ำไหลออกสะดวกขึ้น มีปริมาตรประมาณ 3.64 ลิตร สูง 4 เซนติเมตร บรรจุดินชั้นละ 8.75 กิโลกรัม อัดดินให้มีความสูง 5 เซนติเมตร บรรจุดินทั้งหมด 9 ครั้ง ได้ความสูงของชั้นดิน 45 เซนติเมตร แต่ละคอลัมน์ใส่ดินทั้งหมด 78.75 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาตรประมาณ 53.24 ลิตร ความหนาแน่นเท่ากับ 1.503 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 การเตรียมคอลัมน์ทดลอง

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาเพื่อนำไปบรรจุลงในคอลัมน์ทดลอง เก็บจากพื้นที่บริเวณสวนปาล์มใกล้เคียงกับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยนำดินจากในกระสอบ 10 กระสอบ มาเทกองรวมกันดังแสดงในรูปที่ 3-7 แยกเอาเศษกิ่งไม้ใบไม้และสิ่งเจือปนต่างๆออก จากนั้นตีดินก้อนใหญ่ให้ดินร่วนไม่เกาะเป็นก้อน แบ่งกองดินออกเป็นสี่ส่วนด้วยวิธี Quartering แยกสิ่งเจือปนต่างๆออกอีกครั้ง และคลุกเคล้าทำให้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน นำดินไปบรรจุในคอลัมน์ทดลอง และเก็บตัวอย่างดินบางส่วนเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของดินก่อนและหลังการบำบัด โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ เนื้อดิน พีเอช ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม สังกะสี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก สารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแบคทีเรีย และชนิดของจุลินทรีย์ในดิน



รูปที่ 3-7 ลักษณะดินสวนปาล์มและการทำ Quartering

3.4.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำทิ้ง

ตัวอย่างน้ำทิ้งที่เก็บมาจากบ่อฝังบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เก็บตัวอย่างน้ำไว้ในห้องเย็นของคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยเก็บไว้ใน แกลลอน 40 ลิตร โดยในแต่ละวันแบ่งน้ำทิ้งเพื่อรดคอลัมน์ทดลอง โดยแบ่งน้ำทิ้งประมาณ 11.1 ลิตร ตั้งไว้ในอุณหภูมิห้องประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำทิ้งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลายเป็นห้อง แต่ละคอลัมน์ทดลองมีปริมาณน้ำทิ้งที่รด ดังนี้ อัตราการรด 5 cm/week รดน้ำทิ้ง 0.63 ลิตร/วัน อัตราการรด 7 cm/week รดน้ำทิ้ง 0.88 ลิตร/วัน และอัตราการรด 10 cm/week รดน้ำทิ้ง 1.26 ลิตร/วัน

3.4.4 การเตรียมตัวอย่างหญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ที่ใช้สำหรับการทดลองปลูกในคอลัมน์ทดลองเป็นหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ท่อนพันธุ์ที่นำมาเพาะปลูก ใช้ท่อนพันธุ์ประมาณ 100 ท่อน ต้นพันธุ์ที่เตรียมไว้ตัดเป็นท่อนๆ ให้มีข้อติดอยู่ท่อนละ 2 ข้อ นำไปปลูกโดย ปักไขว้ท่อนพันธุ์เอียง 30 องศา ให้ 1 ข้อจมอยู่ในดิน ประมาณ 1-2 นิ้ว โดยรดน้ำประปาทุกวัน การเพาะหญ้าเนเปียร์ในกระบะ แสดงดังรูปที่ 3-8 ใช้เวลา ประมาณ 5 สัปดาห์ หญ้าเนเปียร์ที่เพาะมีรากที่แข็งแรงและขนาดต้นพอเหมาะที่นำไปปลูกในคอลัมน์ทดลอง



รูปที่ 3-8 การเพาะหญ้าเนเปียร์ในกระบะดิน (A) สัปดาห์ที่ 1 และ (B) สัปดาห์ที่ 5

นำหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในกระบะมาปลูกในคอลัมน์ทดลอง โดยปลูกคอลัมน์ละ 2 ท่อน ปลูกทั้งหมด 4 คอลัมน์ (2 ซ้ำ) ได้แก่ คอลัมน์ SG5 SG7 SG10 และ SPG ใส่ปุ๋ยยูเรียเมื่อความสูงหญ้าเนเปียร์ประมาณ 60 เซนติเมตร และเมื่อหญ้าเนเปียร์สูงประมาณ 90 เซนติเมตรใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 เพื่อรักษาสมดุลของธาตุอาหารหลักในดิน การปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ทดลองแสดงดังในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 การปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ทดลอง

3.4.5 การเก็บตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทดลองเก็บน้ำทุกวัน โดยให้น้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ไหลลงสู่ขวดพลาสติก ในแต่ละวันนำตัวอย่างน้ำที่เก็บได้ไปเก็บไว้ในตู้แช่ เมื่อครบ 1 สัปดาห์นำตัวอย่างที่เก็บในสัปดาห์นั้นๆ มาผสมกันและทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

3.5 วิธีวิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ได้แก่ สี พีเอช บีโอดี ซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ความเป็นด่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งระเหยง่าย ทีเคเอ็น ทีโอดี การวิเคราะห์ดำเนินการตามที่ระบุใน APHA, AWWA and WEF (2005) ปริมาณและลักษณะสารประกอบฟีนอลิก วิเคราะห์ หาอนุพันธ์สารประกอบฟีนอลิกด้วยเครื่อง HPLC (High-performance liquid chromatography) ดำเนินการตามวิธีของ Waterman & Mole (1994) และ Marco et al., (2007) ตามลำดับ วิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิกด้วยวิธี MPN ประยุกต์จาก Wrenn and Venosa (1996) และวิเคราะห์โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์เด่นโดยใช้เทคนิค PCR-DGGE ดัดแปลงจาก Katia et al. (2003) ดังตารางที่ 3-2 และช่วงเวลาในการวัดแสดงดังตารางที่ 3-3

ส่วนน้ำออก วิเคราะห์ สี พีเอช ซีโอดี ทีเคเอ็น ทีโอดี ปริมาณและลักษณะสารประกอบฟีนอลิก วิเคราะห์ หาอนุพันธ์สารประกอบฟีนอลิกด้วยเครื่อง HPLC (High-performance liquid chromatography)

ตารางที่ 3-2 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
สี (PtCo)	วัดโดยตรงโดย spectrophotometer
ความเป็นกรดและด่าง (mg/L)	วัดโดยตรงโดย pH meter
บีโอดี (mg/L)	5-day BOD Test
ซีโอดี (mg/L)	Close reflux, Titrimetric Method
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/L)	Direct Titration Method
ความเป็นด่าง (mg/L as CaCO ₃)	Direct Titration Method
ของแข็งทั้งหมด (mg/L)	Dried at 103-105 °C
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	Dried at 103-105 °C
ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)	Burn at 500 °C
ทีเคเอ็น (mg/L)	Kjeldahl Method
ทีโอซี (mg/L)	TOC Analyzer
* ปริมาณฟีนอลรวม (mg GAE/L)	Folin-Ciocalteu Method
** จำแนกลักษณะสารประกอบฟีนอลิก (mg GAE/L)	HPLC Analyzer
***วิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิก (log MPN/100 ml)	Most Probable Number (MPN)
****วิเคราะห์โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์กลุ่มเด่น	Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE)

ที่มา : APHA, AWWA and WEF (2005), * Waterman & Mole (1994) ,

** Marco et al., (2007), *** Wrenn and Venosa (1996), **** Kaia et al. (2003)

ตารางที่ 3-3 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	ระหว่างการทดลอง	หลังการทดลอง
พีเอช	✓	✓	✓
สี	✓	✓	✓
ทีเคเอ็น	✓	✓	✓
ซีโอดี	✓	✓	✓
ทีไอซี	✓	✓	✓
สารประกอบฟีนอลิกรวม	✓	✓	✓
ประเภทของสารประกอบฟีนอลิก	✓	✓	✓
การทำสมมูลมวลเพื่อแยกประเภทของการบำบัด	×	×	✓
ปริมาณแบคทีเรีย	✓	×	✓
ชนิดของจุลินทรีย์	✓	×	✓

3.5.1.1 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งและน้ำที่ออกจากคอลัมน์

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolics) ในน้ำทิ้งและน้ำที่ผ่านการบำบัดดัดแปลงจากวิธีการ Folin-Ciocalteu (Ergul et al., 2011) โดยนำตัวอย่างน้ำปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที เพื่อกำจัดตะกอน ทำการเจือจางตามความเข้มข้นที่เหมาะสม เติมตัวอย่างน้ำทิ้งที่เจือจางแล้ว 200 ไมโครลิตร ลงใน Folin-Ciocalteu phenol reagents ที่เจือจาง 4 เท่า ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นจึงเติม 1 มิลลิลิตร ของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 200 กรัมต่อลิตร ทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Gallic acid ใช้น้ำกลั่นที่ทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับตัวอย่างเป็น blank

3.5.1.2 การวิเคราะห์สีในน้ำทิ้ง

การวิเคราะห์สี ในน้ำทิ้ง (APHA, AWWA and WEF, 2005) โดยการนำตัวอย่างน้ำทิ้งมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็น เวลา 7 นาที เพื่อกำจัดตะกอน จากนั้นทำการเจือจางตัวอย่างน้ำทิ้งตามความเหมาะสม แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน แพลตตินัมโคบอลต์ในช่วง 0-500 หน่วยสี เพื่อคำนวณเป็นหน่วยสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินก่อนทดลองหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ได้แก่ เนื้อดิน พีเอช ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม สังกะสี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน สารประกอบฟีนอลิก ปริมาณแบคทีเรียในดินชนิดของจุลินทรีย์ ส่วนตัวอย่างดินหลังการทดลองวิเคราะห์พารามิเตอร์เหมือนกับก่อนการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และ ตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
เนื้อดิน	Hydrometer Method
พีเอช	Electrometric Method
ไนโตรเจนทั้งหมด (percent)	Kjeldahl Method
อินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน ในดิน (percent)	Walkey & Black Method
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (mg/kg)	Bray no.II method
โพแทสเซียมในดิน (mg/kg)	Ammonium Acetate Method
สังกะสี (mg/kg)	DTPA extraction Method
ความสามารถในการแลกเปลี่ยน ประจุบวกของดิน (meq/100 g soil)	Ammonium saturation Method
สารประกอบฟีนอลิกในดิน (mg GAE/kg)	Folin-Ciocalteu Method
ปริมาณแบคทีเรียในดิน (log MPN/1 g soil)	Most Probable Number (MPN)
ชนิดของจุลินทรีย์ในดิน	Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE)

ตารางที่ 3-5 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	ระหว่างการทดลอง	หลังการทดลอง
เนื้อดิน	✓	×	✓
พีเอช	✓	×	✓
ไนโตรเจนทั้งหมด	✓	×	✓
อินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน ในดิน	✓	×	✓
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน	✓	×	✓
โพแทสเซียมในดิน	✓	×	✓
สังกะสี	✓	×	✓
ความสามารถในการแลกเปลี่ยน ประจุบวกของดิน	✓	×	✓
สารประกอบฟีนอลในดิน	✓	×	✓
ปริมาณแบคทีเรียในดิน	✓	×	✓
*ชนิดของจุลินทรีย์ในดิน	✓	×	✓

3.5.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลในน้ำทิ้ง

การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลโดยวิธี Most probable number (MPN) ดัดแปลงจากวิธีการของ Wrenn and Venosa (1996) เจือจางตัวอย่างดินครั้งละ 10 เท่า ใช้อาหารเหลว CFMM 9 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่างดิน 1 กรัม ทำการเจือจางจนได้ระดับการเจือจางเท่ากับ 10^{-6} - 10^{-8} เติมสารละลายฟีนอล 100 ไมโครลิตรจาก สารละลายเข้มข้น (Stock solution) 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอล (พนิดา ไต๊ะสุ, 2555) นำตัวอย่างใส่ลงใน 96 wells plate หลุมละ 150 ไมโครลิตร ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ จากนั้นนำถุงพลาสติกมา ห่อหุ้มเพลทและบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาว คลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate reader และนำ ข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณ แบคทีเรียจากตาราง MPN

3.5.2.2 การศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชาคมแบคทีเรียในดิน

1) การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินจากบริเวณโดยรอบหญ้าที่ปลูกในคอลัมน์ทดลองภายใต้โรงเรือนเพาะปลูก โดยเก็บสีกกลงไปจากผิวดินสามช่วงคือ ประมาณ 5 เซนติเมตร 20 เซนติเมตร และ 40

เซนติเมตร (Bodini et al., 2010) ในแต่ละชุดการทดลอง ทำซ้ำชุดการทดลองละ 2 คอลัมน์ เก็บรักษาตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่านำมาวิเคราะห์ ด้านชีวโมเลกุล

2) การสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างดิน

นำตัวอย่างดินของแต่ละชุดการทดลองมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำดินจำนวน 1 กรัม มาสกัดดีเอ็นเอโดยใช้ Soil DNA Kit (OMEGA, USA) ทำตามตอนขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือ โดยขั้นตอนสำคัญในการสกัดดีเอ็นเอ คือ การทำให้เซลล์แตก การแยกโปรตีนออกจากดีเอ็นเอและการตกตะกอนดีเอ็นเอ จากนั้นทำการตรวจสอบ Genomic DNA ภายใต้อุปกรณ์ Gel electrophoresis โดยเตรียมอะกาโรสเจล (Agarose gel) ความเข้มข้น 1.5 % ในบัฟเฟอร์ Tris-boric acid-EDTA (TBE) ความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจน อะกาโรสละลายหมด และทิ้งให้สารละลายเย็นลงจนเหลืออุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เทลงในถาดเตรียมเจลจากนั้นเสียบหัวลงไป ปลอ่ยให้วุ้นแข็งตัวประมาณ 60 นาที จากนั้นวางแผ่น วุ้นลงในแชมเบอร์อิเล็กโทรโฟรีซิส เทปไฟเฟอร์ TBE ความเข้มข้น 1 เท่า ให้ท่วมแผ่นวุ้น หยอดตัวอย่างลงในช่องวิ่งบนแผ่นวุ้นช่องวิ่งละ 3 ไมโครลิตร โดยช่องวิ่งแรกให้หยอดด้วยดีเอ็นเอมาตรฐาน 3 ไมโครลิตร จากนั้นเปิดสวิทซ์ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นวุ้นและบัฟเฟอร์ TBE โดยใช้ความต่างศักย์ 100 โวลต์ นาน 30 นาที ย้อมดีเอ็นเอด้วยสารละลายเอธิเดียมโบรไมด์ (Ethidium bromide) ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นาน 15 นาที และนำแผ่นเจลไปล้างด้วยน้ำกลั่น 1 นาที จากนั้นนำไปส่องดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ด้วยเครื่องตรวจสอบเจล

3) การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนดีเอ็นเอด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (Polymerase Chain Reaction; PCR)

หลังจากทำการตรวจสอบ Genomic DNA นำดีเอ็นเอที่ได้มาทำ PCR ดัดแปลงจาก Wu et al. (2012) โดยเป็นขั้นตอนการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอบริเวณ 16S rDNA ให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ใช้ส่วนผสมในปฏิกิริยารวม 30 ไมโครลิตร ประกอบด้วยส่วนผสมต่าง ๆ คือ แม่แบบดีเอ็นเอ 1 ไมโครลิตร Go Taq® Green Master Mix 15 ไมโครลิตร โดยใช้ไพรเมอร์ 341F+GC คู่กับ 534R ซึ่งเป็นไพรเมอร์สำหรับแบคทีเรียทั่วไป (Universal primer) เติมไพรเมอร์ชนิดละ 1 ไมโครลิตร และเติมน้ำปลอดประจุ (ปลอดเชื้อ) จนได้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร จากนั้น ดำเนินปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส ด้วยเครื่องเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอรุ่น TC-5000 ของบริษัท Techne (UK) โดยตั้งโปรแกรมดังนี้ 1) Denaturing เป็นขั้นตอนการแยกสายคู่ของดีเอ็นเอแม่พิมพ์ให้เป็น สายเดี่ยว โดยใช้อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 2) Annealing เป็นขั้นตอนลดอุณหภูมิลงมาที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ Primer สามารถเกาะติดกับดีเอ็นเอแม่พิมพ์สายเดี่ยวตรงบริเวณลำดับนิวคลีโอไทด์ คู่สม และ 3) Extension เป็นขั้นตอนการสร้างสายดีเอ็นเอสายใหม่ต่อออกจาก Primer ในทิศทางจาก 5' ไป 3' ใช้อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เมื่อสิ้นสุดการทำพีซีอาร์จำนวน

30 รอบ (cycle) นำผลผลิตพีซีอาร์ที่ได้มาตรวจสอบผลิตภัณฑ์ลูกโซ่ พอลิเมอร์เรสที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Gel electrophoresis โดยใช้เจลความเข้มข้น 1.5 % โดยชั่งผง agarose 1.5 กรัม ละลายใน บัฟเฟอร์ TBE ความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามวิธีการสกัด DNA จากตัวอย่างดิน โดยเปรียบเทียบขนาดผลิตภัณฑ์ PCR กับดีเอ็นเอมาตรฐาน

4) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE)

การวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียด้วยเทคนิค DGGE ดัดแปลง จากวิธีการของ Katia et al. (2003) โดยใช้อุปกรณ์ของ DCode™ system เตรียมพอลิอะคริลาไมด์ เจลความเข้มข้น 8% ที่มีเกรเดียนท์ของสารละลาย denaturant 30-70% (100% denaturant ประกอบด้วย 7M urea และ 40% formamide) เมื่อนำเกรเดียนท์ของสารละลาย denaturant ลงในชุดเตรียมเจลแล้ว เสียบหัวลิงไประหว่างกระจกทั้งสองแผ่น ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ ทิ้งไว้ 4-5 ชั่วโมง ให้พอลิอะคริลาไมด์แข็งตัว นำชุดเจลใส่ลงในแชมเบอร์ที่มีบัฟเฟอร์ TAE ความเข้มข้น 1 เท่า ประมาณ 7 ลิตร ที่ผ่านการให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ผสม ผลิตภัณฑ์ PCR กับสีติดตาม (loading dye) ในอัตราส่วน 5:1 หยอดลงในช่องวิ่งปริมาณ 20 ไมโครลิตร จากนั้นเปิดสวิตซ์ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดเจลและบัฟเฟอร์ TAE โดยใช้ความต่าง ศักย์ 130 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 4.5 ชั่วโมง ย้อมดีเอ็นเอด้วยสารละลาย เอธิเดียมโบรไมด์ ความเข้มข้น 0.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นาน 20 นาที และนำแผ่นเจลไปล้าง ด้วยน้ำกลั่น 1 นาที จากนั้นนำไปส่องดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องตรวจสอบเจล แล้วตัด แลกดีเอ็นเอเด่นออกจากเจล นำไปทำพีซีอาร์ซ้ำโดยใช้คูไพรเมอร์ที่ไม่มี GC-clamp

5) การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์

การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของซันดีเอ็นเอ โดยส่งตัวอย่างแลบดีเอ็นเอจากเทคนิค DGGE ที่ทำพีซีอาร์ให้บริสุทธิ์ ส่งวิเคราะห์ที่ บริษัท Bioneer ประเทศเกาหลี ผ่านทางบริษัท บริษัท ยูทูโอไอ (ประเทศไทย) จำกัด โดยใช้ระบบ BigDye® Terminator Cyclic sequencing และเครื่อง ABI® 3730XL DNA Analyzer ในการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์มา จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้โปรแกรม BLASTn ซึ่งเป็นฐานข้อมูลภายใต้ National Center for Biotechnology Information (NCBI) เพื่อจำแนกชนิดของแบคทีเรีย

3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะหญ้าเนเปียร์

พันธุ์ของหญ้าเนเปียร์นำมาจาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อจำหน่ายเป็นอาหารสัตว์ เมื่อเตรียมตัวอย่างดินเสร็จ เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นจากดินทำการปลูกหญ้าเนเปียร์ทันที การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของหญ้าเนเปียร์แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ วิเคราะห์ขณะทำการทดลอง ซึ่งวัดความสูงเพียงอย่างเดียว ส่วนพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์หญ้าเนเปียร์ที่ตัดที่ 75 วัน และ 120 วัน ได้แก่ วิเคราะห์ส่วนสูง น้ำหนัก โปรตีน Crude Fibber ADF (Acid Detergent Fiber) NDF (Neutral Detergent Fiber) และสารประกอบฟีนอลิก ดังแสดงในตารางที่ 3-6 และ ตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-6 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ส่วนสูง (cm)	วิเคราะห์โดยตรง
น้ำหนัก (kg)	วิเคราะห์โดยตรง
โปรตีน (percent)	Kjeldahl Method
Crude Fibber (percent)	Crude Fiber Method
ADF (Acid Detergent Fiber) (percent)	AOAC Method
NDF (Neutral Detergent Fiber) (percent)	AOAC Method
สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์ (mg GAE/g dry weight)	Folin-Ciocalteu Method

ตารางที่ 3-7 ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	ระหว่างการทดลอง	หลังการทดลอง
ส่วนสูง	✓	✓	✓
น้ำหนัก	×	✓	✓
โปรตีน	×	✓	✓
Crude Fibber	×	✓	✓
ADF (Acid Detergent Fiber)	×	✓	✓
NDF (Neutral Detergent Fiber)	×	✓	✓
สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์	×	✓	✓

3.5.3.1 การวัดการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์

วัดการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) การวัดส่วนสูง การวัดส่วนสูงวัดทุกวันตลอดระยะเวลา 120 วัน โดยบันทึกและเปรียบเทียบส่วนสูงของแต่ละคอลัมน์ทดลอง 2) การวัดน้ำหนักของหญ้าเนเปียร์ 2 ช่วงการทดลอง คือ ตัดหญ้าเนเปียร์รอบแรก ที่ 75 วัน และตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่สอง ที่ 120 วัน โดยวิเคราะห์ทั้งน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง แบ่งเป็นน้ำหนักใบกับลำต้น เพื่อเปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ต่างๆ ส่วนสูงและการวัดน้ำหนักหญ้าเนเปียร์แสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 (A) ส่วนสูงหญ้าเนเปียร์ที่ 75 วัน และ (B) หญ้าเนเปียร์ที่ถูกตัดรอบแรก ที่ 75 วัน

3.5.3.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ตกค้างในหญ้าเนเปียร์

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ตกค้างในพืชตามวิธีการของ Proestos and Komaitis (2007) ดังแสดงในรูปที่ 3-11 เริ่มจากนำพืชมาเก็บไว้ในที่มืด 10 วัน (อุณหภูมิห้อง) บดตัวอย่างพืชให้ละเอียดและอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำพืชมา 1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) มาสกัดโดยใช้ตัวทำละลายเมทานอลต่อน้ำในอัตราส่วน 60 : 40 (v/v) อะซีโตนต่อน้ำในอัตราส่วน 60 : 40 (v/v) และเอทิลอะซิเตต ต่อน้ำในอัตราส่วน 60 : 30 (v/v) ผสมตัวทำละลายข้างต้นตัวละ 40 มิลลิลิตรและตัวอย่างพืชให้เข้ากันในขวดรูปชมพู่ที่ห่อหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ทำการแทนที่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน 40 – 60 วินาที เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน จากนั้นนำไปวางในวอเตอร์บัท ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 มิลลิเมตร ก่อนนำตัวอย่างไปตรวจวัดโดยวิธี Folin-Ciocalteu โดยวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 765 นาโนเมตร และนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Gallic acid นำผลการศึกษาที่ได้มาเปรียบเทียบกันหลังจากผ่านการบำบัดด้วยชุดการทดลองต่าง ๆ



รูปที่ 3-11 (A) หน้ำนเปียร์หลังอบ (B) หน้ำนเปียร์หลังบด และ (C) ตัวอย่างที่สกัดในหลอดทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองการบำบัดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิก มีผลการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) คุณลักษณะน้ำทิ้งรดคอสมันและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอสมันทดลอง 2) ผลการทดลองคุณลักษณะดินก่อนและหลังการทดลอง 3) คุณลักษณะหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกด้วยการรดน้ำทิ้งและปลูกด้วยวิธีมาตรฐาน

คอสมันทดลองมี 4 ประเภทคือ 1) คอสมันทดลองที่รดด้วยน้ำประปามีอัตราการรด 3 อัตรา คือ 5 7 และ 10 cm/week 2) คอสมันทดลองที่รดด้วยน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีอัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week และ 3) คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีอัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week 4) คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยวิธีมาตรฐานอัตราการรดน้ำประปา 10 cm/week เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจได้มีการกำหนด ตัวอย่างของแต่ละชุดการทดลอง โดยแบ่งเป็นชุดการทดลอง ดังนี้

T5	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 5 cm/week
T7	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 7 cm/week
T10	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำประปา อัตราการรด 10 cm/week
S5	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 cm/week
S5	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 7 cm/week
S10	หมายถึง คอสมันทดลองรดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 10 cm/week
SG5	หมายถึง คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 cm/week
SG7	หมายถึง คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 7 cm/week
SG10	หมายถึง คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 10 cm/week
SPG	หมายถึง คอสมันทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ตามวิธีมาตรฐาน อัตราการรด 10 cm/week

4.1 คุณลักษณะน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง

4.1.1 คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันดิบ

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ศึกษาเป็นประเภทบ่อปรับเสถียร น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตไหลเข้าสู่บ่อปรับเสถียรบ่อที่ 1 ไหลต่อเนื่องไปจนถึงบ่อปรับเสถียรบ่อที่ 4 เพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอน การย่อยสลายตามธรรมชาติ และการระเหยตามธรรมชาติ น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายถูกนำไปใช้รดสวนปาล์มน้ำมัน คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังตารางที่ 4-1 น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีสีน้ำตาลแดง อุณหภูมิสูง ความสกปรกสูง โดยมีค่า ซีโอดี บีโอดี ของแข็ง ทีเคเอ็น และสารประกอบฟีนอลิกที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (n=10)

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์ได้	เกณฑ์มาตรฐาน
พีเอช	-	8.6±0.08	5.5-9.0
ความเป็นด่าง	mg/L as CaCO ₃	7,130±56	-
สี	PtCo	1,656±163	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
ซีโอดี	mg/L	1,443±180	120
บีโอดี	mg/L	261±6	20
ทีโอดี	mg/L	327±12	-
ของแข็งทั้งหมด	mg/L	9,680±200	-
ของแข็งระเหยง่าย	mg/L	410±31	-
ของแข็งแขวนลอย	mg/L	9,300±178	50
ทีเคเอ็น	mg/L	451±19	100
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	mg/L	110±6	-
สารประกอบฟีนอลิก	mg GAE/L	134±11	1.0

4.1.2 การบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ทดลอง

4.1.2.1 ปริมาณน้ำทิ้งและน้ำประปาที่ไหลออกจากคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

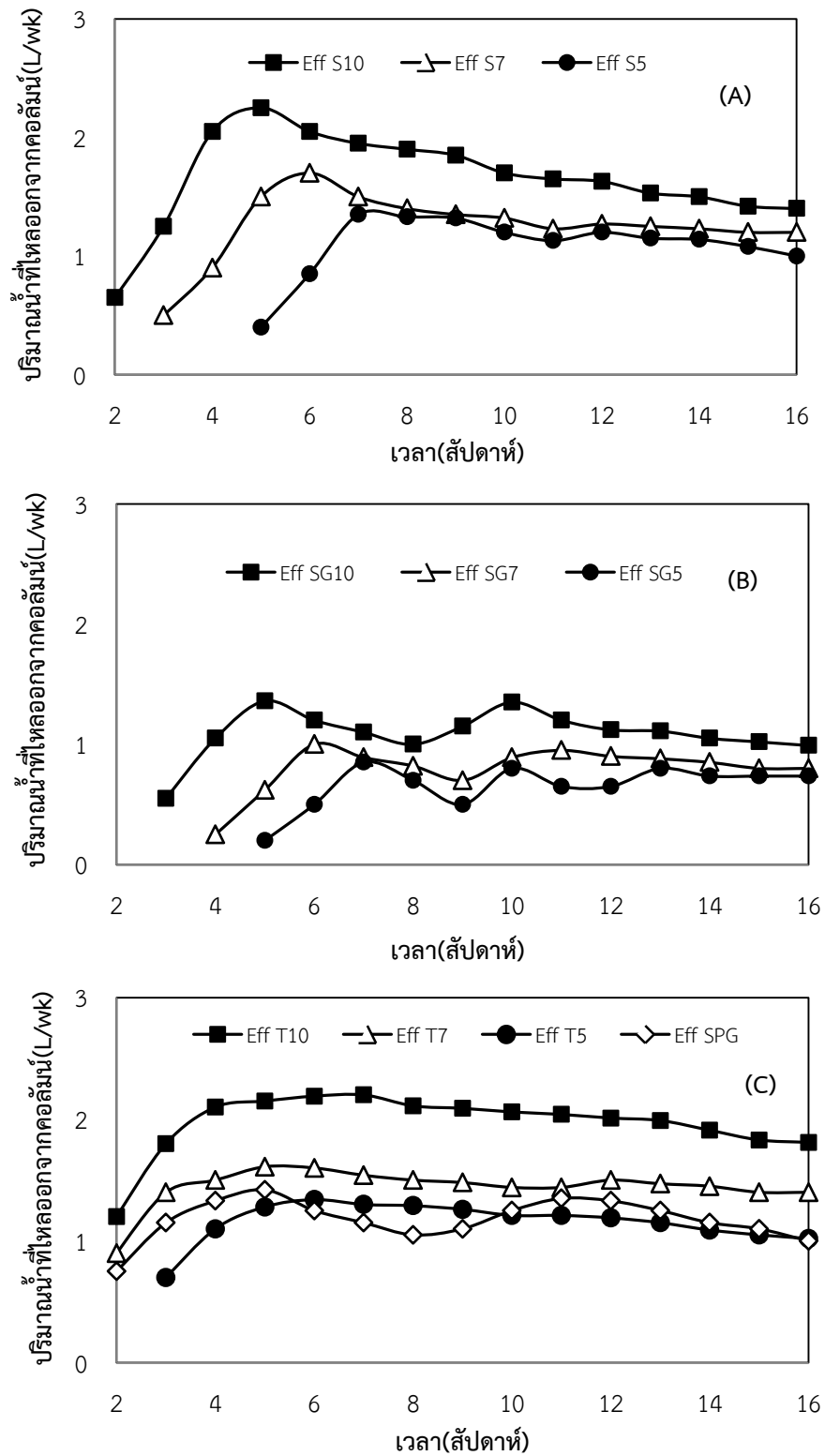
การบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ทดลองสำหรับงานวิจัยนี้มี 4 ประเภท ได้แก่ 1) น้ำประปารดคอลัมน์ดิน (คอลัมน์ T5 T7 และ T10) 2) น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดิน (คอลัมน์ S5 S7 และ S10) 3) น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ (คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10) และ 4) น้ำประปารดคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ (คอลัมน์ SPG)

1) ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

อัตราการรด 5 cm/week รดน้ำทั้ง 0.63 L/day หรือ 4.41 L/week อัตราการรด 7 cm/week รดน้ำทั้ง 0.88 L/day หรือ 6.16 L/week และอัตราการรด 10 cm/week รดน้ำทั้ง 1.26 L/day หรือ 8.82 L/week ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินแสดงดังรูปที่ 4-1A คอลัมน์ S5 น้ำออกจากคอลัมน์ครั้งแรกในสัปดาห์ที่ 5 คอลัมน์ S7 น้ำออกจากคอลัมน์ครั้งแรกในสัปดาห์ที่ 3 และคอลัมน์ S10 น้ำออกจากคอลัมน์ครั้งแรกในสัปดาห์ที่ 2 ของการทดลอง ปริมาณน้ำออกครั้งแรกจากทั้งสามคอลัมน์รายสัปดาห์มีค่าน้อย โดยปริมาณน้ำที่ออกจากคอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าเป็น 0.40, 0.50 และ 0.65 L ตามลำดับ น้ำที่ออกจากคอลัมน์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 5 คอลัมน์ S10 มีปริมาณน้ำออกมากที่สุดเป็น 2.30 L คอลัมน์ S7 มีปริมาณออกรองลงมาเป็น 1.50 L และคอลัมน์ S5 มีปริมาณน้ำออกน้อยที่สุดเป็น 0.40 L ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 7 น้ำออกจากทุกคอลัมน์มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง ในสัปดาห์ที่ 16 ของการทดลอง คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 1.00, 1.20 และ 1.40 L ตามลำดับ

น้ำออกจากคอลัมน์ช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณต่ำเนื่องจากดินในคอลัมน์ทดลองมีความชื้นต่ำ ยังไม่อิ่มตัวและใช้เวลาระยะหนึ่งดินจึงอิ่มตัว อัตราการรดสูงส่งผลให้ดินอิ่มตัวเร็วกว่าอัตราการรดต่ำ ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์จึงมากกว่าอัตราการรดต่ำกว่า ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นจนถึงสัปดาห์ที่ 5 - 7 ดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำปริมาณน้ำไหลผ่านคอลัมน์ได้มากขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 7 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงอย่างต่อเนื่อง บริเวณผิวหน้าดินมีการอุดตันด้วยสิ่งสกปรกในน้ำที่ส่งผลให้น้ำซึ่งบริเวณผิวหน้าดินได้นานขึ้น และดินเกิดการยุบตัว ความหนาแน่นดินในคอลัมน์เพิ่มขึ้น รวมทั้งที่ตั้งของคอลัมน์อยู่ในโรงเรือนมีแดดส่องตลอดวัน อัตราการระเหยจึงเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์จึงมีค่าลดลง

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แสดงดังรูปที่ 4-1B คอลัมน์ SG5 น้ำไหลออกจากคอลัมน์ครั้งแรกในสัปดาห์ที่ 5 คอลัมน์ SG7 มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 4 และ คอลัมน์ SG10 มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ในสัปดาห์ที่ 3 ของการทดลอง ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าเป็น 0.20, 0.25 และ 0.55 L ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 6 - 9 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 9 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.50, 0.70 และ 1.20 L ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 9 - 10 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 10 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.74, 0.80 และ 0.99 L ตามลำดับ



รูปที่ 4-1 ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ (A) น้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน (B) น้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และ (C) น้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ปริมาณน้ำที่ออกจากคอลัมน์ช่วงสัปดาห์ที่ 3 – 6 เพิ่มขึ้น เนื่องจากดินในคอลัมน์ก่อนการทดลองมีความชื้นต่ำ เมื่อรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ส่งผลให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้น น้ำไหลออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 6 – 9 หล้าเนเปียร์เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วส่งผลให้หล้าเนเปียร์ใช้น้ำในการเจริญเติบโตมากขึ้น ปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์จึงลดลง สัปดาห์ที่ 9 – 10 รากหล้าเนเปียร์กระจายอยู่เต็มพื้นที่คอลัมน์ความพรุนในดินเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 10 ปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยในน้ำทิ้งสะสมในชั้นดินช่องว่างในชั้นดินลดลงตามระยะเวลาการบำบัดที่เพิ่มขึ้น น้ำขังที่ผิวหน้าดินได้นานขึ้น อัตราการระเหยเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง

ปริมาณน้ำประปาที่ออกจากคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหล้าเนเปียร์ แสดงดังรูปที่ 4-1C คอลัมน์ T5 T7 T10 และ SPG มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ครั้งแรกรายสัปดาห์เป็น 0.70, 0.90, 1.20 และ 0.75 L ตามลำดับ น้ำออกมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 5 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์มากที่สุด คอลัมน์ T5 T7 T10 และ SPG มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 1.28, 1.61, 2.15 และ 1.42 L ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 5 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงอย่างต่อเนื่องถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง คอลัมน์ T5 T7 และ T10 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 1.02, 1.40 และ 1.81 L ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่ปลูกหล้าเนเปียร์ หลังจากสัปดาห์ที่ 5 ลดลงถึงสัปดาห์ที่ 8 เนื่องจากหล้าเนเปียร์ใช้น้ำสำหรับการเจริญเติบโต สัปดาห์ที่ 8 – 11 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น สัปดาห์ที่ 11 คอลัมน์ SPG มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 1.35 L หลังจากสัปดาห์ที่ 11 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงอย่างต่อเนื่องถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SPG มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 1.00 L

น้ำประปาไหลออกจากคอลัมน์ T5 T7 T10 และ SPG มีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่ 2 – 5 เนื่องจากสัปดาห์ที่ 2 ดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำออกจึงมีปริมาณน้อย หลังจากนั้นดินเริ่มอิ่มตัวด้วยน้ำปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 5 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ T5 T7 และ T10 มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อรดน้ำประปาดินในคอลัมน์ยุบตัว ส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น น้ำขังอยู่ในดินได้นานขึ้น อัตราการระเหยเพิ่มมากขึ้นปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์จึงลดลง ส่วนคอลัมน์ดินที่ปลูกหล้าเนเปียร์ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลง สัปดาห์ที่ 8 – 11 มีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากดินเต็มไปด้วยรากหล้าเนเปียร์ ช่องว่างรูพรุนในดินเพิ่มขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 11 ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงเล็กน้อย หล้าเนเปียร์มีลำต้นขนาดใหญ่ขึ้นจึงใช้น้ำในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ พบว่าน้ำทิ้งและน้ำประปารดคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหล้าเนเปียร์มีแนวโน้มของปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกัน การรดด้วยน้ำประปามีปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์มากกว่ารดด้วยน้ำทิ้งเล็กน้อย น้ำทิ้งและน้ำประปารดคอลัมน์ดินที่ปลูก

หญ้าเนเปียร์มีแนวโน้มของปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกัน การรดน้ำประพามีปริมาณน้ำออกมากกว่าการรดด้วยน้ำที่เล็กน้อยเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบคอลัมน์ที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์กับคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แนวโน้มปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์มีค่าแตกต่างกัน การปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลงเนื่องจากหญ้าเนเปียร์ใช้น้ำในการเจริญเติบโต

งานวิจัยของ พลิชฐ์ จารุจารีต (2559) พบว่าการปลูกหญ้าชิกแนลเล็กน้อยไม่มีผลกระทบต่อสภาพกายภาพของดิน ปริมาณน้ำไหลซึมมีค่าน้อยกว่าคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าชิกแนลเล็กน้อยคิดเป็น 19.7% เนื่องจากปริมาณดินมีมากพอที่ทำให้รากหญ้าชิกแนลเล็กน้อยชอนไช อีกทั้งหญ้าชิกแนลเล็กน้อยมีความหนาแน่นรากที่ไม่มากนัก ความพรุนของดินจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด จากงานวิจัยของอุดมผล พิชนไพบุลย์ (2556) พบว่าการรดน้ำที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่อัตราการรด 0.5 cm/week ในสวนปาล์มน้ำมันไม่มีผลกระทบต่อลักษณะของดินและปาล์มน้ำมันและการรดน้ำที่ส่งผลให้ผลผลิตปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นสูงกว่าแปลงที่ไม่รดน้ำที่เล็กน้อย

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีความแตกต่างกัน ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทดลองแสดง ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ปริมาณน้ำรดคอลัมน์ทดลองและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ทดลองเฉลี่ยรายสัปดาห์ (n=32)

