



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยหญ้ากินนีสีม่วง

Phytoremediation of Lubricant Contaminated Soil by Purple Guinea Grass

นามผู้วิจัย นางสาวณัฐฐา แสงนรินทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วิไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์สาธิต ทัดศรี, Ph.D.

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยหญ้ากินนีสีม่วง

Phytoremediation of Lubricant Contaminated Soil by Purple Guinea Grass

โดย

นางสาวณัฐฐา แสงนรินทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. ๒๕๕๓

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐฐา แสงนรินทร์ 2553: การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยหญ้ากินนีสีม่วง
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
วิไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc. 157 หน้า

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการดำเนินการที่เหมาะสมในการใช้หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum*.TD58) ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด แบ่งเป็น 5 ชุดการทดลองได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นในดิน ความหนาแน่นของพืช การปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความลึกของดิน และการบำบัดซ้ำ ร่วมกับการศึกษาการเจริญเติบโตของพืช และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ระยะเวลาการทดลองชุดละ 56 วัน ผลการศึกษาพบว่าการใช้หญ้ากินนีสีม่วงสามารถบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นไม่สูงกว่า 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยความหนาแน่นของพืชที่เหมาะสม คือ 3 ต้นต่อตาราง และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 ที่ความลึก 0-20 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยบำบัดปริมาณน้ำมันทั้งหมดได้ ร้อยละ 52 หรือสามารถบำบัดองค์ประกอบน้ำมัน กลุ่มอิมัลชัน ร้อยละ 54 กลุ่มอะโรมาติก ร้อยละ 42 และกลุ่มมีซิว ร้อยละ 64 และการบำบัดซ้ำโดยการตัดกอเพื่อให้แตกหน่อใหม่ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 71 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่หายไปจากดินส่วนใหญ่เกิดจากการชะล้างโดยน้ำทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ร้อยละ 42-51 จัดเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์บริเวณเขตราก ทั้งนี้พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนดินสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน อัตราการหายใจของดิน และกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส แต่ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์อะลาคาลเอส และการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย แต่เมื่อมีการเติมปุ๋ยยูเรียซึ่งเป็นการเพิ่มไนโตรเจนในดินในปริมาณที่เหมาะสม สามารถฟื้นฟูสภาพการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรียในดินปนเปื้อนได้ดี

Nutta Sangnarin 2010: Phytoremediation of Lubricant Contaminated Soil
by Purple Guinea Grass. Master of Engineering (Environmental Engineering),
Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering.
Thesis Advisor: Associate Professor Wilai Chiemchaisri, D.Tech.Sc. 157 pages.

The objective of this study is to find the optimum conditions for obtaining highest efficiency treatment of lubricant contaminated soil by purple guinea grass (*Panicum maximum*. TD58). There were five experimental-set up via pot study of 56 days-planting period including: variation of lubricant concentrations, grasses densities, C/N ratios, soil depths and re-treatment methods. The experimental pots were examined for oil content, oil fraction, plant growth and soil activities.

The results showed that purple guinea grass could treat lubricant contaminated soil containing oil content below 30 g oil/kg soil with the optimum plant density of 3 plants/pot, C/N ratio of 49/1 and giving the highest removal efficiency at 0-20 cm. of soil depth. These conditions could enhance highest removal efficiency of total extractable matter (52%), or of oil fractions: saturate compound (52%) aromatic compound (42%) and polar compound (64%). In addition, lubricant treatment efficiency could be increased to 71% by re-treatment of treated soil through shoot cutting method in order to stimulate tillering of grasses. 42-51% removals of soil lubricant were mainly via biodegradation of soil microbes in rhizosphere. Besides, it was found that contaminated lubricant could stimulate the growth of hydrocarbon utilizing bacteria (HUB); soil respiration rate and dehydrogenase activity. In contrast, it inhibited catalase activity and nitrifying bacteria activity. However amendment of appropriate urea in the lubricant contaminated soil could recover nitrifying bacteria activity as well.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิไล เจียมไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความกรุณาอย่างดียิ่งในการช่วยเหลือวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์
ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ หาทุนสนับสนุนงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชชาติ เจียมไชยศรี และ ศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์
ทัตศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำเรื่องการปลูกหญ้า การเลือกชนิดหญ้า
รวมทั้งอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์หญ่ากีนีสีม่วงที่ใช้ในการทดลอง และแนะนำ ช่วยเหลือในการ
ตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้เงินทุนสนับสนุนหลัก
และ กองทุน ดร.ธีระ พันธุมนิช และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสีย
อันตราย ที่ให้เงินทุนสนับสนุนบางส่วนกับงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง ญาติมิตร รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้
การสนับสนุนช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าได้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณัฐฐา แสงนรินทร์

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	100
สรุป	100
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	104
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก การเตรียมดินสำหรับการทดลอง	115
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ	118
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ	133
ภาคผนวก ง สมดุลมวลน้ำมันหล่อลื่น	151
ภาคผนวก จ การทดสอบทางสถิติ	154
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	157

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขุดจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทยปี พ. ศ. 2545 – 2552 (หน่วย: ล้านลิตร)	9
2	ประมาณการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในประเทศไทยระหว่างปี พ. ศ. 2545 – 2552 (หน่วย: ล้านลิตร)	10
3	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นและ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	11
4	ข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเกรด FB 20: เพื่อใช้ผลิตเป็น เชื้อเพลิงสังเคราะห์	13
5	แผนการทดลองแต่ละชุดการทดลอง	37
6	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ก่อนการผสม น้ำมันหล่อลื่น)	38
7	ความถี่ของการเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์	51
8	วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์	52
9	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ก่อนการทดลองแต่ละชุด	54
10	สรุปการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีนิ่ม่วงในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุด การทดลอง	59
11	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันทั้งหมด องค์ประกอบน้ำมันและการ เจริญเติบโตของหญ้ากีนีนิ่ม่วง	65
12	ปริมาณน้ำชะที่เกิดจากการรดน้ำเป็นเวลา 56 วัน (ชุดการทดลองที่ 1)	67
13	ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สกัดได้จากน้ำชะ (ชุดการทดลองที่ 1)	67
14	ชนิดสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่นที่วิเคราะห์โดย Gas Chromatography- Mass Spectrometry; GC-MS	74
15	ค่า Respiration quotient: RQ ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นในแต่ละชุดการ ทดลอง	85
16	กิจกรรมเอนไซม์ของคะตะเลสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้น ต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ปริมาณปุ๋ยยูเรีย และลักษณะดินระหว่างการทดลองที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน (ชุดการทดลองที่ 4)	95
18	สมดุลมวลน้ำมันหล่อลื่นที่ 56 วัน ของการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 5)	97
19	การงอกของเมล็ดมะเขือเทศในดินปนเปื้อนก่อนและหลังการบำบัดในแต่ละชุดการทดลอง	99
ตารางผนวกที่		
ค1	การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 1	134
ค2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 1	135
ค3	การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 1	136
ค4	การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในดิน ชุดการทดลองที่ 1	136
ค5	การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 1	137
ค6	การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 1	138
ค7	การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 1	138
ค8	การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 2	139
ค9	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 2	139
ค10	การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 2	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ในดิน ชุดการทดลองที่ 2	140
ค12 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 2	140
ค13 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 2	141
ค14 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 2	141
ค15 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 3	141
ค16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 3	142
ค17 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 3	142
ค18 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ในดิน ชุดการทดลองที่ 3	142
ค19 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 3	143
ค20 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 3	143
ค21 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 3	144
ค22 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 4	145
ค23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 4	145
ค24 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 4	145
ค25 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ในดิน ชุดการทดลองที่ 4	146
ค26 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 4	146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค27 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 4	146
ค28 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 4	147
ค29 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 5	147
ค30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 5	148
ค31 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 5	148
ค32 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ในดิน ชุดการทดลองที่ 5	149
ค33 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 5	149
ค34 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 5	150
ค35 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 5	150
จ1 ผลการทดสอบการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วงทุกชุดการทดลอง ด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	155
จ2 ผลการทดสอบกิจกรรมจุลินทรีย์ในดินชุดการทดลองที่ 1 ด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	156