คอลัมน์ทดลอง	อัตราการรดน้ำ (cm/week)	ปริมาณน้ำรดคอลัมน์รวม (L)	ปริมาณน้ำไหลผ่านคอลัมน์ (L)	ร้อยละน้ำออกจากคอลัมน์ต่อน้ำรดคอลัมน์
S5	5	70.6	13.5	19.1
S7	7	98.6	17.9	18.2
S10	10	141	24.8	17.6
SG5	5	70.6	8.1	11.5
SG7	7	98.6	10.7	10.9
SG10	10	141	14.7	10.4
T5	5	70.6	16.2	23.0
T7	7	98.6	21.6	21.9
T10	10	141	29.3	20.8
SPG	10	141	17.9	12.7

ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์เฉลี่ยรายสัปดาห์ คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์เป็น 13.5, 17.9 และ 24.8 L ตามลำดับ ร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองเป็น 19.1, 18.2 และ 17.6 ตามลำดับ คอลัมน์ S5 มีร้อยละ

ของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองสูงที่สุด ลำดับถัดมาเป็นคอลัมน์ S7 และคอลัมน์ S10 มีร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองต่ำที่สุด

ปริมาณน้ำทิ้งที่ไหลออกจากคอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์เป็น 8.1, 10.7 และ 14.7 L ตามลำดับ ร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองเป็น 11.5, 10.9 และ 10.4 ตามลำดับ คอลัมน์ SG5 มีร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองสูงที่สุด ลำดับถัดมาเป็นคอลัมน์ SG7 และคอลัมน์ SG10 มีร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองต่ำที่สุด

จากผลการทดลองคอลัมน์ T5 T7 และ T10 มีปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์เฉลี่ยรายสัปดาห์เป็น 16.2, 21.6 และ 29.3 L ตามลำดับ ร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองเป็น 23.0, 21.9 และ 20.8 ตามลำดับ คอลัมน์ T5 มีร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองสูงที่สุด ลำดับถัดมาเป็นคอลัมน์ T7 และคอลัมน์ T10 มีร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองต่ำที่สุด

การรดน้ำประปาในคอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SPG มีปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์เป็น 17.9 L ร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองเป็น 12.7 ร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองมีค่าต่ำ น้ำประปาประเหยได้ดี เนื่องจากมีอัตราการรดสูงและหญ้าเนเปียร์ดูดน้ำไปใช้สำหรับการเจริญเติบโต

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลอง น้ำประปาดคอลัมน์ดินมีร้อยละสูงที่สุด ลำดับถัดมาเป็นน้ำทิ้งรดคอลัมน์ดิน น้ำประปาดคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และน้ำทิ้งรดคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีอัตราส่วนต่ำที่สุด น้ำออกจากคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณน้อยกว่าคอลัมน์ดินประมาณ 40% ตัวแปรที่สำคัญสำหรับร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลอง คือ หญ้าเนเปียร์ และลักษณะน้ำรดคอลัมน์ โดยน้ำที่ไ้ซ้รดในคอลัมน์ดินที่ไม่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์กลายเป็นไ้ได้โดยการระเหย ส่วนน้ำที่ไ้ซ้รดคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้ากลายเป็นไ้ได้ด้วยการระเหยและการคายน้ำของหญ้าเนเปียร์ โดยหญ้าเนเปียร์นั้นต้องไ้ใช้น้ำสำหรับการเจริญเติบโต ทำให้อัตราการคายระเหยเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของหญ้าส่งผลให้ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ลดลง

เมื่อพิจารณาน้ำที่ไ้ซ้รดกล่าวได้ว่าเมื่อรดด้วยน้ำทิ้งร้อยละของน้ำไหลออกจากคอลัมน์ทดลองต่อน้ำรดคอลัมน์ทดลองน้อยกว่าเมื่อรดคอลัมน์ด้วยน้ำประปา ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทิ้งมีสิ่งสกปรกเจือปน สิ่งสกปรกบางส่วนถูกดูดซับโดยคอลัมน์ดิน ส่งผลให้อัตราการไหลซึมช้ากว่าน้ำประปา เมื่อมีอัตราการไหลซึมช้ากว่าส่งผลให้เกิดการระเหยได้คิ่กว่าน้ำประปา

อัตราการรดสูงอัตราการระเหยของน้ำที่สูงกว่าอัตราการรดต่ำเล็กน้อย เนื่องจากอัตราการรดสูงน้ำที่ขังอยู่บนผิวดินนานกว่าอัตราการรดต่ำ และรดน้ำในโรงเรือนมีแสงแดดส่องผ่านได้ทำให้เกิดการระเหยได้ดี

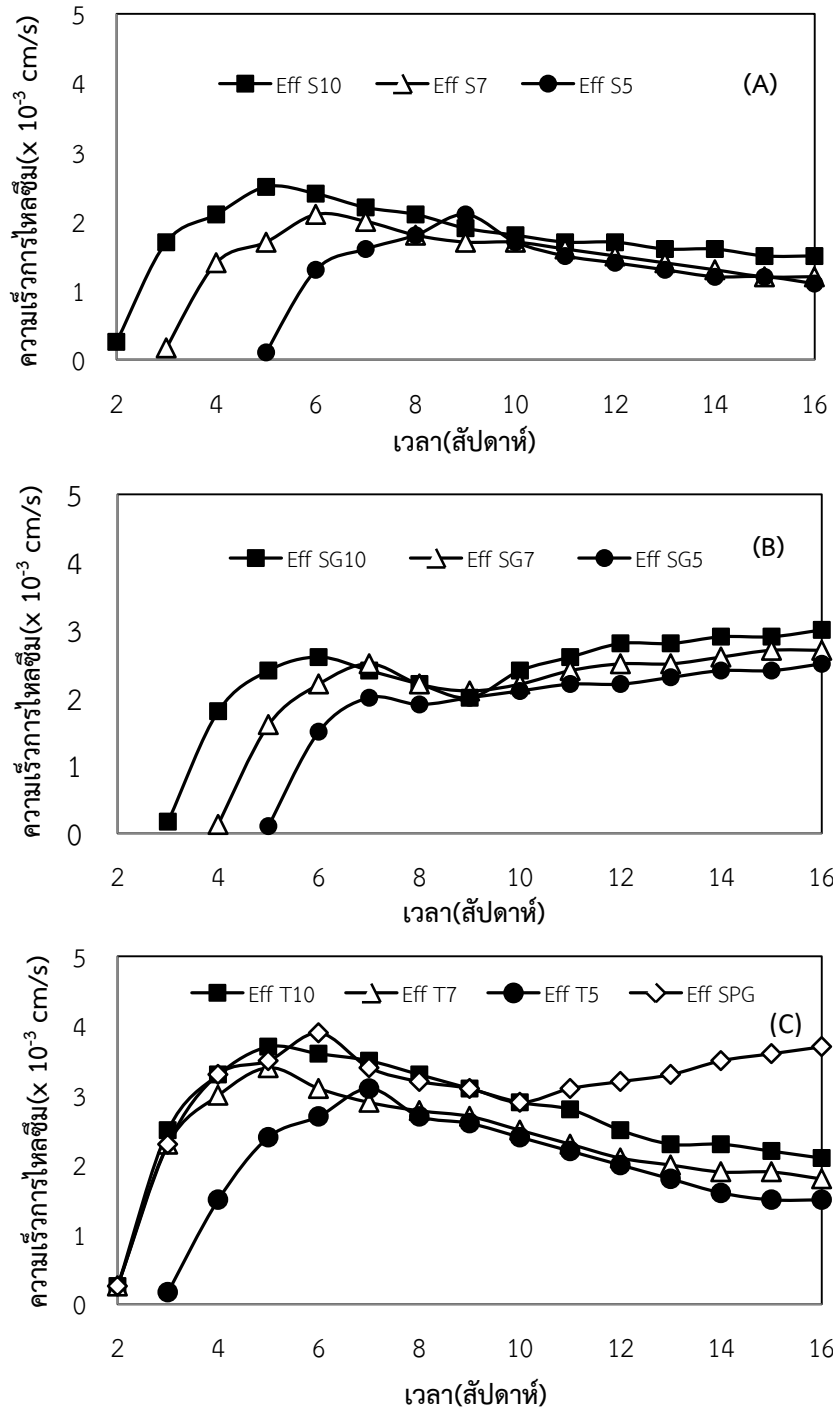
4.1.2.2 ความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน แสดงดังในรูปที่ 4-2A สัปดาห์ที่ 2 คอลัมน์ S10 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.26×10^{-3} cm/s สัปดาห์ที่ 3 คอลัมน์ S7 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.17×10^{-3} cm/s สัปดาห์ที่ 5 คอลัมน์ S5 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.10×10^{-3} cm/s เมื่อดินในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยน้ำ ความเร็วการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีความเร็วการไหลเป็น 1.3×10^{-3} , 2.1×10^{-3} และ 2.4×10^{-3} cm/s ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 9 ความเร็วน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 ความเร็วการไหลน้ำที่ผ่านคอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีความเร็วการไหลเป็น 1.1×10^{-3} , 1.2×10^{-3} และ 1.5×10^{-3} cm/s ตามลำดับ

ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แสดงดังในรูปที่ 4-2B สัปดาห์ที่ 3 คอลัมน์ SG10 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.17×10^{-3} cm/s สัปดาห์ที่ 4 คอลัมน์ SG7 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.13×10^{-3} cm/s สัปดาห์ที่ 5 คอลัมน์ SG5 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.10×10^{-3} cm/s เมื่อดินในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยน้ำ ความเร็วการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 6 น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีความเร็วการไหลเป็น 1.5×10^{-3} , 2.2×10^{-3} และ 2.6×10^{-3} cm/s ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 6 – 9 ความเร็วน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 9 น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีความเร็วการไหลเป็น 2.0×10^{-3} , 2.1×10^{-3} และ 2.0×10^{-3} cm/s ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 9 ความเร็วน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 ความเร็วการไหลน้ำที่ผ่านคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีความเร็วการไหลเป็น 2.5×10^{-3} , 2.7×10^{-3} และ 3.0×10^{-3} cm/s ตามลำดับ

ความเร็วของน้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แสดงดังในรูปที่ 4-2C สัปดาห์ที่ 2 คอลัมน์ T10 T7 และ SPG มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.26×10^{-3} cm/s สัปดาห์ที่ 3 คอลัมน์ T5 มีความเร็วน้ำออกจากคอลัมน์เป็น 0.17×10^{-3} cm/s ความเร็วการไหลของน้ำประปาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 6 น้ำประปาไหลผ่านคอลัมน์ T5 T7 T10 และ SPG มีความเร็วการไหลเป็น 2.7×10^{-3} , 3.1×10^{-3} , 3.6×10^{-3} และ 3.9×10^{-3} cm/s ตามลำดับ หลังจากสัปดาห์ที่ 6 ความเร็วน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ T5 T7 และ T10 ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 น้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ T5 T7 และ T10 มีความเร็วการไหลเป็น 1.5×10^{-3} , 1.8×10^{-3} และ 2.1×10^{-3} cm/s ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ สัปดาห์ที่ 6 – 9 ความเร็วการไหลน้ำประปาลดลง สัปดาห์ที่ 9 ความเร็วน้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ SPG เป็น 3.1×10^{-3} cm/s หลังจากสัปดาห์ที่ 9 ความเร็วน้ำเพิ่มขึ้น

อย่างต่อเนื่องถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 ความเร็วการไหลน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ SPG มีความเร็วการไหลเป็น 3.7×10^{-3} cm/s



รูปที่ 4-2 ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (A) น้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน (B) น้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และ (C) น้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์ดินที่รดน้ำทิ้งและรดน้ำประปา ความเร็วการไหลมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากดินมีความชื้นต่ำ เมื่อรดน้ำดินเริ่มอิ่มตัวด้วยน้ำความเร็วการไหลจึงเพิ่มขึ้น และลดลงในช่วงสัปดาห์ที่ 7 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากการรดน้ำส่งผลให้ดินยุบตัว ดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างรูพรุนในดินลดลง ความเร็วการไหลของน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบความเร็วการไหลของการรดน้ำทิ้งและรดน้ำประปาพบว่าน้ำประปามีความเร็วการไหลสูงกว่าที่อัตราการรดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทิ้งมีอนุภาคของแข็งสูง ส่งผลให้รูพรุนของดินน้อยลง ความเร็วการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้งและรดด้วยน้ำประปาความเร็วการไหลมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สัปดาห์แรกที่น้ำไหลออกจากคอลัมน์ถึงช่วงสัปดาห์ที่ 6 - 7 ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นดินมากขึ้น ช่วงสัปดาห์ที่ 7 - 9 ความเร็วการไหลลดลง เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ดูดน้ำใช้สำหรับการเจริญเติบโต หลังจากสัปดาห์ที่ 9 ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นถึงสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์เติมพื้นที่คอลัมน์ทดลอง ส่งผลให้รูพรุนของดินเพิ่มขึ้น ความเร็วการไหลของน้ำจึงเพิ่มขึ้น

4.1.2.3 การบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

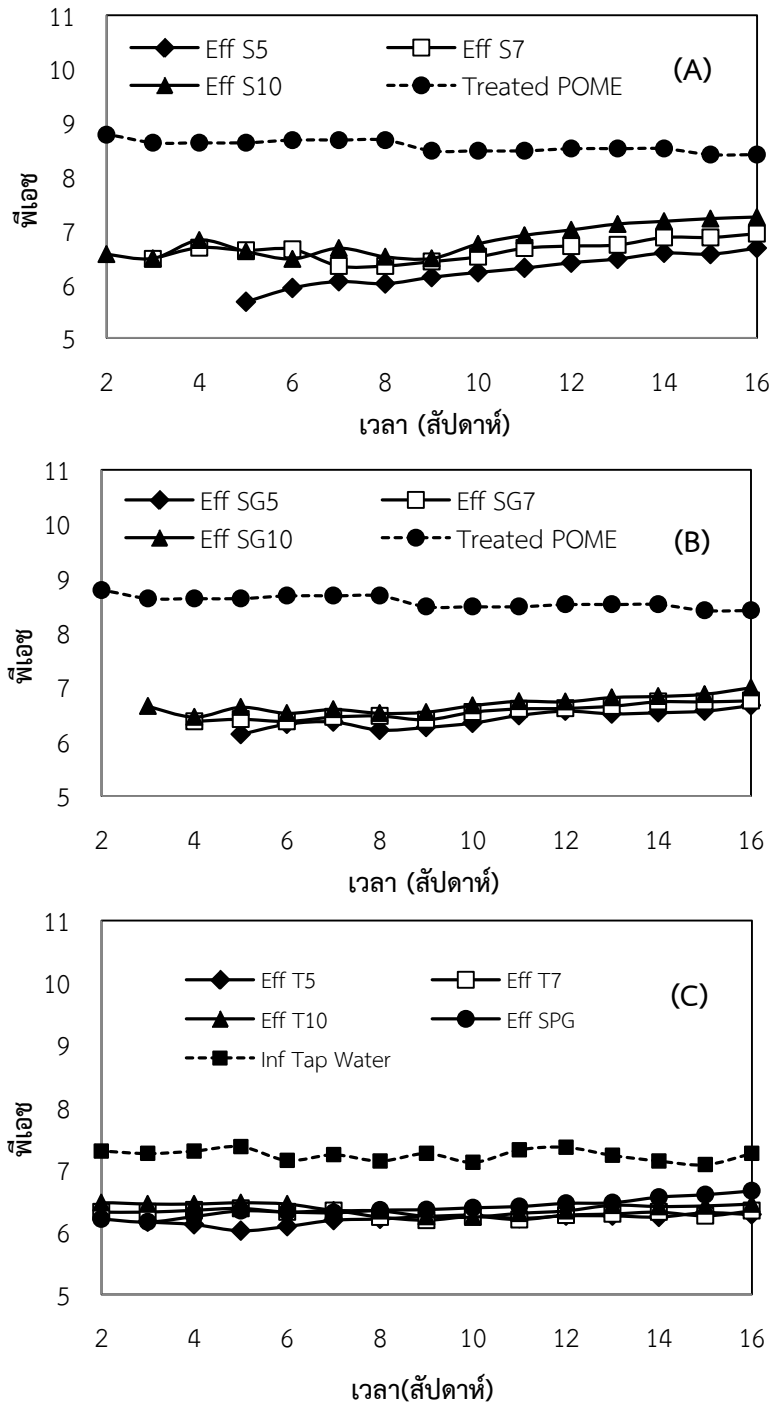
1) พีเอช

ค่าพีเอชของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินรดด้วยน้ำประปาและน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-3 น้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองมีค่าพีเอชในช่วง 8.4-8.8 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดิน (รูปที่ 4.3A) ในช่วงสัปดาห์ที่ 2-10 มีค่าพีเอชในช่วง 5.7-6.7 โดยอัตราการรดสูงมีค่าพีเอชสูงกว่าอัตราการรดต่ำ เมื่อระยะเวลาบำบัดเพิ่มขึ้นค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) และ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557)

ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างดินในคอลัมน์ทดลองมีค่าพีเอชเป็นกรด (pH 4.9) ทำให้มีปริมาณของไฮโดรเจนไอออนในอนุภาคดินสูง เมื่อรดน้ำทิ้งที่มีค่าพีเอชเป็นด่างหรือมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนละลายอยู่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินจึงมีค่าพีเอชสูงขึ้นตามลำดับ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองในช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.7-7.3 เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าพีเอชในดินเพิ่มขึ้น เพราะมีการรดน้ำทิ้งเป็นประจำทุกวัน ทำให้มีการเติมไฮดรอกไซด์ไอออนในดินอย่างต่อเนื่อง เมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลองค่าพีเอชคงที่

น้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ มีค่าพีเอชในช่วง 8.4-8.8 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดิน (รูปที่ 4.3B) ในช่วงสัปดาห์ที่ 2-10 มีค่าพีเอชในช่วง 6.1-6.7 โดยอัตราการรดสูงมีค่าพีเอชสูงกว่าอัตราการรดต่ำ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ในช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.3-7.0 เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าพีเอชในดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-3 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดิน (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และ (C) น้ำประปาที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

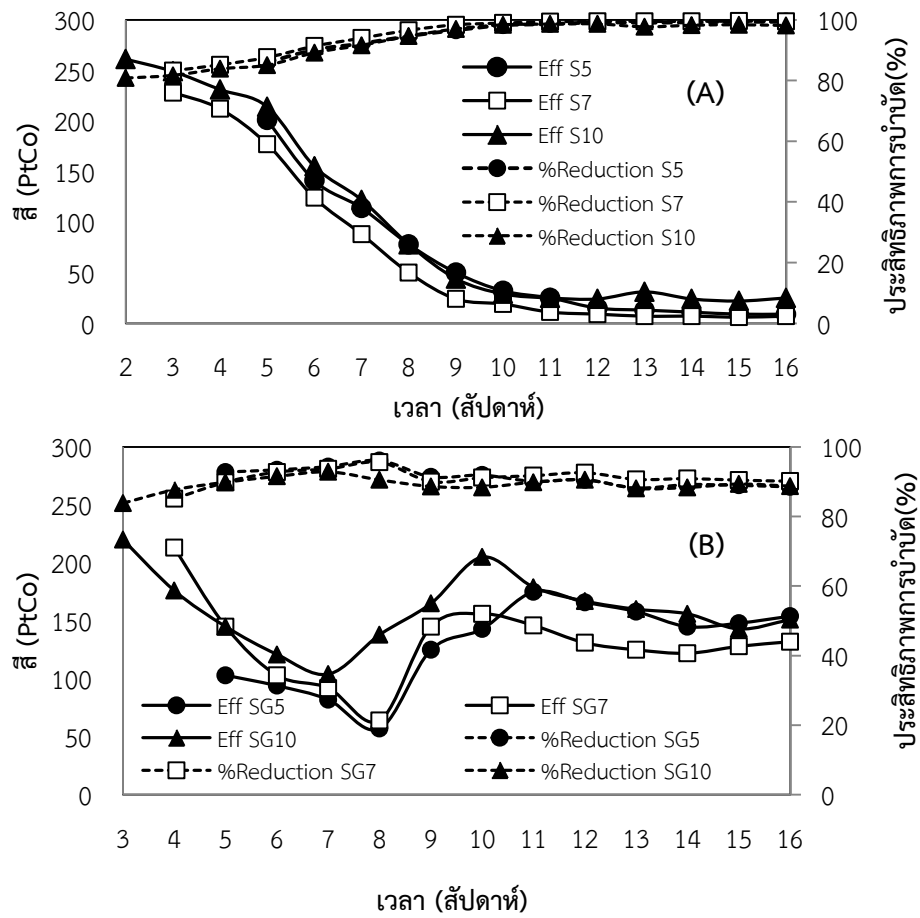
ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่ากว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์เล็กน้อยอันเนื่องมาจากน้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณน้ำไหลซึมคอลัมน์ดินมากกว่าประมาณ 40% ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนละลายเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินมีปริมาณน้ำมากกว่าสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าจึงมีค่าพีเอชมากกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

น้ำประปราดคอลัมน์ทดลองมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.1-7.4 น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.2-6.4 การรดน้ำประปราดในคอลัมน์ทดลองทำให้เติมไฮดรอกไซด์ไอออนได้น้อยกว่าการรดน้ำทิ้ง น้ำประปรามีค่าพีเอชต่ำกว่าน้ำทิ้ง ค่าพีเอชของน้ำประปรายที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินทดลองคงที่ตลอดการทดลอง

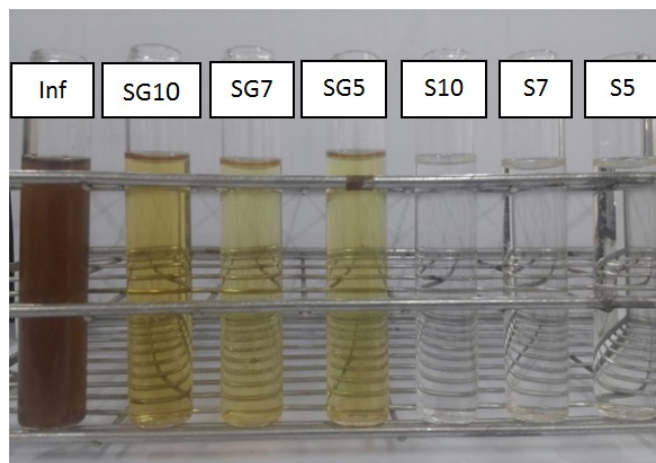
2) สี

ค่าสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้งอัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-4 ลักษณะสีของน้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง แสดงในรูปที่ 4-5 น้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองมีค่าสีในช่วง 1,240-1,467 PtCo น้ำทิ้งมีสีน้ำตาลแดงเข้ม จากรูปที่ 4.4 A การรดน้ำทิ้งในคอลัมน์ดิน น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ S10 สัปดาห์ที่ 2 มีค่าสี 261 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 80.8% น้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ S7 สัปดาห์ที่ 3 มีค่าสี 228 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 83.2% และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ S5 สัปดาห์ที่ 5 มีค่าสี 201 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 85.9%

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินค่าสีมีแนวโน้มลดลง ช่วงสัปดาห์ที่ 5-11 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินมีค่าลดลง น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีสีค่อนข้างใส ช่วงสัปดาห์ที่ 12 ประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าสีเป็น 15, 9 และ 24 PtCo ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 99.2, 99.5 และ 98.6% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 12-16 ประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ S5 และ S7 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย คอลัมน์ S10 ประสิทธิภาพคงที่ ค่าสีของคอลัมน์ S5 S7 และ S10 ในสัปดาห์ที่ 16 มีค่าเป็น 9, 7 และ 25 PtCo ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 99.3, 99.5 และ 98.1% ตามลำดับ สัปดาห์สุดท้ายของการทดลองค่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีสีใส มีสารแขวนลอยสีเหลืองอ่อนเจือปนเล็กน้อย ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) ซึ่งพบว่าค่าสีมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและคงที่เมื่อเวลาบำบัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-4 ค่าสี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด



รูปที่ 4-5 ลักษณะสีของน้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง สัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG10 สัปดาห์ที่ 3 มีค่าสีเป็น 220 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 83.8% น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ SG7 สัปดาห์ที่ 4 มีค่าสีเป็น 213 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 87.7% และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ SG5 สัปดาห์ที่ 5 มีค่าสีเป็น 103 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 92.8% คอลัมน์ SG10 ช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น สัปดาห์ที่ 7 คอลัมน์ SG10 มีค่าสีเป็น 104 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 92.9% ช่วงสัปดาห์ที่ 5-8 คอลัมน์ SG5 และ SG7 มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 8 คอลัมน์ SG5 และ SG7 มีค่าสีเป็น 57 และ 64 PtCo ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 96.1 และ 95.6% ตามลำดับ

ช่วงสัปดาห์ที่ 7-10 คอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สัปดาห์ที่ 10 คอลัมน์ SG10 มีค่าสี 205 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.4% สัปดาห์ที่ 8-10 คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพลดลงเช่นกัน สัปดาห์ที่ 10 คอลัมน์ SG7 มีค่าสี 156 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 91.2% และสัปดาห์ที่ 8-11 คอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพลดลง สัปดาห์ที่ 11 คอลัมน์ SG5 มีค่าสี 175 PtCo คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.1% ช่วงสัปดาห์ที่ 11-14 ทั้ง 3 คอลัมน์มีประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น สัปดาห์ที่ 14 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าสี 145, 122 และ 156 PtCo ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 89.2, 90.9 และ 88.4% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 14-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าสีเป็น 154, 132 และ 151 PtCo ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.5, 90.2 และ 88.7% ตามลำดับ สัปดาห์สุดท้ายของการทดลองค่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีสีเหลืองใส มีค่าสีใกล้เคียงกับผลการทดลองของ พลิชฐ์ จารุจาริต (2559) ที่ปลูกหญ้าชิกเนล เลื่อยร่วมกับการเติมแบคทีเรียเพื่อบำบัดน้ำทิ้ง

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าสีโดยคอลัมน์ทดลองที่ใช้ดินอย่างเดียว ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามช่วงระยะเวลาการบำบัด เนื่องจากเมื่อรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ ส่งผลให้ดินในคอลัมน์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเกิดการกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผิวหน้า (รูปที่ 4-6) ประกอบกับดินในคอลัมน์มีอนุภาคขนาดเล็กทำให้แรงควัตถุ สิ่งเจือปนขนาดใหญ่ในน้ำทิ้งอุดช่องว่างในดิน ส่วนอนุภาคขนาดเล็กในน้ำทิ้ง ดินในคอลัมน์ทดลองสามารถดูดซับไว้ได้ ช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 ของการทดลองคอลัมน์ S10 เป็นคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ จากผลการทดลองกล่าวได้ว่า กลไกในการกำจัดสีโดยคอลัมน์ดินคือการกรองที่ผิวหน้าและการดูดซับโดยดิน



รูปที่ 4-6 การกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผิวหน้าของดินในคอลัมน์ทดลอง

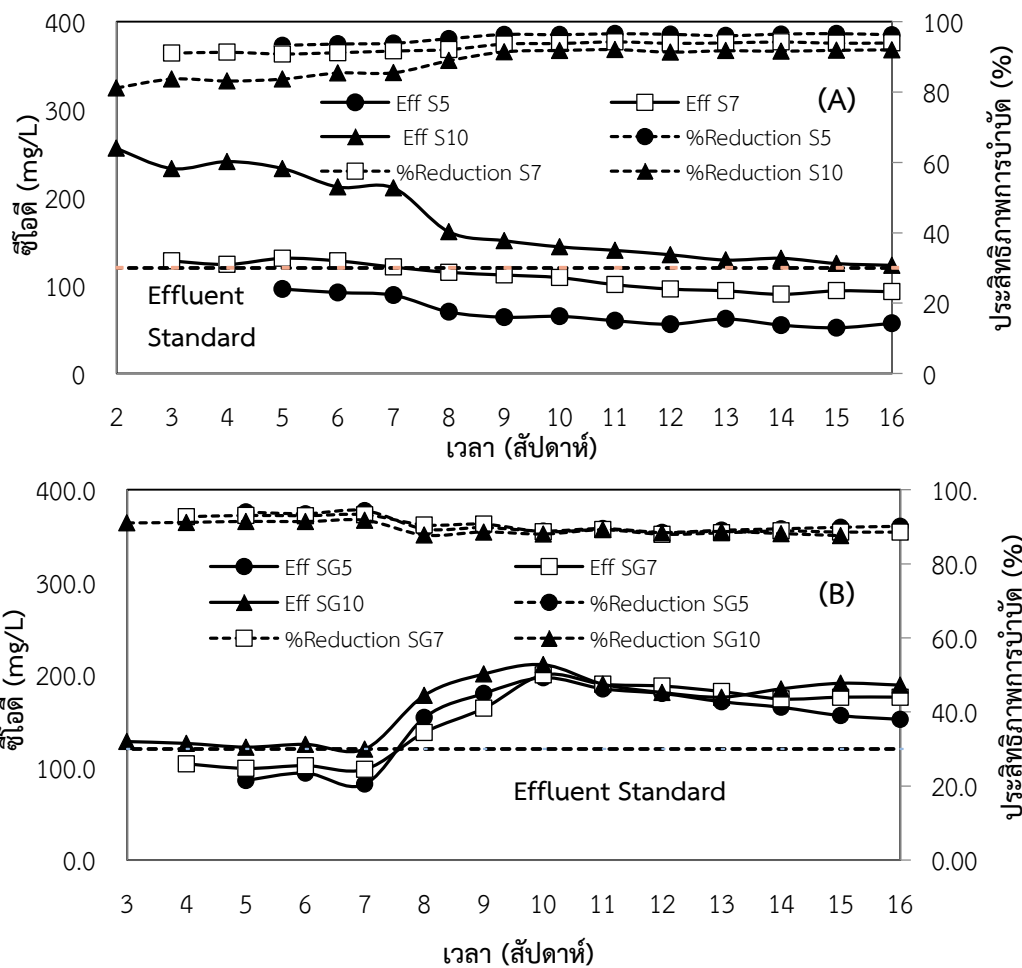
คอลัมน์ทดลองที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ประสิทธิภาพการบำบัดไม่คงที่ โดยช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 รากหญ้าเนเปียร์น้อยทำให้ดินยังมีความหนาแน่นสูง พื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคดินสูง และดินปนเปื้อนสิ่งสกปรกในน้ำทิ้งน้อย อนุภาคดินก่อให้เกิดการกรองที่ผิวหน้าและดินดูดซับสิ่งปรกได้มากประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น แต่ช่วงสัปดาห์ที่ 7-11 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากหญ้าเนเปียร์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว รากหญ้าเนเปียร์ในดินเต็มพื้นที่ของคอลัมน์ น้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านรากหญ้าเนเปียร์และดินได้ ค่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงสัปดาห์ที่ 11-16 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากกลไกการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียเพิ่มขึ้น รากหญ้าเนเปียร์ปล่อยสารดึงดูดให้เกิดแบคทีเรียบริเวณรากเพิ่มขึ้น กลไกของการบำบัดค่าสีในคอลัมน์ทดลองที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คือ การกรองที่ผิวหน้า การดูดซับโดยดินและกระบวนการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียร่วมกับหญ้าเนเปียร์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโดยคอลัมน์ดินกับคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์พบว่า การบำบัดโดยคอลัมน์ดินมีประสิทธิภาพบำบัดค่าสีอยู่ระหว่าง 80.8-99.6% มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเป็น 94.7% การบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าสีอยู่ระหว่าง 83.8-96.1% มีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเป็น 91.0% คอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์อัตราการรดน้ำทิ้ง 7 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด

3) ซีโอดี

ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้งที่อัตราการรด 5 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-7 น้ำทิ้งเข้าระบบมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 1,360-1,766 mg/L การรดน้ำคอลัมน์ S10 S7 และ S5 สัปดาห์ที่ 2 3 และ 5

ของการทดลองมีค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 256, 128 และ 96 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 81.2, 91.1 และ 93.3% (รูปที่ 4-7 A) ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 2-8 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 8 คอลัมน์ S5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด รองลงมาคือคอลัมน์ S7 ส่วนคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด โดยค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 70, 115 และ 161 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.2, 92.1 และ 88.9% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 8-6 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ S5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด ค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 57 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 96.3% รองลงมาคือคอลัมน์ S7 มีค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 93 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.0% และคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด มีค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 123 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 92.0% ผลการทดลองการบำบัดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งด้วยคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์สอดคล้องกับผลการทดลองของ กาณจน์ ชูทอง (2556) และ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัด เมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเริ่มคงที่



รูปที่ 4-7 ค่าซีไอดี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด

น้ำทิ้งผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ S5 มีค่า ซีโอดีผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) โดยกำหนดไว้ไม่เกิน 120 mg/L การบำบัดในคอลัมน์ S7 ช่วงสัปดาห์ที่ 8-16 มีค่าผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วนการบำบัดในคอลัมน์ S10 ไม่ผ่านมาตรฐานตลอดการทดลอง สรุปได้ว่าน้ำที่ออกจากคอลัมน์ S5 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG10 SG7 และ SG5 สัปดาห์ที่ 3 4 และ 5 มีค่าซีโอดี 128, 104 และ 86 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 91.1 92.7 และ 94.0% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 7 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 ค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 82, 98 และ 120 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.4, 93.3 และ 91.8% ตามลำดับ (รูปที่ 4-7 B)

ช่วงสัปดาห์ที่ 7-10 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สัปดาห์ที่ 10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีค่าต่ำที่สุด คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็น 197, 200 และ 211 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.8, 88.7 และ 88.1% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา และคอลัมน์ SG10 ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด คอลัมน์ SG5 มีค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็น 152 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.1% คอลัมน์ SG7 มีค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็น 176 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.6% และคอลัมน์ SG10 มีค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็น 189 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 87.7%

สัปดาห์ที่ 5-7 คอลัมน์ SG5 มีค่าซีโอดีผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง สัปดาห์ที่ 4-7 คอลัมน์ SG7 มีค่าผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำ คอลัมน์ SG10 มีค่าซีโอดีไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตลอดการทดลอง สรุปได้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ SG5 ที่อัตราการรด 5 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ในรูปของมวลซีโอดีในน้ำทิ้งที่ใช้รดคอลัมน์และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ทดลองตลอดการทดลองอัตราการรดน้ำทิ้ง 5 7 และ 10 cm/week มวลในรูปซีโอดีในน้ำทิ้งมีค่าเป็น 107, 150 และ 214 g ตามลำดับ คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มวลในรูปซีโอดีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 0.92, 1.96 และ 4.34 g คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มวลรูปซีโอดีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 1.22, 1.64 และ 2.44 g ที่อัตราการรด 5 cm/week โดยที่อัตราการรด 7 และ 10 cm/week มวลซีโอดีหลังการบำบัดโดยคอลัมน์ดินมีค่าสูงกว่ามวลของคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ลดมวลซีโอดีได้สูงกว่าคอลัมน์ดินที่ไม่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดมวลในรูปซีโอดีคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถลดมวลในรูปซีโอดีได้ดีกว่าคอลัมน์ดินที่ไม่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์

การลดค่าซีโอดีและสมมูลมวล

การศึกษาสมมูลมวลและการย่อยสลายซีโอดี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีในรูปของมวลและความเข้มข้น เพื่อหาปัจจัย และสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกัน รวมทั้งหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการลดมวลและการลดความเข้มข้นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่าซีโอดีก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด

คอลัมน์	ซีโอดีเข้าระบบ (mg/L)	ซีโอดีออก (mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด
S5	1,360-1,766 (1,518)	52-96 (68)	93.3-96.6 (95.6)
S7	1,360-1,766 (1,518)	90-128 (110)	90.8-94.3 (92.9)
S10	1,360-1,766 (1,518)	123-256 (175)	81.2-92.0 (88.4)
SG5	1,360-1,766 (1,518)	86-197 (150)	88.8-94.0 (90.5)
SG7	1,360-1,766 (1,518)	98-200 (153)	88.7-93.3 (90.3)
SG10	1,360-1,766 (1,518)	120-211 (166)	88.1-91.8 (89.4)

การทำสมมูลมวลของการบำบัดค่าซีโอดี

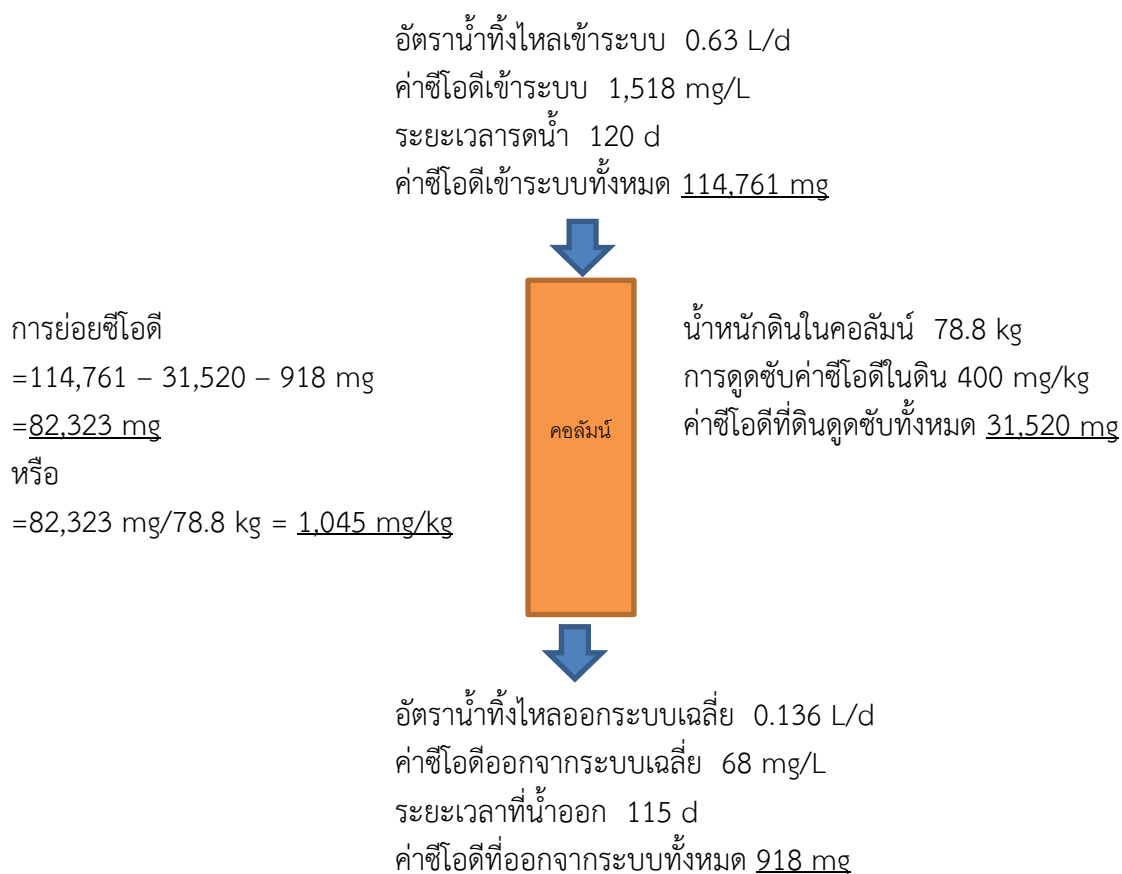
เมื่อพิจารณาการบำบัดซีโอดีที่น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดิน (คอลัมน์ S5 S7 และ S10) กระบวนการซึ่งทำให้ค่าซีโอดีในน้ำทิ้งมีค่าลดลงสามารถเกิดขึ้นได้จาก 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ การดูดซับ (adsorption) และการบำบัดชีวภาพ (biological degradation) ส่วนการระเหย (evaporation) ของน้ำทำให้ค่าความเข้มข้นของซีโอดีมีค่าสูงขึ้น การลดลงของค่าซีโอดีของน้ำทิ้งรดคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ (คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10) สามารถเกิดขึ้นได้จาก 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การดูดซับ (adsorption) และการบำบัดทางชีวภาพพร้อมกับการบำบัดด้วยพืช (biological degradation and phytoremediation) ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าซีโอดีสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการการระเหย (evaporation) ของน้ำและการคายน้ำของพืช (evapo-transpiration)