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแรงประเภทเนื้อดิน (soil texture triangle) ตามสัดส่วนโดยมวลของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว	20
2	ลักษณะการรั่วไหลของสาร DNAPL และ LNAPL	24
3	รูปแบบของน้ำมันที่ซึมลงในดินที่มีช่องว่างในดิน (Soil Permeability) แตกต่างกัน	25
4	หญ้ากีนีสีม่วง	34
5	การวางแผนปลูกศึกษาผลของความเข้มของน้ำมันหล่อลื่นต่อประสิทธิภาพ การบำบัด	40
6	การวางแผนปลูกศึกษาผลของการปลูกพืชซ้ำเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ ในการบำบัด	41
7	ตำแหน่งการปลูกพืช	42
8	การวางแผนปลูกศึกษาผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด	43
9	การวางแผนปลูกศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารต่อประสิทธิภาพการบำบัด	44
10	ลักษณะกระถางปลูกพืช	45
11	การวางแผนปลูกศึกษาผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด	45
12	การเก็บน้ำชะจากกระถางทดลอง	46
13	ชั้นวางกระถาง และลักษณะการติดตั้งหลอดไฟ	47
14	การวิเคราะห์หาอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์	48
15	ลำต้น (ซ้าย) และราก (ขวา) ของหญ้ากีนีสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 1 ที่ระยะเวลา 6 วัน	56
16	การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 2 ที่ระยะเวลา 56 วัน	57
17	การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ความหนาแน่นต่างๆ ที่ปลูกใน ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในชุดการทดลองที่ 3	60
18	การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 5 ที่ระยะเวลา 56 วัน	61
19	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันในดิน	63
20	ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิ่มตัวในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น	69
21	ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีขี้ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น	71
23	การเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 2)	72
24	องค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 1)	75
25	องค์ประกอบน้ำมันในดิน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 56 วัน	76
26	องค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 5)	77
27	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญ้าและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 1)	79
28	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญ้าและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยมีความหนาแน่นหญ้าแตกต่างกันคือ 2, 3 และ 4 ต้นต่อกระถาง (ชุดการทดลองที่ 3)	80
29	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญ้าและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกันคือ 28/1 และ 49/1 (ชุดการทดลองที่ 4)	81
30	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่นกับจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ชุดการทดลองที่ 1)	82
31	ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นหญากินนี้สีม่วงกับจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ชุดการทดลองที่ 3)	82
32	อัตราการใช้ออกซิเจน (a) และอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (b) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น ในชุดการทดลองที่ 1	84
33	กิจกรรมเอนไซม์อะไมเลสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า และปลูกหญ้าในชุดการทดลองที่ 1	87
34	ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในชุดการทดลองที่ 1	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	กิจกรรมของดีไฮโดรจีเนสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า และปลูกหญ้าในชุดการทดลองที่ 1	89
36	ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในชุดการทดลองที่ 1	91
37	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (a) ในไคโรทไนโตรเจน (b) และไนเตรทไนโตรเจน (c) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปลูกพืชและไม่ปลูกพืช (ชุดการทดลองที่ 1)	93
38	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (a) ในไคโรทไนโตรเจน (b) และไนเตรทไนโตรเจน (c) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน (ชุดการทดลองที่ 4)	96

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	องศาเซลเซียส
C/N Ratio	=	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
CPR	=	อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์
Cut-Plant	=	ตัดลำต้น/กอ เพื่อบำบัดซ้ำ
g/kg soil	=	กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง
HUB	=	จุลินทรีย์ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน
MC	=	ความชื้นในดิน
New-Plant	=	ปลูกใหม่ เพื่อบำบัดซ้ำ
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	=	แอมโมเนียมไนโตรเจน
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	=	ไนไตรท์ไนโตรเจน
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	=	ไนเตรทไนโตรเจน
OM	=	อินทรีย์วัตถุ
ORP	=	ศักย์รีดอกซ์
OUR	=	อัตราการใช้ออกซิเจน
pH	=	ความเป็นกรดด่าง
pt.	=	ต้น
TN	=	ไนโตรเจนทั้งหมด
TOC	=	อินทรีย์คาร์บอน

การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยหญ้ากินนีสีม่วง

Phytoremediation of Lubricant Contaminated Soil by Purple Guinea Grass

คำนำ

ปัญหาของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของเสียอันตรายในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย นับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ต้องดำเนินการแก้ไข ทั้งในรูปแบบของการปนเปื้อนที่เกิดจากการรั่วไหลจากแหล่งเก็บ และจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา กรมควบคุมมลพิษ (2549) ได้ทำการสำรวจรวบรวมข้อมูล พบว่าในอดีตตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 - 2539 ปริมาณการใช้ น้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทยเติบโตเฉลี่ยร้อยละ 7.4 และในปี พ.ศ. 2540 - 2549 ประเทศไทยใช้น้ำมันหล่อลื่นทั้งประเทศเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 – 30 จากความต้องการใช้น้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก เพราะน้ำมันหล่อลื่นเป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลในโรงงาน เครื่องยนต์ของยานพาหนะต่างๆ เช่น รถยนต์ รถไฟ เรือ และเครื่องบิน โดยเฉพาะกิจกรรมด้านยานยนต์ เป็นกลุ่มที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นในสัดส่วนสูงที่สุด มากกว่าร้อยละ 60 (สิริพร, 2546)

น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วในประเทศไทยส่วนใหญ่ มีระบบการจัดการ และการกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี คือ มีการปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำและดินโดยตรง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นอย่างยิ่ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดินและน้ำบริเวณที่ได้รับการปนเปื้อนเสียคุณค่า และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทั้งมนุษย์ สัตว์ และพืช เพราะเมื่อน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพจะประกอบด้วย สารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอน สารตัวทำละลาย โลหะหนัก เป็นต้น ซึ่งสารบางตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น สารโพลีคลอริเนเตดไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyl Compound: PCB) และสารโพลีไซคลิกอะโรมาติก (Polycyclic Aromatic Compound: PCA)

จากความตระหนักของภาครัฐในปัญหาดังกล่าวจึงมีการกำหนดให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ในประกาศบัญชีรายชื่อวัตถุอันตรายปี พ.ศ. 2538 และเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วชนิดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Hazardous Waste)

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัตถุที่ไม่ใช่แล้ว ส่งผลทำให้โรงงานที่มีน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะต้องทำการจัดเก็บรวบรวม และกำจัดให้ถูกต้อง และหากมีการขนส่งเพื่อนำไปกำจัดหรือดำเนินการใดๆ จะต้องขออนุญาตตามที่กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีการยอมรับที่จะนำมาใช้กับการทำความสะอาดดินที่มีการปนเปื้อนปิโตรเลียม และการบำบัดด้วยพืช (phytoremediation) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้พืชชั้นสูงบำบัดสิ่งปนเปื้อนในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยกว่าวิธีการบำบัดโดยวิธีอื่น สามารถบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในพื้นที่ได้ (*In Situ Remediation*) โดยไม่ต้องมีการเคลื่อนย้ายดิน หรือสูบน้ำที่มีการปนเปื้อนออก ทำให้ลดโอกาสการกระจายสารปนเปื้อนสู่แหล่งอื่น เนื่องจากการขนย้าย (EPA, 1996)