จากข้างต้นกล่าวได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นสามารถก่อให้เกิดการลดลงและการเพิ่มขึ้นของสารได้การใช้ค่าความเข้มข้นในการคิดประสิทธิภาพการบำบัดอาจไม่แสดงค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ลดลงจากการระเหยจะมีส่วนทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าสูงขึ้นทั้งที่ระบบสามารถลดค่าซีโอดีได้ดี

จากผลการทดลองค่าซีโอดีในดินก่อนและหลังการทดลอง พบว่าค่าซีโอดีในดินก่อนการทดลองมีค่าเป็น 84 mg/kg ค่าซีโอดีในดินหลังการทดลองในคอลัมน์ S5 S7 S10 SG5 SG7 และ SG10 มีค่าเป็น 484, 568, 602, 318, 376 และ 428 mg/kg ตามลำดับ เมื่อคำนวณสมมูลมวลของคอลัมน์ S5 ค่าการดูดซับซีโอดีเท่ากับ 484 mg/kg เมื่อหักลบกับค่าซีโอดีในดินเริ่มต้น คอลัมน์ S5 จึงมีค่าการดูดซับซีโอดีจากน้ำทิ้งเป็น 400 mg/kg

ในส่วนนี้จึงพิจารณาสมมูลมวลของซีโอติดังต่อไปนี้

มวลซีโอติลดลงได้ = มวลซีโอติที่เข้าระบบ - มวลซีโอติที่เหลืออยู่ในดิน - มวลซีโอติของน้ำที่ออกจากคอลัมน์
โดยตัวอย่างการคำนวณสมมูลมวลของการบำบัดซีโอติ ยกตัวอย่างคอลัมน์ S5 แสดงดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างสมมูลมวลของการบำบัดซีโอติ

ค่ามวลซีโอติเข้าระบบทั้งหมดและมวลซีโอติที่ผ่านการบำบัดโดยจากคอลัมน์ทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-4 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีมวลในรูปซีโอติออกจากระบบเป็น 918, 1,969 และ 4,340 mg ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดมวลซีโอติเป็น 99.1, 98.6 และ 97.9% ตามลำดับ คอลัมน์ S5 ลดมวลซีโอติได้สูงที่สุด ลำดับถัดมาเป็นคอลัมน์ S7 และคอลัมน์ S10 ลดมวลซีโอติได้ต่ำที่สุด จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการรดเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการลดมวลซีโอติลดลง

คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีมวลในรูปซีโอติออกจากระบบเป็น 1,215, 1,637 และ 2,440 mg ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดมวลซีโอติเป็น 98.8, 98.9 และ 98.7% ตามลำดับ คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีประสิทธิภาพการลดมวลซีโอติใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดมวลซีไอดี อัตราการรดน้ำทิ้งที่ 5 cm/week คอลัมน์ดินลดมวลซีไอดีได้สูงกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แต่ที่อัตราการรดน้ำทิ้ง 7 และ 10 cm/week คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ลดมวลซีไอดีได้สูงกว่าคอลัมน์ดิน เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดมวลซีไอดีโดยรวม คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการลดมวลซีไอดีสูงกว่าคอลัมน์ดินเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการบำบัดในรูปของ มวล และความเข้มข้น ประสิทธิภาพการลดมวลในทุกคอลัมน์ทดลองมีความใกล้เคียงกัน มีประสิทธิภาพการลดมวลในรูปซีไอดีอยู่ระหว่าง 97.9-99.1% ส่วนประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นในรูปซีไอดีอยู่ระหว่าง 88.4-95.6%

คอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้งมีผลต่างของประสิทธิภาพการลดซีไอดีในรูปของมวลและความเข้มข้น ของคอลัมน์ S5 S7 และ S10 เป็น 3.5, 5.7 และ 10.3 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดลงโดยมวลมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการลดลงของความเข้มข้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีอัตราการรดสูง ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นน้อยลง อัตราการรดสูงน้ำขังที่ชั้นผิวหน้าของดินสูง ใช้เวลานานในการซึมลงคอลัมน์ดิน อีกทั้งโรงเรือนที่ตั้งคอลัมน์ดินแสงแดดสามารถส่องผ่านได้ ทำให้น้ำเกิดการระเหยได้ดี ประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นจึงต่ำกว่าอัตราการรดที่ต่ำกว่า

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้งมีผลต่างของประสิทธิภาพการลดซีไอดีในรูปของมวลและความเข้มข้น ของคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 เป็น 8.3, 8.6 และ 9.3 ตามลำดับ ความต่างของประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นและมวลที่อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการทดลองมีกระบวนการการระเหยของน้ำและการคายน้ำของพืช ส่งผลให้น้ำทิ้งที่รดคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ระเหยได้ดีตั้งแต่อัตราการรดต่ำ กระบวนการการระเหยของน้ำและการคายน้ำของพืชส่งผลให้ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ต่อมีปริมาณน้ำรดคอลัมน์ดินมีอัตราส่วนที่ต่ำ การบำบัดซีไอดีของคอลัมน์ที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ในรูปความเข้มข้นจึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ตารางที่ 4-4 มวลในรูปซีไอดีก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด

คอลัมน์	มวลซีไอดีเข้าระบบทั้งหมด (mg)	มวลซีไอดีที่ผ่านการบำบัดทั้งหมด (mg)	ประสิทธิภาพการบำบัด (สมมูลมวล)	ประสิทธิภาพการบำบัด (ความเข้มข้น)	ผลต่าง
S5	107,171	918	99.1%	95.6%	3.5%
S7	150,039	1,969	98.6%	92.9%	5.7%
S10	214,342	4,340	97.9%	88.4%	10.3%
SG5	107,171	1,215	98.8%	90.5%	8.3%
SG7	150,039	1,637	98.9%	90.3%	8.6%
SG10	214,342	2,440	98.7%	89.4%	9.3%

ค่าคงที่การย่อยสลายซีโอดี

คำนวณค่าคงที่การย่อยสลายจากปฏิกิริยา first order reaction โดยใช้สูตร

$$\ln C = \ln C_0 - kt$$

ค่าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4-5

กำหนดให้การย่อยซีโอดีเป็นการย่อยแบบ first order reaction

เมื่อ $\ln C_0$ คือ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งเข้าระบบในแต่ละวัน

$\ln C$ คือ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งออกระบบในแต่ละวัน

t คือ ระยะเวลา 1 วัน

เมื่อ คำนวณได้ ค่า k ของการย่อยสลายของแต่ละคอลัมน์ทดลองในแต่ละวัน

เพื่อพิจารณาค่าคงที่การย่อยสลาย มี 2 สาเหตุ ที่ทำให้ค่าคงที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราการรดน้ำทิ้ง เมื่ออัตราการรดต้ำน้ำทิ้งไหลลงในคอลัมน์ได้อย่างรวดเร็ว มีน้ำซึ่งบริเวณผิวหน้าชั้นดินน้อย เมื่ออัตราการรดสูงขึ้นน้ำซึ่งบริเวณผิวชั้นดินมาก และใช้เวลานานในการซึมลงคอลัมน์ดิน อีกทั้งพื้นที่ตั้งคอลัมน์ดินแสงแดดส่องผ่านได้ดี ส่งผลให้น้ำที่อยู่บนผิวชั้นดินระเหยได้ดี ปริมาณน้ำไหลออกจากคอลัมน์ต้ำน้ำทิ้งรดคอลัมน์ต้ำ ความเข้มข้นน้ำออกจึงสูงกว่าอัตราการรดต้ำที่บำบัดซีโอดีได้ดี

การปลูกหญ้าเนเปียร์เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าคงที่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดกระบวนการคายระเหยและการคายน้ำของพืช น้ำทิ้งที่รดคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ระเหยได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการรดที่เท่ากันในคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ ค่าคงที่การย่อยสลายมีค่าสูงกว่า

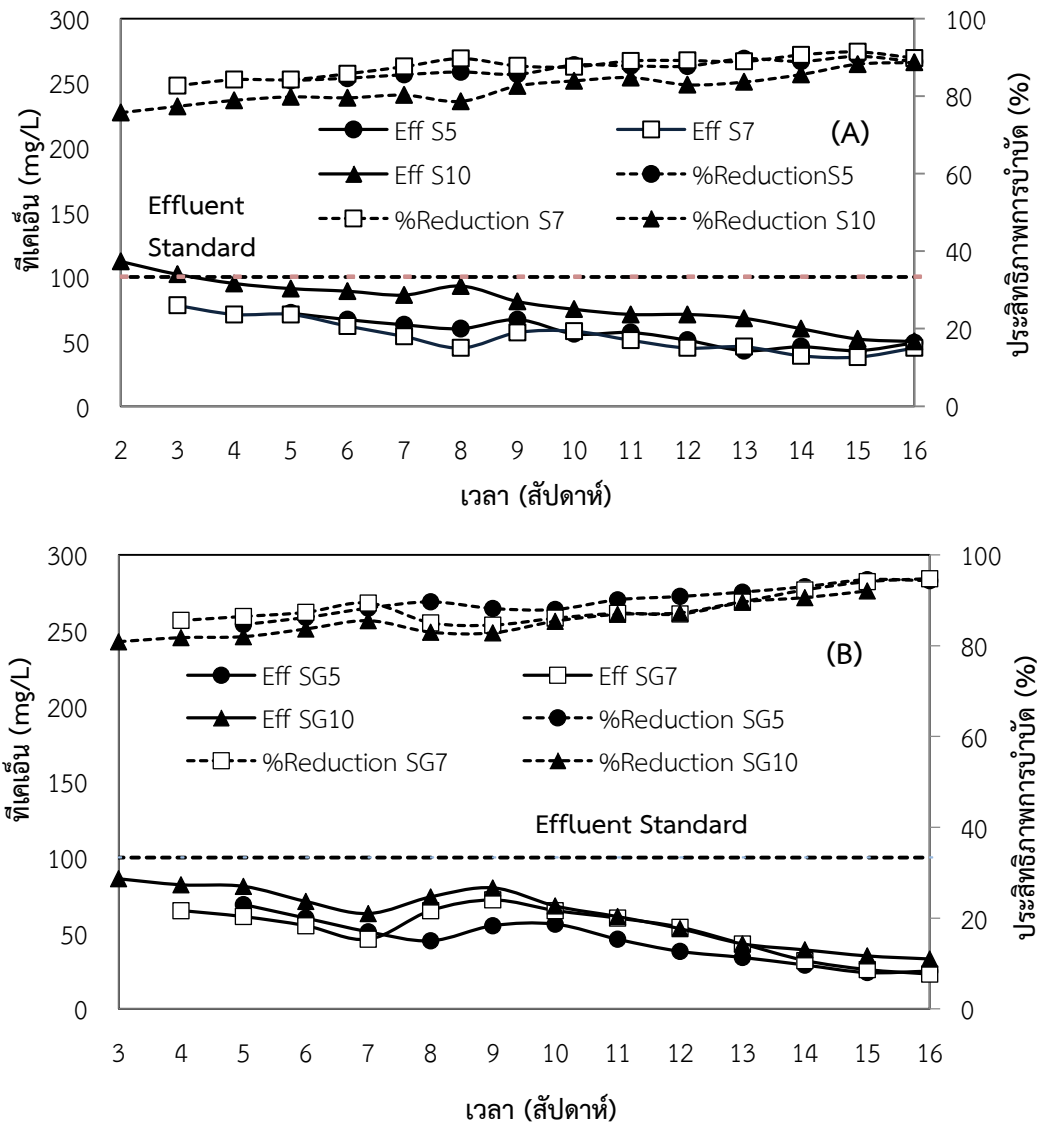
ตารางที่ 4-5 อัตราการย่อยซีโอดีแบบปฏิกิริยาลำดับที่ 1

คอลัมน์	อัตราการลดซีโอดีแบบ first order (day ⁻¹)
S5	1.640-2.057 (1.916±0.15)
S7	1.350-1.617 (1.500±0.10)
S10	0.867-1.312 (1.145±0.17)
SG5	1.912-2.508 (2.081±0.21)
SG7	1.799-2.290 (1.998±0.18)
SG10	1.697-2.029 (1.832±0.12)

4) ทีเคเอ็น

ค่าทีเคเอ็นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-9 น้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองมีค่าทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 415-466 mg/L น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดคอลัมน์ S10 สัปดาห์ที่ 2 มีค่าทีเคเอ็น

112 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 75.7% น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดคอลัมน์ S7 สัปดาห์ที่ 3 มีค่าที่เคเอ็น 78 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 82.7% และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดคอลัมน์ S5 สัปดาห์ที่ 5 มีค่าที่เคเอ็น 72 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดที่ 84.0% (รูปที่ 4-9A)



รูปที่ 4-9 ค่าที่เคเอ็น (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด

ช่วงสัปดาห์ที่ 2-7 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 7 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าที่เคเอ็น 63, 54 และ 86 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 85.5, 87.6 และ 80.2% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 7-9 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 9 คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด รองลงมาเป็นคอลัมน์ S5 และคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 87.8, 85.6 และ 82.6% ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 9-16 คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด รองลงมาเป็น

คอลัมน์ S5 และคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 49, 45 และ 50 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.9, 89.8 และ 88.7 ตามลำดับ ผลการลดค่าที่เคเอ็นสอดคล้องกับ ผลการทดลองของ กาญจนี ชูทอง (2556) ซึ่งพบว่าค่าที่เคเอ็นลดลงอย่างต่อเนื่องและคงที่เมื่อเวลาบำบัดเพิ่มขึ้น ช่วงสัปดาห์ที่ 4 ถึงสัปดาห์สุดท้ายของการบำบัดน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่มีการบำบัดโดยดินเพียงอย่างเดียว มีค่าที่เคเอ็นผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 100 mg/L

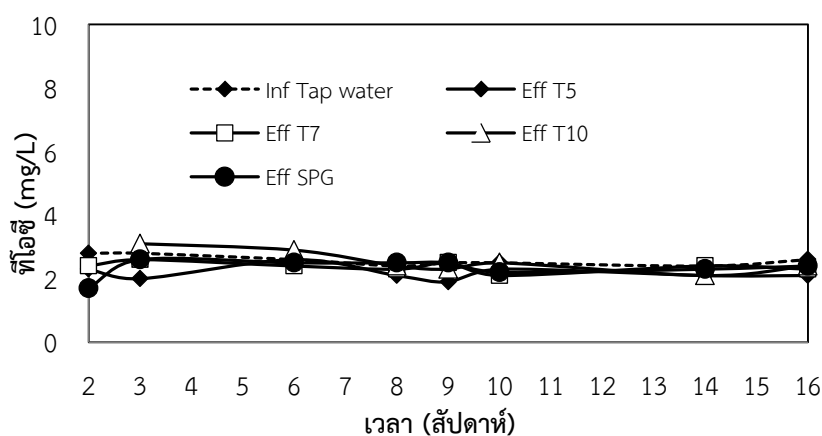
น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG10 สัปดาห์ที่ 3 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 86 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 80.9% คอลัมน์ SG7 สัปดาห์ที่ 4 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 65 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 85.6% และคอลัมน์ SG5 สัปดาห์ที่ 5 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 69 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 84.7% ช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 7 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 51, 46 และ 63 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.3, 89.4 และ 85.5% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 7-10 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สัปดาห์ที่ 10 คอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด รองลงมาเป็นคอลัมน์ SG7 และคอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 88.0, 86.1 และ 85.4% ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 10 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 16 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าที่เคเอ็นเป็น 25, 23 และ 33 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.3, 94.8 และ 92.5% ตามลำดับ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ตลอดการทดลองมีค่าที่เคเอ็นผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง โดยกำหนดไว้ไม่เกิน 100 mg/L

จากผลการทดลองการบำบัดที่เคเอ็นโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ดินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเกิดกลไกการดูดซับด้วยอนุภาคดิน สิ่งสกปรกในน้ำทิ้งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถไหลผ่านไปได้ อนุภาคขนาดเล็กถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคดิน

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในคอลัมน์สามารถดูดสารอาหารในรูปที่เคเอ็นได้ จากงานวิจัยของ Klomjek, (2016) หญ้าเนเปียร์สามารถลดค่าที่เคเอ็นได้มากกว่า 70% เมื่อระยะเวลาบำบัดเพิ่มขึ้นหญ้าเนเปียร์มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นจึงสามารถดูดสารอาหารได้มากขึ้น ค่าที่เคเอ็นในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์ที่มีการบำบัดโดยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าคอลัมน์ดิน ประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสองรูปแบบมีประสิทธิภาพสูง น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลองมีค่าที่เคเอ็นผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์อัตราการรดน้ำทิ้ง 7 cm/week มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

5) ทีไอซี

ค่าทีไอซีของน้ำที่รดคอลัมน์ทดลองด้วยน้ำประปาอัตราการรด 5 (T5) 7 (T7) และ 10 cm/week (T10) และรดน้ำประปา 10 cm/week ของคอลัมน์ที่มีการใส่ปุ๋ยในคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ (SPG) แสดงดังรูปที่ 4-10 น้ำประปารดคอลัมน์มีค่าทีไอซีในช่วง 2.4-2.8 mg/L น้ำประปาที่ไหลผ่านคอลัมน์ T5 T7 T10 และ N ตลอดการทดลอง มีค่าทีไอซีในช่วง 1.9-2.6, 2.1-2.6, 2.1-3.1 และ 1.7-2.6 mg/L ตามลำดับ มีค่าทีไอซีเฉลี่ยเป็น 2.6, 2.2, 2.4 และ 2.3 mg/L ตามลำดับ การรดน้ำประปาลงในคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่าทีไอซีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สรุปได้ว่าไม่เกิดการชะละลายสารอินทรีย์ภายในดินออกมาจากคอลัมน์ทดลอง

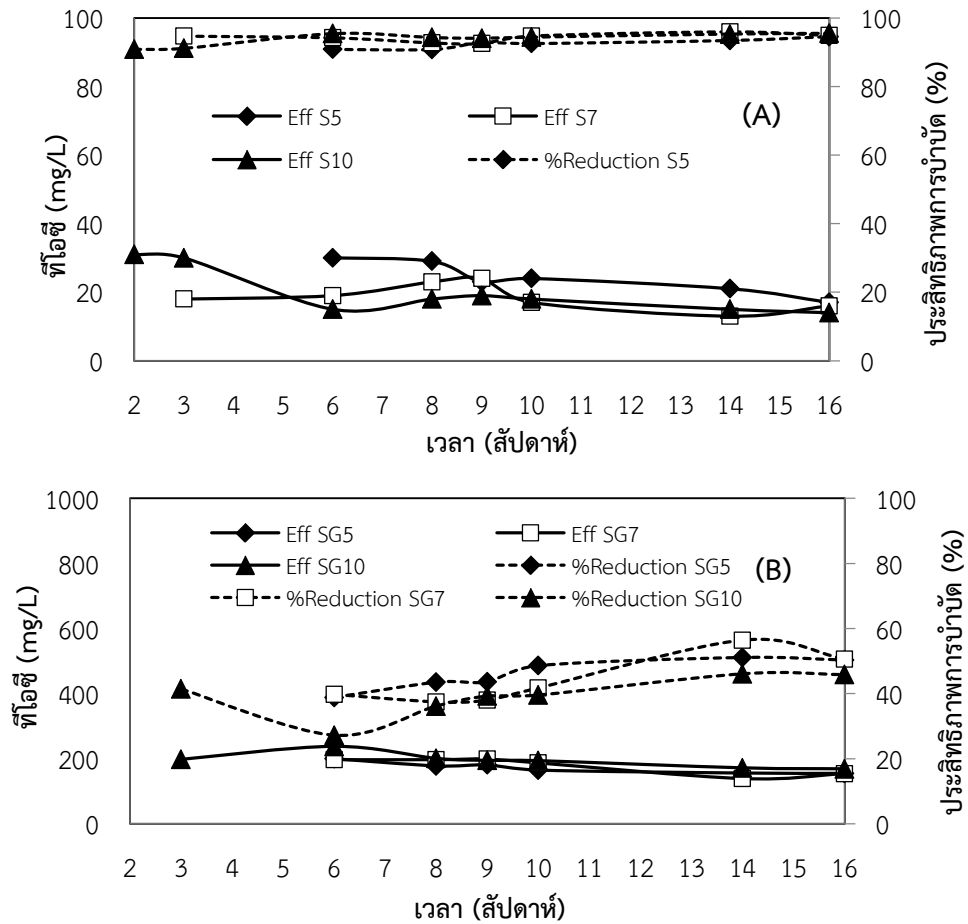


รูปที่ 4-10 ค่าทีไอซีของน้ำประปาและน้ำประปาที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ทดลอง

ค่าทีไอซีของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้งที่อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-11A และ 4-11B ตามลำดับ

น้ำทิ้งรดคอลัมน์มีค่าทีไอซีอยู่ในช่วง 312-338 mg/L น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ S10 สัปดาห์ที่ 2 มีค่าทีไอซี 31 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.8% ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 9 คอลัมน์ S10 มีค่าทีไอซี 19 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.1% สัปดาห์ที่ 16 เป็นสัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง คอลัมน์ S10 มีค่าทีไอซี 14 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.5%

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ S7 สัปดาห์ที่ 3 มีค่าทีไอซี 18 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.7% ช่วงสัปดาห์ที่ 3-9 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าลดลงเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 9 คอลัมน์ S7 มีค่าทีไอซี 24 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 92.5% ช่วงสัปดาห์ที่ 9-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ S7 มีค่าทีไอซี 16 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.9%



รูปที่ 4-11 ค่าทีโอซี (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และประสิทธิภาพการบำบัด

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ S5 สัปดาห์ที่ 6 มีค่าทีโอซี 30 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.8% ช่วงสัปดาห์ที่ 3-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ S5 มีค่าทีโอซี 17 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.6% โดยรวม ประสิทธิภาพการบำบัดคอลัมน์ S10 S7 และ S5 มีประสิทธิภาพการบำบัดทีโอซีใกล้เคียงกัน

น้ำทิ้งรดคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ SG10 สัปดาห์ที่ 3 มีค่า ทีโอซี 198 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 41.4% ช่วงสัปดาห์ที่ 3-6 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง มีค่าทีโอซี 238 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 27.2% สัปดาห์ที่ 6-16 คอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ SG10 มีค่าทีโอซี 169 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 45.8%

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ SG7 สัปดาห์ที่ 6 มีค่าทีโอซี 197 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 39.8% ช่วงสัปดาห์ที่ 6-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SG7 มีค่าที่ไอซี 154 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 50.6% ช่วงสัปดาห์ที่ 6-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

คอลัมน์ SG5 ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับคอลัมน์ SG 7 สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SG5 มีค่าที่ไอซี 155 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 50.3%

จากการทดลองข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ไอซีของคอลัมน์ดินอย่างเดียว ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ ดินในคอลัมน์ที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีความหนาแน่นสูง อนุภาคดินมีขนาดเล็กสามารถปล่อยประจุเพื่อดูดซับสารที่มีขนาดเล็กได้ ค่าที่ไอซีในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นต่ำทำให้ดินสามารถดูดซับที่ไอซีได้อย่างต่อเนื่อง

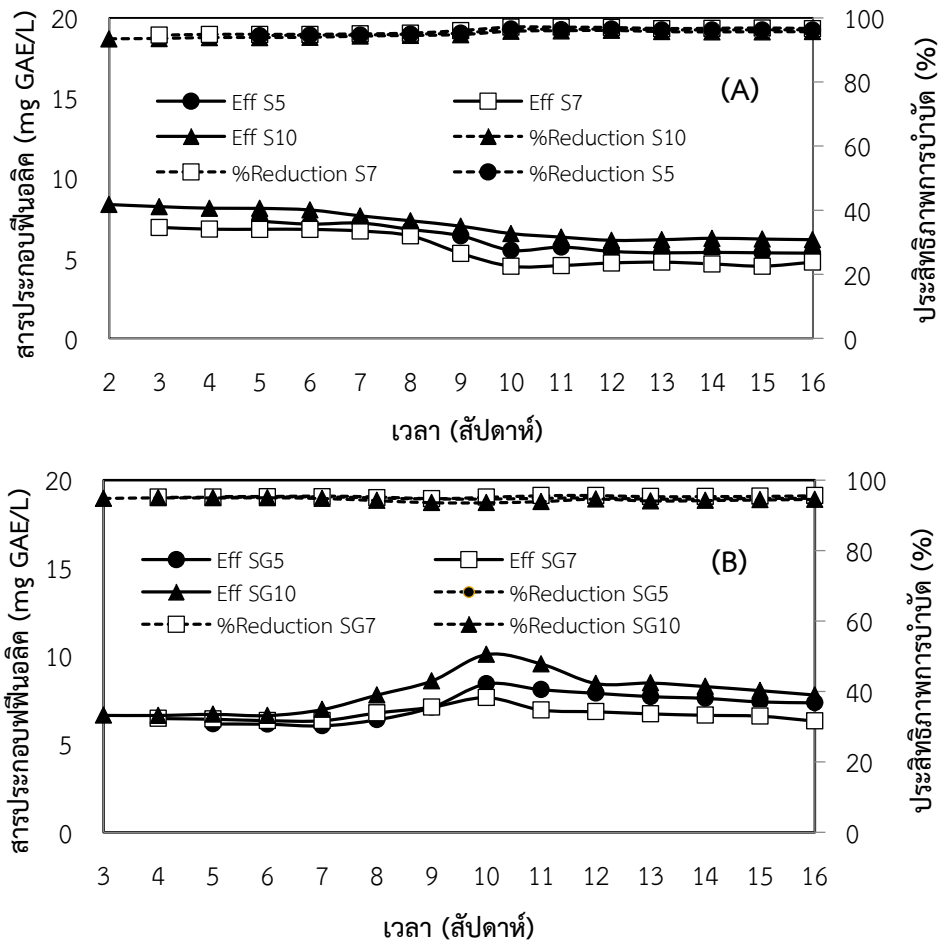
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ในรูปของมวลที่ไอซีของน้ำทิ้งที่รดคอลัมน์และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ทดลองตลอดการทดลองพบว่า ที่อัตราการรดน้ำทิ้ง 5 7 และ 10 cm/week มีมวลที่ไอซีในน้ำทิ้งที่นำมารดคอลัมน์เป็น 22.9, 31.9 และ 45.6 g ตามลำดับ คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีมวลที่ไอซีในน้ำทิ้งที่ออกจากคอลัมน์เป็น 0.27, 0.33 และ 0.50 g คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีมวลที่ไอซีในน้ำทิ้งที่ออกจากคอลัมน์เป็น 1.40, 1.91 และ 2.88 g ดังนั้นที่อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week คอลัมน์ดินสามารถลดมวลในรูปที่ไอซีได้ดีกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

6) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

สารประกอบฟีนอลิกของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์รดด้วยน้ำทิ้ง อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week แสดงดังรูปที่ 4-12 น้ำทิ้งรดคอลัมน์มีค่าสารประกอบฟีนอลิกในช่วง 128-157 mg GAE/L น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ S10 S7 และ S5 สัปดาห์ที่ 2 3 และ 4 มีค่าสารประกอบฟีนอลิก 8.4, 6.9 และ 7.3 mg GAE/L ตามลำดับ (รูปที่ 4-12A) คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 93.5, 94.6 และ 94.5% ตามลำดับ สัปดาห์ที่ 2-10 ทั้ง 3 คอลัมน์มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 10 คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด รองลงมาคือคอลัมน์ S5 ส่วนคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด มีค่าสารประกอบ ฟีนอลิก 4.5, 5.5 และ 6.5 mg GAE/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 97.1, 96.5 และ 95.8% ตามลำดับ

ช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ สัปดาห์ที่ 16 ทั้ง 3 คอลัมน์มีประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างกันเล็กน้อย คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด รองลงมาคือคอลัมน์ S5 และคอลัมน์ S10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด คอลัมน์ S7 น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 4.8 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 96.7% รองลงมาคือคอลัมน์ S5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเป็น 5.3 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 96.3% และคอลัมน์ S10 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเป็น 6.2 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.7% ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งด้วยคอลัมน์ดินอย่างเดียว คอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด ผลการบำบัด

สารประกอบฟีนอลิกสอดคล้องกับผลการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ใช้การบำบัดด้วยดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบำบัด เมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกเริ่มคงที่



รูปที่ 4-12 ค่าสารประกอบฟีนอลิก (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินและประสิทธิภาพการบำบัด (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ และประสิทธิภาพการบำบัด (ต่อ)

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์คอลัมน์ SG10 SG7 และ SG5 สัปดาห์ที่ 3 4 และ 5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิก 6.7, 6.5 และ 6.2 mg GAE/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.8, 95.1 และ 95.4% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 คอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อย คอลัมน์ SG7 และ SG5 มีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 7 คอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพรองลงมาและคอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด โดยค่าสารประกอบฟีนอลิกในน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 6.1, 6.3 และ 7.0 mg GAE/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.5, 95.3 และ 94.8% ตามลำดับ

ช่วงสัปดาห์ที่ 7-10 คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง สัปดาห์ที่ 10 ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิคต่ำที่สุด คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าสารประกอบฟีนอลิคในน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็น 8.4, 7.7 และ 10.1 mg GAE/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.6, 95.1 และ 93.6% ตามลำดับ ช่วงสัปดาห์ที่ 10-12 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อถึงสัปดาห์ที่ 12 และประสิทธิภาพการบำบัดคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง สัปดาห์ที่ 16 คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพรองลงมา และคอลัมน์ SG10 มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ SG7 มีค่าสารประกอบฟีนอลิคในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 6.3 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 95.6% คอลัมน์ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิคในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 7.4 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.9% และคอลัมน์ SG10 มีค่าสารประกอบฟีนอลิคในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็น 7.8 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.6% เมื่อพิจารณาค่าสารประกอบฟีนอลิคตลอดการทดลอง สรุปได้ว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ SG5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิคสูงที่สุด ผลการทดลองมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิคสอดคล้องกับผลการทดลองของ พลิชช์ จารุจาริต (2559) ที่ปลูกหญ้าชิกเนลล์เกี่ยวกับการเติมแบคทีเรียเพื่อบำบัดน้ำทิ้ง ช่วงแรกของการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อถึงจุดอิ่มตัวประสิทธิภาพการบำบัดลดลงและคงที่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิคของคอลัมน์ดิน ประสิทธิภาพดีขึ้นตามช่วงระยะเวลาการบำบัด เนื่องจากดินในคอลัมน์มีความหนาแน่นสูง ขนาดอนุภาคดินมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสมาก เกิดกลไกการบำบัดด้วยการดูดซับสารประกอบฟีนอลิคด้วยดิน ประกอบกับสารฟีนอลิคในน้ำทิ้งมีค่าไม่สูงมากนัก การดูดซับสารประกอบฟีนอลิคทำได้อย่างต่อเนื่อง

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆ ช่วงสัปดาห์ที่ 3-7 หญ้าเนเปียร์มีลำต้นขนาดเล็ก รากหญ้าเนเปียร์น้อย ดินมีความหนาแน่นสูง เกิดกลไกการบำบัดด้วยการดูดซับสารประกอบฟีนอลิคด้วยดิน ช่วงสัปดาห์ที่ 7-10 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อย หญ้าเนเปียร์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว รากหญ้าเนเปียร์เติมพื้นที่คอลัมน์พื้นที่ผิวสัมผัสดินลดลงประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบฟีนอลิคด้วยดินจึงลดลง ค่าสารประกอบฟีนอลิคของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น ช่วงสัปดาห์ที่ 11-16 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากหญ้าเนเปียร์สามารถดึงดูดแบคทีเรียให้มาอาศัยบริเวณราก และมีแบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิคเพิ่มขึ้น

การลดสารประกอบฟีนอลิครวมและสมมูลมวล

การศึกษาสมมูลมวลและการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิค เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดค่าสารประกอบฟีนอลิคในรูปของมวลและความเข้มข้น เพื่อหาปัจจัย และสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกัน รวมทั้งหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ

การลดมวลและการลดความเข้มข้น ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก แสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก

คอลัมน์	ฟีนอลิกเข้าระบบ (mg GAE/L)	ฟีนอลิกที่ออก (mg GAE/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด
S5	128-157 (139)	5.32-7.32 (6.07)	94.5-96.3 (95.7)
S7	128-157 (139)	4.51-6.93 (5.59)	94.6-96.9 (96.0)
S10	128-157 (139)	6.12-8.35 (7.10)	93.5-96.1 (94.9)
SG5	128-157 (139)	6.05-8.43 (7.20)	94.6-95.9 (94.7)
SG7	128-157 (139)	6.32-7.65 (6.71)	95.1-95.6 (95.3)
SG10	128-157 (139)	6.63-10.10 (7.91)	93.6-95.0 (94.4)

การทำสมดุลมวลของการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก

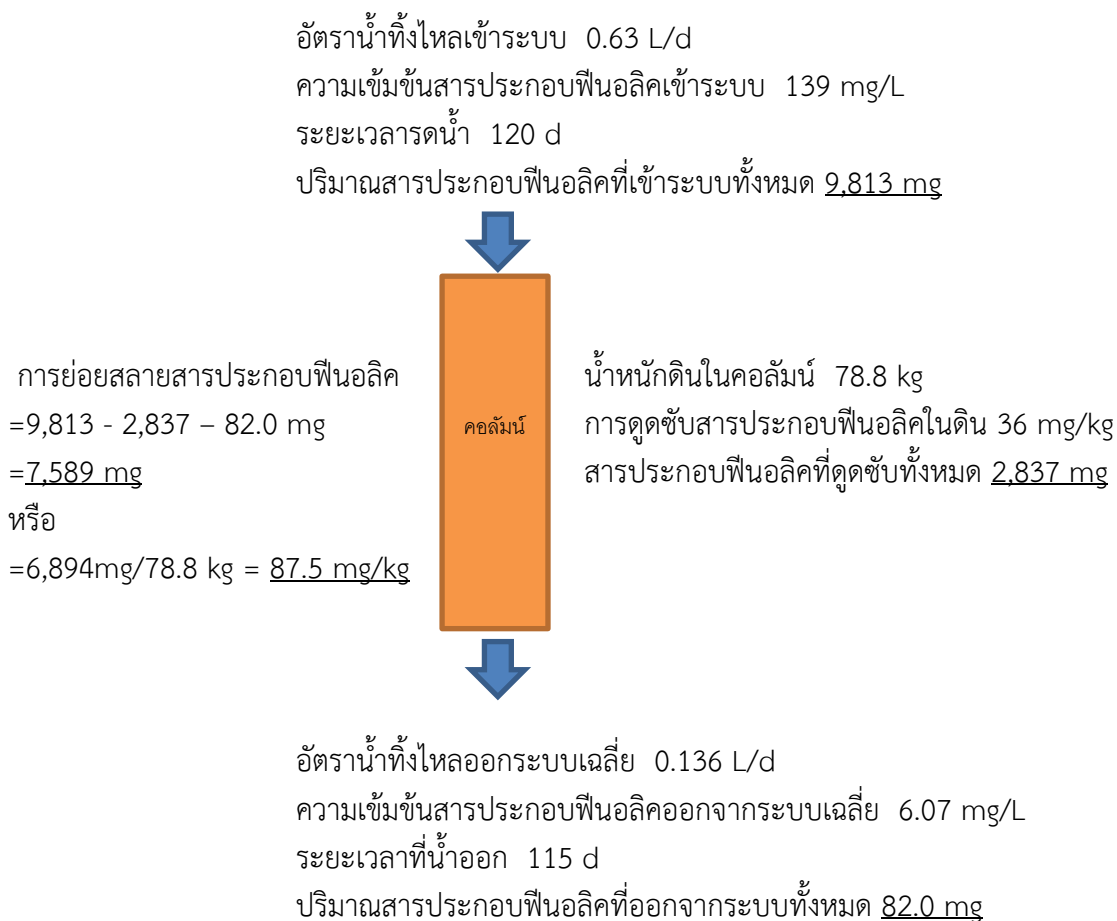
จากผลการทดลองค่าสารประกอบฟีนอลิกในดินก่อนและหลังการทดลอง พบว่าค่าสารประกอบฟีนอลิกในดินก่อนการทดลองมีค่าเป็น 60 mg GAE/kg ค่าสารประกอบฟีนอลิกในดินหลังการทดลองในคอลัมน์ S5 S7 S10 SG5 SG7 และ SG10 มีค่าเป็น 96, 133, 193, 83, 101 และ 138 mg GAE/kg ตามลำดับ เมื่อคำนวณสมดุลมวลของคอลัมน์ S5 ค่าการดูดซับสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 96 mg/kg เมื่อหักลบกับค่าสารประกอบฟีนอลิกในดินเริ่มต้น คอลัมน์ S5 จึงมีค่าการดูดซับสารประกอบฟีนอลิกจากน้ำทิ้งเป็น 36 mg/kg

ค่ามวลสารประกอบฟีนอลิกเข้าระบบทั้งหมดและมวลสารประกอบฟีนอลิกที่ผ่านการบำบัดโดยจากคอลัมน์ทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-7 คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีมวลสารประกอบฟีนอลิก ออกจากคอลัมน์ทดลองเป็น 82, 100 และ 176 mg ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดมวลสารประกอบฟีนอลิกเป็น 99.2, 99.3 และ 99.1% ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีประสิทธิภาพการลดมวลสารประกอบฟีนอลิกใกล้เคียงกัน

คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีมวลในรูปสารประกอบฟีนอลิกที่ผ่านการบำบัดเป็น 58 72 และ 116 mg ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดมวลสารประกอบฟีนอลิกเป็น 99.4, 99.5 และ 99.4% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีประสิทธิภาพการลดมวลสารประกอบฟีนอลิกใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดมวลสารประกอบฟีนอลิก พบว่าอัตราการรดน้ำ ที่ 5 7 และ 10 cm/week คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าลดมวลสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าคอลัมน์ดิน เล็กน้อย

การคำนวณสมดุลมวลของการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกตัวอย่างคอลัมน์ S5 ดังแสดงในรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 ตัวอย่างสมดุลมวลของการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการบำบัดในรูปของมวลและความเข้มข้น ประสิทธิภาพการลดมวลในทุกคอลัมน์ทดลองมีความใกล้เคียงกัน มีประสิทธิภาพการลดมวลในรูปสารประกอบฟีนอลิกอยู่ระหว่าง 99.1-99.3% ส่วนประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นในรูปสารประกอบฟีนอลิกอยู่ระหว่าง 94.9-96.0%

คอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้งมีผลต่างของประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอลิกในรูปของมวลและความเข้มข้น ของคอลัมน์ S5 S7 และ S10 เป็น 3.5, 3.3, และ 4.2 ตามลำดับ อัตราการรดมีผลต่อผลต่างของประสิทธิภาพการบำบัดเล็กน้อย เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีความเข้มข้นต่ำ การระเหยของน้ำในอัตราการรดสูงกว่าส่งผลให้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงการลดสารประกอบฟีนอลิกในรูปของมวล ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับ การระเหยของน้ำที่พบว่าที่อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week ประสิทธิภาพการลดมวลใกล้เคียงกัน

เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้กลไกการดูดซับและการบำบัดชีวภาพลดมลงได้ดี

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้งมีผลต่างของประสิทธิภาพการลดสารประกอบฟีนอลิกในรูปของมวลและความเข้มข้น ของคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 เป็น 4.7, 4.2, และ 5.0 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดลงโดยมวลมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการลดลงของความเข้มข้น ความต่างของประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นและมวลที่อัตราการรด 5 7 และ 10 cm/week ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการทดลองมีกระบวนการการระเหยของน้ำและการคายน้ำของพืช ส่งผลให้น้ำทิ้งที่รดคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ระเหยได้ดีตั้งแต่อัตราการรดต่ำ ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลดสารประกอบฟีนอลิกในรูปมวลและความเข้มข้นจึงแตกต่างกันตั้งแต่อัตราการรด 5 cm/week กระบวนการการระเหยของน้ำและการคายน้ำของพืชส่งผลให้ปริมาณน้ำออกจากคอลัมน์ต่อมีปริมาณน้ำรดคอลัมน์ดินมีอัตราส่วนที่ต่ำ การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกของคอลัมน์ที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ในรูปความเข้มข้นจึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ตารางที่ 4-7 มวลสารประกอบฟีนอลิกก่อนและหลังการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัด

คอลัมน์	สารประกอบฟีนอลิกเข้าระบบทั้งหมด (mg)	สารประกอบฟีนอลิกออกทั้งหมด (mg)	ประสิทธิภาพการบำบัด (สมมูลมวล)	ประสิทธิภาพการบำบัด (ความเข้มข้น)	ผลต่าง
S5	9,813	82	99.2%	95.7%	3.5
S7	13,739	100	99.3%	96.0%	3.3
S10	19,627	176	99.1%	94.9%	4.2
SG5	9,813	58	99.4%	94.7%	4.7
SG7	13,739	72	99.5%	95.3%	4.2
SG10	19,627	116	99.4%	94.4%	5.0

ค่าคงที่การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก

คำนวณค่าคงที่การย่อยสลายจากปฏิกิริยา first order reaction โดยใช้สูตร

$$\ln C = \ln C_0 - kt$$

ค่าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4-8

กำหนดให้การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นการย่อยแบบ first order reaction

เมื่อ $\ln C_0$ คือ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งเข้าระบบในแต่ละวัน

$\ln C$ คือ ความเข้มข้นของน้ำทิ้งออกระบบในแต่ละวัน

t คือ ระยะเวลา 1 วัน

เมื่อ คำนวณได้ ค่า k ของการย่อยสลายของแต่ละคอลัมน์ทดลองในแต่ละวัน

การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกมีสองสาเหตุที่ทำให้ค่าคงที่การย่อยสลายแตกต่างกัน ได้แก่

1) อัตราการรตนน้ำทิ้ง อัตราการรตนน้ำทิ้งสูงน้ำไหลผ่านคอลัมน์ได้เร็วกว่าอัตราการรตต่ำ ระยะเวลาย่อยสลายด้วยแบคทีเรียในดินน้อย น้ำไหลออกจากคอลัมน์จึงมีความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าคอลัมน์ที่มีอัตราการรตนน้ำทิ้งต่ำ

2) การปลูกหญ้าเนเปียร์การปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้ค่าคงที่การย่อยสลายมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากหญ้าเนเปียร์สามารถดึงแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลิกได้ ทำให้แบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าคอลัมน์ที่ไม่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการรตที่เท่ากันในคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ ค่าคงที่การย่อยสลายมีค่าสูงกว่าคอลัมน์ดิน

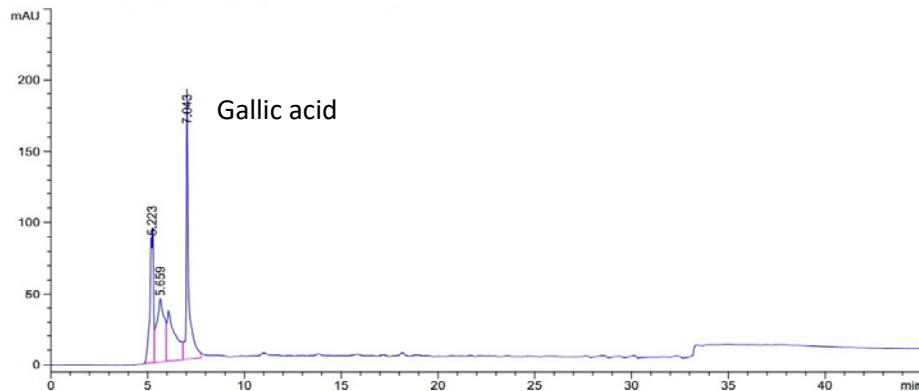
ตารางที่ 4-8 อัตราการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกแบบปฏิกิริยาลำดับที่ 1

คอลัมน์	อัตราการรตสารประกอบฟีนอลิกแบบ first order (day ⁻¹)
S5	2.112-2.453 (2.305±0.13)
S7	1.771-2.098 (1.968±0.15)
S10	1.365-1.622 (1.493±0.09)
SG5	2.419-2.563 (2.472±0.05)
SG7	2.354-2.430 (2.376±0.04)
SG10	1.940-2.117 (2.040±0.06)

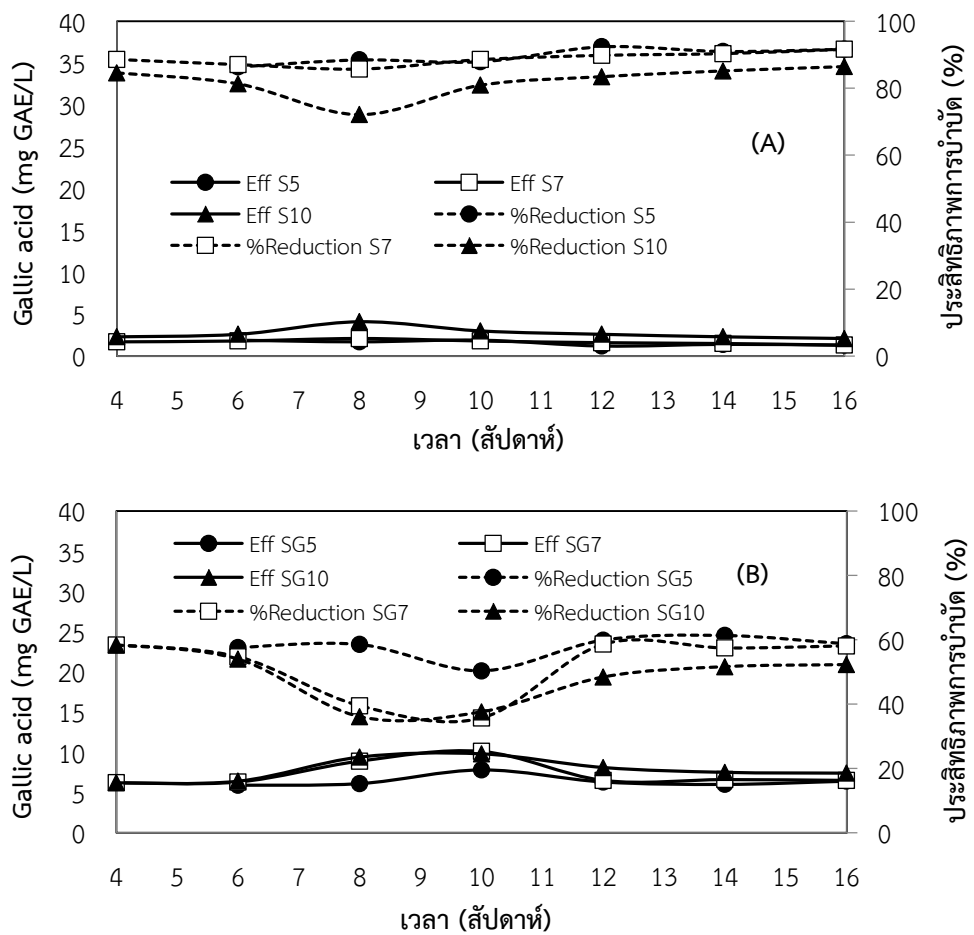
ประเภทของสารประกอบฟีนอลิก

การทดลองหาประเภทของสารประกอบฟีนอลิกทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High-performance liquid chromatography; (HPLC) โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของน้ำทิ้งที่เข้าระบบทดลองแสดงดังรูปที่ 4-14 จากโครมาโทแกรมของน้ำทิ้งรตคอลัมน์ทดลอง สามารถระบุประเภทของสารประกอบฟีนอลิกได้เพียง 1 ประเภท คือ Gallic acid ส่วนประเภทอื่นๆ เป็นสาร Unknown ที่มีพีคไม่ตรงกับสารมาตรฐาน

ค่ากรดแกลลิก ของน้ำทิ้งเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 13.9 – 15.7 mg GAE/L โดยกรดแกลลิก คิดเป็นร้อยละ 10.0-11.3 ของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ทดลองมีพีคตรงกันกับน้ำเข้าระบบ แต่จะมีพีคที่เล็กและสั้นกว่า ค่ากรดแกลลิกที่ใช้เป็นสารมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-14 โครมาโทแกรมของชนิดและปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกของน้ำทิ้งที่เข้าระบบทดลอง



รูปที่ 4-15 ปริมาณกรดแกลลิกและประสิทธิภาพการบำบัดของ (A) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดิน และ (B) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของกรดแกลลิกในตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยคอลัมน์ S5 และ S7 พบว่ามีค่ากรดแกลลิกใกล้เคียงกัน โดยตลอดการบำบัดมีค่าระหว่าง 1.2-2.1

mg GAE/L ประสิทธิภาพการบำบัดกรดแกลลิกคิดเป็น 85.7-92.4% ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่ากว้างขึ้นลงเล็กน้อย แนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มมากขึ้น คอลัมน์ S10 มีค่ากรดแกลลิกมากกว่าคอลัมน์ S5 และ S7 อยู่พอสมควร ตลอดการบำบัด มีค่าระหว่าง 2.1-4.1 mg GAE/L ประสิทธิภาพการบำบัดกรดแกลลิกคิดเป็น 72.1-91.6% ช่วงสัปดาห์ที่ 4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุดในสัปดาห์ที่ 8 หลังจากสัปดาห์ที่ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และคงที่เมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลอง

สำหรับคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG5 เป็นคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดกรดแกลลิกสูงสุด มีค่ากรดแกลลิกในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์อยู่ระหว่าง 5.9-7.8 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 50.3-57.6% ช่วงสัปดาห์ที่ 6-10 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 10-16 ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

คอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา มีค่ากรดแกลลิกในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์อยู่ระหว่าง 6.2-10.1 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 35.7-58.4% ช่วงสัปดาห์ที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 10-12 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 12-16 ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่

คอลัมน์ SG10 เป็นคอลัมน์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด มีค่ากรดแกลลิกในน้ำที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์อยู่ระหว่าง 6.2-9.8 mg GAE/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 37.6-58.4% ช่วงสัปดาห์ที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สัปดาห์ที่ 10-16 ประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ SG10 มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ดินอย่างเดียวกับคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ดินอย่างเดียวกันทุกชุดการทดลองอยู่ระหว่าง 72.1-92.4% ส่วนคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดทุกชุดการทดลองอยู่ระหว่าง 35.7-57.6% เนื่องจากกรดแกลลิกเป็นสารที่ย่อยสลายยาก กลไกการดูดซับโดยดินเป็นกลไกหลักของการบำบัด การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นได้น้อย ต้องเติมแบคทีเรียที่มีความเฉพาะเจาะจงในการย่อยสลายจึงจะบำบัดกรดแกลลิกได้ดี คอลัมน์ดินอย่างเดียวกันเกิดกลไกการดูดซับได้ดีกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ ประสิทธิภาพการบำบัดกรดแกลลิกของคอลัมน์ดินจึงดีกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ (Nogales et al., 2011)

4.1.2.4 ลักษณะการซึมชะละลายซีไอดีและสารประกอบฟีนอลิกเมื่อรดน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการซึมชะละลายซีไอดีและสารประกอบฟีนอลิกของคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์และคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ ค่าซีไอดีและสารประกอบฟีนอลิกในน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์จนสิ้นสุดการทดลองถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการซึมชะละลาย

มวลสะสมของซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน แสดงดังในรูปที่ 4-16A การซึมชะละลายซีโอดีที่ 50% ของค่าซีโอดีของน้ำรดคอลัมน์ S5 S7 และ S10 ใช้เวลาในการซึมชะละลายเป็น 9.1, 8.0 และ 6.5 สัปดาห์ ตามลำดับ การซึมชะละลายสารประกอบฟีนอลิกที่ 50% ของค่าสารประกอบฟีนอลิกของน้ำรดคอลัมน์ S5 S7 และ S10 ใช้เวลาในการชะเป็น 9.3, 7.8 และ 7.6 สัปดาห์ ตามลำดับ การรดน้ำทิ้งที่อัตราการรดสูงมีการซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกได้เร็วกว่าอัตราการรดต่ำ การซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกลดลงตามระยะเวลาการทดลองเนื่องจากอนุภาคของแข็งในน้ำทิ้งอุดช่องรูพรุนของดินและการยุบตัวของดินส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นการซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกจึงลดลง

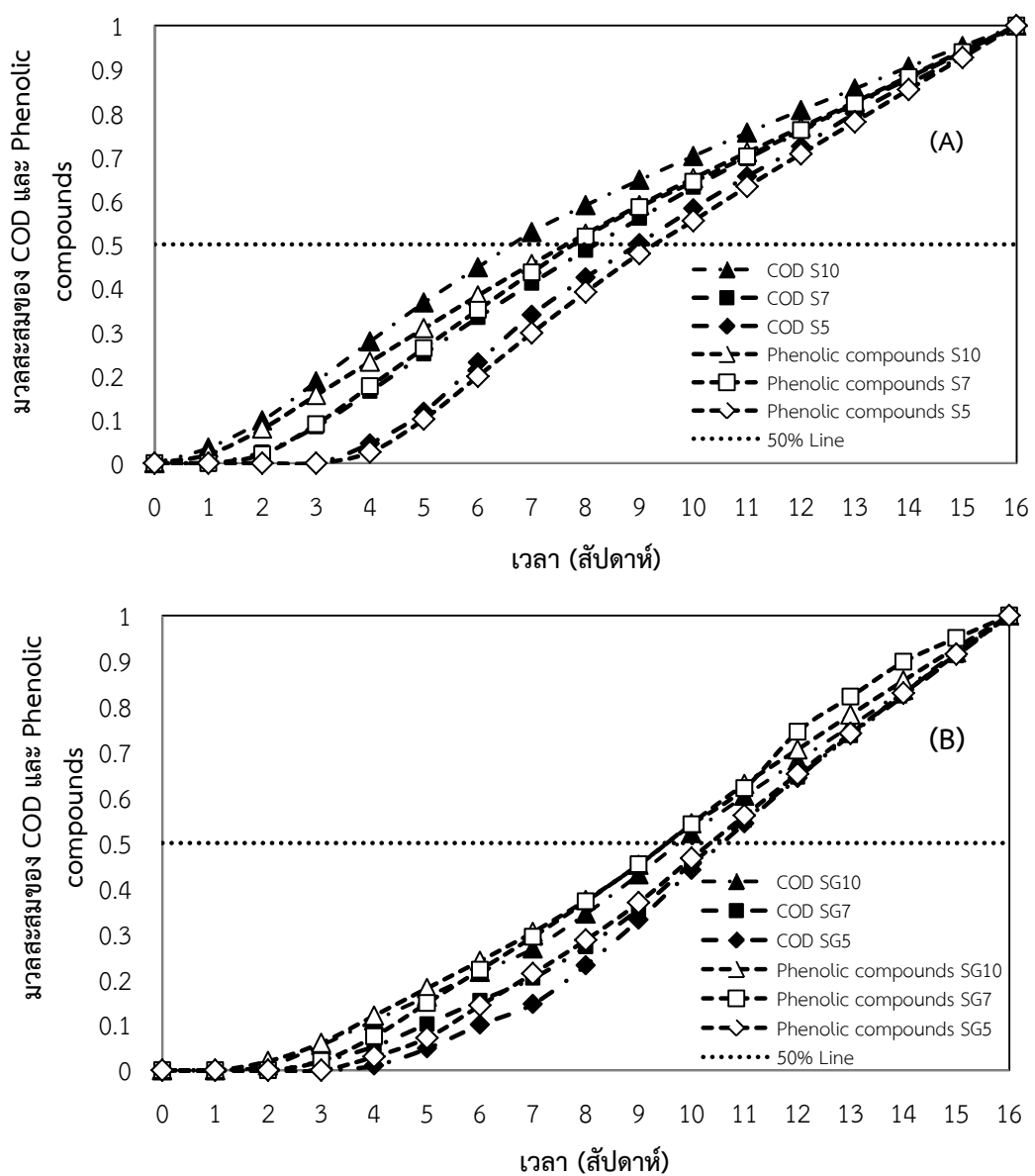
เมื่อเปรียบเทียบการซึมชะละลายของซีโอดีกับสารประกอบฟีนอลิกที่ไหลผ่านคอลัมน์ดิน พบว่าซีโอดีซึมชะละลายได้เร็วกว่าสารประกอบฟีนอลิกเนื่องจากซีโอดีของน้ำทิ้งรดคอลัมน์มีความเข้มข้นสูง โดยมีความเข้มข้นซีโอดีในน้ำทิ้งเป็น $1,443 \pm 180$ mg/L อนุภาคดินในคอลัมน์ดูดซับซีโอดีได้ต่ำกว่าปริมาณของซีโอดีในน้ำทิ้งที่รดคอลัมน์ส่งผลให้ซีโอดีซึมชะละลายออกจากคอลัมน์สูง ส่วนสารประกอบฟีนอลิกของน้ำทิ้งรดคอลัมน์มีความเข้มข้นต่ำ โดยสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นเป็น 134 ± 11 mg GAE/L อนุภาคดินในคอลัมน์ดูดซับสารประกอบฟีนอลิกได้ดีส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกซึมชะละลายจากคอลัมน์ได้น้อย

มวลสะสมของซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกที่ผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แสดงดังในรูปที่ 4-16B การซึมชะละลายซีโอดีที่ 50% คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 ใช้เวลาในการซึมชะละลายเป็น 10.2, 10.0 และ 9.4 สัปดาห์ ตามลำดับ การรดน้ำทิ้งมีการซึมชะละลายซีโอดีใกล้เคียงกัน โดยอัตราการรดสูงมีการซึมชะละลายเร็วกว่าอัตราการรดต่ำเล็กน้อย การซึมชะละลายซีโอดีมีความสม่ำเสมอตลอดการทดลอง โดยกล่าวได้ว่าในกรณีที่ดินมีความหนาแน่นลดลง ปลูกหญ้าเนเปียร์อยู่เต็มพื้นที่เนื้อดินช่องว่างของดินเป็นปัจจัยเชิงลบการชะซีโอดีเพิ่มขึ้น แต่หญ้าเนเปียร์ดูดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีไปใช้ในการเจริญเติบโตเป็นปัจจัยเชิงบวกที่ส่งผลให้การซึมชะละลายซีโอดีลดลง การซึมชะละลายสารประกอบฟีนอลิกที่ 50% คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 ใช้เวลาในการซึมชะละลายเป็น 10.1, 9.3 และ 9.3 สัปดาห์ ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นการรดน้ำทิ้งมีการซึมชะละลายสารประกอบฟีนอลิกใกล้เคียงกัน อัตราการรดสูงมีการซึมชะละลายสารประกอบฟีนอลิกเร็วกว่าอัตราการรดต่ำเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบการซึมชะละลายของซีโอดีกับสารประกอบฟีนอลิกที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ พบว่าที่อัตราการรดเดียวกันซีโอดีซึมชะละลายได้ช้ากว่าสารประกอบฟีนอลิก เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ใช้สารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสำหรับการเจริญเติบโตได้ ส่วนสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งรดคอลัมน์หญ้าเนเปียร์ไม่สามารถใช้สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารอาหารได้ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกซึมชะละลายจากคอลัมน์ทดลองได้เร็วกว่าซีโอดี

พฤติกรรมของการซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกของคอลัมน์ดินกับคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ พบว่าที่อัตราการรดเดียวกันคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ซึมชะละลายซีโอดี

ช้ากว่าคอลัมน์ดินประมาณ 1.1 – 2.9 สัปดาห์ ส่วนการซึมชะละลายสารประกอบฟีนอลิกคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ซึมชะละลายช้ากว่าคอลัมน์ดินประมาณ 0.8 – 1.7 สัปดาห์ เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ใช้สารอินทรีย์ในรูปซีโอต์สำหรับการเจริญเติบโต อีกทั้งรากหญ้าเนเปียร์ดึงแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดีขึ้น เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นการซึมชะละลายซีโอต์และสารประกอบฟีนอลิกในคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากหญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตเต็มที่ที่รากหญ้าเนเปียร์อยู่เต็มพื้นที่คอลัมน์ เมื่อระยะเวลาการบำบัดเพิ่มขึ้นรากหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ซีโอต์และสารประกอบฟีนอลิกซึมชะละลายผ่านทางช่องว่างของรากหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-16 มวลสะสมของซีโอต์และสารประกอบฟีนอลิกที่ผ่านคอลัมน์ (A) คอลัมน์ดิน และ (B) คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

4.1.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์ดิน และคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์กับการบำบัดน้ำทิ้งด้วยพืชชนิดต่างๆ

สรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดินและดินที่ปลูกพืชแสดงดังตารางที่ 4-9 การบำบัดน้ำทิ้งด้วยดินที่ไม่ปลูกพืชที่อัตราการรอด 7 cm/week มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี ทีเคเอ็น และสารประกอบฟีนอลิกคิดเป็น 95.6, 87.7 และ 96.0% ตามลำดับ ส่วนการบำบัดน้ำทิ้งที่อัตราการรอดเดียวกันและมีลักษณะน้ำเข้าระบบเหมือนกันโดยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี ทีเคเอ็น และสารประกอบฟีนอลิกคิดเป็น 90.3, 90.0 และ 95.3% ตามลำดับ การปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยการรดน้ำทิ้งให้ผลผลิตประมาณ 94.3 ตัน/ไร่/ปี สร้างกำไรประมาณ 21,390 บาท/ไร่/ปี

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมันใช้น้ำทิ้งจากบ่อสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการบำบัดมารดสวนปาล์มน้ำมันด้วยอัตราการรอด 0.5 cm/week มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีและทีเคเอ็น คิดเป็น 70.6 และ 68.0% ตามลำดับ และไม่พบว่ามีผลกระทบต่อคุณภาพดินและต้นปาล์มน้ำมันในแปลงที่ปลูก การปลูกปาล์มน้ำมันโดยใส่ปุ๋ยตามมาตรฐานและรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบให้ผลผลิตหลายปาล์มสด 4.8 ตัน/ไร่/ปี เมื่อใช้ราคาปาล์มย้อนหลัง 5 ปี 4.38 บาท/กก.หลายปาล์มสด การปลูกปาล์มน้ำมันโดยใส่ปุ๋ยตามมาตรฐานและรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบสร้างกำไรประมาณ 15,405 บาท/ไร่/ปี

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดินที่ปลูกหญ้าซิกแนลเล็อยในโรงเรือนเพาะปลูก ที่อัตราการรอด 1 cm/week มีประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดี ทีเคเอ็น และสารประกอบฟีนอลิก คิดเป็น 82.5, 55.0 และ 39.0% ตามลำดับ การปลูกหญ้าซิกแนลเล็อยโดยการรดน้ำทิ้งให้ผลผลิตเป็น 13 ตัน/ไร่/ปี และสร้างกำไรประมาณ 6,500 บาท/ไร่/ปี

ตารางที่ 4-9 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดินและการบำบัดโดยดินร่วมกับการปลูกพืชชนิดต่างๆ

ชนิดหญ้า	อัตราการรด	ความเข้มข้นน้ำในระบบเฉลี่ย			ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย			ผลผลิต (ตัน/ไร่/ ปี)	กำไร (บาท/ ไร่/ปี)
		COD (mg/L)	TKN (mg/L)	Phenolic compounds (mg GAE/L)	COD (%)	TKN (%)	Phenolic compounds (%)		
ไม่ปลูกพืช	7 cm/week รดน้ำทิ้งทุกวัน	1,518	445	139	95.6	87.7	96.0	-	-
เนเปียร์	7 cm/week รดน้ำทิ้งทุกวัน	1,518	445	139	90.3	90.0	95.3	94.3	21,390
เนเปียร์ (รองแผ่น HDPE)	7 cm/week รดน้ำทิ้งทุกวัน	1,518	445	139	90.3	90.0	95.3	94.3	21,390
*ปาล์ม น้ำมัน	0.5 cm/week รดน้ำทิ้งสองวันครั้ง	10,359	1,137	-	70.6	68.0	-	4.8	15,405
**ชิกแนล เลื่อย	1 cm/week รดน้ำทิ้งห้าวันครั้ง	1,881	90.1	168	82.5	55.0	39.0	13	6,500

ที่มา : * อุดมผล พืชไร่ไพบูลย์ และคณะ, 2556, ** พลิชฐ์ จารุจารีต, 2559

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโดยการปลูกพืชแบบบึงประดิษฐ์ ดังตารางที่ 4-10 การบำบัดน้ำทิ้งชุมชนหรือน้ำทิ้งจากโรงงานโดยการปลูกพืชที่เจริญเติบโตในน้ำ พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานขุบโลหะโดยการปลูกกกกลม มีประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีและทีเคเอ็น คิดเป็น 79.9 และ 86.8% ตามลำดับ เมื่อใช้การปลูกธูปฤาษีในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดีและทีเคเอ็น คิดเป็น 93.0 และ 82.8% ตามลำดับ การบำบัดการน้ำเสียด้วยการปลูกกกกลมลดค่าทีเคเอ็นได้มากกว่าการปลูกธูปฤาษีเล็กน้อย ส่วนการปลูกธูปฤาษีลดค่าซีไอดีได้มากกว่าการปลูกกกกลม

การปลูกหญ้าเนเปียร์แบบบึงประดิษฐ์ โดยการรดน้ำทิ้งฟาร์มเลี้ยงสุกรที่อัตราการรด 2 cm/week ซึ่งถือเป็นอัตราการรดที่สูง โดยปล่อยน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหยดลงพื้นที่ปลูกหญ้าเนเปียร์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ดินมีความชุ่มชื้นตลอดเวลา การปลูกหญ้าเนเปียร์แบบบึงประดิษฐ์ลดค่าซีไอดีและทีเคเอ็น คิดเป็น 82.8 และ 95.0% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากน้ำทิ้งเข้าระบบมีความเข้มข้นของซีไอดีและทีเคเอ็นต่ำ หญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตเร็วสามารถใช้สารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตได้ดี

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งและรายได้จากการจำหน่ายหญ้าเนเปียร์ การบำบัดน้ำทิ้งโดยการปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดและรายได้จากการจำหน่ายหญ้าเนเปียร์สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ และสามารถรองรับน้ำที่อัตราการรดสูง เมื่อดินอิ่มตัวด้วยสารอินทรีย์สามารถไถปรับหน้าดินได้ เนื่องจากมีรอบการปลูกต่ำประมาณ 3-4 ปี การรดน้ำทิ้งในสวนปาล์ม น้ำมันสามารถเพิ่มผลผลิตปาล์มน้ำมันได้เล็กน้อย แต่ต้องรดน้ำทิ้งในอัตราการรดที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่รดในอัตราสูงสารอินทรีย์สะสมในดินมากเกินไป อาจทำให้ดินแน่นเกินไปจนน้ำไม่สามารถซึมผ่านชั้นดินได้ นอกจากนี้การปลูกปาล์มน้ำมันไม่สามารถไถเพื่อปรับหน้าดินได้ จำเป็นต้องหมดรอบการปลูกปาล์มจึงไถปรับหน้าดินได้ซึ่งใช้เวลาประมาณ 20-25 ปี ส่วนการปลูกหญ้าชิกแนลเลื่อยบำบัดทีเคเอ็นและสารประกอบฟีนอลิกได้ไม่ดีนก เนื่องจากหญ้าชิกแนลเลื่อยมีชีวมวลค่อนข้างน้อย การดูดสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตจึงน้อย อีกทั้งหญ้าชิกแนลเลื่อยสามารถปล่อยสารประกอบฟีนอลิกออกจากรากได้ การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกจึงทำได้ไม่ดีนก และหญ้าชิกแนลเลื่อยสร้างรายได้น้อยเนื่องจากชีวมวลน้อย ส่วนการปลูกกกกลมและธูปฤาษีลดค่าซีไอดีและทีเคเอ็นได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือ การปลูกพืชทั้งสองชนิดนี้ไม่สร้างรายได้จากการจำหน่ายเป็นชีวมวล ซึ่งเป็นการลงทุนที่มีผลตอบแทนน้อย และอาจไม่คุ้มค่าสำหรับการนำไปบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ส่วนการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบบึงประดิษฐ์มีความจำเป็นต้องให้น้ำในปริมาณมาก น้ำทิ้งที่ให้ควรมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ การรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีความเข้มข้นสูงอาจไม่เหมาะสมสำหรับการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบบึงประดิษฐ์

ตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโดยการปลูกพืชแบบบึงประดิษฐ์

ชนิดหญ้า	อัตราการรด	ความเข้มข้นน้ำเข้าระบบเฉลี่ย			ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย (%)			ผลผลิต (ตัน/ไร่/ ปี)	กำไร (บาท/ ไร่/ปี)
		COD (mg/L)	TKN (mg/L)	Phenolic compounds (mg GAE/L)	COD (mg/L)	TKN (mg/L)	Phenolic compounds (mg GAE/L)		
*กกกลม	ปลูกในน้ำ	1,121	325	-	79.9	86.8	-	-	
*ธูปฤาษี	ปลูกในน้ำ	1,121	325	-	93.0	82.8	-	9.1	
**เนเปียร์	รดน้ำทิ้ง 2 cm/day	373	70	-	82.8	95.0	-	-	

ที่มา : * ดาริกา วสุนธรากุล, 2548, ** Pantip Klomjek, 2016

4.1.3 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนในดิน

การบำบัดน้ำทิ้งโดยดินเป็นการย้ายมลพิษจากน้ำทิ้งปนเปื้อนลงสู่ดิน และใช้กลไกต่างๆ ในดินลดมลพิษชนิดต่างๆ ปี 2559 กระทรวงอุตสาหกรรมได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดเกณฑ์การปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน การตรวจสอบคุณภาพดินและน้ำใต้ดิน การแจ้งข้อมูล รวมทั้งการจัดทำรายงานผลการตรวจสอบคุณภาพดินและน้ำใต้ดิน และรายงานเสนอมาตรการควบคุมและมาตรการลดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน พ.ศ. 2559 โดยมีการประกาศครอบคลุมอุตสาหกรรม 12 ประเภท ปัจจุบันอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันไม่ครอบคลุมประกาศฉบับนี้ อย่างไรก็ตามการใช้ค่ามาตรฐานตามประกาศฉบับนี้เพื่อพิจารณาระดับการปนเปื้อนของสารในดินจากการรดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจะเป็นประโยชน์ต่อโรงงานด้านการจัดการน้ำเสียในอนาคต โดยค่าสังกะสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้รดสวนปาล์มจะส่งผลกระทบต่อการปนเปื้อนของดิน จากการทดลองพบว่าดินก่อนการทดลองมีค่าสังกะสีเป็น 0.58 mg/kg ดินหลังการทดลองมีค่าสังกะสีระหว่าง 0.47 - 1.47 mg/kg ตามประกาศกระทรวงกำหนดให้เกณฑ์การปนเปื้อนสังกะสีในดินไม่เกิน 1,000 mg/kg และการปนเปื้อนสังกะสีในน้ำใต้ดินไม่เกิน 10 mg/L จากการทดลองค่าสังกะสีในดินมีค่าต่ำเมื่อรดน้ำทิ้งมีค่าสังกะสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าสังกะสีในดินจึงผ่านเกณฑ์การปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน และจากผลการทดลองไม่มีแนวโน้มที่ค่าสังกะสีในดินจะมีค่าเกินมาตรฐาน

4.1.4 การวิเคราะห์ผลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

1) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้ง

การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยคอลัมน์ดินประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดอยู่ในช่วงสัปดาห์ที่ 10-16 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในช่วงนี้เป็นช่วงที่ดินแน่นที่สุด น้ำทิ้งไหลออกจากคอลัมน์ได้ช้าลง ประกอบกับเนื้อดินมีอนุภาคขนาดเล็กปริมาณดินในคอลัมน์มีมาก พื้นที่ผิวดินมาก ทำให้ดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำเสียได้ดี และดูดซับได้อย่างต่อเนื่องเพราะน้ำทิ้งมีปริมาณสิ่งสกปรกไม่มากนัก กลไกการบำบัดน้ำทิ้งส่วนใหญ่เป็นกลไกการบำบัดโดยการดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบคทีเรียจะย่อยสลายสิ่งสกปรกที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของดินเนื่องจากรดน้ำทิ้งทุกวันแบคทีเรียส่วนมากจะย่อยสลายสารที่ย่อยสลายง่ายก่อน ประสิทธิภาพโดยรวมอัตราการรด 7 cm/week (S7) มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับอัตราการรดที่ 5 cm/week (S5) อัตราการรดที่ 10 cm/week (S10) มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดเป็น 2 ช่วงคือ 1) ช่วงสัปดาห์ที่ 7 ช่วงนี้การบำบัดเป็นกลไกการดูดซับด้วยดินเป็นกลไกหลัก เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์มีไม่มากนัก น้ำไหลผ่านคอลัมน์ได้ช้า ความหนาแน่นดินสูง เนื้อดินมีอนุภาคขนาดเล็กการบำบัดใช้กลไกการดูดซับด้วยดินได้ดี 2) ช่วงสัปดาห์ที่ 13-16 ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ช่วงนี้มีกลไกของการดูดซับด้วยดินและการบำบัดโดยแบคทีเรียร่วมกับหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์หลังสารตั้งแบคทีเรียให้มาอาศัยบริเวณรากได้ (McCutcheon and Schnoor,

2003) แแบคทีเรียย่อยสลายสิ่งสกปรกได้ดี การดูดซับด้วยดินมีประสิทธิภาพลดลงจากช่วงสัปดาห์ที่ 7 น้ำไหลผ่านชั้นดินได้เร็ว เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์ทำให้เกิดช่องว่างในชั้นดินมาก ประสิทธิภาพโดยรวมอัตราการรอด 7 cm/week (SG7) มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดและมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับอัตราการรอดที่ 5 cm/week (SG5) โดยอัตราการรอดที่ 10 cm/week (SG10) มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งเฉลี่ยโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ แสดงดังตารางที่ 4-11

คอลัมน์ดินเกิดกระบวนการดูดซับด้วยดินเป็นกลไกหลักของการบำบัด การย่อยสลายด้วยแบคทีเรียเป็นกลไกรอง เนื่องจากไม่มีสารตั้งให้แบคทีเรียมาอาศัย รวมทั้งอัตราการรอดน้ำรายวันไม่เหมาะสมกับการย่อยสลาย แแบคทีเรียย่อยสลายได้เฉพาะสารตัวที่ไม่เลกุลขนาดเล็กและย่อยได้ง่ายก่อน คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์เกิดกระบวนการดูดซับด้วยดินได้ดีในช่วงที่หญ้าเนเปียร์เจริญไม่เต็มที่ เมื่อหญ้าโตเต็มที่การดูดซับด้วยดินทำได้ลดลง รากหญ้าเนเปียร์เปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อดินทำให้เนื้อดินมีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อหญ้าเนเปียร์โตเต็มที่แบคทีเรียมาอาศัยอยู่บริเวณรากเพิ่มมากขึ้น เกิดการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียได้ดี

ตารางที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้ง

คอลัมน์	ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ย (%)				
	สี	ซีไอดี	ทีเคเอ็น	ทีไอซี	สารประกอบฟีนอลิก
S5	96.0	95.6	87.3	92.5	95.7
S7	95.1	92.9	87.7	94.2	96.0
S10	92.8	88.4	82.0	93.3	94.9
SG5	91.6	90.5	90.0	46.0	95.0
SG7	91.2	90.3	88.4	44.0	95.3
SG10	90.2	89.4	86.0	39.4	94.4

4.2 ลักษณะดิน

4.2.1. ลักษณะทางกายภาพของดิน

การวิเคราะห์ลักษณะดินทางกายภาพก่อนการทดลองตรวจวัดโดยการผสมดินทั้งหมดประมาณ 1.5 ลบ.ม. เก็บตัวอย่างดินโดยใช้วิธี Quartering เพื่อแบ่งดินออกเป็นส่วนๆ ละ 4 กอง แบ่งดินจนได้น้ำหนักดิน 1 กก. เก็บดินก่อนการทดลองทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 1 กิโลกรัม การวิเคราะห์ลักษณะดินหลังการทดลอง นำตัวอย่างดินในคอลัมน์หลังการรดน้ำเสียที่เสร็จสิ้นในสัปดาห์ที่ 16 ของการทดลอง เก็บตัวอย่างดินบริเวณส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของคอลัมน์ทดลองที่นำน้ำเสียมารดคอลัมน์ ส่วนคอลัมน์ที่นำน้ำประปามารดคอลัมน์ทดลองตั้งสมมุติฐานว่าลักษณะดินทางกายภาพของดินมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากรดด้วยน้ำประปาไม่มีการปนเปื้อนสารแขวนลอย สารละลาย และสารอาหารของจุลชีพ จึงไม่ทำการวิเคราะห์ดินจากคอลัมน์ดังกล่าว ตัวอย่างดินถูกส่งให้ศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของดิน พารามิเตอร์ทางกายภาพที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ลักษณะเนื้อดิน

ลักษณะดินที่ใช้ในการทดลองส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ดินก่อนการทดลองมีความสามารถในการรองรับสิ่งสกปรกจากน้ำทิ้งได้ดี เมื่อดินสะสมสารต่างๆในน้ำทิ้ง ความสามารถในการรองรับสิ่งสกปรกจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ส่งผลทำให้ดินมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ลักษณะทางกายภาพดินที่มีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ลักษณะเนื้อดิน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำทิ้งที่รด หากน้ำทิ้งมีอนุภาคขนาดเล็กมาก เนื้อดินจะมีสัดส่วนอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำดินเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ประสิทธิภาพบำบัดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขนาดอนุภาคของดินที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งความหนาแน่นหรือรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงด้วย การเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมี เกิดจากดินดูดซับสารเคมีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ส่งผลให้ดินมีค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น มีปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เมื่อมีการปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้ดินถึงจุดอิ่มตัวของการบำบัดน้ำทิ้งได้ช้าลง อันเนื่องมาจากหญ้าเนเปียร์ใช้สารอาหารเหล่านั้นในการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีวภาพเกิดขึ้นได้เมื่อมีการรดน้ำทิ้งที่มีแบคทีเรียลงในดินส่งผลให้ค่าปริมาณแบคทีเรียในดินเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้สารอาหารในน้ำทิ้งที่เป็นแหล่งอาหารที่ดีของแบคทีเรียก็ส่งผลต่อลักษณะทางชีวภาพได้เช่นกัน