ลักษณะของพืชที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารปนเปื้อนในดิน คือพืชต้องเจริญเติบโตได้ดี ทนทานต่อมลพิษที่ปนเปื้อน และสามารถกำจัดสารมลพิษได้มาก ทั้งโดยการดูดซึมโดยตรง การสะสมในเซลล์พืช หรือทางอ้อม เช่น ส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ งานวิจัยที่ผ่านมาการใช้พืชหลายชนิดในการบำบัดสารปนเปื้อนในดิน โดยอาศัยการทำงานของระบบเขตรากและจุลินทรีย์ในดิน โดยเฉพาะบริเวณเขตราก ตัวอย่างการใช้หญ้าหรือพืชใบเลี้ยงเดี่ยวบำบัดดินปนเปื้อน พืชที่บำบัดโลหะหนัก เช่น ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) บำบัดแคดเมียม (Duponnois *et al.*, 2006) ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) บำบัดตะกั่ว (Belimov *et al.*, 2001) พืชที่บำบัดสารโพลีอะโรมาติก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในน้ำมันหล่อลื่น เช่น หญ้าดอกขาว (raygrass; *Lolium perene*) สามารถบำบัด fluoranthene และ pyrene ได้เป็นอย่างดี (Rezek *et al.*, 2008) หญ้าพื้นเมืองเกาหลี (*Panicum bisulcatum* Thunb. และ *Echinochloa crus-galli*) หลังการทดลองเป็นเวลา 80 วันสามารถกำจัด phenanthrene และ pyrene ได้ร้อยละ 99 (Lee *et al.*, 2008) และพืชที่บำบัดน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบ ได้แก่ ต้นกก switchgrass และ gamagrass หลังการทดลองเป็นเวลา 1 ปี สามารถบำบัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนได้ร้อยละ 70 (Euliss *et al.*, 2008) และ tall fescue สามารถบำบัดตะกอนปนเปื้อนปิโตรเลียมที่ระดับความลึกดิน 0-15 เซนติเมตรได้ร้อยละ 47 หลังการทดลองเป็นเวลา 5 เดือน (Hutchinson *et al.*, 2001) ข้อดีของการใช้หญ้า ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ มีรากฝอย ระบบรากแผ่กระจายได้ในบริเวณกว้างและลึก ส่งเสริมให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีกว่าพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีรากแก้ว (White *et al.*, 2006)

ดังนั้นในการงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหาแนวทางการใช้พืชเพื่อบำบัดดินปนเปื้อน น้ำมันหล่อลื่น สำหรับการบำบัดดินในพื้นที่ (*In Situ Remediation*) ที่เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงแหล่งเดียว ทำการศึกษาโดยการนำหญ้า ได้แก่ หญ้ากีนีสีม่วง (*Panicum maximum*.TD58) ซึ่งเป็นหญ้าที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีเมล็ดขายทั่วไป และจัดว่าเป็นหญ้าที่ทนทานต่อสภาพดินไม่เหมาะสม เช่น ดินเค็ม ดินขาดธาตุอาหาร (สายัณห์, 2548) ซึ่งอาจนำมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นได้ดี และเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ คือ สามารถนำไปใช้เป็นหญ้าเลี้ยงสัตว์

โดยข้อมูลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการบำบัดที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นหรือสารเคมีที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน โดยใช้พืชและการดำเนินการที่เหมาะสม ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศหรือการใช้เทคโนโลยีอื่นๆ ที่มีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานที่สูงกว่า

วัตถุประสงค์

เพื่อหาวิธีการดำเนินการที่เหมาะสมในการใช้ หญ้ากินนีสีม่วงในการ บำบัดดินปนเปื้อน น้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ความหนาแน่นของพืช ความลึกของดิน การเติมธาตุอาหารเพื่อปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และการบำบัดซ้ำ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองแบบกระถาง (pot experiment) ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่น ความหนาแน่นพืช การปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด และการปลูกพืชซ้ำเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด
2. ดินปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง เป็นดินปนเปื้อนจากการสังเคราะห์ขึ้น โดยใช้ดินร่วนปนทรายผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ ของฮอนด้า (HONDA) ที่ความเข้มข้น 0, 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง
3. พืชที่ใช้ในการบำบัด คือ หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum*.TD58) นำเมล็ดพันธุ์มาจาก ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษา
 - 4.1 ตัวแปรอิสระ
 - อัตราการระเหยของน้ำ
 - อุณหภูมิ
 - 4.2 ตัวแปรควบคุม
 - ชนิดดิน
 - ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดิน
 - ปริมาณดินต่อหน่วยการทดลอง
 - ปริมาณน้ำที่ให้แก่พืช
 - ความหนาแน่นพืช

- อัตราส่วนการรับอนต่อนในโตรเจนในดิน เมื่อเริ่มต้นการทดลอง

4.3 ตัวแปรตาม

- อัตราการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในดิน
- การเจริญเติบโตของพืช
- กิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน



การตรวจเอกสาร

น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น (lubrication oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งจากการกลั่นปิโตรเลียม น้ำมันหล่อลื่นเป็นวัสดุหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว โดยทั่วไปจะนำไปใช้หล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด เช่น ภายในห้องเพลาคอเหวี่ยง ห้องเกียร์ และเฟืองท้าย เป็นต้น การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพต่างๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (ประเสริฐ และคณะ, 2544)



1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) มีน้ำมันพื้นฐานที่มีใช้อยู่แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่มาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น (ประเสริฐ และคณะ, 2544)

2. การผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเป็นส่วนที่แยกออกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ แล้วนำมากลั่นต่อในหอสุญญากาศ หลังจากนั้นจึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความบริสุทธิ์และมีคุณภาพดีขึ้นโดยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจจะต่อเนื่องกันหรือไม่ก็ได้ กระบวนการต่างๆ มีดังนี้ (ประเสริฐ และคณะ, 2544)

2.1 การกลั่น (distillation) ในหอกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีการแยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงต่างๆ ออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศ ส่วนในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นจะนำส่วนที่เหลือนี้ไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศ เพื่อที่จะทำให้ส่วนหนักๆ ที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นระเหยตัวและกลั่นออกไป

2.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) คือการกำจัดสารพาราฟินด้วยตัวทำละลาย ส่วนมากใช้ฟีนอล (phenol; C_6H_5OH) เพื่อให้น้ำมันมีค่าดัชนีความข้นใสสูงขึ้น สีสดใสขึ้น และไม่เกิดการรวมตัวกับออกซิเจน

2.3 ไฮโดรไฟนิง (hydrofining) คือกรรมวิธีการเติมไฮโดรเจนสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบของกำมะถัน ในไฮโดรเจน กรด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีสวย สีสดใสได้นาน เข้มข้นคง และมียอายุการใช้งานยาวนาน

2.4 การแยกไขออก (dewaxing) เพื่อให้มีจุดไหลเท (pour point) ต่ำ สามารถใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำหรือใช้ในฤดูหนาวได้ดี

2.5 การแยกแอสฟัลต์ (asphalt separation) คือการแยกเอาสารจำพวกยางมะตอยออกจากน้ำมันหล่อลื่นส่วนหนักๆ

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่ทำให้บริสุทธิ์ทุกๆ กระบวนการทั้งนี้แล้วแต่ชนิดของน้ำมันดิบที่จะนำมากลั่น และขึ้นอยู่กับงานที่ต้องนำไปใช้ที่สำคัญ