1) ลักษณะเนื้อดิน

ลักษณะเนื้อดินทั้งก่อนและหลังการทดลอง วิเคราะห์จากเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคดินร่วนเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทราย ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน

ตัวอย่างดิน	ขนาดอนุภาค			เนื้อดิน
	% ดินเหนียว	% ซิลต์	% ทราย	
ก่อนการทดลอง	20.89	28.48	50.63	ดินร่วน
หลังการทดลองจากคอลัมน์ S5	20.56	30.13	49.31	ดินร่วน
หลังการทดลองจากคอลัมน์ S7	21.57	28.58	49.85	ดินร่วน
หลังการทดลองจากคอลัมน์ S10	22.13	29.31	48.58	ดินร่วน
หลังการทดลองจากคอลัมน์ SG5	20.26	26.67	53.08	ดินร่วนเหนียว ปนทราย
หลังการทดลองจากคอลัมน์ SG7	20.46	27.41	52.13	ดินร่วนเหนียว ปนทราย
หลังการทดลองจากคอลัมน์ SG10	20.42	27.83	51.75	ดินร่วนเหนียว ปนทราย

ดินที่นำมาบรรจุในคอลัมน์ทดลองก่อนการทดลองเป็นดินร่วน มีเปอร์เซ็นต์ของดินร่วนเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทรายเป็น 20.9, 28.5 และ 50.6 ตามลำดับ ส่วนหลังการทดลองของดินในคอลัมน์ S5 S7 และ S10 ขนาดอนุภาคดินมีการเปลี่ยนแปลงจากดินก่อนการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณของแข็งที่อยู่ในน้ำทำให้เกิดการสะสมโดยดูดซับด้วยชั้นดิน อนุภาคในน้ำที่มึขนาดเล็กจะถูกพื้นผิวของดินดูดซับไว้บริเวณผิวหน้าของอนุภาคดิน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในน้ำที่ไม่สามารถผ่านช่องว่างรูพรุนของชั้นดินได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของดินเล็กน้อย เนื้อดินโดยรวมยังคงเป็นดินร่วนเหมือนเนื้อดินก่อนการทดลอง

ลักษณะเนื้อดินหลังการทดลองของคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีลักษณะเนื้อดินเปลี่ยนแปลงไปเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย โดยมีเปอร์เซ็นต์ของดินร่วนเหนียวลดลงเล็กน้อย ดินทรายแป้งลดลงเล็กน้อย และดินทรายเพิ่มขึ้น การปลูกหญ้าเนเปียร์ส่งผลต่อความหนาแน่นของดินในคอลัมน์ทดลอง อีกทั้งรากหญ้าเนเปียร์ทำให้เกิดช่องว่างในดินเพิ่มขึ้น น้ำที่ไหลผ่านชั้นดินและรากหญ้าเนเปียร์ได้ง่าย การดูดซับอนุภาคขนาดเล็กในน้ำที่ของคอลัมน์ทดลองทำได้น้อยลง อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านชั้นดินและรากหญ้าเนเปียร์ได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินในคอลัมน์ทดลอง มีผลให้ขนาดอนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ดินในคอลัมน์ที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์จึงมีลักษณะเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินส่งผลต่อการดูดซับของดิน กล่าวคือดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าดินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่มีปริมาณเท่ากัน และดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ เช่นดินเหนียวจะมีประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อนุภาคต่างๆมาถูกดูดซับได้ง่ายจากผลการทดลองคอลัมน์ดินมีขนาดอนุภาคดินเล็กกว่าคอลัมน์ที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ จึงมีผลให้ความสามารถของการดูดซับอนุภาคในน้ำที่ของคอลัมน์ดินดีกว่าการดูดซับของคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์

4.2.2 ลักษณะทางเคมีของดิน

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม สังกะสี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และสารประกอบฟีนอลิกในดิน ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของดิน แสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ลักษณะทางเคมีของดิน

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง					
		S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
พีเอช	4.9	6.5	6.7	6.5	6.5	6.3	6.4
ไนโตรเจนทั้งหมด(g/kg)	1.07	1.60	1.30	1.30	1.20	1.10	1.30
อินทรีย์วัตถุ (g/kg)	23.0	28.9	25.9	23.8	22.2	22.9	24.8
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	26.8	52.1	59.2	58.6	31.3	39.0	43.6

ตารางที่ 4-13 ลักษณะทางเคมีของดิน (ต่อ)

พารามิเตอร์	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง					
		S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	59.8	330	218	297	293	279	270
สังกะสี (mg/kg)	0.58	0.47	0.65	0.50	1.47	0.97	0.68
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cmol/kg)	5.55	7.42	7.40	7.22	8.09	7.41	7.74
สารประกอบฟีนอลิก (mg GAE/kg)	60	96	133	193	83	101	138

2) พีเอช

ค่าพีเอชในดินมีผลต่อการดูดซึมแร่ธาตุและการเจริญเติบโตของพืช พืชหลายชนิดเจริญเติบโตได้โดยช่วงพีเอชที่เหมาะสม และค่าพีเอชในดินมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารของจุลินทรีย์ในดิน อิทธิพลของพีเอชในดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชดินที่มีสภาพเป็นกรดจะทำให้ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม กำมะถัน แคลเซียม และแมกนีเซียม เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ พืชจึงมีแนวโน้มขาดธาตุอาหารดังกล่าว ขณะที่ธาตุเหล็กจะแตกตัวออกมาในปริมาณมากจนเป็นอันตรายต่อพืช และความเป็นกรดมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินและมีประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณที่ลดลง ดินที่มีสภาพเป็นเบส จะทำให้ธาตุไนโตรเจน เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นดินควรมีพีเอชอยู่ระหว่าง 4.8-8.5 จึงเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชและการดำรงชีวิตอยู่ของจุลินทรีย์ในดิน

ค่าพีเอชของดินก่อนการทดลองมีค่าเป็น 4.9 เป็นกรดเล็กน้อย หลังจากการทดลองคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ทดลอง ผลการทดลองของคอลัมน์ดินอย่างเดี่ยว คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าพีเอช 6.5, 6.7 และ 6.5 ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าพีเอช 6.5, 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ ตัวอย่างดินทุกคอลัมน์หลังการทดลองมีค่าพีเอชค่อนข้างใกล้เคียงกัน สอดคล้องกันผลการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ที่ค่าพีเอชในดินเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลอง ค่าพีเอชในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำทิ้งทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนในดิน (H^+) เมื่อบริการน้ำทิ้งอย่างต่อเนื่องปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในดินจึงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าพีเอชของดินในทุกคอลัมน์มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากพีเอชค่อนข้างเป็นกรดเปลี่ยนเป็นพีเอชเป็นกลางและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช

3) ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืช เมื่อพืชขาดไนโตรเจนจะแคระแกร็น โตช้า ใบเหลือง โดยเฉพาะใบล่างๆ จะแห้ง ร่วงหล่นเร็ว การออกดอกออกผลจะช้า และไม่ค่อยสมบูรณ์ โดยมาตรฐานไนโตรเจนในดินกำหนดไว้ 5 ระดับ ดังนี้ 1) น้อยกว่า 0.1 g/kg ต่ำมาก 2) 0.1-0.3 g/kg ต่ำ 3) 0.3-0.6 g/kg ปานกลาง 4) 0.6-1.0g/kg สูง 5) มากกว่า 1.0 g/kg สูงมาก

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของดินในคอลัมน์ทดลองก่อนและหลังการทดลอง จากการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในตัวอย่างดินก่อนการทดลองมีค่า 1.07 g/kg ไนโตรเจนทั้งหมดในดินมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงมาก หลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ทดลอง โดยคอลัมน์ S5 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็น 1.60 g/kg รองลงเป็นคอลัมน์ S7 และ S10 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากันที่ 1.30 g/kg คอลัมน์ SG10 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุดเป็น 1.30 g/kg รองลงเป็นคอลัมน์ SG5 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 1.20 g/kg และคอลัมน์ SG7 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดน้อยที่สุดเป็น 1.10 g/kg หลังการทดลองทุกคอลัมน์ทดลองมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากในน้ำทิ้งมีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินจึงมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ซึ่งพบว่าค่าไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่มีการรดน้ำทิ้งทุกวันมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

คอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดน้อยกว่าคอลัมน์ทดลองดินอย่างเดียว เนื่องจากในคอลัมน์ทดลองค่าพีเอชเป็นกลางทำให้หญ้าเนเปียร์สามารถดูดไนโตรเจนไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตได้ดี

4) อินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุ คือ อินทรีย์สารทุกชนิดที่มีอยู่ในดิน เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ รวมไปถึงสิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์ ขยะต่างๆ ตลอดจนจนถึงเซลล์ของจุลินทรีย์ที่สลายตัว ซึ่งเป็นแหล่งของธาตุไนโตรเจน แต่ก็ให้ธาตุอื่นๆ โดยจะปล่อยธาตุอาหารจากการสลายตัวอย่างช้าๆ อีกทั้งบำรุงดินทางกายภาพ เคมีและชีวภาพด้วย เกณฑ์ในการประเมินระดับอินทรีย์วัตถุในดินมีดังนี้ 1) น้อยกว่า 1 g/kg คือ ต่ำ 2) 1-2 g/kg คือ ปานกลาง 3) 2-3 g/kg คือ ค่อนข้างสูง 4) มากกว่า 3 g/kg คือ สูง (ยงยุทธ และคณะ, 2554)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการทดลอง จากการวิเคราะห์ อินทรีย์วัตถุในดินในตัวอย่างดินก่อนการทดลองมีค่า 23.0 g/kg หลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีค่าอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ทดลอง โดยคอลัมน์ S5 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นมากที่สุด มีค่าอยู่ที่ 28.9 g/kg รองลงเป็นคอลัมน์ S7 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 25.9 g/kg และคอลัมน์ S10 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 23.8 g/kg สอดคล้องกับการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ซึ่งพบว่าค่าอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

การวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุหลังการทดลองของคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG10 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นโดยมีค่า 24.8 g/kg คอลัมน์ SG7 และคอลัมน์ SG5 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงเล็กน้อยมีค่าเป็น 22.9 และ 22.2 g/kg ตามลำดับ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุของคอลัมน์ดินคอลัมน์ทดลองที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณน้อยกว่าคอลัมน์ดิน เนื่องจากหญ้าเนเปียร์สามารถดูดสารอินทรีย์วัตถุสำหรับการเจริญเติบโตได้ ส่วนคอลัมน์ดินอินทรีย์วัตถุจากน้ำทิ้งที่รดสะสมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น

5) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการธาตุหนึ่งที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินมีปัจจัยต่างๆ ควบคุม เช่น ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ชนิดของแร่ดินเหนียว เป็นต้น

ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนและหลังการทดลอง จากการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ฟอสฟอรัสในดินก่อนการทดลองมีค่า 26.8 mg/kg หลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นทุกการทดลอง คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เป็น 52.1, 59.2 และ 58.6 mg/kg ตามลำดับ คอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นทุกการทดลองเช่นกัน คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เป็น 31.3, 39.0 และ 43.6 mg/kg ตามลำดับ โดยเกณฑ์ในการประเมินฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมี ดังนี้ 1) น้อยกว่า 3 mg/kg คือ ต่ำมาก 2) ระหว่าง 3-10 mg/kg คือ ต่ำ 3) 10-15 mg/kg คือ ปานกลาง 4) 16-45 mg/kg คือ สูง 5) มากกว่า 45 mg/kg คือ สูงมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ซึ่งพบว่าค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

ดินหลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่า 45 mg/kg ปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีค่าสูงมาก แสดงว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีเพียงพอกับความ ต้องการของพืช และมีฟอสฟอรัสสำรองไว้ใช้ต่อไปได้อีก

คอลัมน์ดินอย่างเดียวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่าคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากพีเอชของดินเป็นกลางฟอสฟอรัสเปลี่ยนรูปเป็นฟอสเฟตได้และหญ้าเนเปียร์สามารถดูดฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเป็นสารอาหารพืชได้ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินกับปริมาณน้ำทิ้งรดคอลัมน์ทดลองมีค่าแปรผันตรง กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำทิ้งรดคอลัมน์เพิ่มขึ้นปริมาณฟอสฟอรัสในดินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย จากงานวิจัยของ อนุกุล เกียรติขวัญบุตร (2558) พบว่าค่าฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเป็น 221 mg/L สรุปได้ว่า การรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ทดลองสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้ในทุกคอลัมน์ทดลอง

6) โฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน

โฟแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่มีประจุบวกที่พืชดูดใช้เป็นปริมาณมากที่สุด โฟแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในพืช ได้แก่ การสังเคราะห์แสง การหายใจ การลำเลียงสารประกอบที่ได้จากการสังเคราะห์แสง การสร้างโปรตีน และน้ำมันใน ถ้าหากพืชขาดโฟแทสเซียมจะทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตลดลง

ปริมาณโฟแทสเซียมที่มีประโยชน์ในดินก่อนและหลังการทดลอง จากการวิเคราะห์ ปริมาณโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินก่อนการทดลองมีค่า 59.8 mg/kg หลังการทดลองคอลัมน์ ดินอย่างเดียวมีปริมาณโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ทดลอง คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีค่าโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 330, 218 และ 297 mg/kg ตามลำดับ สำหรับคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ทดลองเช่นกัน คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าโฟแทสเซียม 293, 279 และ 270 mg/kg ตามลำดับ เกณฑ์ในการ ประเมินโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมี ดังนี้ 1) น้อยกว่า 30 mg/kg คือ ต่ำมาก 2) ระหว่าง 30–60 mg/kg คือ ต่ำ 3) 60 - 90 mg/kg คือ ปานกลาง 4) 91 - 120 mg/kg คือ สูง 5) มากกว่า 120 mg/kg คือ สูงมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

ดินหลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวและคอลัมน์ที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่า โฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากกว่า 120 mg/kg ดังนั้นปริมาณโฟแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมี ค่าสูงมาก แสดงว่าปริมาณโฟแทสเซียมที่มีประโยชน์ในดินมีเพียงพอกับความต้องการของพืช และมี ธาตุโพแทสเซียมสำรองไว้ใช้ต่อไปได้อีก

7) สังกะสี

สังกะสีมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการทางชีวเคมีต่างๆ ของพืช ได้แก่ การ สังเคราะห์ด้วยแสง และการสร้างน้ำตาล การสังเคราะห์โปรตีน การเจริญพันธุ์ และการเพาะด้วย เมล็ด การเติบโตอย่างสม่ำเสมอ การต้านทานโรค

ปริมาณสังกะสีในดินก่อนและหลังการทดลอง จากการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีใน ดินก่อนการทดลองมีค่า 0.58 mg/kg หลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียว คอลัมน์ S7 มีปริมาณ สังกะสีเพิ่มขึ้น มีค่าสังกะสี 0.65 mg/kg ส่วนคอลัมน์ S5 และ S10 มีค่าสังกะสีลดลง มีค่าสังกะสี 0.47 และ 0.50 mg/kg ตามลำดับ สำหรับคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณสังกะสี เพิ่มขึ้น คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าสังกะสี 1.47, 0.97 และ 0.68 mg/kg ตามลำดับ

ปริมาณสังกะสีจากคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีค่าแกว่งไปมาลดบ้างเพิ่มบ้าง และปริมาณสังกะสีในดินกับปริมาณการรด น้ำทิ้งในคอลัมน์ดินมีค่าไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นสรุปได้ว่า การรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถเพิ่มปริมาณสังกะสีในดินได้

8) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก เป็นสมบัติของดินที่มีความสำคัญต่อการสำรองปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ไว้ในดิน และปลดปล่อยออกมาให้พืชได้ใช้ประโยชน์

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินก่อนและหลัง จากการวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของดินก่อนการทดลองมีค่า 5.55 cmol/kg หลังการสำหรับการหุดการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียว ตัวอย่างดินในคอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้น มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 7.4, 7.4 และ 7.2 cmol/kg สำหรับคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ตัวอย่างดินในคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 8.1, 7.4 และ 7.7 cmol/kg ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับการทดลองของ กุสุมาลย์ ล่องแก้ว (2557) ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัด

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้งสองชุดการทดลองมาเปรียบเทียบกัน สรุปได้ว่าทั้งสองชุดการทดลองสามารถเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินได้ และคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินได้มากกว่าคอลัมน์ดินอย่างเดียวสำหรับอัตราการรดน้ำที่เท่ากันในทุกคอลัมน์ทดลอง

9) สารประกอบฟีนอลิกในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในดินก่อนการทดลองมีค่า 60 mg/kg หลังการทดลองคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ คอลัมน์ S10 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยมีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 193 mg/kg คอลัมน์ S7 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 133 mg/kg และคอลัมน์ S5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเป็น 96 mg/kg

คอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นทุกคอลัมน์ คอลัมน์ SG10 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นมากที่สุด มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 138 mg/kg ส่วนคอลัมน์ SG7 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอันดับสอง มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 101 mg/kg และคอลัมน์ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด มีสารประกอบฟีนอลิกเป็น 83 mg/kg

สารประกอบฟีนอลิกจากคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีปริมาณสูงกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์ดึงแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ส่งผลให้การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ดี เมื่อมีการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกด้วยแบคทีเรียสารประกอบฟีนอลิกที่สะสมในชั้นดินจึงลดลง เมื่อพิจารณาคอลัมน์ดินอย่างเดียวที่ใช้การดูดซับโดยดินเป็นกลไกหลัก ปริมาณการสะสมสารประกอบฟีนอลิกในคอลัมน์ดินอย่างเดียวจึงมากกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ โดยสามารถศึกษาผลทางการวิเคราะห์ลักษณะทางชีวภาพได้ในหัวข้อถัดไป

คอแลมดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีขนาดอนุภาคดินใหญ่กว่าคอแลมดินอย่างเดียว ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย อนุภาคดินมีขนาดใหญ่จะความเป็นประจุของดินลง ทำให้ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลลดลง การบำบัดด้วยการใช้แบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลทำได้ดีขึ้น เมื่อปลูกหญ้าเนเปียร์รากหญ้าเนเปียร์จะปล่อยสารบางอย่างเพื่อดึงดูดแบคทีเรียกลุ่มย่อยสลายสารประกอบฟีนอลที่มีอยู่ตามธรรมชาติในดินให้เพิ่มจำนวนกลายเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น เมื่อปริมาณแบคทีเรียในดินที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในดินเพิ่มขึ้น ทำให้ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลได้มากขึ้น กลไกหลักในการบำบัดสารประกอบฟีนอลในคอแลมดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คือ กลไกการดูดซับด้วยดิน และกลไกการย่อยสลายโดยแบคทีเรียร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ดังนั้นปริมาณสารประกอบฟีนอลสะสมในคอแลมดินจึงมีมากกว่าคอแลมดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์

4.2.3 ลักษณะทางชีวภาพของดิน

4.2.3.1 ปริมาณแบคทีเรียในดิน

การวัดปริมาณแบคทีเรียในดินด้วยอาหารที่ไม่มีคาร์บอน (carbon free mineral medium; CFMM) ถูกนำมาใช้สำหรับหาปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลในการศึกษาครั้งนี้ จากการวัดด้วยเครื่อง Microplate reader โดยนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณแบคทีเรียจากตาราง MPN ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอล (n = 3)

ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรีย log MPN / ดิน 1 กรัม
ดินก่อนการทดลอง	7.2±2.5
หลังการทดลองจากคอแลม S5	10.8±2.5
หลังการทดลองจากคอแลม S7	11.2±1.0
หลังการทดลองจากคอแลม S10	12.2±3.0
หลังการทดลองจากคอแลม SG5	12.4±1.5
หลังการทดลองจากคอแลม SG7	12.8±1.5
หลังการทดลองจากคอแลม SG10	12.4±2.5
หลังการทดลองจากคอแลม SPG	6.2±2.5
หลังการทดลองจากคอแลม T5	7.4±1.0
หลังการทดลองจากคอแลม T7	6.8±2.5
หลังการทดลองจากคอแลม T10	7.4±1.0

จากผลการทดลองปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลในตัวอย่างดินก่อนการทดลองมีปริมาณแบคทีเรีย 7.2±2.5 log MPN/ดิน 1 กรัม ตัวอย่างดินหลังการทดลองปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายฟีนอลเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างดินก่อนการทดลอง คอแลมที่รดน้ำทิ้งในอัตราที่สูงกว่า มีปริมาณแบคทีเรียเพิ่มขึ้นมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอแลมดินอย่างเดียวและคอแลมดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ที่อัตราการรดเดียวกัน พบว่าคอแลมที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีปริมาณแบคทีเรีย

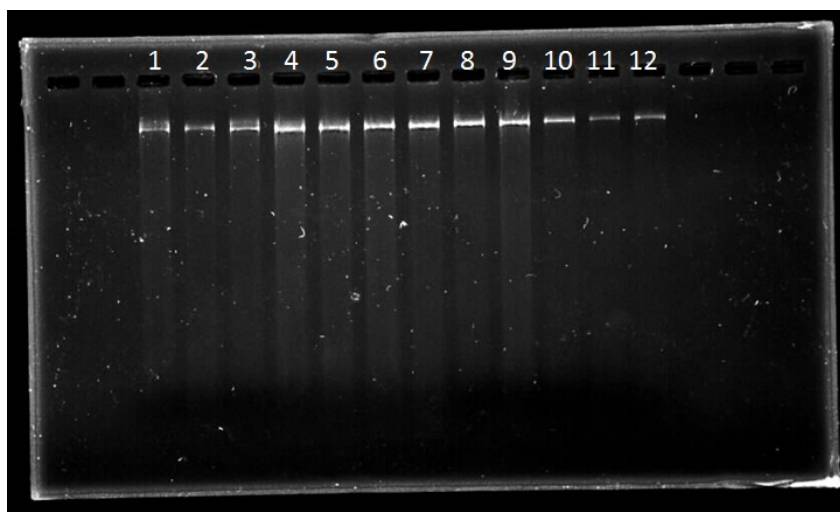
มากกว่า และการปลูกหญ้าเนเปียร์ส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายฟีนอลในดินเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ พลิชฐ์ จารุจารีต (2559) พบว่าการปลูกหญ้าชิกแนลเลื้อยทำให้ปริมาณแบคทีเรียในดินเพิ่มมากขึ้น โดยดินอย่างเดียวมีปริมาณแบคทีเรีย 8.71–8.91 log MPN/ดิน 1 กรัม ดินที่ปลูกหญ้าชิกแนลเลื้อยมีปริมาณแบคทีเรีย 10.57–10.71 log MPN/ดิน 1 กรัม การปลูกหญ้าชิกแนลเลื้อยทำให้เพิ่มปริมาณแบคทีเรียในดินได้ 16.8–18.1%

ส่วนคอสม์ดินที่รดน้ำประปาที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ปริมาณแบคทีเรียมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากในน้ำประปามีสารคลอรีนผสมอยู่อาจส่งผลต่อการเจริญของแบคทีเรียในดินบางชนิด คอสม์ดินที่รดน้ำประปาที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ปริมาณแบคทีเรียมีค่าใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง เนื่องจากรากหญ้าเนเปียร์หลังสารตั้งแบคทีเรียให้เจริญดีขึ้นและการรดน้ำประปาทำให้แบคทีเรียลดลง

4.2.3.2 ชนิดของแบคทีเรียในดิน

1) การสกัด DNA ของแบคทีเรียจากตัวอย่างดิน

ทำการสกัด DNA ของแบคทีเรียจากตัวอย่างดินเพื่อศึกษาความหลากหลายของชนิดแบคทีเรียในดิน และความแตกต่างของแบคทีเรียแต่ละชุดทดลอง โดยเก็บตัวอย่างจากตัวอย่างน้ำเข้าระบบ ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง และตัวอย่างดินหลังการทดลองของทุกคอสม์ จากการสกัดดีเอ็นเอโดยใช้ชุดสกัดสำเร็จรูป (OMEGA, USA) สามารถสกัดดีเอ็นเอได้จากตัวอย่างน้ำและดิน ซึ่งปรากฏแถบ DNA ดังรูปที่ 4-17



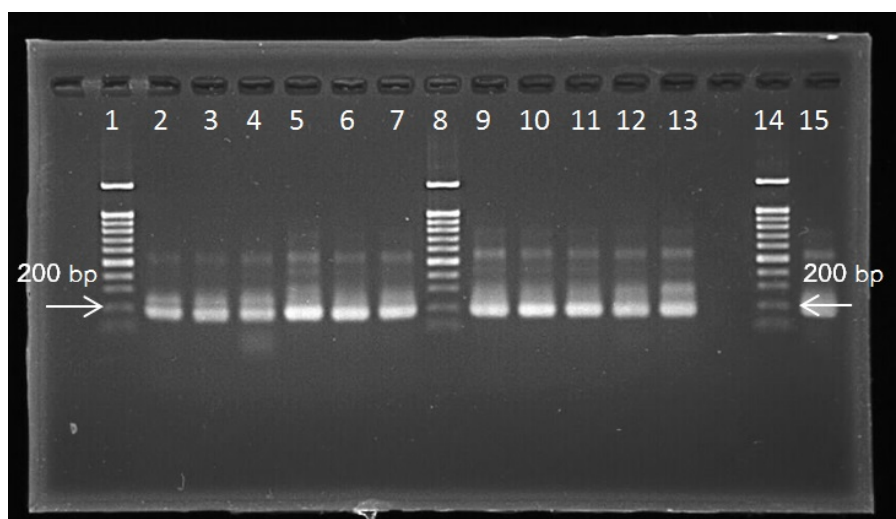
รูปที่ 4-17 Genomic DNA ของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน เรียงลำดับดังนี้ 1) น้ำเข้าระบบ 2) ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง 3) ตัวอย่างดินจากคอสม์ S5 4) ตัวอย่างดินจากคอสม์ S7 5) ตัวอย่างดินจากคอสม์ S10 6) ตัวอย่างดินจากคอสม์ SG5 7) ตัวอย่างดินจากคอสม์ SG7 8) ตัวอย่างดินจากคอสม์ SG9 9) ตัวอย่างดินจากคอสม์ SPG 10) ตัวอย่างดินจากคอสม์ T5 11) ตัวอย่างดินจากคอสม์ T7 12) ตัวอย่างดินจากคอสม์ T10

จากผลการสกัดดีเอ็นเอพบว่าแถบที่ 1-12 มีดีเอ็นเอของแบคทีเรียของทุกตัวอย่าง ที่ทำการวิเคราะห์ โดยแถบที่ 1 (น้ำทิ้ง) และ 2 (ดินก่อนการทดลอง) เป็นแถบดีเอ็นเอของน้ำเข้าทั้งระบบและดินก่อนการทดลองมีแถบดีเอ็นเอชัดไม่มากนัก แถบที่ 3 (S5) 4 (S7) และ 5 (S10) เป็นแถบ ดีเอ็นเอของโคลัมน์ที่รดน้ำทิ้งลงในโคลัมน์ดิน มีความเข้มของแถบเพิ่มขึ้นจากแถบที่ 1 และ 2 เนื่องจากเมื่อรดน้ำทิ้งลงในโคลัมน์แบคทีเรียในน้ำทิ้งจะอยู่ในดินด้วย ส่งผลให้ปริมาณดีเอ็นเอของแบคทีเรียหลังการทดลองเพิ่มมากขึ้น แถบที่ 6 (SG5) 7 (SG7) และ 8 (SG10) เป็นแถบดีเอ็นเอของโคลัมน์ที่รดน้ำทิ้งลงในโคลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ มีความเข้มของแถบเพิ่มขึ้นจากแถบที่ 1 และ 2 เนื่องจากเมื่อรดน้ำทิ้งลงในโคลัมน์แบคทีเรียในน้ำทิ้งจะไปอยู่ในดินและแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นจากรากของหญ้าเนเปียร์ ทำให้ปริมาณดีเอ็นเอของแบคทีเรียหลังการทดลองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบแถบดีเอ็นเอที่เด่นชัดกว่าพบว่าปริมาณแบคทีเรียมากกว่าแถบดีเอ็นเอที่อ่อนกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี MPN

แถบที่ 9 (SPG) เป็นแถบที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ตามวิธีมาตรฐานรดน้ำประปาที่อัตราการรด 10 cm/week มีแถบดีเอ็นเอชัดกว่าแถบดีเอ็นเอของดินก่อนการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถเพิ่มปริมาณแบคทีเรียได้ และแถบที่ 11 (T5) 11 (T7) และ 12 (T10) เป็นแถบดีเอ็นเอของการนำน้ำประปาดรดโคลัมน์ดิน พบว่าแถบดีเอ็นเอของดินโคลัมน์ใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง แสดงว่าการรดน้ำประปาไม่มีผลต่อปริมาณแบคทีเรียในดินของโคลัมน์ทดลอง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี MPN ข้างต้น พบว่าปริมาณของแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกในดินก่อนการทดลอง และดินในโคลัมน์ที่มีการรดน้ำประปามีปริมาณใกล้เคียงกับ สอดคล้องกับความเด่นชัดของแถบดีเอ็นเอที่มีความใกล้เคียงกัน

2) การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วน 16S rDNA โดยวิธี Polymerase chain reaction (PCR)

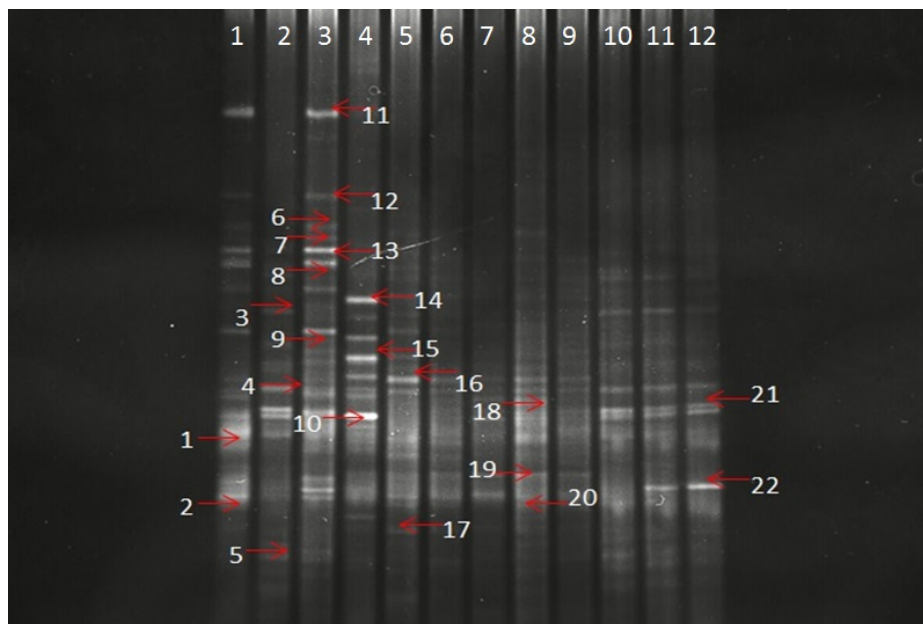
เมื่อสกัด DNA แล้ว จึงทำการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วน DNA ที่สนใจโดย ปฏิกริยาลูกโซ่พอลิเมอ-เรสด้วยไพรเมอร์ (DNA primers) 341f-gc และ 534r ตามวิธีของ Wu et al. (2012) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ขนาดประมาณ 200 คู่เบส ไพรเมอร์ชนิดนี้เป็น แบบ Universal primer โดยสามารถเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนดีเอ็นเอได้ที่ตำแหน่ง 16S rDNA ของ แบคทีเรียทั่วไป เมื่อนำผลิตภัณฑ์ PCR ที่ได้มาตรวจสอบด้วยเครื่องอิเล็กโทรโฟเรซิสพบว่า มีแถบผลิตภัณฑ์ขนาด 200 คู่เบสอย่างชัดเจนจากตัวอย่างน้ำและดินทั้ง 12 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-18 ผลิตรหัสพีซีอาร์จาก Genomic DNA ของแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำและตัวอย่างดิน เรียงลำดับดังนี้ 1) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 2) น้ำเข้าระบบ 3) ตัวอย่างดินก่อนการ ทดลอง 4) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S5 5) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S7 6) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S10 7) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG5 8) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 9) ตัวอย่างดินจาก คอลัมน์ SG7 10) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG10 11) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SPG 12) ตัวอย่างดิน จากคอลัมน์ T5 13) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T7 14) Marker 100 bp - 1.5 kb DNA ladder 15) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T10

3) การจำแนกแบคทีเรียด้วยวิธี Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE)

เทคนิค DGGE เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ความหลากหลายของแบคทีเรีย ผลการวิเคราะห์ได้ในรูปแบบสายของ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียแต่ละชนิด สามารถนำไป วิเคราะห์หาลำดับเบส และนำไปเปรียบเทียบกับสายของ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียที่ทราบ ชนิดแล้วในฐานข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าเป็นชนิดใด โดยโปรไฟล์ของ DGGE ของตัวอย่างดินทั้ง 12 ตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4-19 และลำดับของแถบดีเอ็นเอของตัวอย่างดินและน้ำที่แสดงดังตารางที่ 4-15



รูปที่ 4-19 โปรไฟล์ของ DGGE ในพอลิอะครีลาไมด์เจลที่ใช้เกรเดียนท์ของความเข้มข้น denaturant เท่ากับ 40-60% เรียงลำดับดังนี้ 1) น้ำเข้าระบบ 2) ตัวอย่างดินก่อนการทดลอง 3) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S5 4) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S7 5) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ S10 6) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG5 7) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG7 8) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SG9 9) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ SPG 10) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T5 11) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T7 12) ตัวอย่างดินจากคอลัมน์ T10

ตารางที่ 4-15 ลำดับของแถบตีเอ็นเอของตัวอย่างดินและน้ำ

ลำดับ	ตัวอย่าง	แถบตีเอ็นเอที่พบ																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	น้ำทิ้ง	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	
2	ดินก่อนการทดลอง	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	
3	ดินจากคอลัมน์ S5	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	
4	ดินจากคอลัมน์ S7	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	✓	
5	ดินจากคอลัมน์ S10	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	
6	ดินจากคอลัมน์ SG5	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	
7	ดินจากคอลัมน์ SG7	-	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	
8	ดินจากคอลัมน์ SG10	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	
9	ดินจากคอลัมน์ SPG	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	
10	ดินจากคอลัมน์ T7	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	
11	ดินจากคอลัมน์ T10	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓	✓	
12	ดินจากคอลัมน์ T10	✓	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	

จากการเลือกแถบดีเอ็นเอทั้ง 22 ตัวอย่าง ส่งวิเคราะห์ sequencing ได้ชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเด่น แสดงดังตารางที่ 4-16

น้ำทิ้งมีแบคทีเรียกลุ่มเด่นทั้งหมด 13 ชนิด ได้แก่ *Clostridiales bacterium*, *Streptomyces cellulosa*, *Clostridium butyricum*, *Spiroplasma sp.*, *Planktothrix sp.*, *Chitinimonas koreensis*, *Microbacteriaceae bacterium*, *Paenibacillus polymyxa*, *Candidatus*, *Midichloria sp.*, *Nocardioides mesophilus*, *Hydrogenophaga sp.*, *Jatrophihabitans fulvus* และ *Flavobacterium haoranii* แบคทีเรียกลุ่มเด่นส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำ น้ำเสีย ตะกอน

ดินก่อนการทดลองมีแบคทีเรียกลุ่มเด่นทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่ *Chitinimonas koreensis*, *Bacillus muralis*, *Candidatus Midichloria sp.*, *Nocardioides mesophilus*, *Hydrogenophaga sp.*, *Bacillus subtilis*, *Flavobacterium haoranii* และ *Stenotrophomonas sp.* แบคทีเรียกลุ่มเด่นส่วนมากเป็นแบคทีเรียที่อยู่ในดิน

คอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่มีการรดน้ำทิ้งแบคทีเรียกลุ่มเด่นเป็นแบคทีเรียในน้ำทิ้งและแบคทีเรียในดินก่อนการทดลอง พบว่ามีแบคทีเรียกลุ่มเด่น 9 – 13 ชนิด มีแหล่งที่มาของแบคทีเรียมาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ดิน และน้ำทิ้ง คอลัมน์ S5 S7 และ S10 มีแบคทีเรียกลุ่มเด่นเป็น 13, 10 และ 9 ชนิด ตามลำดับ แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบในคอลัมน์ S5 S7 และ S10 ที่พบทั้ง 3 คอลัมน์ ได้แก่ *Flavobacterium haoranii*, *Candidatus Midichloria sp.* และ *Paenibacillus polymyxa* เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดิน น้ำ และตะกอนเป็นส่วนใหญ่

คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รดน้ำทิ้งแบคทีเรียกลุ่มเด่นมาจากแบคทีเรียในน้ำทิ้งแบคทีเรียในดินก่อนการทดลอง และแบคทีเรียที่อาศัยในพืช รากพืช มีแบคทีเรียกลุ่มเด่น 11-15 ชนิด โดยมีแหล่งที่มาของแบคทีเรีย 3 แหล่ง ได้แก่ ดิน น้ำทิ้ง และรากหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 มีแบคทีเรียกลุ่มเด่นเป็น 12, 10 และ 15 ชนิด ตามลำดับ แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบในคอลัมน์ SG5 SG7 และ SG10 ที่พบทั้ง 3 คอลัมน์ ได้แก่ *Candidatus Midichloria sp.*, *Stenotrophomonas sp.*, *Spiroplasma sp.*, *Chitinimonas koreensis*, *Nocardioides mesophilus*, *Agrococcus jenensis*, *Alpha proteobacterium*, *Rhodococcus sp.*, *Jatrophihabitans fulvus*, *Kocuria palustris* เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดิน น้ำ ตะกอน พืช รากพืช ใบเปลือกไม้ของพืช เมื่อปลูกหญ้าเนเปียร์ส่งผลให้มีแบคทีเรียที่อาศัยต้นพืชเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังพบแบคทีเรียที่สำคัญสำหรับการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก คือ ตัวอย่างดีเอ็นเอในลำดับที่ 18 คือ *Rhodococcus sp.* จากงานวิจัยของ Norazah et al. (2015) *Rhodococcus sp.* เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ การย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 0.74 g/L มีประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 95.8% หรือที่ความเข้มข้น 0.85 g/L มีประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 92.2%