3. สารเพิ่มคุณภาพ

ปัจจุบันเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ประเภทต่างๆ ได้รับการออกแบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เช่น ทำงานที่ความเร็วรอบสูงขึ้น แรงม้า แรงเสียดทาน และรับภาระน้ำหนักสูงขึ้น ในขณะที่ขนาดเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ถูกสร้างให้เล็กลง จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ประเภทต่างๆ มักประสบกับปัญหาทางด้านอุณหภูมิ ความเครียด และภาระน้ำหนักสูง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วนๆ ที่ไม่มีสารเพิ่มคุณภาพไม่ดีพอ ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ต่างๆ ได้อย่างครบถ้วน อายุการใช้งานก็จะสั้นลงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารบางอย่างลงไป ในน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดตามสภาพการใช้งานของเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์นั้นๆ ในปริมาณที่

พอดี เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานให้มีคุณภาพดีเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ สารเพิ่มคุณภาพจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางเคมีและด้านกายภาพของน้ำมันพื้นฐานนั้นๆ

สารเคมีที่นิยมใช้กันมาก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทั้งทางด้านเคมีและกายภาพ ได้แก่ (จันทร์เพ็ญ, 2540)

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| - สารชะลอการรวมตัวกับออกซิเจน | - สารป้องกันการเกิดสนิม |
| - สารยับยั้งการกัดกร่อน | - สารชะล้างทำความสะอาด |
| - สารกระจายเขม่าตะกอน | - สารต้านทานการสึกหรอ |
| - สารรับแรงกดสูง | - สารต้านทานการเกิดฟอง |
| - สารเพิ่มดัชนีความหนืด | - สารลดจุดไหลเท |
| - สารเพิ่มคุณสมบัติเกาะติด | - สารเพิ่มความดัน |
| - สารลดแรงเสียดทาน | - สารทำให้น้ำมันผสมกับน้ำได้ |

ประโยชน์ของการใส่สารเพิ่มคุณภาพชนิดต่างๆ ในน้ำมันหล่อ ลื่น (ประเสริฐ และคณะ , 2544)

ปรับให้น้ำมันมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นได้สมบูรณ์ตลอดอายุการใช้งานของ น้ำมันหล่อลื่น ปรับค่าความหนืดหรือความข้นใสของน้ำมันหล่อลื่นตามอุณหภูมิการใช้งานที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะอย่าง ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท ช่วยลดการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์ให้ยาวนานขึ้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีอายุการใช้งานนานขึ้น และทำให้เครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์มีสมรรถนะในการทำงานสูงขึ้น

4. น้ำมันหล่อลื่นเบนซิน 4 จังหวะฮอนด้า (HONDA)

น้ำมันหล่อลื่นเบนซิน 4 จังหวะฮอนด้า เป็นน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่อยู่ในชั้นคุณภาพ ASP grade SG ซึ่งใช้สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซิน เป็นน้ำมันเครื่องที่ได้รับรองมาตรฐาน เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา นับเป็นมาตรฐานของน้ำมันเครื่องที่เน้นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ลดการสึกหรอของบริเวณวาล์ว โดยเฉพาะในเครื่องยนต์สมัยใหม่ที่มีหลายวาล์วต่อสูบ รวมทั้งน้ำมันเครื่องในระดับนี้จะช่วยในการประหยัด

น้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย โดยมีลักษณะทางกายภาพเป็นสีเหลืองใส ค่าดัชนีความข้นใสหรือความหนืด (viscosity index) เท่ากับ 140 จุดวาบไฟ (flash point) เท่ากับ 98 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้ยังจัดเป็นน้ำมันหล่อลื่นมาตรฐานประเภทเอสเทอร์สังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารที่มีดัชนีความข้นใสสูงมาก การระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องการทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมากๆ (ประเสริฐ และคณะ, 2544)

5. ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทย

ธนบดี (2547) ได้รวบรวมยอดจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นจากกรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ ซึ่งเป็นยอดการจำหน่ายเฉพาะผู้ค้าน้ำมันรายใหญ่ในประเทศไทยเท่านั้น ยังไม่มีการรวมผู้ค้ารายย่อย ซึ่งมีส่วนแบ่งทางการตลาดระหว่าง บริษัทค้าน้ำมันรายใหญ่ต่อรายย่อย เท่ากับ 75:25 ทำให้สามารถประมาณการปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นทั้งประเทศได้ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ยอดจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทยปี พ. ศ. 2545 – 2552 (หน่วย: ล้านลิตร)

บริษัทผู้ค้าน้ำมัน	พ.ศ.						
	2545	2546	2547	2549	2550	2551	2552
รายใหญ่ ^{1/}	507.91 ^{1/}	503.23 ^{1/}	671.40 ^{1/}	507.54 ^{2/}	573.64 ^{2/}	541.75 ^{2/}	554.65 ^{2/}
รายย่อย ^{3/}	167.64	167.74	223.80	168.76	190.73	180.13	184.42
รวม	670.55	670.97	895.19	675.03	762.93	720.53	737.68

หมายเหตุ ^{1/} กรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์

^{2/} กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553)

^{3/} ประมาณการโดยใช้ส่วนแบ่งทางการตลาดระหว่าง รายใหญ่: รายย่อย เท่ากับ 75:25

ที่มา: คัดแปลงจากธนบดี (2547)

จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยเฉพาะในปี พ. ศ. 2547 มีการใช้เพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 33.4 จากปี พ. ศ. 2546 ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว แต่เฉลี่ยแล้วมีขอดีจำหน่าย 724 ล้านลิตรต่อปี

6. ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเมืองไทย

การประมาณการปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว จากยอดการจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่น โดยจะต้องทราบร้อยละของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เหลืออยู่หลังการใช้งานจนเสื่อมสภาพที่เรียกว่า “Used Oil Generation Factor: UOGF” เพื่อนำไปใช้ในการประมาณปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากยอดการจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นต่อไป โดยที่การศึกษาหาค่า UOGF นี้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและต้องการเครื่องมืออุปกรณ์โดยเฉพาะ ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่านี้ แต่จันทร์เพ็ญ (2540) ได้ทำการประเมินปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากยอดจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่น โดยได้เลือกค่า UOGF เท่ากับ 0.50 ซึ่งได้จากการรวบรวมการประเมินน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจาก 4 แหล่งทั่วโลก ค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50 – 53 ของยอดจำหน่ายน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่เกิดขึ้นในประเทศไทยระหว่างปี พ. ศ. 2545 – 2552 แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในประเทศไทยระหว่างปี พ. ศ. 2545 – 2552
(หน่วย: ล้านลิตร)

บริษัทผู้ค้าน้ำมัน	พ.ศ.						
	2545	2546	2547	2549	2550	2551	2552
ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่น ^{1/}	670.55	670.97	895.19	675.03	762.93	720.53	737.68
ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ^{2/}	335.27	335.49	447.60	337.51	381.47	360.24	368.84

หมายเหตุ ^{1/} ปริมาณการโดยใช้ส่วนแบ่งทางการตลาดระหว่าง รายใหญ่: รายย่อย เท่ากับ 75: 25

^{2/} ประเมินโดยใช้ค่า UOGF เท่ากับ 0.50

7.สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

ในน้ำมันหล่อลื่นอาจมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวน 100 หรือ 1,000 ชนิด โดยมีสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ สารประกอบโพลีนิวเคลียร์อะโรมาติก (Polynuclear Aromatic Compound: PNAs) สารเติมแต่งคุณภาพมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน สังกะสี แคลเซียม ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม (สิริพร, 2546) น้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้งานแล้วสมบัติในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะเปลี่ยนไป เนื่องจาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดความเป็นกรดกัดกร่อนเนื้อโลหะในเครื่องจักรกล และเกิดตะกอนยางเหนียวเกาะติดตามทางเดินของน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องจักรกล นอกจากนี้ยังมีสารปนเปื้อนอื่นๆ ได้แก่ สิ่งสกปรก ฝุ่นและสนิม ส่วนสารเติมแต่งคุณภาพในน้ำมันจะถูกใช้หมดไป หรือเสื่อมสภาพไป ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานหล่อลื่นไม่เพียงพอ ทำให้เกิดเศษโลหะ น้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดเข้ามาปะปน (จันทร์เพ็ญ, 2540)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วปรากฏตามรายการผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 (Mueller Associates, 1989)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