Rhodococcus sp. เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่อาศัยอยู่ในดิน ดินก่อนการทดลองไม่มี *Rhodococcus* sp. เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น เมื่อมีการปลูกหญ้าเนเปียร์และรดน้ำทิ้งทำให้ *Rhodococcus* sp. มีปริมาณเพิ่มขึ้นกลายเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากรากหญ้าเนเปียร์ ปล่อยสารประกอบอินทรีย์ (Root exudates) ที่ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียให้มาเกาะที่บริเวณ รากหญ้าเนเปียร์ (Fletcher and Hegde 1995; Van Hecke et al., 2005; Kumar et al., 2006) และมีการรดน้ำทิ้งที่มีสารประกอบฟีนอลิก ทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่สามารถย่อยสลายสลายประกอบ ฟีนอลิกที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีปริมาณเพิ่มขึ้น

คอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบมาตรฐานที่มีการรดน้ำประปาแบคทีเรีย กลุ่มเด่นเป็นแบคทีเรียในดินก่อนการทดลอง มีแบคทีเรียกลุ่มเด่น 8 ชนิด แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบใน คอลัมน์ SPG ได้แก่ *Candidatus Midichloria* sp., *Chitinimonas koreensis*, *Nocardioides mesophilus*, *Microbacteriaceae bacterium*, *Agrococcus jenensis*, *Jatrophihabitans fulvus*, *Kocuria palustris*, *Clostridium* sp. แบคทีเรียส่วนใหญ่พบในดินและหญ้า

คอลัมน์ดินที่รดด้วยน้ำประปา ชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเด่นคล้ายกับดินก่อนการ ทดลองมีแบคทีเรียกลุ่มเด่นทั้งหมด 10 ชนิด ได้แก่ *Hydrogenophaga* sp., *Flavobacterium haoranii*, *Candidatus Midichloria* sp., *Stenotrophomonas* sp., *Chitinimonas koreensis*, *Nocardioides mesophilus*, *Planktothrix* sp., *Microbacteriaceae bacterium*, *Clostridium* sp., *Bacillus subtilis* แบคทีเรียที่พบส่วนมากเป็นแบคทีเรียที่อยู่ในดิน

ผลการทดลองในการศึกษานี้สอดคล้องกับการทดลองของ พลิชฐ์ จารุจารีต (2559) พบว่าการปลูกหญ้าชิกแนลเลี้ยงทำให้มีชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเด่นเพิ่มขึ้น แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบใน ดินเป็นชนิดเดียวกัน ได้แก่ *Flavobacterium haoranii*, *Paenibacillus polymyxa*, *Nocardioides mesophilus* และ *Agrococcus jenensis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่พบส่วนใหญ่ใน ดิน รากพืช และน้ำเสีย

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแบคทีเรียกลุ่มของคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์กับ คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ พบว่ามีแบคทีเรียกลุ่มเด่นใกล้เคียงกัน คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มี แบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด สารประกอบฟีนอลิก คอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าคอลัมน์ดินที่ ปลูกหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากกระบวนการบำบัดสารประกอบฟีนอลิกมีหลายกลไก ได้แก่ การกรอง การดูดซับ การดูดซับโดยดิน เป็นต้น รวมทั้งน้ำทิ้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยและมีชนิด ของสารประกอบฟีนอลิกเพียงชนิดเดียว คือ gallic acid ส่งผลให้แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบ ฟีนอลิกที่เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นเพียงชนิดเดียว งานวิจัยของ Albert Krastanov et al. (2013) พบว่าชนิดของสารประกอบฟีนอลิกมีความสำคัญกับชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเด่น การบำบัดน้ำเสียที่มี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงและมีชนิดของสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิด ได้แก่ gallic acid,

caffeic acid, vanillic acid, phenol, protocatechuic acid และ *p*-hydroxybenzoic acid เกิดแบคทีเรียกลุ่มเต็นที่ย่อยสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ *Rhodococcus sp.*, *Methylobacterium populi*, *Pseudomonas*, *Candida tropicalis* และ *Trichosporon cutaneum* ดังนั้นหากมีความเข้มข้นและชนิดของสารประกอบฟีนอลิกน้อยทำให้ชนิดของแบคทีเรียกลุ่มเต็นที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกน้อยลง

ตารางที่ 4-16 ชนิดของแบคทีเรียในดิน

ลำดับของแถบดีเอ็นเอ	สายพันธุ์แบคทีเรีย	Accession no.	Similarity (%)	แหล่งที่พบ	เอกสารอ้างอิง
1	<i>Hydrogenophaga sp.</i>	JQ799976.1	95	น้ำเสียและตะกอน	Jung Hoon Yoon et al., 2008
2	<i>Flavobacterium haorarii</i>	NR117422.1	94	ดิน, น้ำเสีย	Zhang et al., 2010
3	<i>Bacillus muralis</i>	KU550762.1	87	ในดินทั่วไป	Joan L et al., 2011
4	<i>Candidatus Midichloria sp.</i>	HG793392.1	95	ในน้ำ	Davide S et al., 2006
5	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	KC404032.1	89	ในดินทั่วไป	Hauben L et al., 1999
6	<i>Clostridium butyricum</i>	KT906205.1	90	ดิน, น้ำ	Hao J et al., 2008
7	<i>Spiroplasma sp.</i>	FJ821677.1	92	ใยเปลือกไม้ของพืช	Alexeeva I et al., 2006
8	<i>Chitinimonas koreensis</i>	KU991492.1	89	ดินในเรือนกระจก	Byung Yong Kim et al., 2006
9	<i>Paenibacillus polymyxa</i>	NR117733.2	96	ดิน, รากพืช	Timmusk et al., 2005
10	<i>Nocardioides mesophilus</i>	NR116027.1	95	ดินทั่วไป	Dastager et al., 2010
11	<i>Clostridiales bacterium</i>	JQ296927.1	90	ในดินทั่วไป	Africa Charlene et al., 2014
12	<i>Streptomyces cellulosae</i>	KP264920.1	88	ในดินสวน	Urabe H et al., 1990
13	<i>Planktothrix sp.</i>	KM384751.1	86	พืชและสัตว์	Komárek J, 2004
14	<i>Microbacteriaceae bacterium</i>	KC434981.1	90	ในดินทั่วไป	Richert et al., 2007
15	<i>Pontibacter sp.</i>	KX198137.1	84	ในดินทั่วไป	Syed G. Dastager, 2011
16	<i>Agrococcus jenensis</i>	NR026275.1	90	ดิน, ส่วนต่างๆของพืช	Groth et al., 1996
17	<i>Alpha proteobacterium</i>	JF488446.1	93	พืช	Williams KP et al., 2007
18	<i>Rhodococcus sp.</i>	JX428889.1	84	ดิน, น้ำ และ เซลล์ยูคาริโอ	McLeod MP and Eltis LD, 2008
19	<i>Jatrophihabitans fulvus</i>	NR_137370.1	89	ดินและหญ้า	Long Jin et al., 2015
20	<i>Kocuria palustris</i>	KT907164.1	85	พืชสกุลธูปฤาษี	Gabor Kovacs, 1999
21	<i>Clostridium sp.</i>	KP114232.1	95	ในดิน	Anne Maczulak, 2011
22	<i>Bacillus subtilis</i>	KU550712.1	87	ในดิน	Euzéby JP, 2008

4.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะดินเพื่อนำไปใช้งาน

การรดน้ำทิ้งในคอลัมน์ทดลองทำให้เนื้อดินเปลี่ยนแปลง คอลัมน์ดินเนื้อดินเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ อนุภาคของแข็งในน้ำทิ้งเกาะดินในคอลัมน์ทดลองทั้งอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก การปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถไหลผ่านดินและรากหญ้าเนเปียร์ได้มากขึ้น ชั้นดินกักเก็บได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีปริมาณดินทรายเพิ่มขึ้น เมื่อเนื้อดินมีอนุภาคใหญ่ขึ้นพื้นที่ผิวจะลดลง ความมีประจุของดินเพื่อเหนี่ยวนำอนุภาคมาเกาะติดน้อยลง ปริมาณการดูดซับสิ่งสกปรกในดินจะน้อยลง ดังนั้นคอลัมน์ดินสามารถดูดซับของแข็งในน้ำทิ้งได้มากกว่าคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของคอลัมน์ดิน การรดน้ำทิ้งในคอลัมน์ดินอย่างเดียวและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้า ดินก่อนการทดลองพีเอชเป็นกรด น้ำทิ้งที่เป็นด่างสามารถเติมไฮดรอกไซด์ไอออนในดินได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ดินหลังการทดลองมีค่าเป็นกลาง และปริมาณแบคทีเรียในดินเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียโดยส่วนใหญ่ไม่ชอบสภาพความเป็นกรด

ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นสูง อนุภาคดินดูดซับสารเหล่านี้ได้ดีและมีความเข้มข้นในดินสูงชั้นดินในคอลัมน์ดินอย่างเดียวมีปริมาณสารเหล่านี้มากกว่าดินในคอลัมน์ดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากหญ้าเนเปียร์สามารถใช้สารอาหารเหล่านี้ใช้สำหรับการเจริญเติบโต

การรดน้ำทิ้งลงในคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ ค่าสารประกอบฟีนอลิกในดินสูงขึ้น คอลัมน์ดินอย่างเดียวมีค่าสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ เพราะคอลัมน์ดินมีกลไกการดูดซับเป็นกลไกหลัก ไม่มีแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มี 2 กลไกที่สำคัญ คือการดูดซับด้วยดินและการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์

เมื่อรดน้ำทิ้งในคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ดินหลังการทดลองมีชนิดแบคทีเรียกลุ่มเด่นเพิ่มขึ้น แบคทีเรียบางส่วนที่อยู่ในน้ำทิ้งและตะกอนเจริญเติบโตในดิน ชนิดแบคทีเรียเด่นที่ตรวจพบโดยส่วนใหญ่เป็นชนิดที่ตรวจพบในดิน น้ำ และตะกอน คอลัมน์ดินปลูกหญ้าเนเปียร์หลังการทดลองมีชนิดแบคทีเรียกลุ่มเด่นเพิ่มขึ้น แบคทีเรียบางส่วนที่อยู่ในน้ำทิ้งและตะกอน ตลอดจนเจริญได้ดี ในดิน พืช และบริเวณรากพืช นอกจากนี้แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นเกิดขึ้น ดังนั้นการรดน้ำทิ้งในคอลัมน์ปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้เกิดแบคทีเรียย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่น

4.3 คุณลักษณะหนุ่เนเปียร์

4.3.1 การเจริญเติบโตของหนุ่เนเปียร์

หนุ่เนเปียร์เป็นหนุ่ที่ขยายพันธุ์โดยใช้ท่อนพันธุ์ หนุ่เนเปียร์ที่นำมาปลูกในคอลัมน์ทดลองเป็นหนุ่เนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 นำท่อนพันธุ์หนุ่เนเปียร์ปลูกในกระบะดินเพื่อให้หนุ่เนเปียร์ มีขนาดพอเหมาะสำหรับนำไปปลูกในคอลัมน์ทดลอง

เริ่มปลูกหนุ่เนเปียร์ตั้งแต่วันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2558 ปลูกในกระบะพลาสติก 2 ถัง รดน้ำประปาทุกวันให้อัตราการรด 10 cm/week อัตราการเจริญเติบโตในกระบะเพาะแสดงดังตารางที่ 4-17 และลักษณะหนุ่เนเปียร์ในกระบะเพาะ แสดงดังรูปที่ 4-20

ตารางที่ 4-17 ความสูงของหนุ่เนเปียร์ที่เพาะในกระบะ

สัปดาห์ที่	ความสูงของหนุ่เนเปียร์โดยเฉลี่ย (cm)
1	12±1.3
2	18±2.1
3	24±2.3
4	33±5.4
5	40±6.2



รูปที่ 4-20 หนุ่เนเปียร์ที่เพาะในกระบะพลาสติก (A) สัปดาห์ที่ 1 และ (B) สัปดาห์ที่ 5

หลังจากหนุ่เนเปียร์เจริญเติบโตได้ที่ มีความสูงเหมาะสมและรากที่แข็งแรง ย้ายหนุ่เนเปียร์ปลูกในคอลัมน์ทดลองในวันที่ 6 เมษายน 2558 โดยมีทั้งหมด 4 รูปแบบการปลูก แบ่งเป็นการปลูกแบบมาตรฐานรดน้ำประปาให้อัตราการรด 10 cm/week (SPG) 1 คอลัมน์ และการปลูกโดยการรดน้ำทิ้งให้อัตรา 10 (SG10) 7 (SG7) และ 5 cm/week (SG5) อย่างละ 1 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ทดลองทำการทดลอง 2 ซ้ำ

การปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ทดลองแบบมาตรฐาน สัปดาห์ที่ 1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 20 g สัปดาห์ที่ 3 ใส่ปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 20 g ในคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์แบบมาตรฐาน (SPG) นั้นเป็นการดำเนินการตามมาตรฐานเหมือนกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ของเกษตรกรทั่วไป เพื่อให้การเจริญเติบโตในคอลัมน์การปลูกเป็นแบบมาตรฐานใกล้เคียงกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ของเกษตรกร ลักษณะการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-21 หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในคอลัมน์ทดลองในสัปดาห์ที่ (A) 1 (B) 3 (C) 10 และ (D) สัปดาห์ที่ 16

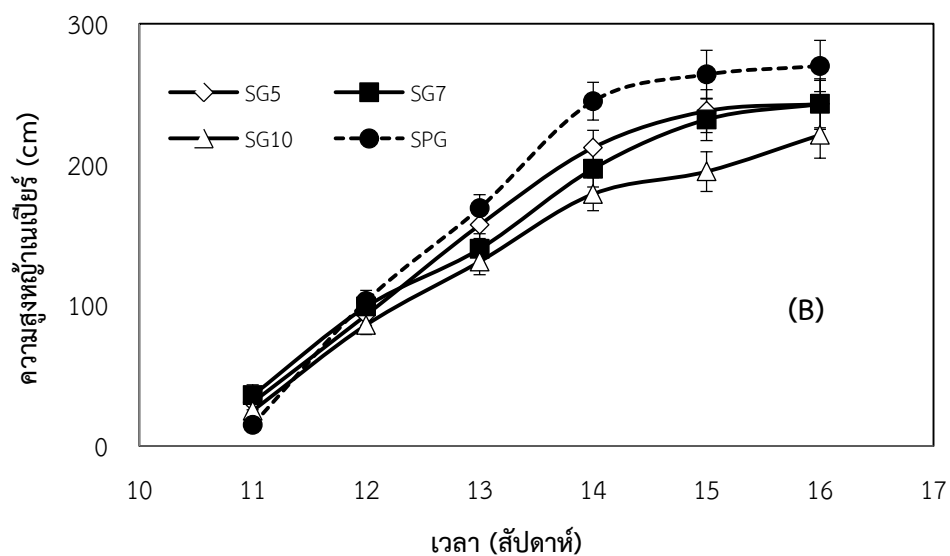
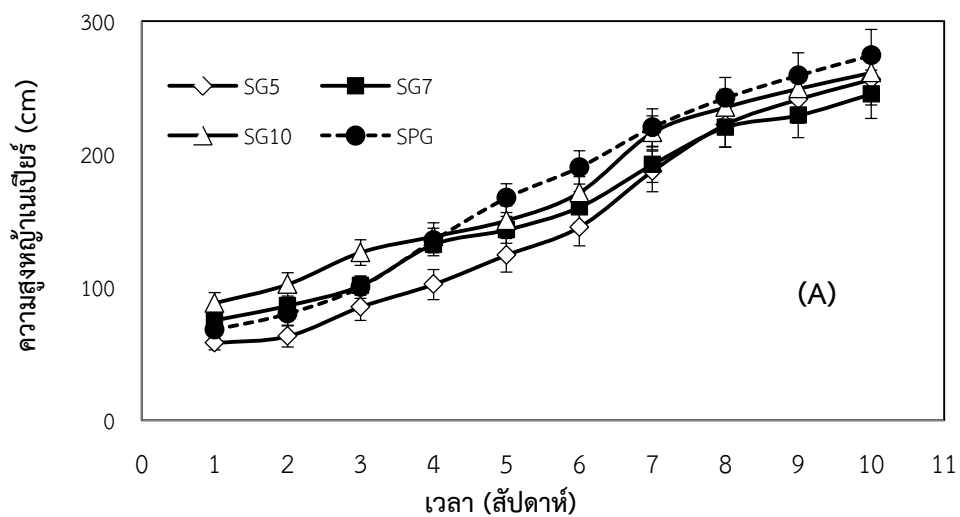
การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์วัดจาก 2 พารามิเตอร์ ดังนี้

1) ความสูง

หญ้าเนเปียร์มีการปลูกทั้งหมด 8 คอลัมน์ สัปดาห์ที่ 1 ของการปลูกในคอลัมน์มีความสูงอยู่ในช่วง 55-77 cm ความสูงของหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สัปดาห์ที่ 10 การปลูกแบบมาตรฐาน (SPG) มีความสูงมากที่สุดที่ 274 cm ความสูงถัดมาคือรดด้วยน้ำทิ้งที่อัตรา 10 (SG10) 5 (SG5) และ 7 cm/week (SG7) มีความสูง 261, 256 และ 245 cm ตามลำดับ (รูปที่ 4-22 (A)) จากรูปพบว่าความสูงของหญ้าเนเปียร์ในช่วงของรอบการตัดที่ 1 ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึง

สัปดาห์ที่ 10 ความสูงของหญ้าเนเปียร์ที่เจริญเติบโตมีแนวโน้มเหมือนกันและมีความสูงแตกต่างกันเล็กน้อย

สัปดาห์สุดท้ายของการทดลองหญ้าที่ปลูกแบบมาตรฐาน (SPG) มีความสูงมากที่สุดที่ 270 cm ถัดมาคือที่รดด้วยอัตรา 7 (SG7) 5 (SG5) และ 10 cm/week (SG10) มีความสูง 243, 243 และ 221 cm ตามลำดับ (รูปที่ 4-22 (B)) ช่วงรอบการตัดครั้งที่ 2 ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 11 ถึงสัปดาห์ที่ 16 หญ้าเนเปียร์สามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เพราะหลังตัดหญ้าเนเปียร์ในรอบที่ 1 หญ้าเนเปียร์มีตอและรากที่แข็งแรงหนาแน่น การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ไม่ต่างจากการตัดในรอบที่ 1 แต่มีความสูงที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากระยะเวลาที่เจริญเติบโตน้อยกว่าการตัดในรอบที่ 1



รูปที่ 4-22 ความสูง (A) หญ้าเนเปียร์ก่อนตัดรอบแรก และ (B) ก่อนตัดรอบที่สอง

2) น้ำหนักหญ้าเนเปียร์

น้ำหนักของหญ้าเนเปียร์วิเคราะห์รอบที่ 1 ที่ระยะเวลาการปลูก 75 วัน ตัดหญ้าเนเปียร์ให้เหลือตอไว้ให้สั้นที่สุด เพื่อให้หญ้าเนเปียร์สามารถเจริญเติบโตได้ดีสำหรับตัดในรอบถัดไปได้ หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในคอลัมน์ SG10 มีน้ำหนักมากที่สุดที่ 11.1 kg/m^2 คอลัมน์ SPG SG7 และ SG5 มีน้ำหนักทรงลงมาที่ 10.4, 9.8 และ 9.6 kg/m^2 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าคอลัมน์ที่มีการรดน้ำทิ้งในอัตราสูงหญ้าเนเปียร์จะมีน้ำหนักมาก คอลัมน์ที่มีการรดน้ำทิ้งในอัตราที่ต่ำหญ้าเนเปียร์จะมีน้ำหนักน้อยด้วย การปลูกหญ้าเนเปียร์แบบมาตรฐานมีน้ำหนักน้อยกว่าการรดน้ำทิ้งที่อัตราการรด 10 cm/week (SG10) เนื่องจากคอลัมน์ที่มีการรดน้ำทิ้งที่อัตราการรด 10 cm/week ซึ่งเท่ากับอัตราการรดน้ำประจำของการปลูกแบบมาตรฐาน หญ้าเนเปียร์ได้รับสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตในน้ำทิ้งมากกว่าสารอาหารจากปุ๋ยในคอลัมน์ที่มีการปลูกแบบมาตรฐาน ส่วนคอลัมน์ SG7 และ SG5 หญ้าเนเปียร์มีน้ำหนักน้อยกว่าคอลัมน์ SG10 เพราะมีอัตราการการรดน้ำทิ้งน้อยกว่าสารอาหารที่มีประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตจึงน้อยกว่าคอลัมน์ SG10

วิเคราะห์น้ำหนักหญ้าเนเปียร์ของการตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 2 ระยะเวลาการปลูก 120 วัน หรือ 45 วันหลังจากตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 1 หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในคอลัมน์ SG10 หญ้าเนเปียร์มีน้ำหนัก 7.6 kg/m^2 คอลัมน์ SG7 SG5 และ SPG มีน้ำหนัก 6.5, 7.2 และ 7.0 kg/m^2 ตามลำดับ น้ำหนักของหญ้าที่รดน้ำทิ้งที่อัตรา 10 cm/week น้ำหนักมากกว่าการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบวิธีมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4-18

การตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 2 น้ำหนักหญ้าเนเปียร์ลดลง เนื่องจากระยะเวลาในเจริญเติบโตของการตัดหญ้า เนเปียร์รอบที่ 2 เพียง 45 วัน ที่ระยะเวลา 45 วัน เหมาะสมสำหรับการตัดหญ้า เนเปียร์มากที่สุด เพราะเป็นเวลาที่หญ้าเนเปียร์ มีโปรตีนสูง มีไฟเบอร์น้อย เหมาะสำหรับการนำไปเป็นอาหารสัตว์และนำไปเป็นส่วนผสมของการผลิตก๊าซชีวภาพที่สุด การปลูกหญ้าเนเปียร์ในรอบที่ 1 ใช้เวลา 75 วัน ทำให้โปรตีนของหญ้าเนเปียร์ลดลงและไฟเบอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการตัดที่เวลา 45 วัน แต่การตัดหญ้าเนเปียร์ครั้งที่ 1 จำเป็นต้องให้ระบบลำต้นโตเต็มที่และระบบรากที่มีความหนาแน่นแข็งแรง ทำให้หญ้าเนเปียร์ที่ตัดในรอบถัดไปเจริญเติบโตได้ดี หญ้าเนเปียร์แสดงในรูปที่ 4-23 (A) และหญ้าเนเปียร์อบแห้ง แสดงในรูปที่ 4-23 (B)

ตารางที่ 4-18 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งหญ้าเนเปียร์

ตัดครั้งที่	น้ำหนักหญ้าเนเปียร์สด				น้ำหนักหญ้าเนเปียร์แห้ง			
	(kg/m^2)				(kg/m^2)			
ที่	SG10	SG7	SG5	SPG	SG10	SG7	SG5	SPG
1	11.1 ± 0.66	9.8 ± 0.72	9.6 ± 0.25	10.4 ± 0.71	3.34	3.07	3.13	3.30
2	7.6 ± 0.26	6.5 ± 0.30	7.2 ± 0.51	7.0 ± 0.43	2.51	2.12	2.35	2.27



รูปที่ 4-23 ลักษณะ (A) หญ้าเนเปียร์สด และ (B) หญ้าเนเปียร์อบแห้ง

4.3.2 คุณภาพของหญ้าเนเปียร์

1) คุณภาพสำหรับการเป็นอาหารสัตว์

การวัดคุณภาพของหญ้าเนเปียร์เพื่อเปรียบเทียบว่ามีคุณภาพเพียงพอสำหรับเป็นอาหารสัตว์หรือไม่ โดยหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกแบบวิธีมาตรฐานและปลูกด้วยการรดด้วยน้ำทิ้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการเป็นอาหารสัตว์ โดยพืชอาหารสัตว์ที่ดีต้องมีโปรตีนมากกว่า 7% ADF (Acid Detergent Fiber) ไม่มากกว่า 30-35% และ NDF (Neutral Detergent Fiber) ไม่มากกว่า 55-60% (Weiss, 1999) โดยรายละเอียดของคุณลักษณะหญ้าเนเปียร์ แสดงดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 คุณลักษณะของหญ้าเนเปียร์

คอลัมน์	คุณลักษณะของหญ้าเนเปียร์							
	ตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 1				ตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 2			
	Protein	Crude Fibber	ADF	NDF	Protein	Crude Fibber	ADF	NDF
SPG	12.5%	30.5%	25.3%	45.2%	9.92%	30.9%	28.2%	46.7%
SG10	15.8%	23.4%	22.4%	41.4%	20.1%	24.7%	24.3%	43.1%
SG7	15.0%	23.0%	22.1%	39.9%	19.3%	23.0%	23.7%	38.1%
SG5	16.0%	25.7%	23.1%	40.4%	18.3%	23.2%	23.5%	39.1%

2) สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์ เป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกแบบวิธีมาตรฐานรดด้วยน้ำประปากับการปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยการรดด้วยน้ำทิ้ง โดยวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในส่วนของ ใบ ลำต้น และรากของหญ้าเนเปียร์ ผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4-20

การตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 1 ผลการทดลองส่วนที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุดคือ ส่วนลำต้น คอลัมน์ SPG มีค่าสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด มีค่าเป็น 18.0 mg GAE/g dry weight คอลัมน์ SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 16.9, 17.1 และ 14.9 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ค่าสารประกอบฟีนอลิกของใบหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SPG มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 17.4 mg GAE/g dry weight คอลัมน์ SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 16.1, 16.6 และ 14.6 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ส่วนรากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยที่สุด คอลัมน์ที่มีค่าสารประกอบฟีนอลิกในรากมากที่สุดคือ คอลัมน์ SPG มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 14.4 mg GAE/g dry weight คอลัมน์ที่มีค่าต่ำลงมาคือ คอลัมน์ SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 13.5, 12.0 และ 11.6 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ

ผลการทดลองของการตัดหญ้าเนเปียร์รอบที่ 2 ส่วนลำต้นมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากที่สุด คอลัมน์ SPG SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 17.1, 17.7, 14.5 และ 15.1 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ค่าสารประกอบฟีนอลิกของใบหญ้าเนเปียร์ คอลัมน์ SPG SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 16.5, 17.5, 14.3 และ 14.9 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ส่วนรากมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยที่สุด คอลัมน์ SPG SG10 SG7 และ SG5 มีค่าสารประกอบฟีนอลิกเป็น 13.5, 14.2, 12.3 และ 11.9 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ

ตารางที่ 4-20 สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์

ตัด ครั้งที่	สารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์ (mg GAE / g dry weight)											
	ใบ				ลำต้น				ราก			
	SG10	SG7	SG5	SPG	SG10	SG7	SG5	SPG	SG10	SG7	SG5	SPG
1	16.1	16.6	14.6	17.4	16.9	17.1	14.9	18.0	13.5	12.0	11.6	14.4
	±0.5	±0.6	±0.2	±0.8	±0.3	±0.5	±0.1	±0.3	±0.2	±0.2	±0.3	±0.5
2	17.5	14.3	14.9	16.5	17.7	14.5	15.1	17.1	14.2	12.3	11.9	13.5
	±0.3	±0.1	±0.4	±0.6	±1.1	±0.3	±0.2	±0.5	±0.6	±0.6	±0.3	±0.3

4.3.3 สรุปปริมาณและคุณภาพหญ้าเนเปียร์

การปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยวิธีการปลูกด้วยการรดน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกแบบวิธีมาตรฐาน พบว่าการปลูกด้วยการรดน้ำทิ้งมีประสิทธิภาพสำหรับการปลูกหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่จริง ปริมาณผลผลิตที่ได้ใกล้เคียงกับการปลูกแบบวิธีมาตรฐาน คุณภาพหญ้าเนเปียร์สูงกว่าการปลูกแบบมาตรฐาน คอลัมน์ที่ดีที่สุดคือ SG10 มีผลผลิตหญ้าเนเปียร์และโปรตีนสูงที่สุด มีไฟเบอร์น้อยกว่าการปลูกแบบมาตรฐาน และการปนเปื้อนของสารประกอบฟีนอลิกในน้ำทิ้งที่รดคอลัมน์ทดลองไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพหญ้าเนเปียร์

4.4 สรุป

สรุปผลการบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์แสดงดังรูปที่ 4-24



คอลัมน์ดิน

1. คอลัมน์ S7 เป็นคอลัมน์ดินที่บำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมที่สุด โดยคอลัมน์ S7 มีประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดี สี และสารประกอบฟีนอลิกเฉลี่ยคิดเป็น 92.9, 95.1 และ 96.0% ตามลำดับ
2. กลไกทางกายภาพและเคมีเป็นกลไกหลักในการบำบัดน้ำทิ้ง ได้แก่ การกรอง การดูดติดผิว การดูดซับโดยดินและการระเหย
3. การซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกที่ 50% ของค่าซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกของน้ำรดคอลัมน์ S7 ใช้เวลาซึมชะละลาย 8.0 และ 7.8 สัปดาห์ ตามลำดับ
4. การรตนน้ำทิ้งในคอลัมน์ดินไม่พบแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้



คอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

1. คอลัมน์ SG7 เป็นคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์บำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมที่สุด โดยคอลัมน์ SG7 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี สี และสารประกอบฟีนอลิกเฉลี่ยคิดเป็น 90.3, 91.2 และ 95.3% ตามลำดับ
2. กลไกทางชีวภาพเป็นกลไกหลักในการบำบัดน้ำทิ้ง ได้แก่ การบำบัดโดยแบคทีเรียในดิน การดูดสารอินทรีย์ในรูปสารอาหารของหญ้าเนเปียร์
3. การซึมชะละลายซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกที่ 50% ของค่าซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกของน้ำรดคอลัมน์ SG7 ใช้เวลาซึมชะละลาย 10.0 และ 9.3 สัปดาห์ตามลำดับ
4. การรตนน้ำทิ้งในคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์พบแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่ย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิกได้ คือ *Rhodococcus sp.*
5. หญ้าเนเปียร์ที่รดด้วยน้ำทิ้งเจริญเติบโตและมีคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับการปลูกแบบมาตรฐาน และไม่พบการปนเปื้อนสารประกอบฟีนอลิกในหญ้าเนเปียร์

รูปที่ 4-24 สรุปผลการบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ดินและคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์

4.5 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์และการประยุกต์ใช้ประโยชน์

4.5.1 การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เป็นการประเมินถึงความคุ้มค่าของการลงทุนสำหรับการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์ เพื่อการสร้างรายได้วิเคราะห์และการลงทุนจากการปลูกหญ้าเนเปียร์โดยหญ้าเนเปียร์สามารถนำไปจำหน่ายเพื่อเป็นอาหารสัตว์และเป็นส่วนประกอบของการผลิตก๊าซชีวภาพ ปัจจุบันมีการรับซื้อหญ้าเนเปียร์ราคาตันละ 300 บาท ส่วนการลงทุนนั้นเป็น ค่าไถ ค่าท่อนพันธ์ ค่าปลูก/เตรียมท่อนพันธ์ ค่าแผ่น HDPE และค่าติดตั้ง และค่าขุดดินและถมดิน นอกจากนี้ได้ทำการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ในการปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อเปรียบเทียบกับปลูกหญ้าเนเปียร์

1) การลงทุนการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 แสดงดังตารางที่ 4-21 การปลูกหญ้าเนเปียร์สำหรับการใช้งานจริงแบ่งเป็นสองประเภทได้แก่ การปลูกหญ้าเนเปียร์โดยการรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยไม่รองพื้นด้วยแผ่น High Density Polyethylene (HDPE) และ การปลูกหญ้าเนเปียร์โดยรดน้ำทิ้งโดยรองพื้นด้วยแผ่น HDPE

การปลูกหญ้าเนเปียร์โดยรดน้ำทิ้งโดยไม่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE เป็นการปลูกหญ้าเนเปียร์ลักษณะเดียวกับการปลูกในแปลงทดลอง เนื่องจากปล่อยให้น้ำไหลผ่านชั้นดินได้อย่างอิสระ วิธีนี้หากรดน้ำทิ้งในอัตราการรดสูงในระยะยาวน้ำที่รดอาจไหลซึมปนเปื้อนน้ำใต้ดินได้ โดยการดำเนินการวิธีนี้มีต้นทุนน้อยกว่าการปลูกหญ้าเนเปียร์ทั่วไปที่ใช้ปุ๋ยผสมรวม

การปลูกหญ้าเนเปียร์โดยรดน้ำทิ้งโดยรองพื้นด้วยแผ่น HDPE สามารถรับน้ำทิ้งวันละครั้งได้ แผ่น HDPE สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ อีกทั้งยังเพิ่มระยะเวลาการบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพได้ดี น้ำที่ไหลออกจากการบำบัดโดยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถนำไปบำบัดต่อเพื่อให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยการรดสวนปาล์มหรือเพิ่มแปลงหญ้าเนเปียร์อีกหนึ่งแปลงเพื่อบำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านมาตรฐานเพื่อเก็บน้ำไปใช้ซ้ำได้ อย่างไรก็ตามการปูพื้นแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยแผ่น HDPE มีการลงทุนค่อนข้างสูง ได้แก่ ค่าแผ่น HDPE ค่าติดตั้ง ค่าขุดดิน และค่าถมดิน ค่าลงทุนในปีเริ่มต้นสำหรับป้องกันไม่ให้น้ำไหลซึมไปยังน้ำใต้ดินประมาณ 300,000 บาท/ไร่

ตารางที่ 4-21 ค่าใช้จ่ายในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (โดยต้นทุนคงที่ไม่รวมค่าที่ดิน)

รายการ	ค่าใช้จ่าย	
	ไม่รองแผ่น HDPE	รองแผ่น HDPE
ต้นทุนคงที่		
1. ค่าไถ (บาท/ไร่)	900	900
2. ค่าท่อนพินช์ (บาท/ไร่)	1,200	1,200
3. ค่าปลูก/เตรียมท่อนพินช์ (บาท/ไร่)	750	750
4. *ค่าแผ่น HDPE 1 มิลลิเมตร (บาท/ไร่)	-	136,000
5. *ค่าติดตั้งแผ่น HDPE (บาท/ไร่)	-	32,000
6. ค่าขุดดิน 1.5 เมตร (บาท/ไร่)	-	108,000
7. ค่าถมดิน (บาท/ไร่)	-	48,000
รวมค่าลงทุนคงที่ (บาท/ไร่)	2,850	326,850
ค่าลงทุนแปรผัน		
1. ค่ากำจัดวัชพืช (บาท/ไร่/ปี)	300	300
2. ค่าเก็บเกี่ยว (บาท/ไร่/ปี)	5,500	5,500
3. ค่าขนส่ง (บาท/ไร่/ปี)	900	900
4. ค่าเสื่อมอุปกรณ์ (บาท/ไร่/ปี)	200	200
รวมค่าลงทุนแปรผัน (บาท/ไร่/ปี)	6,900	6,900

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา, 2554, * บริษัท พี.อี.ไทย เซลส์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด เว็บไซต์ <http://www.hdpethai.com> สืบค้นเมื่อ 5 มิถุนายน 2560

รายได้จากการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบไม่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE และรองพื้นด้วยแผ่น HDPE แสดงดังตารางที่ 4-22 การปลูกหญ้าเนเปียร์ทั้งสองแบบมีวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน การปลูกหญ้าเนเปียร์แบบไม่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE เป็นการปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อผลตอบแทนเป็นหลัก มีกำไรสำหรับการจำหน่ายหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 21,390 บาท/ไร่/ปี เมื่อคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบไม่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE มีระยะเวลาคืนทุนที่ 1.6 เดือน โดยในระยะยาวอาจมีการปนเปื้อนของมลพิษจากการรดน้ำทิ้งได้ จำเป็นต้องไถปรับหน้าดินเมื่อหมดรอบการปลูก ส่วนการรองพื้นด้วยแผ่น HDPE มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน และปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดเป็นหลัก มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงและได้กำไรจากการจำหน่ายหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 21,390 บาท/ไร่/ปี เมื่อคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบรองพื้นด้วยแผ่น HDPE มีระยะเวลาคืนทุนที่ 15.3 ปี

ตารางที่ 4-22 รายได้จากการปลูกหญ้าเนเปียร์

ประเภท	น้ำหนักใบหญ้า เนเปียร์สด (กก./ไร่-ปี)	รายได้ (บาท./ไร่-ปี)	ค่าลงทุน คงที่ (บาท)	ค่าลงทุน แปรผัน (บาท/ไร่/ปี)	กำไรสุทธิ (บาท./ไร่-ปี)
ไม่รองพื้น HDPE	94,300	28,290	2,850	6,900	21,390
รองพื้น HDPE	94,300	28,290	326,850	6,900	21,390

2) การลงทุนปลูกปาล์มน้ำมัน

ต้นทุนของการปลูกปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 4-23 การปลูกปาล์มน้ำมันมีต้นทุนสองส่วน ได้แก่ ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่การปลูกปาล์มน้ำมันคิดเป็น 2,958 บาท/ไร่ และต้นทุนผันแปรการปลูกปาล์มน้ำมันคิดเป็น 5,619 บาท/ไร่/ปี รายได้การปลูกปาล์มน้ำมัน โดยผลผลิตเฉลี่ยย้อนหลัง 5 ปี ของภาคใต้ เป็น 2,597 กก.ปาล์มทะเล/ไร่/ปี ราคาปาล์มทะเลย้อนหลัง 5 ปี 4.38 บาท/กก. คำนวณรายได้คิดเป็น 11,375 บาท/ไร่/ปี เมื่อหักต้นทุนผันแปร 5,619 บาท/ไร่/ปี ได้กำไรสุทธิคิดเป็น 5,756 บาท/ไร่/ปี เมื่อกำหนดระยะเวลาคืนทุนจากการปลูกปาล์มน้ำมันมีระยะเวลาคืนทุนที่ 6.2 เดือนเมื่อปาล์มให้ผลผลิต

ตารางที่ 4-23 ค่าใช้จ่ายการปลูกปาล์มน้ำมัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) (โดยต้นทุนคงที่ไม่รวมค่าที่ดิน)

รายการ	ค่าใช้จ่าย
ต้นทุนคงที่	
- ค่าไถ (บาท/ไร่)	900
- ค่าต้นกล้าปาล์มน้ำมัน (บาท/ไร่)	600
- ค่าปลูก (บาท/ไร่)	300
- ค่าเฉลี่ยต้นทุนก่อนให้ผลผลิต (บาท/ไร่/ปี)	1,158
ต้นทุนคงที่รวม (บาท/ไร่)	2,958
ต้นทุนผันแปร	
- ดูแลรักษา (บาท/ไร่/ปี)	842
- เก็บเกี่ยว (บาท/ไร่/ปี)	1,269
- ค่าปุ๋ย (บาท/ไร่/ปี)	2,957
- ค่ายาป้องกันกำจัดศัตรูพืชและวัชพืช (บาท/ไร่/ปี)	360
- ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงและหล่อลื่น (บาท/ไร่/ปี)	84
- ค่าวัสดุการเกษตรและวัสดุสิ้นเปลือง (บาท/ไร่/ปี)	70
- ค่าเสื่อมอุปกรณ์การเกษตร (บาท/ไร่/ปี)	37
ต้นทุนผันแปรรวม (บาท/ไร่/ปี)	5,619