Property	Virgin Lube	Used Oil
Physical Property		
Specific gravity (kg/L)	0.882	0.910
Viscosity, @ 100 °F	-	324
Water, Vol %	0	12.3
Carbon residue, wt. %	0.82	3.0
Ash, wt. %	0.94	1.3
Flash point, °F	-	348
Pour point, °F	-35	-35
Chemical Property		
Total acid No.	2.2	4.4
Total base No.	4.7	1.7
Nitrogen, wt. %	0.058	0.08

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Property	Virgin Lube	Used Oil
Sulfur, wt.%	0.32	0.42
Lead, ppm	0	7,535
Calcium, ppm	1,210	1,468
Zinc, ppm	1,664	1,097
Phosphorus, ppm	1,397	931
Magnesium, ppm	675	309
Barium, ppm	37	297
Iron, ppm	3	205
Sodium, ppm	4	118
Potassium, ppm	<1	31
Copper, ppm	0	29
Silicon, ppm	4	24
Chromium, ppm	0	15
Tin, ppm	0	13
Manganese, ppm	0	4

ที่มา: Mueller Associates (1989)

8. การบำบัดและกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว จะมีการจัดเก็บในเบื่องตัน โดยผู้ประกอบการและจะถูกจัดส่งอย่างเป็นระบบโดยผู้รับขนส่ง/จัดเก็บรายย่อยหรือ Collector เพื่อที่จะนำเข้คลังจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งคลังจัดเก็บจะมีกระบวนการบำบัดในเบื่องตัน เช่น แยกน้ำ และกรองสิ่งสกปรก ก่อนที่จะนำไปเก็บยังถังเก็บ และหลังจากนั้นจะถูกลำเลียงเข้ายังส่วนกำจัด/บำบัด น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายที่จะทำการกำจัด เช่น เผาเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาปูน หรือเผาทำลายในเตาเผา (ถ้ามีสารโลหะต่างๆ ตกค้างมาก) หรือนำไปบำบัดโดยผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆ ที่ได้มาตรฐานเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เช่น Re-Refining Plant (สิริพร, 2546)

การกำจน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยระบบผสมกากเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (fuel blending process) เป็นกระบวนการปรับสภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และ กากอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องทำลายด้วยการเผา ให้เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สามารถเผาทำลายในเตาเผาซีเมนต์ได้

เตาเผาซีเมนต์เป็นเตาที่มีอุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับเตาเผาขยะ ให้ความร้อนสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาการเผาไหม้นาน อินทรีย์สารจึงถูกทำลายได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีกากของการเผาไหม้เหลือเป็นเถ้า ให้ต้องกำจนอีก เพราะเถ้ากลายเป็นเถ้าปูนได้ และ ไม่มีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ด้วย วิธีนี้จึงเป็นการนำพลังงานมาใช้และลดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิง ปัจจุบันมีเตาเผาปูนซีเมนต์ที่ใช้งานอยู่แล้วเป็นจำนวนมากกระจายอยู่แทบทุกภาคของประเทศ วิธีการนี้เป็นที่ยอมรับกันแพร่หลาย ทั้งในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น เพราะไม่มีผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติของผลผลิต

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเกรด FB 20: เพื่อใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์

คุณลักษณะ	หน่วย	คุณสมบัติ
ค่าพลังงานความร้อน (Heat Content)	กิโลแคลอรี/กิโลกรัม	ไม่น้อยกว่า 10,000
คลอรีน/โบรมีน (Chlorine/Bromine)	% น้ำหนัก	ไม่น้อยกว่า 0.10
ซัลเฟอร์ (Sulphur)	% น้ำหนัก	ไม่มากกว่า 1.00
โลหะหนักทั้งหมด (Total Heavy Metals)	% น้ำหนัก	ไม่มากกว่า 0.10
ปริมาณเถ้า (Ash Content)	% น้ำหนัก	ไม่มากกว่า 1.00
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6-8
จุดวาบไฟ (Flash Point)	องศาเซลเซียส	ไม่น้อยกว่า 100
ค่าความหนืด (Viscosity)	เซนติพอยต์	ไม่มากกว่า 200
ความหนาแน่น (Density)	กรัม/มิลลิลิตร	ปริมาณ 0.9

ที่มา: Thailand's Oil Business (2551)

น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีสารจำพวกโลหะหนักและสารก่อมะเร็งที่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีค่าความร้อนสูง สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เพราะฉะนั้นการเททิ้งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นการสูญเสียทรัพยากร

อีกด้วย ดังนั้นเมื่อต้นปี 2542 กรมโรงงานฯ จึงได้จัดทำโครงการ "รวมใจประสานจัดการ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว" เป็นระยะเวลา 1 ปี เพื่อเป็นโครงการนำร่องในการบริหารจัดการ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้เป็นระบบครบวงจรและถูกต้องตามหลักวิชาการครอบคลุมพื้นที่ 10 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ ปริมณฑลและจังหวัดในภาคตะวันออก โดยความร่วมมือจากกลุ่มบริษัท น้ำมัน และกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ให้ประสานงานกับสถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิงและ ศูนย์บริการรถยนต์ในสังกัดให้ดำเนินการขออนุญาตเป็นผู้ครอบครองน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อกรม โรงงานอุตสาหกรรม และเข้าร่วมโครงการโดยขอให้จำหน่ายน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้กับบริษัท บริหารและพัฒนาการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) ในราคาลิตรละ 1 บาท เพื่อนำไปผสม กับกากอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 4:1 และนำไปจำหน่ายต่อให้กับกลุ่มบริษัทปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็น เชื้อเพลิงในเตาเผาปูนซีเมนต์ (Thailand's Oil Business, 2551)

9. ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่รั่วไหลสู่ระบบนิเวศจากการจัดการที่ไม่ถูกต้อง สารประกอบที่อยู่ใน น้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะสารเติมแต่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างรุนแรง โดยสามารถ สร้างผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนี้ (ศูนย์แลกเปลี่ยนวัสดุเหลือ ใช้ สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2546)

9.1 ผลกระทบต่อดินและน้ำใต้ดิน

9.1.1 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ตกค้างบนพื้นดิน มักจะไม่รวมตัวกับสารประกอบใน ดิน แต่จะแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างดิน ทำให้ดินจับตัวกันเป็นก้อนไม่มีช่องว่างอากาศ ส่งผลให้ สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในดิน เช่น ไส้เดือน แมลงขนาดเล็ก ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และทำให้ต้นพืชและ เมล็ดพืชไม่สามารถนำแร่ธาตุในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นไปใช้ได้ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว บางส่วนจะระเหยไปเป็นมลสารขนาดเล็กในอากาศ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์ที่สูดดมหรือ หายใจเข้าไป

9.1.2 เมื่อมีการปลูกพืชบนดินที่มีน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วตกค้าง สารเพิ่มคุณภาพและ สารไฮโดรคาร์บอนบางชนิดในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจะถูกดูดซึมไปสะสมอยู่ตามบริเวณต่างๆ ของพืช ในกระบวนการสร้างอาหาร นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบางประเภทอาจมีการ ปนเปื้อนสารพิษ เช่น โลหะหนัก ซึ่งจะสะสมในดินและถูกดูดซึมโดยพืช

9.1.3 เมื่อฝนตกน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบางส่วนที่ตกค้างบนผิวดิน จะถูกชะล้างโดยน้ำฝนแพร่กระจายลงแหล่งน้ำผิวดินและซึมผ่านชั้นดินไปปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรง เนื่องจากแหล่งน้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำที่ใช้อุปโภคและบริโภคโดยตรงของมนุษย์

9.1.4 น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในแหล่งน้ำใต้ดินมีระยะเวลาในการตกค้างมากที่สุด เนื่องจากน้ำใต้ดินมีการเคลื่อนตัวช้ามาก ทำให้ไม่มีการหมุนเวียนและการระบายสารปนเปื้อนออก การบำบัดด้วยสารเคมีหรือใช้แบคทีเรียในการกำจัดสารพิษทำได้ยาก เพราะไม่มีอากาศช่วยในการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

9.2 ผลกระทบต่อแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

9.2.1 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 1 ลิตร ที่รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะทำให้น้ำมันสีและกลิ่นเหม็นไม่เหมาะแก่การใช้งานเป็นปริมาณถึง 2.5 แสนลิตร

9.2.2 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 1 ลิตรสามารถปกคลุมผิวน้ำในบริเวณ 2.5 ไร่ ซึ่งกีดขวางการละลายของออกซิเจนจากอากาศเข้าไปในน้ำ ทำให้สิ่งมีชีวิตที่จำเป็นต้องใช้ก๊าซออกซิเจน ในการดำรงชีวิตอาจตายได้ เช่น ปลา นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อกระบวนการสร้างอาหารของพืชน้ำ และกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำ ซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบในการทำปฏิกิริยาเคมี

9.2.3 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่เคลือบผิวน้ำจะกีดขวางการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ไปยังไดน้ำ ซึ่งเป็นการตัดปัจจัยในการสร้างอาหารของพืชน้ำที่เป็นห่วงโซ่แรกในระบบนิเวศ และขัดขวางการฟูดขึ้นมาหาอาหารและหายใจของปลาบางชนิด ขัดขวางการวางไข่ของปลาบางชนิดบนผิวน้ำและการวางไข่ของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ รวมทั้งละลายไขมันที่เคลือบปีกสัตว์ปีก เช่น เป็ด ห่าน นกนางนวล เป็นต้น ทำให้สัตว์เหล่านี้ไม่สามารถลอยตัวและหาอาหารในน้ำได้

9.2.4 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น เมื่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสะสมอยู่ในร่างกาย ทำให้เปลือกไข่ของสัตว์นั้นบางลง ไข่มีขนาดเล็กลง ปริมาณในการวางไข่แต่ละครั้งลดลง

9.2.5 สารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสามารถรวมตัวกับน้ำเป็นสารประกอบใหม่ที่สามารถตกค้างเป็นเวลานาน พืชน้ำและสัตว์น้ำที่ไม่สามารถปรับตัวให้ต้านทานสารพิษเหล่านั้นได้จะตายและทำให้น้ำเน่าเสีย หากพืชน้ำและสัตว์น้ำบางส่วนที่สามารถปรับตัวสร้างความต้านทานมลพิษที่เกิดขึ้นจะเป็นพาหะในการนำสารพิษมาสู่มนุษย์จากการบริโภค

9.3 ผลกระทบต่อสุขภาพ

9.3.1 หากต้องสัมผัสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ผิวจะแห้งแตก ระคายเคือง เป็นผื่นแดง เนื่องจากน้ำมันจะชะล้างไขมันตามธรรมชาติออกจากผิวหนัง ทำให้ผิวหนังบริเวณนั้นเกิดการติดเชื้อและการแพ้ได้ง่าย

9.3.2 หากสูดดมไอระเหยของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดการวิงเวียน คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ง่วงนอน ตาแดง ระคายเคืองระบบหายใจ

9.3.3 หากรับประทานอาหารที่มีน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย สารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้องและท้องเสีย

9.3.4 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่สะสมในร่างกายจากการสูดดม การสัมผัสและการรับประทานติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ ระบบประสาท ระบบทางเดินหายใจ ระบบเลือด และระบบทางเดินอาหารทั้งมนุษย์และสัตว์เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคมะเร็ง

10. กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจัดเป็นวัตถุอันตราย ชนิดที่ 3 อยู่ในบัญชี ข. แนบท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องบัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย พ. ศ. 2538 ลำดับที่ 1 หมวดของเสียเคมีวัตถุ และเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัตถุที่ไม่ใช้แล้วชนิดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ. ศ. 2540 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัตถุที่ไม่ใช้แล้ว มีผลให้สถานประกอบการใดๆ ที่มีเก็บปริมาณตั้งแต่ 20 กิโลกรัม หรือ 20 ลิตร ขึ้นไป จะต้องยื่นขออนุญาตมีไว้ครอบครองวัตถุอันตรายน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ยกเว้น สถานประกอบการที่มีกฎหมายเฉพาะควบคุมซึ่งได้กำหนดกรรมวิธีบำบัด หรือกำจัดวัตถุนั้นแล้ว ซึ่งได้แก่ สถานให้บริการน้ำมันที่มี

บริการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และศูนย์บริการรถยนต์ รถจักรยานยนต์ ยี่ห้อต่างๆ (จันทิรา, 2551)

11. ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของน้ำมัน (ชรินทร์, 2533)

11.1 ประเภทของการรั่วไหล จากลักษณะการรั่วไหลว่าเกิดการรั่วไหลทันทีและในระยะเวลาสั้น หรือรั่วไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากเกิดในกรณีหลังโอกาสที่พื้นที่แพร่กระจายจะมากกว่ากรณีแรก

11.2 ประเภทของน้ำมัน น้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์น้ำมันเมื่อรั่วไหลในปริมาณที่เท่ากัน ขนาดพื้นที่ที่แพร่กระจายจะไม่เท่ากัน เพราะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะด้านความหนืด (kinematic viscosity) น้ำมันที่มีความหนืดสูงกว่าจะมีแรงต่อต้านการไหลสูงกว่าน้ำมันที่มีความหนืดต่ำกว่า

11.3 สถานที่ ลักษณะของพื้นที่มีอิทธิพลที่สำคัญต่อการแพร่กระจายของน้ำมันเป็นอย่างมาก โดยพื้นที่ที่มีความลาดชันจะมีผลทำให้น้ำมันแพร่กระจายได้รวดเร็วกว่าพื้นที่ที่เป็นที่ราบ หรือน้ำมันที่รั่วไหลลงสู่แม่น้ำจะมีพื้นที่แพร่กระจายตามรูปแบบของลำน้ำ ต่างจากน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลรูปแบบการแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นกับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม

11.4 ระยะเวลาที่เกิด ระยะเวลาที่เกิดการรั่วไหลจะเป็นดัชนี ช่วยทำให้การคาดการณ์ เป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น หากตัดปัจจัยด้านอื่นออกหมดอาจกล่าวได้ว่าพื้นที่แพร่กระจายของน้ำมันจะแปรผันตามระยะเวลาที่เกิดการรั่วไหลนั่นเอง

11.5 สภาพแวดล้อม เงื่อนไขสภาพอากาศ ลักษณะอุทกวิทยาสมุทรศาสตร์ เป็นข้อมูลในลักษณะที่เคลื่อนไหวตลอดเวลา มีอิทธิพลอย่างมากต่อทิศทางและการเคลื่อนตัวของมวลน้ำมันในน้ำ และกรณีที่น้ำมันรั่วไหลลงสู่พื้นดินก็จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพของดินด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถคาดการณ์การแทรกซึมของน้ำมันลงสู่ดินว่าจะมีทิศทางการแพร่กระจาย