การปลูกหญ้าเนเปียร์ด้วยการรดน้ำที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบไม่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE สร้างกำไรได้ประมาณ 21,390 บาท/ไร่/ปี มีระยะเวลาคืนทุนที่ 1.6 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับกำไรจากการปลูกปาล์มน้ำมัน 5,657 บาท/ไร่/ปี ที่มีระยะเวลาคืนทุนที่ 2.3 เดือน การปลูกหญ้าเนเปียร์มีกำไรมากกว่าการปลูกปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปลูกหญ้าเนเปียร์โดยการรดน้ำที่แทนการใส่ปุ๋ย การปลูกหญ้าเนเปียร์จึงลดรายจ่ายค่าปุ๋ยได้ ส่วนการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบรองพื้นด้วยแผ่น HDPE มีกำไรคิดเป็น 21,390 บาท/ไร่/ปี อย่างไรก็ตามการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบรองพื้นด้วยแผ่น HDPE มีต้นทุนสูงและมีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างนาน โดยมีระยะเวลาคืนทุนที่ 15.3 ปี

4.5.2 การประยุกต์ใช้ประโยชน์

การประยุกต์ใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) การใช้น้ำที่รดสวนปาล์ม 2) การใช้น้ำที่รดหญ้าเนเปียร์ 3) การใช้น้ำที่รดหญ้าเนเปียร์รองพื้นด้วยแผ่น HDPE ต่อด้วยการรดสวนปาล์ม 4) การใช้น้ำที่รดหญ้าเนเปียร์รองพื้นด้วยแผ่น HDPE ต่อด้วยการรดดิน

1) การใช้น้ำที่รดสวนปาล์ม

การประยุกต์ใช้การบำบัดน้ำทิ้งโดยดินสามารถใช้ในพื้นที่จริงที่มีการรดน้ำทิ้ง โดยปัจจุบันโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดมาใช้รดสวนปาล์มน้ำมัน การรดน้ำทิ้งในสวนปาล์มน้ำมันไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเพิ่มเติม การรดน้ำทิ้งในสวนปาล์มน้ำมันรองรับน้ำทิ้งได้ในอัตราการรดต่ำประมาณ 0.5 – 2.0 cm/week เพื่อลดการสะสมของมลพิษในดินและลดปัญหาดินเค็ม เนื่องจากเมื่อดินสะสมมลพิษสูงจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของปาล์มน้ำมัน พื้นที่ 1 ไร่รองรับน้ำทิ้งได้ประมาณ 1.1 – 4.6 ลบ.ม./ไร่/วัน ขึ้นอยู่กับลักษณะความสกปรกมากของน้ำทิ้ง จากงานวิจัยของอุดมผล พิชนไพบุลย์ และคณะ, (2556) พบว่าการรดน้ำทิ้งในสวนปาล์มน้ำมันที่อัตราการรด 0.5 cm/week ประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดีและทีเคเอ็นเฉลี่ยคิดเป็น 70.6 และ 68.0% ตามลำดับ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีไม่ผ่านมาตรฐาน โดยโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กมีกำลังการผลิต 45 ตันทะลายปาล์มสด/ชม. ดำเนินการผลิตที่ 16 ชั่วโมง คิดเป็นอัตราการผลิตเป็น 720 ตันทะลายปาล์มสด/วัน กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเกิดน้ำเสียประมาณ 64% ของผลทะลายปาล์มสด เมื่อคำนวณกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเกิดน้ำเสีย 460 ลบ.ม./วัน จากการสอบถามโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในบ่อบำบัดสุดท้ายมีปริมาณลดลงจากการซึมลงดินและการระเหยตามธรรมชาติ โดยน้ำทิ้งที่นำไปรดสวนปาล์มมีประมาณ 30% ของน้ำเสียทั้งหมดหรือคิดเป็น 138 ลบ.ม./วัน เมื่อนำไปรดสวนปาล์มที่อัตราการรด 0.5 cm/week ใช้พื้นที่สำหรับการรดน้ำทิ้งทั้งหมดคิดเป็น 121 ไร่ กรณีที่โรงงานมีพื้นที่สวนปาล์มน้ำมันเพียงพอและสามารถรองรับน้ำทิ้งได้ตามอัตราการรดดังกล่าวได้ โรงงานสามารถรดสวนปาล์มเพื่อบำบัดน้ำทิ้งและเปลี่ยนสวนปาล์มอีกแปลงหนึ่งเพื่อที่รดน้ำทิ้งหากตรวจพบว่าดินในสวนปาล์มมีการปนเปื้อนใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมลพิษในดิน หรือมีการปนเปื้อนที่หน้าดินและไม่สามารถรดน้ำทิ้งได้อีกต่อไป ในการ

ปฏิบัติจริงโรงงานอาจจะรดน้ำทิ้งด้วยอัตราที่สูงกว่าที่ใช้คำนวณในงานนี้ส่งผลให้ต้องการพื้นที่ในการบำบัดน้ำทิ้งลดลง

2) การใช้น้ำทิ้งรดหญ้าเนเปียร์

การปลูกหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่ที่มีการรดน้ำทิ้งสามารถบำบัดได้ และลดปริมาณน้ำทิ้งที่ซึมลงไปในชั้นน้ำใต้ดิน สารอาหารในน้ำทิ้งทำให้หญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตได้ดีก่อให้เกิดรายได้สำหรับการขายผลผลิตหญ้าเนเปียร์ หญ้าเนเปียร์สามารถนำไปเป็นอาหารสัตว์หรือการนำไปเป็นส่วนประกอบของการผลิตก๊าซชีวภาพ การรดน้ำทิ้งในการปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนการใส่ปุ๋ยในการปลูกหญ้าเนเปียร์ได้ เนื่องจากเมื่อรดน้ำทิ้งหญ้าเนเปียร์จะได้สารอาหารที่เจริญเติบโตได้ดีเทียบกับการใส่ปุ๋ย การปลูกหญ้าเนเปียร์วิธีนี้จึงลดค่าปุ๋ยได้ จากการทดลองหญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตได้ดีด้วยการรดน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียว อัตราการบำบัดน้ำทิ้งที่ดีที่สุดที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ คืออัตราการรดที่ 7 cm/week (SG7) เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่จริง พื้นที่ 1 ไร่สามารถรองรับน้ำทิ้งได้ 112 ลบ.ม./ สัปดาห์ หรือ 16 ลบ.ม./วัน กรณีที่นำน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กมีกำลังการผลิต 45 ตันทะลายปาล์มสด/ชม. หรือมีน้ำทิ้งประมาณ 138 ลบ.ม./วัน ที่ต้องนำไปรดหญ้าเนเปียร์ หากนำไปรดแปลงที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่อัตราการรด 7 cm/week ใช้พื้นที่สำหรับรดน้ำทิ้งทั้งหมดคิดเป็น 8.63 ไร่

3) การใช้น้ำทิ้งรดหญ้าเนเปียร์รองพื้นด้วยแผ่น HDPE ต่อด้วยการรดสวนปาล์ม

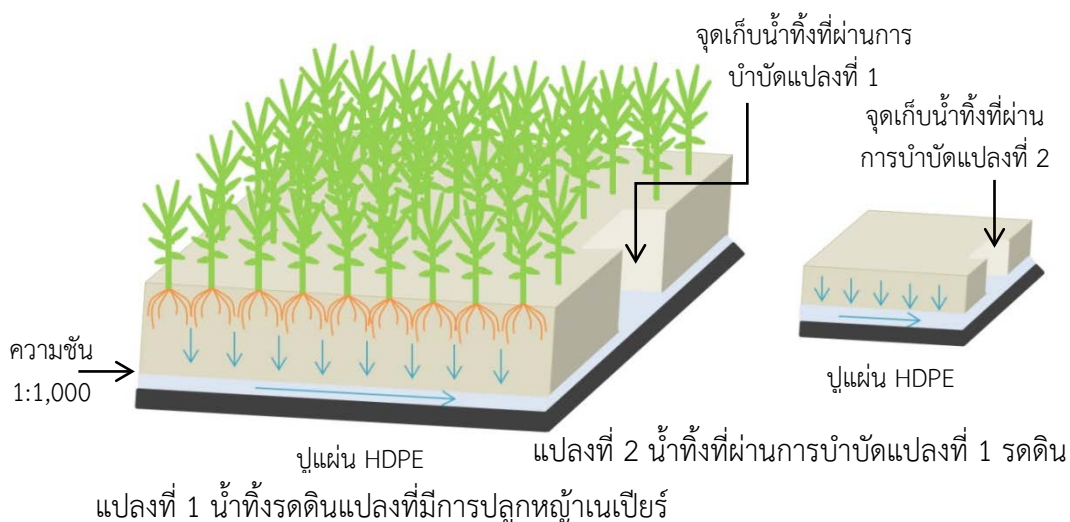
การบำบัดโดยดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ไม่สามารถบำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านมาตรฐานได้ แต่ค่ามลพิษมีค่าต่ำใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยการปลูกหญ้าเนเปียร์รดสวนปาล์มน้ำมันส่งผลให้ลดการสะสมของมลพิษในสวนปาล์มน้ำมัน และสามารถรดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในสวนปาล์มน้ำมันได้ในอัตราการรดที่มากขึ้น ลดพื้นที่การรด ตลอดจนไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำใต้ดิน กรณีที่นำน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กมีกำลังการผลิต 45 ตันทะลายปาล์มสด/ชม. หรือมีน้ำทิ้งประมาณ 138 ลบ.ม./วัน ที่ต้องนำไปรดหญ้าเนเปียร์ หากนำไปรดแปลงที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่รองพื้นด้วยแผ่น HDPE ที่อัตราการรด 7 cm/week ใช้พื้นที่สำหรับรดน้ำทิ้งแปลงที่ 1 คิดเป็น 8.63 ไร่ และนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากการรดแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์แปลงที่ 1 ซึ่งมีน้ำที่ไหลออกจากระบบบำบัดประมาณ 20% ของน้ำทิ้งที่รดแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ ปริมาณน้ำลดลงเนื่องจากหญ้าเนเปียร์ใช้น้ำสำหรับการเจริญเติบโตและการระเหยตามธรรมชาติ น้ำไหลออกจากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 27.6 ลบ.ม./วัน นำน้ำที่ผ่านการบำบัดในแปลงที่ 1 รดสวนปาล์มที่อัตราการรด 0.5 cm/week ใช้พื้นที่สวนปาล์มคิดเป็น 25 ไร่

4) การใช้น้ำทิ้งรดหญ้าเนเปียร์รองพื้นด้วยแผ่น HDPE ต่อด้วยการรดดิน

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์มีค่าสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย หากโรงงานต้องการให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านมาตรฐานและมีความจำเป็นต้องนำน้ำกลับไปใช้

ประโยชน์ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ จำเป็นต้องบำบัดด้วยการรดดินอีกแปลง เพื่อให้ น้ำหลังบำบัดมีค่าผ่านมาตรฐาน การบำบัดจึงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน (รูปที่ 4-24) ขั้นที่ 1 นำน้ำทิ้งรดดินแปลงที่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ โดยมีการปูพื้นด้วยแผ่น HDPE รองด้านล่างเพื่อไม่ให้น้ำทิ้งไหลลงซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน กำหนดให้มีความชันอย่างน้อย 1:1000 เพื่อให้ น้ำทิ้งสามารถไหลรวมไปอยู่ที่จุดเดียวกันได้ โดยมีจุดเก็บน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดอยู่ด้านล่างของแปลงเพื่อนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดไปบำบัดต่อในแปลงที่ 2 ขั้นที่ 2 นำน้ำทิ้งที่ออกจากแปลงที่ 1 มารดแปลงที่ 2 ซึ่งเป็นแปลงที่มีดินอย่างเดียวไม่มีการปลูกหญ้าเนเปียร์ ด้านล่างปูพื้นด้วย HDPE และมีความชันอย่างน้อย 1:1000 แปลงที่ 2 บำบัดน้ำทิ้งให้ผ่านมาตรฐาน น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากแปลงที่ 2 สามารถนำไปใช้ซ้ำโดยผ่านกระบวนการผลิตน้ำประปา ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต หรือทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหากน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) กรณีที่นำน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มขนาดเล็กมีกำลังการผลิต 45 ตัน ทะลายปาล์มสด/ชม. หรือมีน้ำทิ้งประมาณ 138 ลบ.ม./วัน นำไปรดแปลงที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่อัตราการรด 7 cm/week ใช้พื้นที่สำหรับรดน้ำทิ้งทั้งหมดคิดเป็น 8.63 ไร่

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใช้งานแปลงที่ 2 จะใช้พื้นที่น้อยกว่าแปลงที่ 1 เนื่องจากน้ำที่ออกจากแปลงที่ 1 มีปริมาณประมาณ 20% ของปริมาณน้ำทิ้งที่รด โดยน้ำไหลออกจากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 27.6 ลบ.ม./วัน นำน้ำที่ผ่านการบำบัดในแปลงที่ 1 รดดินที่อัตราการรด 7 cm/week ใช้ที่ดินคิดเป็น 1.72 ไร่ ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยดินแบบ 2 ขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 4-25



รูปที่ 4-25 การบำบัดด้วยดินแบบ 2 ขั้นตอน

ตารางที่ 4-24 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยดินแบบ 2 ชั้นตอน และค่าลักษณะน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งเข้า ระบบ เฉลี่ย	ประสิทธิภาพ การบำบัด แปลงที่ 1 (%)	ประสิทธิภาพ การบำบัด แปลงที่ 2 (%)	ประสิทธิภาพน้อย ที่สุดแปลงที่ 2 ที่น้ำ ทิ้งผ่านมาตรฐาน (%)	ความ เข้มข้น น้ำออก
สี (PtCo)	1,656	90.2	89.6	-	16.9
ซีโอดี (mg/L)	1,443	88.6	83.6	27.1	27.0
ทีโอซี (mg/L)	327	50.6	85.4	-	23.6
ทีเคเอ็น (mg/L)	451	94.8	80.8	0.0	4.5
สารประกอบ ฟีนอลิก (mg GAE/L)	134	95.3	86.4	84.1	0.86

การประยุกต์ใช้ประโยชน์การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้ง 4 ประเภท มีความแตกต่างกัน โดยวัตถุประสงค์ของแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำหลังการบำบัดว่าโรงงาน ต้องการคุณภาพน้ำในระดับใด รวมทั้งความพร้อมของพื้นที่สวนปาล์มน้ำมัน พื้นที่ว่างที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และงบบประมาณสำหรับการดำเนินการ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งบ่อสุดท้ายโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยการบำบัดโดยดิน และการบำบัดโดยดินร่วมกับการปลูกหญ้าเนเปียร์ มีกลไกการบำบัดน้ำทิ้งโดยดินที่สำคัญ 3 กลไก คือ กลไกทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง การกรอง การดูดติดผิวและการระเหย กลไกทางเคมี ได้แก่ การฟอร์มตัวของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ การดูดซับสารอาหาร การย่อยสลาย และการเปลี่ยนแปลงของสารที่ไม่เสถียร กลไกทางชีวภาพ ได้แก่ การบำบัดสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ละลายน้ำ การสลายตัวตามธรรมชาติส่งผลให้คุณภาพของดินหลังการทดลองมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

2. การบำบัดน้ำทิ้งโดยคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์เมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์ที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยของ ค่าซีโอติ และสารประกอบฟีนอลิกของคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ต่ำกว่าคอลัมน์ที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 2.64 ± 2.30 และ $0.66 \pm 0.10\%$ ตามลำดับ เนื่องจากคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์มีรากหญ้าเนเปียร์เจริญอยู่เต็มพื้นที่คอลัมน์ส่งผลให้ขนาดรูพรุนในเนื้อดินเพิ่มขึ้น น้ำไหลผ่านคอลัมน์ได้เร็วขึ้น กลไกการกรอง การดูดติดผิว และการดูดซับสิ่งปนเปื้อนโดยดินเกิดได้น้อยลง อย่างไรก็ตามการปลูกหญ้าเนเปียร์สามารถเพิ่มกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี โดยเมื่อคิดจากสมมูลมวลคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ลดค่าซีโอติและสารประกอบฟีนอลิกได้ดีกว่าคอลัมน์ที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์คิดเป็น 9.8 ± 2.32 และ $23.5 \pm 8.07\%$ ตามลำดับ การย่อยสลายซีโอติและสารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่เกิดจากแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในบริเวณรากของหญ้าเนเปียร์ นอกจากนี้การปลูกหญ้าเนเปียร์ส่งผลให้ลดการสะสมซีโอติและสารประกอบฟีนอลิกในดินได้ก็ว่าการไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คิดเป็น 27.7 ± 5.49 และ $40.4 \pm 3.23\%$ ตามลำดับ

3. อัตราการน้ำทิ้งในคอลัมน์ดินที่ไม่ปลูกหญ้าเนเปียร์ที่เหมาะสม คืออัตราการรด 7 cm/week (คอลัมน์ S7) ส่วนคอลัมน์ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ หญ้าเนเปียร์สามารถนำธาตุตั้งกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี มีสารอาหารผ่านมาตรฐานหญ้าสำหรับเลี้ยงสัตว์ สำหรับอัตราการรดที่เหมาะสมของคอลัมน์ดินที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ คือ รดน้ำทิ้งที่อัตราการรด 7 cm/week (คอลัมน์ SG7) เป็นอัตราการรดที่เหมาะสมทั้งในด้านคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด และการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ เพื่อเป็นการจัดการน้ำทิ้งอย่างคุ้มค่า ใช้น้ำทิ้งให้ก่อประโยชน์สูงสุด อีกทั้งยังสามารถสร้างรายได้ และเพื่อให้ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยดินมีคุณภาพผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

4. หญ้าเนเปียร์ที่ปลูกด้วยการรดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับการปลูกหญ้าเนเปียร์แบบมาตรฐานที่เกษตรกรทั่วไปปลูกและไม่มีกรปนเปื้อนมลพิษจากน้ำทิ้งที่รดหญ้าเนเปียร์

5. โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบสามารถนำรูปแบบการบำบัดทั้ง 4 ประเภท และอัตราการรดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จริงในพื้นที่สวนปาล์มน้ำมันของโรงงานหรือพื้นที่ที่ปลูกหญ้าเนเปียร์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิจัยนี้ศึกษา การลดสารอินทรีย์ สี และสารประกอบฟีนอลิก โดยปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ดียิ่งขึ้น ผู้สนใจศึกษาอาจประยุกต์ด้วยการเติมจุลินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดดังกล่าว

2. การขังน้ำในคอลัมน์สามารถเพิ่มระยะเวลาการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นศึกษารูปแบบการขังน้ำในการบำบัดโดยติดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

3. การรดน้ำทิ้งตลอดเวลาแบบต่อเนื่องหรือเว้นระยะเวลาการให้น้ำแทนการรดน้ำครั้งเดียวในปริมาณมาก แม้รดด้วยอัตราการให้น้ำที่เท่ากันจะสามารถลดการไหลซึมผ่านชั้นดินได้ โดยการดูตุน้ำไปใช้ของหญ้าเนเปียร์และการคายระเหย (evapotranspiration) งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับรูปแบบการรดน้ำทิ้ง

4. การอธิบายพฤติกรรมการไหลของน้ำและลักษณะการชะสารอินทรีย์ที่ไหลผ่านคอลัมน์สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ โดยทางผู้วิจัยได้ใช้ค่าซีโอดีและสารประกอบฟีนอลิกเพื่อศึกษาการซึมชะละลายและลักษณะการไหลในคอลัมน์ โดยใช้การไหลแบบ Equilibrium Transport Model (ADR) โดยใช้โปรแกรม Hydrus-1D ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองลักษณะการไหลภายในคอลัมน์ โดยเลือกลักษณะการไหลเป็น Water flow in a field soil profile under grass จากการดำเนินการพบว่ามีข้อจำกัดในด้านข้อมูลดิบจากการทดลองที่ไม่เพียงพอสำหรับใช้โปรแกรม โดยข้อมูลที่จำเป็นข้อจำกัด ได้แก่ ค่า water flow-iterations criteria, solute transport – transport parameter, solute transport – reaction parameter และ root water – water stress reduction เป็นต้น กรณีที่ใช้ข้อมูลหตุยภูมิค่าที่ได้ อาจไม่มีความใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองและต้องใช้เวลาในการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาเรื่องลักษณะการไหลและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับโปรแกรม Hydrus-1D อย่างครบถ้วนเพื่อออกแบบการทดลอง และนำโปรแกรมดังกล่าวมาใช้ใช้แสดงผลประกอบกับผลการทดลองที่เก็บได้จริงจากห้องปฏิบัติการ

5. การวิเคราะห์ลักษณะดินควรวิเคราะห์มากกว่า 2 ครั้ง เนื่องจากสามารถคาดการณ์อัตราการสะสมสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินได้ การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยวัดลักษณะดิน 2 ครั้ง เป็นข้อกำหนดของการทดลอง เนื่องจากการทดลองต้องดำเนินการตลอดเวลา การเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ระหว่างทดลองส่งผลให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ จึงได้เก็บตัวอย่างเพียง 2 ครั้ง คือ ก่อนการทดลองและหลังการทดลอง ส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณระยะเวลาสะสมของมลพิษที่ทำให้เกิดมาตรฐานได้และไม่สามารถประเมินระยะเวลารอบการปลูกหญ้าเนเปียร์ที่สั้นลงได้

6. การปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ความสูงชั้นดิน 50 cm ส่งผลให้ให้รากหญ้าเนเปียร์มีความหนาแน่นมากเกินไปจนสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของดินได้ อีกทั้งด้านข้างของคอลัมน์ทดลองเป็นพลาสติก อาจก่อให้เกิดการไหลลัดวงจรได้ ในการทดลองในอนาคตควรปลูกหญ้าเนเปียร์ในคอลัมน์ขนาดใหญ่หรือพื้นที่จริง

บรรณานุกรม

- กัณฑ์ศรี ศรีพงศ์พันธุ์. 2547. มลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์. นครปฐม.
- กาญจณี ชูทอง. 2556. กลไกการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กุสุมาลย์ ล่องแก้ว จิตติ มังคละสิริ อรมาศ สุทธิณัฐ และ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ การตรวจวัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีระบบบำบัดน้ำเสียแบบมีและไม่มีระบบรวบรวมน้ำชีวภาพ เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 12, 27-29 มีนาคม 2556, โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชาออร์คิด ขอนแก่น
- กุสุมาลย์ ล่องแก้ว. 2557. การลดสารประกอบฟีนอลิคด้วยระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบและการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กรมควบคุมมลพิษ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.pcd.go.th/index.cfm> (วันที่ค้นข้อมูล : 19 พฤศจิกายน 2559).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://webkc.dede.go.th/webmax/content> (วันที่ค้นข้อมูล: 19 พฤศจิกายน 2559).
- จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐาน และการประยุกต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ดาริกา วสุนธรากุล และสุดสาคร พุกงาม. 2548. การใช้พืชน้ำในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ. บทความวิชาการ. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ธนารักษ์ พงษ์ภคตรา. 2543. ข้อมูลเทคโนโลยีสำหรับการจัดการของเสียโรงงานปาล์มน้ำมัน. เอกสารประกอบการบรรยายสำหรับการฝึกอบรมเรื่อง เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดและการป้องกันมลพิษของโรงงานอุตสาหกรรม. วันที่ 10-12 พฤษภาคม 2543 ณ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตสุราษฎร์ธานี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานเสื่อกกโดยใช้ซีโอไซด์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พนิดา โต๊ะสุ. 2555. การย่อยสลายฟีนอลโดยเชื้อผสม *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1 ที่ตรึงบนวัสดุเศษเหลือปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พลิชฐ์ จารุจารีต. 2559. การบำบัดสารประกอบฟีนอลิกและสีของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยดินที่ปลูกหญ้าซิกแนลเกี่ยวข้องกับการเติมเชื้อ *Methylobacterium* sp. NP3 และ *Acinetobacter* sp. PK1. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัชร สนั่นพัฒน์พงศ์. 2555. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำยางข้นโดยใช้การบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพและอรรุญ หันพงศ์กิตติกุล. 2554. การประยุกต์ใช้เอนไซม์ทางการค้าและจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้ในการเก็บเกี่ยวน้ำมันจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://nutrition.dld.go.th/Nutrition_Knowledge/nutrition_1.htm (วันที่ค้นข้อมูล: 19 พฤศจิกายน 2559).
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.oae.go.th/production.html> (วันที่ค้นข้อมูล: 12 ธันวาคม 2559).
- สันหัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
- อดุง ศิลป์ประเสริฐ, สุรีย์ บุญญานพวงศ์, วิไลลักษณ์ กิจจนะพานิช, รัชมี แก้ววิชิต, เสนีย์ กาญจนวงค์, ขจรศักดิ์ โสภางจารย์, ทรงเชาว์ อินสมพันธ์, ทิพวรรณ ประภามณฑล. 2545. โครงการการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน มาใช้เพื่อการเกษตรกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

อุดมผล พิษณุไพบูลย์, พรทิพย์ ศรีแดง, พนาลี ชีวภิตาการ, เจิดจรรย์ ศิริวงศ์ และสมทิพย์ ด่านธีรวณิช. 2556. Land treatment โดยการใช้น้ำทิ้งหลังการบำบัดเบื้องต้นจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบในสวนปาล์มน้ำมัน. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ฉลา พิทักษ์สินสุข จริยา บุญจรัสชะ และจิรพัฒน์ วงพิพัฒน์. 2553. การรวบรวมและจัดทำข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนะของพืชอาหารสัตว์. รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2553 กองอาหารสัตว์กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

เพ็ญภา ทองประไพ. 2555. ลักษณะดินและน้ำท่าจากการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานน้ำยางชั้นด้วยการบำบัดโดยดินในสวนปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เกสัชรัตน์ กชกรจารุพงศ์. 2550. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งด้วยการบำบัดโดยดิน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Africa, Charlene., Nel, Janske., Stemmet, Megan. 2014. "Anaerobes and Bacterial Vaginosis in Pregnancy: Virulence Factors Contributing to Vaginal Colonisation". International Journal of Environmental Research and Public Health. 11 (7): 6979–7000.

Aksu, Z. 2005. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. Process Biochem. 40, 997-1026.

Alam, N., Shim, M.J., Lee, M.W., Shin, P.G., Yoo, Y.B., Lee, T.S., 2009. Phylogenetic relationship in different commercial strains of *Pleurotus nebrodensis* based on ITS sequence and RAPD. Mycobiology. 37: 183-188.

Albert, K., Zlatka, A., Husein, Y. 2013. Microbial degradation of phenol and phenolic derivatives. Life and Earth Sciences. 13:76-87.

Aleksieva, Z., Ivanova, D., Godjevargova, T., Atanasov, B. 2002. Degradation of some phenol derivatives by *Trichosporon cutaneum* R 57. Proc. Biochem. 37. 1215-1219.

- Alexeeva, I., Elliott, E. J., Rollins, S., Gasparich, G. E., Lazar, J., Rohwer, R. G. 2006. Absence of Spiroplasma or Other Bacterial 16S rRNA Genes in Brain Tissue of Hamsters with Scrapie. *Journal of Clinical Microbiology* 44(1): 91-97.
- Andreia, A.M.G., Tiago, S.A., Renata, K.C.C., Ramires, M.S.A., Rodrigo, M. 2013. Study of “napier grass” delignification for production of cellulosic derivatives. *Carbohydrate Polymers* 92: 849 – 855.
- Anne, M. 2011. "Clostridium". *Encyclopedia of Microbiology. Facts on File.* pp. 168–173.
- Anokhina, T.O., Kochetkov, V.V., Zelenkova, N.F., Balakshina, V.V., Boronin, A.M. 2004. Biodegradation of phenanthrene by Pseudomonas bacteria bearing rhizospheric plasmids in model plant-microbial associations. *Appl. Biochem. Microbiol.* 40:568–572.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th edition. American Public Health Association. Washington DC. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 1995, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 16th ed., AOAC International, Arlington, Virginia, USA
- Bai, X., Larschan, E., Kwon, S.Y., Badenhorst, P., Kuroda, M.I. 2007. Regional control of chromatin organization by noncoding roX RNAs and the NURF remodeling complex in *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 176(3): 1491-1499.
- Barker, D.F., Kuhn, J., Campbell, A. 1981. Sequence and properties of operator mutations in the bio operon of *Escherichia coli*. *Gene*. 13:89-102
- Bodini S.F., A.R. Cicalini, F., Santori. 2010. Rhizosphere dynamics during phytoremediation of olive mill wastewater. *Bioresource Technology*. 102: 4383-4389.
- Brown, V. M., Jordan D. H. M., Tiller B A., 1967. The effect of temperature on the acute toxicity of phenol to rainbow trout in hard water. *Water Research*. 1:: 587–597.

- Bunrung, S., Prasertsan, S., Prasertsan, P. 2011. Decolourisation of Biogas Effluent of Palm Oil Mill using Palm Ash. TICHE Tnternational Conference 2011, November 10-11, Songkhla, Thailand.
- Byung-Yong, Kim., Hang-Yeon, Weon., Seung-Hee, Yoo., Wen-Ming, Chen., Soon-Wo, Kwon., Seung-Joo, Go., Erko, Stackebrandt. 2006. *Chitinomonas koreensis* sp. nov., isolated from greenhouse soil in Korea. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 56, 1761–1764.
- Chouychai, W., Tongkukiatkul, A., Upatham, S., Lee, H., Pokethitiyook, P. and Kruatrachue, M. 2009. Plant-enhanced phenanthrene and pyrene biodegradation in acidic soil. *Journal of Environmental Biology* 30: 139–144.
- Cunningham, S.D., W.R. Berti and J.W. Huang. 1995. Phytoremediation of Contaminated Soils. *Tibtech*. 15:393–397.
- Dastager, S. G., Raziuddin, Q. S., Deepa, C. K., Li, W. J. & Pandey, A. 2010. *Pontibacter niistensis* sp. nov., isolated from forest soil. *Int J Syst Evol Microbiol*. 60, 2867–2870.
- Diez, M.C., Mora, M.L., Videla, S. 1999. Adsorption of phenol and color from BKME using synthetic allophanic compounds. *Water Res.* 33(1), 125-130.
- Ergul, F.E., Sagin, s., Ongen, G., 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.
- Euzéby, J.P. 2008. "Bacillus". List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature. Archived from the original on 14 December 2008. Retrieved 2008-11-18.
- Gaskin, E.S., Bentham, H.R. 2010. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. *Science of the Total Environment*. 408: 3683-3688.

- Gerhardt, E.K., Huang, X-D., Glick, R.B., Greenberg, M.B. 2010. Phytoremediation and Rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant science*. 176:20-30.
- Gramss G, Kirsche, B., Voigt, K.D., Gunther, T., Fritsche, W., 1999. Conversion rates of five polycyclic aromatic hydrocarbons in liquid culture of fifty-eight fungi and the concomitant production of oxidative enzymes. *Mycol Res* 103:1009-1018.
- Groth, I., Schumann, P., Weiss, N., Martin, K. & Rainey, F. A. 1996. *Agrococcus jenensis* gen. nov., sp. nov., a new genus of actinomycetes with diaminobutyric acid in the cell wall. *Int J Syst Bacteriol* 46, 234239.
- Hauben, L., Vauterin, L., Moore, E., Hoste, B., Swings, J. 1999. "Genomic diversity of the genus *Stenotrophomonas*". *Int J Syst Bacteriol*. 49 (4): 1749–60.
- Hao, J., Lin, R., Zheng, Z., Liu, H., Liu, D. 2008. Isolation and characterization of microorganisms able to produce 1,3-propanediol under aerobic conditions. *World J Microbiol Biotechnol*. 9:1731–1740
- Huang, D., Ou, B., Prior, R.L. 2005. The chemistry behind antioxidant capacity assays. *J. Agric. Chem*. 53: 1841-1856.
- IUPAC. 1985. Nomenclature for regular single-strand and quasi-single strand Inorganic and coordination polymers. *Pure Appl. Chem*. 57:149-168.
- Joan L, Slonczewski., John W, Foster. 2011. *Microbiology: An Evolving Science* (2nd Edition). Norton
- Jung, Y.D., Kim, M.S., Shin, B.A., Chay, K.O., Ahn, B.W., Liu, W., Bucana, C.D., Gallick, G.E., Ellis, L.M. EGCG. 2001. a major component of green tea, inhibits tumour growth by inhibiting VEGF induction in human colon carcinoma cells. *Br J Cancer*. 84: 844–850.
- Kaewmai, R., H-Kittikun, A., Musikavong, C. 2012. Greenhouse Gas Emissions of Palm Oil Mills in Thailand. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 11, 141-151.

- Kaewmai, R., H-Kittikun, A., Suksaroj, C., Musikavong, C. 2013 Alternative Technologies for the Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Palm Oil Mills in Thailand. *Environmental Science & Technology*, 47 (21), pp 12417–12425
- Katia, R., A. d. Silva, J. F. Salles , L. Seldin, J. D. van Elsas. 2003. Application of a novel *Paenibacillus*-specific PCR-DGGE method and sequence analysis to assess the diversity of *Paenibacillus* spp. in the maize rhizosphere. *Microbiological Methods*. 54: 213– 231.
- Khan, S., M. Afzal , S. Iqbal, Q.M. Khan. 2013. Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere* 90:1317-1332.
- Khongkhaem, P., Intasiri, A., Luepromchai, E. 2011. Silica-immobilized *Methylobacterium* sp. NP3 and *Acinetobacter* sp. PK1 degrade high concentrations of phenol. *Lett. Appl. Microbiol.* 52: 448-455.
- Khongkhaem, P., Suttinun, O., Intasiri, A., Pinyakong, O., Luepromchai, E., 2016. Degradation of phenolic compounds in palm oil mill effluent by silica-immobilized bacteria in internal loop airlift bioreactors. *CLEAN-Soil Air Water* 44, 389-392.
- Kietkwanboot, A., Tran, H.T.M., Suttinun, O., 2015. Simultaneous dephenolization and decolorization of treated palm oil mill effluent by oil palm fiber-immobilized *Trametes Hirsuta* strain AK 04. *Water Air Soil Pollut.* 226 (345)
- Kim, S.-J., Kweon, O., Jones, R., Edmondson, R., Cerniglia, C., 2008. Genomic analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in *Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1. *Biodegradation* 19:859–881.
- Klomjek, P. 2016. Swine wastewater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland planted with Napier grass. *Sustainable Environment Research*. 26: 217-223.
- Komárek, J., Komárková, J. 2004. Taxonomic review of the cyanoprokaryotic genera *Planktothrix* and *Planktothricoides*. *Czech Phycology* 4:1–18.

- Kovacs, G., Burghardt, J., Pradella, S., Schumann, P., Stackebrandt, E., Mhrialigeti, K. 1999. *Kocuria palustris* sp. nov, and *Kocuria rhizophila* sp. nov., isolated from the rhizoplane of the narrow-leaved cattail (*Typha angustifolia*). *International Journal of Systematic Bacteriology*, 49, 167-173.
- Kumar, P., S. Ranganath, K. Sengupta, and H. Weimin. 2006. Cooperative multitarget tracking with efficient split and merge handling. *Circuits and Systems for Video Technology*, IEEE Transactions on 12:1477–1490.
- Long, Jin., Hyung-Gwan, Lee., So-Ra, Ko., Chi-Yong, Ahn., Hee-Mock, Oh. 2015. *Jatrophihabitans fulvus* sp. nov., an actinobacterium isolated from grass soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 65, 3476–3480.
- Marco, E. D., Savarese, M., Paduano, A., Sacchi, R. 2007. Characterization and fractionation of phenolic compounds extracted from olive oil mill wastewater. *Food Chemistry* 104: 858-867.
- McCutcheon, S., Schnoor, C., J. Eds. L. 2003. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*, Wiley, New York.
- McLeod, MP., Eltis, L.D. 2008. Genomic insights into the aerobic pathways for degradation of organic pollutants. *Microbial Biodegradation*. ISBN: 978-1-904455-17-2 (Díaz E, ed), pp. 1–23. Caister Academic Press, Norfolk, UK.
- Mekki, A., Dhoub, A., Sayadi, S. 2007. Polyphenols dynamics and phytotoxicity in a Soil amended by olive mill wastewaters. *Journal of Environmental Management* 84:134–140.
- Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C. 2005. *Environmental Pollution*. 138: 86-91.
- Meyer, J.S., Marcus, M.D., Bergman, H.L. 1984. Inhibitory Interactions of aromatic organics during microbial degradation. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 3(4): 583–587.

- Mosse, K.P.M., Patti, A.F., Christen, E.W., and Cavagnaro, R. 2011. Review: winery wastewater quality and treatment options in Australia. *Australian Society of Viticulture and Oenology*. 17:111-122.
- Nogales, J., Canales, A., Jiménez-Barbero, J., Serra, B., Pingarrón, J.M., García, J.L., Díaz E. 2011. Unravelling the gallic acid degradation pathway in bacteria: the gal cluster from *Pseudomonas putida*. *Mol Microbiol*.79(2): 359-74.
- Norazah, M.N., Sitim, A.A., Mohd, Y.S., Abdul, L.I. 2015. Statistical optimisation for improvement of phenol degradation by *Rhodococcus* sp. NAM 81. *Journal of Environmental Biology* 37(3): 443-451.
- Pacwa-Plociniczak, P.G.A., Piotrowska-Seget, Z., Cameotra, S.S. 2011. Environmental applications of biosurfactants: recent advances. *Int J Mol Sci*. 12: 633-654.
- Pan, G., Kurumada, K.I. 2008. Hybrid gel reinforced with coating layer for removal of phenol from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*. 138(1): 194-9.
- Pantip, K. 2016. Swine wastewater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland planted with Napier grass. *Sustainable Environment Research*. 26: 217-223.
- Parales, R.E., and Harwood, C.S. 2002. Bacterial chemotaxis to pollutants and plant-derived aromatic molecules. *Corr Opin Microbiol*. 5:266-273.
- Pescod, M.B.. "Wastewater Treatment and Use in Agriculture-FAO Irrigation and Drainage Paper." *Wastewater Characteristics and Effluent Quality Parameters*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Phenrat, T., Otwong, A., Chantharit, A., Lowry, G. V. (2016) Ten-Year Monitored Natural Recovery of Lead-Contaminated Mine Tailing in Klity Creek, Kanchanaburi Province, Thailand. *Environmental Health Perspectives*.
- Proestos, C.,M. Komaitis. 2008. Application of microwave-assisted extraction to the fast extraction of plant phenolic compounds. *LWT* 41 : 652-659.

- Quideau, S., Deffieux, D., Douat-Casassus, C. 2011. Plant polyphenols-Chemical properties. Biological activities and synthesis. *Angew. Chem.* 50: 586-621.
- Rakamthong, C., 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.
- Richeert, K., Brambilla, E., Stackebrandt, E. 2007. The phylogenetic significance of peptidoglycan types: molecular analysis of the genera *Microbacterium* and *Aureobacterium* based upon sequence comparison of *gyrB*, *rpoB*, *recA* and *ppk* and 16S rRNA genes. *Syst. Appl. Microbiol.* 30, 102-108.
- Sandrin, T.R., Maier, R.M. 2003. Impact of metals on the biodegradation of organic pollutants. *Environmental Health Perspectives.* 111(8): 1093-1101.
- Sassera, D., Beninati, T., Bandi, C., Bouman, E. A. P., Sacchi, L., Fabbi, M. & Lo, N. 2006. "Candidatus *Mitochondria mitochondrii*". an endosymbiont of the tick *Ixodes ricinus* with a unique intramitochondrial lifestyle. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.* 56, 2535–2540
- Sayadi S., Allouch N., Jaoua M., Aloui F. 2000. Detrimental effects of high molecular-mass polyphenols on olive mill wastewaters biotreatments, *Process Biochem.* 35: 725–735.
- Siciliano, S. D., Germida, J. J. 1998a. Degradation of chlorinated benzoic acid mixtures by plantbacteria associations. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 17(4): 728-733.
- Siciliano, S. D. and Germida, J. J. 1998b. Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environmental Review.* 6: 65-79.

- Siciliano, G., Tessa, A., Petrini, S., Mancuso, M., Bruno, C., Grieco, G.S., Malandrini, A., Murri, L. 2003. Autosomal dominant external ophthalmoplegia and bipolar affective disorder associated with a mutation in the ANT1 gene. *Neuromuscular Disorders*, 13(2): 162-165.
- Singer, S. J., Gaba, D. M., Geppert, J. J., Sinaiko, A. D., Howard, S. K., & Park, K. C. 2003. The culture of safety in California hospitals. *Quality and Safety in Health Care*, 12(2): 112-118.
- Somtrakoon, K., Suanjit, S., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Cassidy, M.B., Trevors, J. T., Lee, H. and Upatham, S. 2009. Comparing phenanthrene degradation by alginate-encapsulated and free *Pseudomonas* sp. UG14Lr cells in heavy metal contaminated soils. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 84: 1660–1668.
- Syed, G., Dastager, C.K., Deepa, A.P. 2011. Plant growth promoting potential of *Pantoea niistensis* in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) *Applied Soil Ecology*. 49, 250-255.
- Thongnuekhang, V., Puetpaiboon, U. 2004. Nitrogen removal from concentrated latex wastewater by land treatment. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 26(4). 521-528.
- Timmusk, S., Grantcharova, N., Wagner, E.G. 2005. *Paenibacillus polymyxa* invades plant roots and forms biofilms. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 7292–7300.
- Tosu, P., Luepromchai, E., Suttinun, O., 2015. Activation and immobilization of phenol-degrading bacteria on oil palm residues for enhancing phenols degradation in treated palm oil mill effluent. *Environ. Eng. Res.* 20, 141-148.
- Urabe, H., Toyama, K., Ogawara, H. 1990. "Cloning from *Streptomyces cellulosa* of the gene encoding beta-lactamase. a blue-dextran binding protein." *The Journal of antibiotics*. 43 (11): 1483–1488.
- U.S.EPA. 1981. Process Design manual for Land Treatment of municipal Wastewater. EPA 625/1-81-013. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

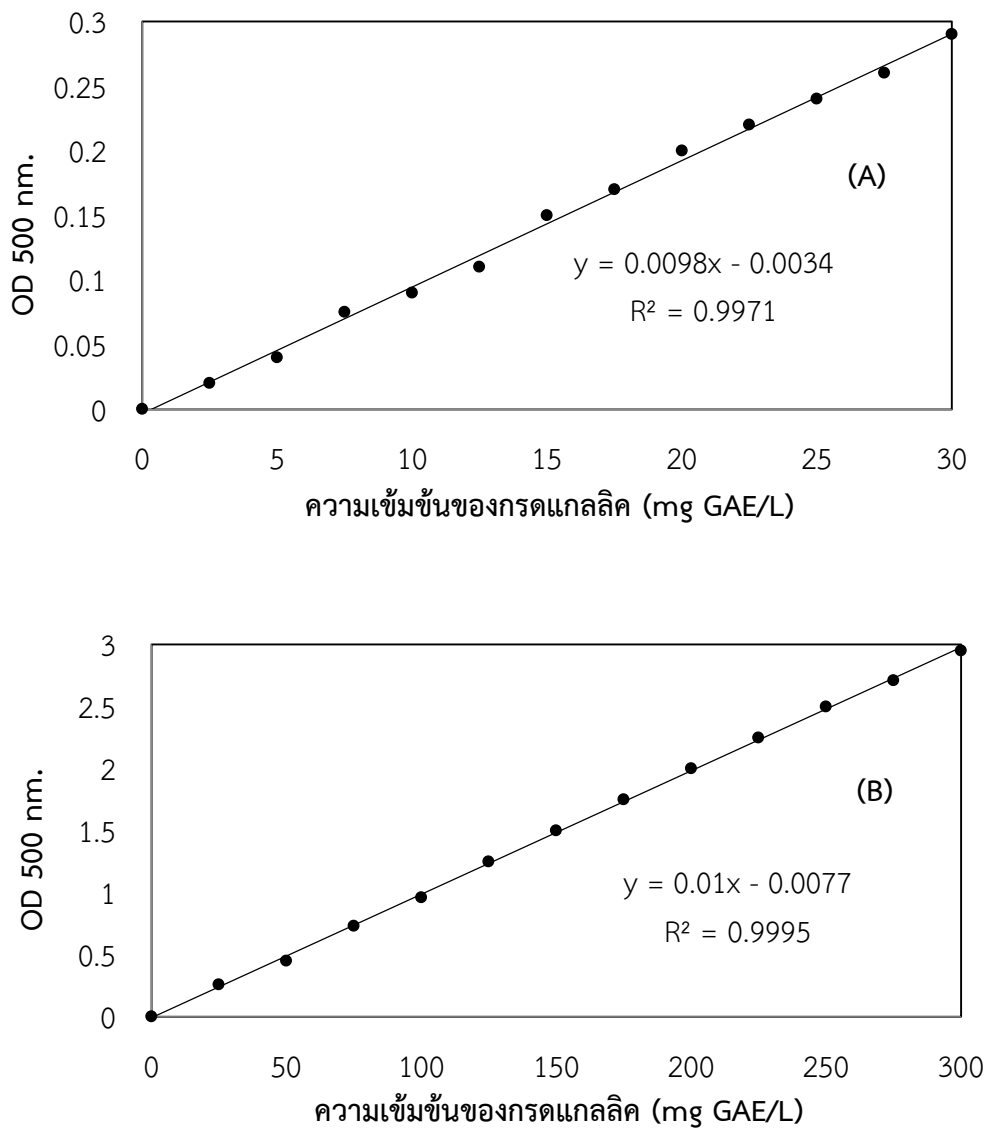
- Wang Y, et al. (2012) Coiled-coil networking shapes cell molecular machinery. *Mol Biol Cell*. 23(19): 3911-22.
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). Analysis of phenolics plant metabolites (pp. 83–91). Oxford: Blackwell Scientific Publication.
- Williams, K.P., Sobral, B.W., Dickerman, A.W. 2007. "A robust species tree for the alphaproteobacteria". *Journal of Bacteriology*. 189 (13): 4578–86.
- Wrenn, B.A., Venosa, A.D., 1996. Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable-number procedure. *Canadian Journal of Microbiology* 42 : 252–258.
- Yang, R.Y., Tsou, S. C. S., Lee, T. C., Chang, L. C., Kuo, G., and Lai, P. Y. 2006. Moringa, a novel plant rich in antioxidants, bioavailable iron, and nutrients. pp224-239. In: C. T. Ho (ed) *Challenges in Chemistry and Biology of Herbs*. American Chemical Society. Washington. D.C.
- Yoshitomi, K.J., and Shann, J.R. 2001. Corn (*Zea mays* L.) root exudates and their impact on 14C-pyrene mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 33: 1769–1776.
- Yoon, J.H., Kang, S.J., Ryu, S.H., Jeon C.O., Oh, T.K. 2008. *Hydrogenophaga bisanensis* sp. nov., isolated from wastewater of a textile dye works. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58, 393–397.
- Zhang, Y.E., Vibranovski, M.D., Krinsky, B.H., Long, M. 2010. Age-dependent chromosomal distribution of male-biased genes in *Drosophila*. *Genome Res.* 20(11): 1526--1533.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

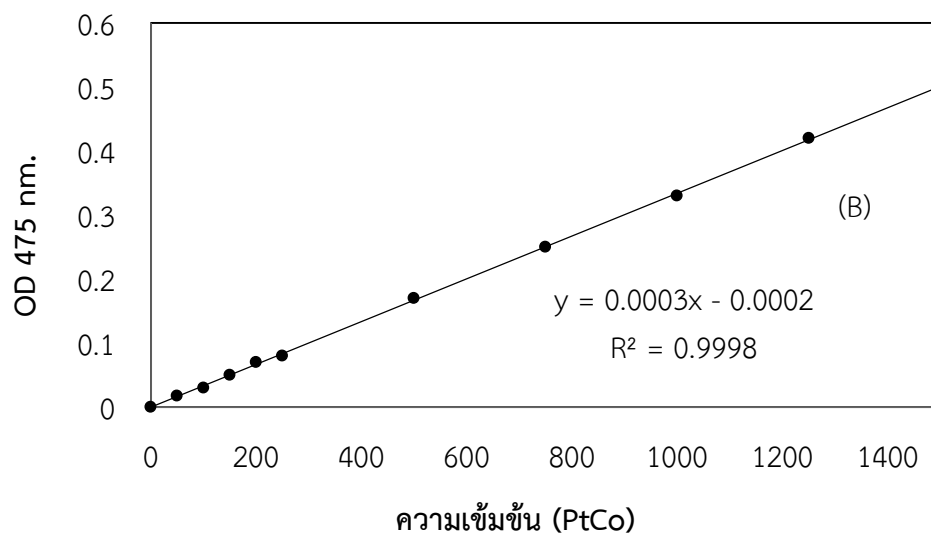
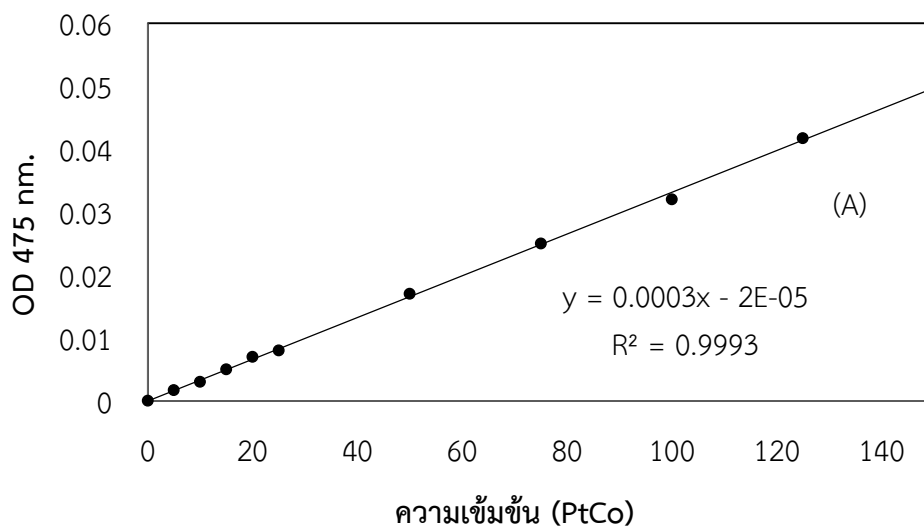
กราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์

ก.1 กราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกด้วยวิธี Folin-ciocalteu



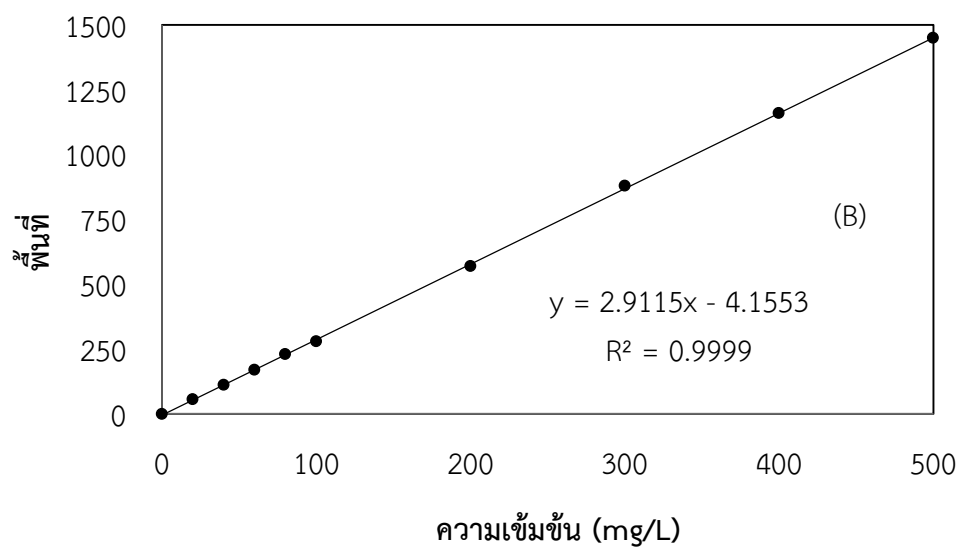
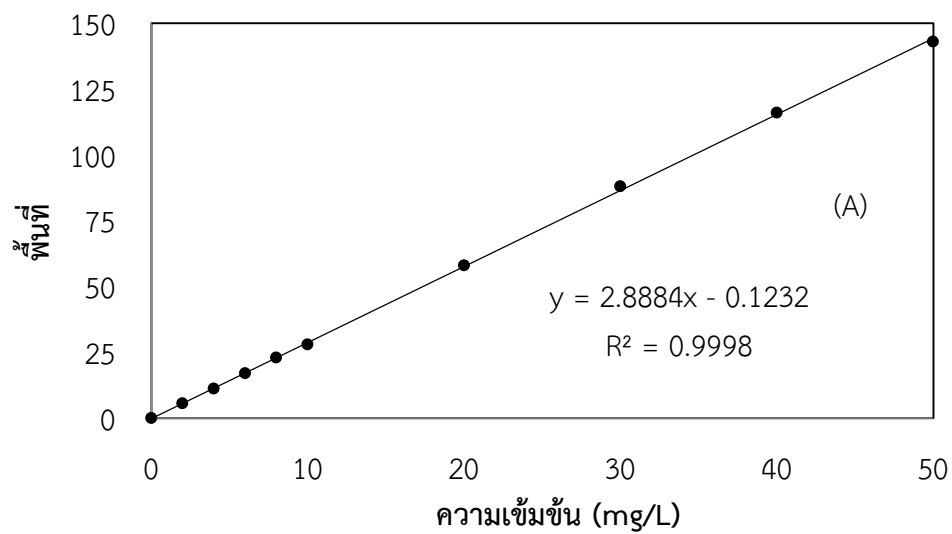
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกด้วยวิธี Folin-ciocalteu ที่ความเข้มข้น 0-30 (A) และ 0-300 (B) mg GAE/L ตามลำดับ

ก.2 กราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์สี



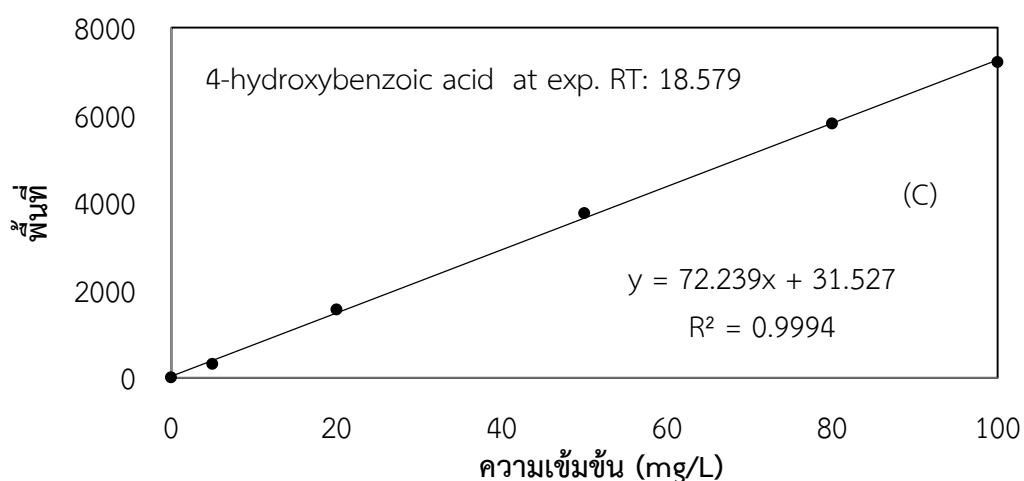
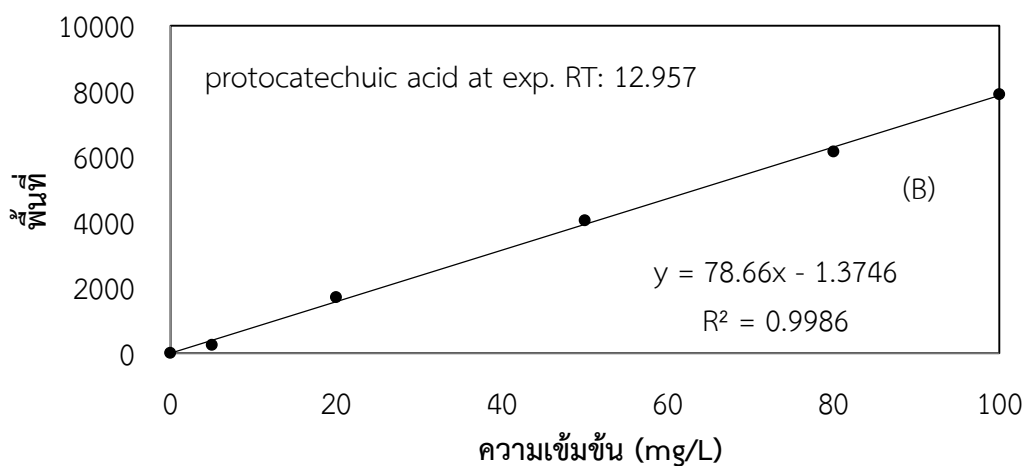
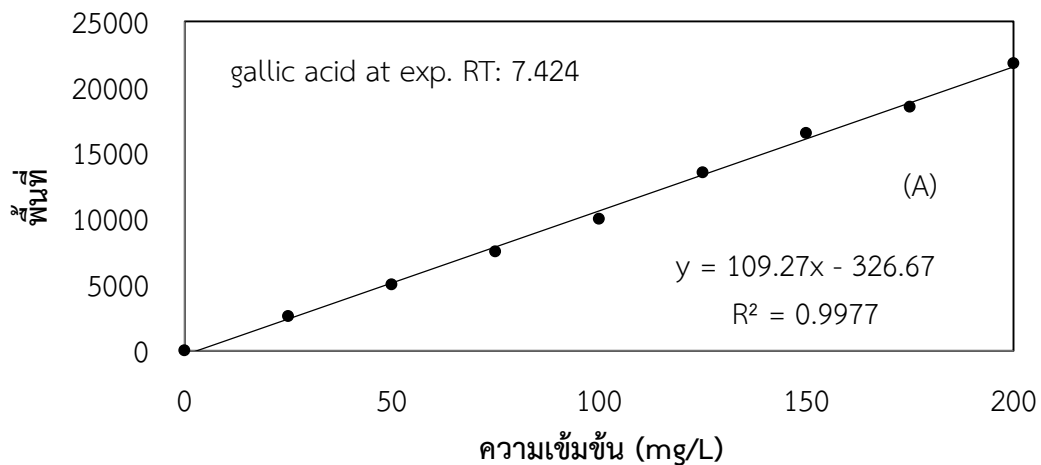
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของสารแพลทตินัมโคบอลต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สี ที่ความเข้มข้น 0-150 (A) และ 0-1,500 (B) PtCo ตามลำดับ

ก.3 กราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์ทีโอซี

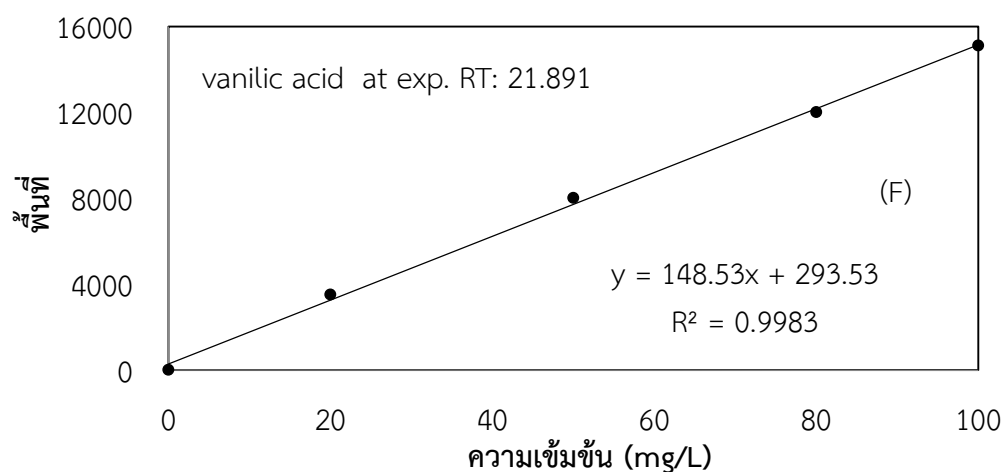
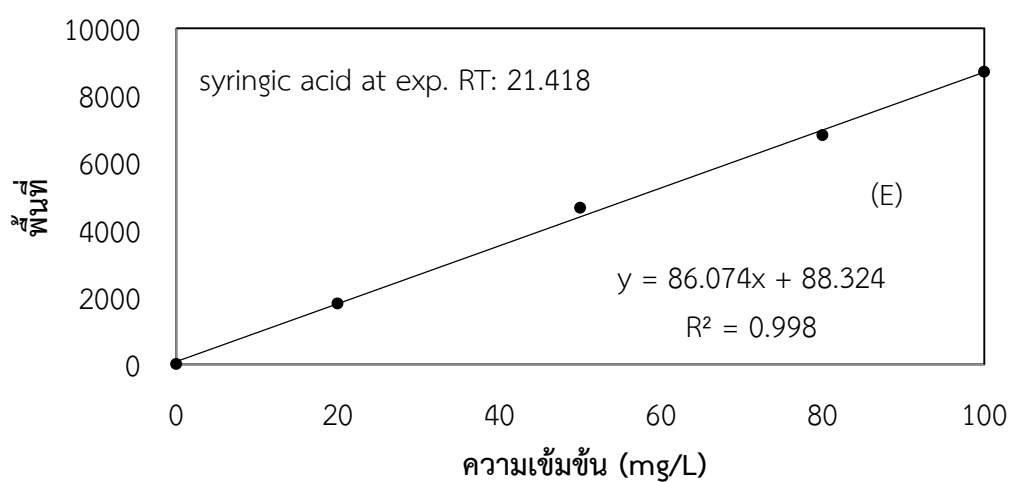
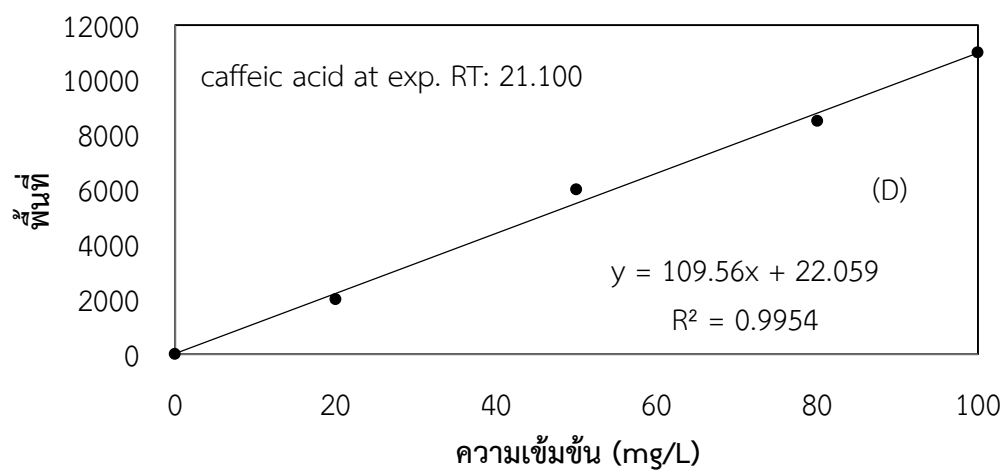


รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์ทีโอซี ที่ระดับความเข้มข้น 0-50 (A) และ 0-500 (B) mg/L ตามลำดับ

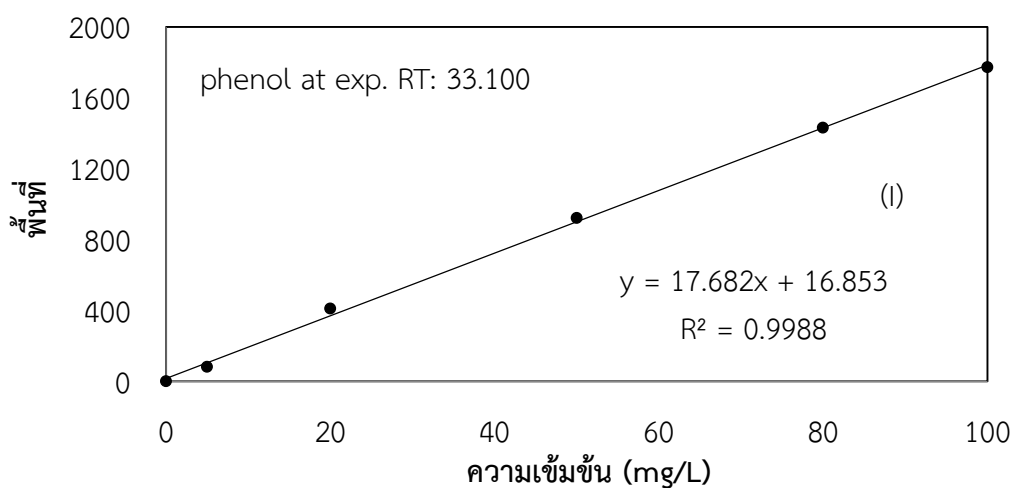
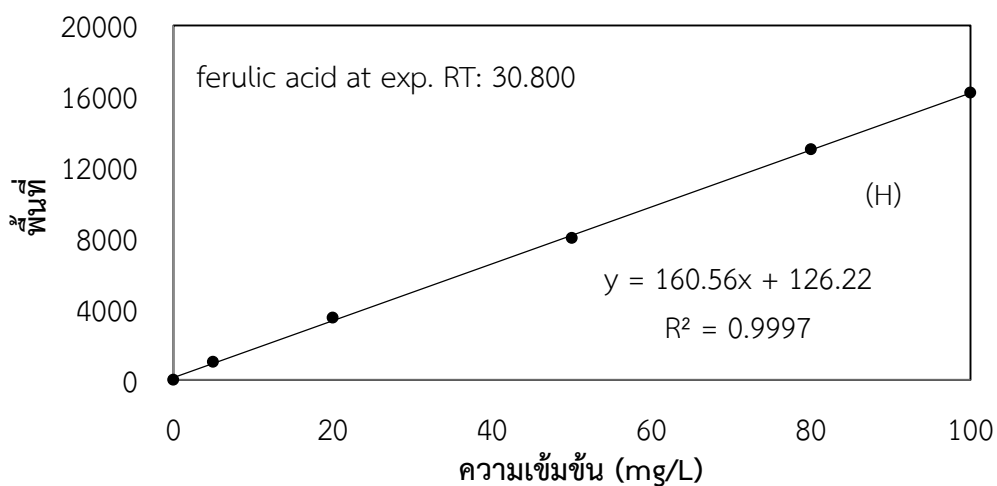
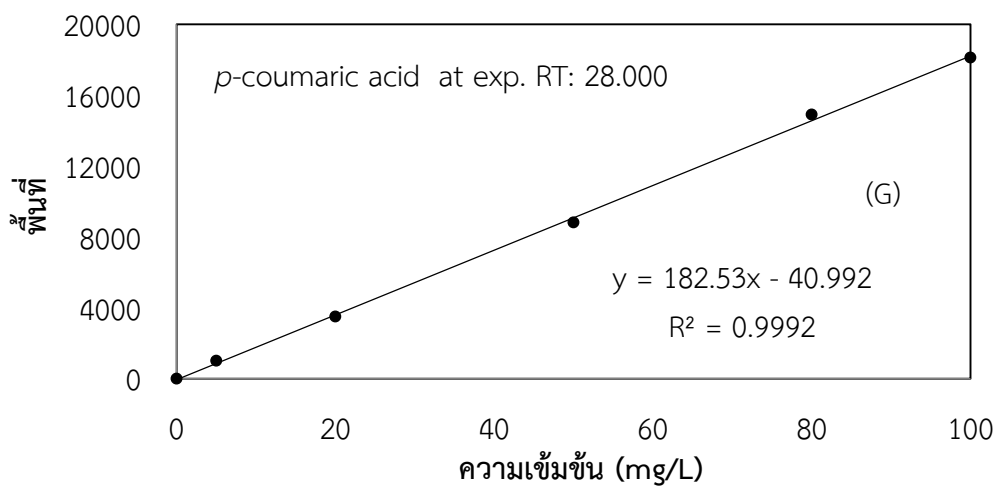
ก.4 กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบฟีนอลิกด้วยเครื่อง Hihg Performance Liquid Chromatography (HPLC)



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



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



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

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์น้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ตารางที่ ข-1 ค่าพีเอชน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอัลมันน์											
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10	Inf Tap Water	T5	T7	T10	PSG
0	8.78	-	-	-	-	-	-	7.21	-	-	-	-
1	8.78	-	-	-	-	-	-	7.32	-	-	6.43	6.26
2	8.78	-	-	-	-	-	-	7.30	-	6.32	6.47	6.21
3	8.78	-	-	6.56	-	-	6.65	7.26	6.16	6.32	6.45	6.16
4	8.63	-	6.47	6.48	-	6.37	6.45	7.30	6.12	6.35	6.45	6.25
5	8.63	-	6.68	6.82	6.13	6.41	6.63	7.37	6.02	6.38	6.47	6.34
6	8.63	5.67	6.63	6.61	6.32	6.37	6.52	7.15	6.09	6.32	6.45	6.32
7	8.68	5.93	6.65	6.47	6.36	6.45	6.59	7.24	6.19	6.34	6.35	6.31
8	8.68	6.05	6.34	6.67	6.21	6.47	6.52	7.14	6.21	6.24	6.34	6.35
9	8.68	6.01	6.34	6.51	6.26	6.4	6.54	7.26	6.25	6.19	6.25	6.36
10	8.48	6.13	6.42	6.48	6.34	6.54	6.66	7.12	6.27	6.25	6.24	6.39
11	8.48	6.22	6.51	6.75	6.48	6.6	6.74	7.32	6.22	6.20	6.30	6.41
12	8.48	6.3	6.67	6.91	6.56	6.61	6.73	7.36	6.26	6.27	6.34	6.46
13	8.52	6.4	6.71	7.01	6.51	6.65	6.81	7.23	6.26	6.29	6.43	6.47
14	8.52	6.47	6.73	7.12	6.53	6.73	6.83	7.14	6.24	6.32	6.41	6.56
15	8.52	6.58	6.87	7.17	6.56	6.73	6.87	7.08	6.31	6.26	6.42	6.60
16	8.41	6.56	6.87	7.22	6.66	6.75	6.99	7.26	6.28	6.34	6.45	6.66

หมายเหตุ: - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอัลมันน์

ตารางที่ ข-2 ค่าสีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอถัมน์						
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
0	1360	-	-	-	-	-	-
1	1360	-	-	-	-	-	-
2	1360	-	-	261	-	-	-
3	1360	-	228	249	-	-	220
4	1430	-	212	231	-	213	176
5	1430	201	177	214	103	145	145
6	1430	141	124	155	94	103	121
7	1455	114	88	122	82	92	104
8	1455	78	50	78	57	64	138
9	1455	50	24	44	125	145	165
10	1766	32	19	29	143	156	205
11	1766	25	11	25	175	146	179
12	1766	15	9	24	166	131	167
13	1340	13	7	31	158	125	160
14	1340	11	7	24	145	122	156
15	1340	9	6	22	148	128	143
16	1340	9	7	25	154	132	151

หมายเหตุ: ค่าสีมีหน่วยเป็น PtCo, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถัมน์

ตารางที่ ข-3 ค่าซีไอดีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอถัมน์						
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
0	1360	-	-	-	-	-	-
1	1360	-	-	-	-	-	-
2	1360	-	-	256	-	-	-
3	1430	-	128	233	-	-	128
4	1430	-	124	241	-	104	126
5	1430	96	131	233	86	99	122
6	1455	92	128	212	94	102	125
7	1455	89	121	211	82	98	120
8	1455	70	115	161	154	138	178
9	1766	64	112	151	180	164	201
10	1766	65	109	144	197	200	211
11	1766	60	101	140	185	190	190
12	1565	56	96	135	180	188	181
13	1565	62	94	129	171	182	176
14	1565	55	90	131	165	174	185
15	1541	52	94	125	156	176	191
16	1541	57	93	123	152	176	189

หมายเหตุ: ค่าซีไอดีมีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถัมน์

ตารางที่ ข-4 ค่าที่เคเอ็นน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอถั่มน์						
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
0	461	-	-	-	-	-	-
1	461	-	-	-	-	-	-
2	461	-	-	112	-	-	-
3	450	-	78	102	-	-	86
4	450	-	71	95	-	65	82
5	450	72	71	91	69	61	81
6	435	67	62	89	60	55	71
7	435	63	54	86	51	46	63
8	435	60	45	93	45	65	74
9	466	67	57	81	55	72	80
10	466	56	58	75	56	65	68
11	466	57	51	71	46	60	61
12	415	51	45	71	38	54	53
13	415	43	46	68	34	43	43
14	415	46	39	60	29	32	39
15	441	43	38	52	24	26	35
16	441	49	45	50	25	23	33

หมายเหตุ: ค่าที่เคเอ็นมีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถั่มน์

ตารางที่ ข-5 ค่าที่ไอซีน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา ๑ (สัปดาห์)	คอถัมนั											
	Treat d POME	S5	S7	S1 0	SG 5	SG 7	SG1 0	Inf Tap Water	T5	T7	T1 0	PSG
2	338	-	35	31	-	93	54	2.8	2. 3	4. 4	-	1.7
3	338	26	18	60	115	100	198	2.8	2	2.	3.1	3.6
6	327	30	19	15	200	197	238	2.6	2. 6	2. 4	6	3.5 0
8	315	29	33	48	178	197	201	2.4	2. 1	2. 3	2.4	2.5 0
9	321	33	24	19	181	199	195	2.5	1. 9	2. 5	2.3	2.5 0
10	321	24	17	18	165	187	194	2.5	2. 3	2. 1	2.5	2.2 0
14	319	21	13	15	156	139	172	2.4	2. 1	2. 4	2.1	2.3 0
16	312	17	16	14	155	154	169	2.6	2. 1	2. 3	2.4	2.4 0

หมายเหตุ: ค่าที่ไอซีมีหน่วยเป็น mg/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถัมนั

ตารางที่ ข-6 ค่าสารประกอบฟีนอลิกน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอถัมน์						
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
0	128	-	-	-	-	-	-
1	128	-	-	-	-	-	-
2	128	-	-	8.35	-	-	-
3	128	-	6.93	8.22	-	-	6.65
4	133	-	6.82	8.12	-	6.47	6.64
5	133	7.32	6.81	8.12	6.16	6.43	6.70
6	133	7.13	6.81	8.01	6.14	6.35	6.63
7	134	7.20	6.70	7.65	6.05	6.34	6.98
8	134	6.8	6.4	7.34	6.40	6.78	7.80
9	134	6.4	5.3	7	7.10	7.11	8.60
10	157	5.50	4.50	6.54	8.43	7.65	10.10
11	157	5.70	4.55	6.32	8.10	6.95	9.56
12	157	5.43	4.71	6.12	7.90	6.85	8.45
13	143	5.34	4.76	6.16	7.71	6.73	8.48
14	143	5.37	4.65	6.25	7.61	6.65	8.28
15	143	5.34	4.51	6.20	7.41	6.60	8.05
16	143	5.32	4.76	6.16	7.36	6.32	7.80

หมายเหตุ: ค่าสารประกอบฟีนอลิกมีหน่วยเป็น mg GAE/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถัมน์

ตารางที่ ข-7 ค่ากรดแกลลิกน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบบำบัดโดยดิน

ระยะเวลา (สัปดาห์)	คอถัมน์						
	Treated POME	S5	S7	S10	SG5	SG7	SG10
2	14.4	-	-	-	-	-	-
4	14.9	-	1.7	2.3	-	6.2	6.2
6	13.9	1.9	1.8	2.6	5.9	6.3	6.4
8	14.7	1.7	2.1	4.1	6.1	8.9	9.4
10	15.7	1.9	1.8	3	7.8	10.1	9.8
12	15.7	1.2	1.6	2.6	6.3	6.5	8.1
14	15.5	1.4	1.5	2.3	6	6.6	7.5
16	15.5	1.3	1.3	2.1	6.4	6.5	7.4

หมายเหตุ: ค่ากรดแกลลิกมีหน่วยเป็น mg GAE/L, - ไม่มีน้ำไหลออกจากคอถัมน์

ภาคผนวก ค

สมดุลมวลการบำบัดซีโอทีและสารประกอบฟีนอลิก

ตารางที่ ค-1 สมดุลมวลการบำบัดซีโอที

คอลัมน์	ซีโอทีเข้าระบบ (mg)	ปริมาณการดูดติดผิว และดูดซับซีโอทีโดยดิน (mg)	ปริมาณซีโอทีที่ย่อย สลายทางชีวภาพ (mg)	ซีโอทีออกจาก ระบบ (mg)
S5	107,171	31,520	74,733	918
S7	150,039	44,758	103,312	1,969
S10	214,342	47,438	162,564	4,340
SG5	107,171	25,058	80,898	1,215
SG7	150,039	29,629	118,776	1,637
SG10	214,342	33,726	178,176	2,440

ตารางที่ ค-2 สมดุลมวลการบำบัดสารประกอบฟีนอลิก

คอลัมน์	สารประกอบ ฟีนอลิกเข้าระบบ (mg)	ปริมาณการดูดติดผิว และดูดซับ สารประกอบฟีนอลิก โดยดิน (mg)	ปริมาณ สารประกอบฟีนอ- ลิกที่ย่อยสลายทาง ชีวภาพ (mg)	สารประกอบฟีนอ- ลิกออกจากระบบ (mg)
S5	9,813	2,835	6,896	82
S7	13,739	5,752	7,887	100
S10	19,627	10,480	8,971	176
SG5	9,813	1,812	7,943	58
SG7	13,739	3,231	10,436	72
SG10	19,627	6,146	13,365	116

ภาคผนวก ง

สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

ง.1 สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อในรูปแบบของเหลว carbon free mineral medium (CFMM) ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีดังนี้ ต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร

- แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) 3.0 กรัม
- ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) 2.2 กรัม
- โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 0.8 กรัม

ผสมสารข้างต้นกับน้ำกลั่นให้ละลายจนหมดจากนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อต้มน้ำ แรงดันสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นสารเติมละลาย 3 ชนิด ละลาย 0.1 มิลลิลิตร ต่อ CFMM ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังรายละเอียดด้านล่าง

- แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร
- เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.05 กรัมต่อมิลลิลิตร
- แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) 0.05 กรัมต่อมิลลิลิตร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายอดิษฐ์ อนุศักดิ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120041

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกฐิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต หาดใหญ่
ทุนจาก Kurita water and Environment Foundation

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Adinun Anusak, Oramas Suttinun, Korakot Nakkanong, Charongpun Musikavong. 2016. Reduction of color, organic matter, and phenolic compounds in treated palm oil mill effluent by land treatment. The 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management May 11-13, 2016. The Twin Towers Hotel, Bangkok, Thailand.