คุณสมบัติของดิน

ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่ กับ อินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน เกิดขึ้นเป็นชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มผิวโลก (ศุภมาส, 2535) ในทางวิศวกรรม ดิน คือ วัสดุอะไรก็ตามที่ตกตะกอนและทับถมกันไม่แน่น เช่น กรวด ทราย ตะกอนทราย และดินเหนียว หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านั้น ซึ่งอาจเป็นพวกที่มีความเชื่อมแน่น (cohesion) หรือไม่มี ความเชื่อมแน่น (cohesionless) ก็ได้ (มณฑิธร, 2539)

1. องค์ประกอบของดิน (กฤตินี, 2539)

1.1 แร่ธาตุ นับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและมีปริมาณมากที่สุดถึงร้อยละ 45 ประกอบด้วยหิน และแร่ธาตุ ปะปนกัน ในดินแต่ละที่จะมีความแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ องค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อความหนาแน่น ความละเอียดของเนื้อดิน การระบายอากาศ พืชในดิน เป็นต้น

1.2 อินทรีย์สาร เกิดจากซากหรือผลผลิตของสิ่งมีชีวิต มีประมาณร้อยละ 5 ซึ่งสารอินทรีย์นี้จะช่วยให้สภาพของดินเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในดิน โดยเฉพาะพวกที่ต้องการ สารอินทรีย์ในการดำรงชีพ (heterotrophic bacteria)

1.3 น้ำในดิน น้ำจะอยู่ตามช่องว่างภายในดิน (soil pore) เป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อพืช ในการช่วยละลายแร่ธาตุในดิน น้ำในดินมีอยู่ประมาณร้อยละ 25 โดยจะอยู่ใน 3 รูปแบบ คือ แอ็ดฮีชัน วอเตอร์ (adhesion water) หมายถึง น้ำที่ถูกดูดซับโดยอนุภาคของดินเป็นแผ่นบางๆ หุ้มอยู่รอบอนุภาคของดินมีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงน้อยมากไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช โคฮีชัน วอเตอร์ (cohesion water) หมายถึง น้ำที่ถูกยึดโดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดินอีกทีหนึ่ง ซึ่งอยู่ในช่องว่างของอนุภาคดิน น้ำประเภทนี้มีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นพืชสามารถนำไปใช้ได้ และแกรวิเทชัน วอเตอร์ (gravitation water) หมายถึง น้ำที่จะเคลื่อนตัวตามช่องว่างขนาดใหญ่ของดินซึ่งมีผลกระทบต่อการระบายอากาศของดิน น้ำประเภทนี้ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช

1.4 อากาศ ดินโดยทั่วไปจะมีอากาศแทรกอยู่ประมาณร้อยละ 25 ซึ่งจะประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดจะแทรกอยู่ตามช่องว่างในดิน ถ้าในดินมีน้ำมากอากาศในดินจะมีน้อย เนื่องจากน้ำเข้าไป

แทนที่อากาศในช่องว่างของดิน อากาศถูกไล่ออกไป ซึ่งจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในดิน ก๊าซที่มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ ได้แก่ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในที่ที่มีออกซิเจนปริมาณไม่เท่ากันจะแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณอากาศในดินแต่ละตำแหน่งจะเป็นตัวกำหนดชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ในดิน (กฤตินี, 2539 และ พงษ์สิทธิ์, 2546)

1.5 สิ่งมีชีวิตในดิน มีตั้งแต่ขนาดใหญ่ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดเล็กมาก คือ พวกรูทจุลินทรีย์ สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีการดำรงชีวิตอยู่ในลักษณะที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิตอื่น (symbiosis) และมีบทบาทสำคัญในการแปรสภาพก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีในดิน สิ่งมีชีวิตในดินถ้าเปรียบเทียบกับเป็นปริมาณทั้งหมดของดินจะมีเพียงร้อยละ 1 แต่นับว่ามีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินเป็นอย่างยิ่ง (กฤตินี, 2539 และ พงษ์สิทธิ์, 2546)

2. สมบัติของดิน

2.1 สมบัติด้านฟิสิกส์

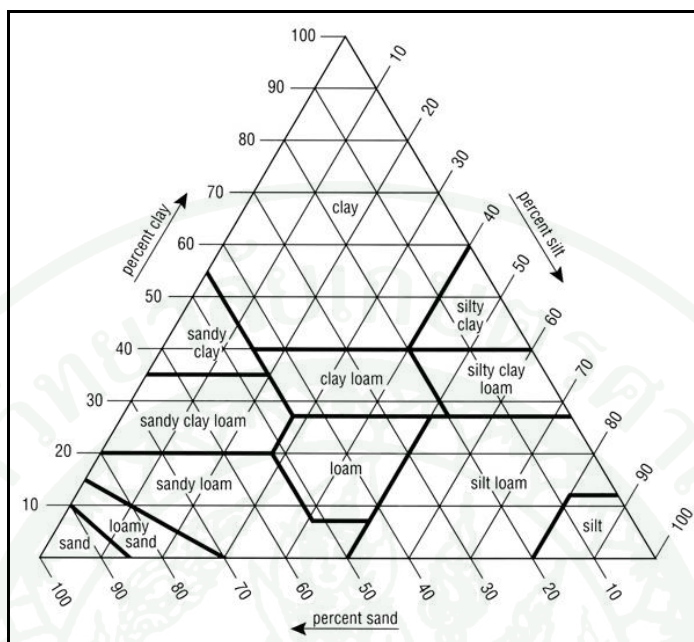
เนื้อดิน หมายถึง สัดส่วนสัมพัทธ์ของอนุภาคในกลุ่มขนาดทราย ซิลต์และดินเหนียว ซึ่งเนื้อดินจะเป็นประเภทใดขึ้นอยู่กับสมบัติเด่นของกลุ่มขนาดหลักในดินชนิดนั้น ในสภาพดินธรรมชาติที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ นั้น หากอนุภาคในกลุ่มขนาดใดมีอยู่เป็นจำนวนมากถือเป็นกลุ่มขนาดหลักของดิน ดินประเภทนั้นย่อมมีสมบัติโน้มไปทางลักษณะเด่นแสดงออกมาให้เห็นได้ โดยเนื้อดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้ (สุกมาศ, 2539)

2.1.1 ดินเนื้อหยาบหรือดินทราย ลักษณะเด่น คือ จับดูจะสากมือ เมื่อขึ้นจะไม่เหนียว ดินมือ อุ่นน้ำได้น้อย แต่ระบายอากาศได้ดี เป็นต้น

2.1.2 ดินร่วน หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคใหญ่กลุ่มทราย ซิลต์ และดินเหนียว ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด หรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

2.1.3 ดินเนื้อละเอียด หรือดินเหนียว ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ จะแข็งเมื่อแห้ง ปั้นเป็นเส้นได้ยาวเมื่อขึ้น เหนียวเหนอะหนะเมื่อเปียก อุ่นน้ำได้มาก แต่ระบายอากาศได้ไม่ดี ไถพรวนลำบาก เป็นต้น

การแบ่งชนิดของเนื้อดินสามารถทำได้โดยใช้ไคอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงประเภทเนื้อดิน (ภาพที่ 1) ซึ่งแบ่งตามสัดส่วนของดินเหนียว ดินแป้ง และดินทราย (Alexander, 1977)



ภาพที่ 1 ไคอะแกรมสามเหลี่ยมแรงประเภทเนื้อดิน (soil texture triangle) ตามสัดส่วนโดยมวลของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว

ที่มา: Soil Survey Division Staff (1993)

วิธีการจำแนกชนิดของเนื้อดิน

1. จากจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินแป้งและลากเส้นตรงโดยให้เส้นขนานกับแกนของจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว
2. เส้นที่สองให้เริ่มจากจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว และลากเส้นตรงโดยให้เส้นขนานกับแกนของจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินทราย
3. เส้นที่สามให้เริ่มจากจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินทราย และลากเส้นตรงโดยให้เส้นขนานกับแกนของจำนวนเปอร์เซ็นต์ของดินแป้ง
4. จุดตัดคือ ชื่อชนิดของเนื้อดินชนิดนั้นๆ

เนื้อดินบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อินทรีย์อย่างหยาบได้ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมากอยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักปริมาณมาก ดินที่มีเนื้อละเอียดขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น หากอนุภาคในดินเกาะยึดกันเองเป็นเสถียร (stable aggregate) จะมีความพรุน

สูงมาก ในทางตรงกันข้ามหากไม่เกาะยึดกัน ลักษณะเช่นนี้จะแน่นทึบมาก น้ำและอากาศไหลทะไหลยากมาก ดินเนื้อละเอียดจะมีช่องขนาดเล็กมากกว่า มีความสามารถที่อุ้มน้ำเป็นประโยชน์ (Available Water Capacity: AWC) ต่อพืชมากกว่าเนื้อดินกับการดูดซับและดูดซึม ในดินตัวดูดซับคืออนุภาคดินเหนียวและอนุภาคอินทรีย์วัตถุ ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวมาก จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มาก ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินเนื้อหยาบ ในดินเนื้อหยาบจะมีอัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุสูงกว่า เพราะมีการกระจายอากาศที่ดีกว่า ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อยกว่าดินเนื้อละเอียด

2.2 สมบัติด้านเคมี

2.2.1 ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (soil pH) ดินเป็นสิ่งที่มีความทั้งประจุบวกและลบ แต่มีค่าประจุลบมากกว่า ธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก จึงถูกดินดูดซับเอาไว้ ธาตุอาหารที่ถูกดินดูดซับเอาไว้ย่อมมีโอกาสให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้ ดินบริเวณที่เป็นดินตะกอนน้ำทะเล (marine deposits) จะเป็นดินที่มีความเข้มข้นของเกลือสูง มีสารประกอบไพไรต์ (pyrite: FeS_2) ความเป็นกรดเป็นด่างจะมีค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 2.5-6.0 (สันท, 2532) สำหรับดินบริเวณที่ห่างฝั่งทะเล ส่วนใหญ่เกิดจากตะกอนแม่น้ำ ความเป็นกรดเป็นด่างจะอยู่ในช่วง 7 - 8.5 สภาพดินเป็นกลางปริมาณเกลือในดินปานกลางถึงสูง (เอิบ, 2533)

2.2.2 สภาพออกซิเดชันรีดักชันของดิน (soil oxidation reduction) สถานะออกซิเดชัน (oxidation state) เป็นผลมาจากการระบายน้ำและอากาศของดิน ซึ่งสภาพอากาศในดินเป็นตัวกำหนดชนิดจุลินทรีย์ในดินที่จะเป็นตัวกลางย่อยสลายสารอินทรีย์ และการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในดิน หากดินมีการระบายอากาศที่ดี การสลายตัวของคาร์บอนอินทรีย์ย่อมจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากดินขาดออกซิเจน การสลายตัวจะไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้กรดอินทรีย์แทน ส่วนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน ไนโตรเจนอินทรีย์จะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียก่อน หากดินมีการถ่ายเทอากาศดีก็จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) โดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งก็คือการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรท แต่ถ้าดินเกิดขาดออกซิเจน จุลินทรีย์จะใช้ไนเตรทในกระบวนการหายใจอันเป็นกระบวนการรีดิวส์ไนเตรทนั่นเอง (ศุภมาส, 2539)

2.3 สมบัติด้านชีวภาพ

ดินเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากใช้เป็นที่อยู่อาศัย สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางด้านการอำนวยความสะดวกและการเกิดโทษ สิ่งมีชีวิตต่างๆ ในดิน ได้แก่

2.3.1 แบคทีเรีย ขนาดเล็กมาก มีปริมาณมากที่สุดในดิน แต่ถ้าสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมจำนวนของแบคทีเรียอาจลดลงได้อย่างมาก แบคทีเรียซึ่งแบ่งตัวแบบเป็นสองเท่า (binary fission) สามารถแบ่งตัวได้ในเวลาอันรวดเร็ว จึงสามารถเปลี่ยนแปลงสารอาหารของมัน เช่น ซากพืช ซากสัตว์ให้เห็นได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง โดยทั่วไปแล้วจำนวนประชากรของมันจะถูกควบคุมโดยแหล่งพลังงาน จึงเป็นเหตุผลอธิบายได้ว่า ทำไมเมื่อเติมซากอินทรีย์ลงไปในดิน มวลของแบคทีเรียจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.3.2 แอคติโนไมซีต แอคติโนไมซีตมีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรียมากแต่มีจำนวนน้อยกว่าแบคทีเรีย ขนาดเซลล์เดี่ยวๆ ของมันจะใกล้เคียงกับขนาดของแบคทีเรีย แต่มีความยาวคล้ายเส้นด้ายและมีกิ่งก้าน น้ำหนักทั้งหมดของแอคติโนไมซีตใกล้เคียงกับแบคทีเรียโดยชอบอาศัยอยู่ในสภาพที่มีความชื้นต่ำ และพบมากในระยะท้ายๆ ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน ทั้งนี้เพราะมันมีความสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก

2.3.3 เชื้อรา โดยทั่วไปเชื้อราจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วหลังระยะการย่อยสลายอินทรีย์สาร จนสามารถสังเกตเห็นเส้นใยใต้บนผิวดิน ปริมาณเชื้อราจะมีน้อยกว่าแบคทีเรียและแอคติโนไมซีตมาก แต่มวลรวมของเชื้อราจะมีมากกว่า เพราะเชื้อรามีกระจุกใยรา (mycelium) จำนวนมาก สามารถเติบโตแข่งขันกับแบคทีเรียได้ในสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ซับซ้อน เชื้อราหลายชนิดสามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้โดยไม่ยาก เชื้อรามีความต้องการไนโตรเจนในการเจริญเติบโตในปริมาณที่น้อยกว่าแบคทีเรียมาก

2.3.4 สัตว์ขนาดเล็กในดิน มีอยู่เป็นจำนวนมาก มีบทบาทในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ หรือซากพืช ซากสัตว์ในดิน ได้แก่ สัตว์เซลล์เดียว (protozoa) ไส้เดือนฝอย (nematode) และไส้เดือน สัตว์เหล่านี้ช่วยย่อยสลายอินทรีย์สาร แต่สัตว์เซลล์เดียวและไส้เดือนฝอยหลายชนิดสามารถทำลายพืชที่ปลูกได้

3. ประเภทของจุลินทรีย์ในดิน

จุลินทรีย์ในดินแบ่งตามลักษณะการเจริญเติบโตได้ ดังนี้

3.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) จุลินทรีย์ประเภทที่ใช้ออกซิเจนจะใช้ออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้น ในดินที่มีการถ่ายเทอากาศดี ได้รับอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ (organic waste) ไม่มากเกินไป การย่อยสลายสารอินทรีย์จะดำเนินไปด้วยจุลินทรีย์ประเภทนี้ แต่ในสภาพอับอากาศ เช่น การระบายอากาศไม่ดีจนขาดออกซิเจน จะมีจุลินทรีย์ประเภทที่ไม่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตได้ จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถย่อยสลายซากสารอินทรีย์ได้โดยใช้สารอื่นในกระบวนการหายใจ อาทิ เช่น ใช้ไนเตรท ซัลเฟต เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน ในสภาพดินไรจะมีจุลินทรีย์ประเภทใช้ออกซิเจนอยู่มากที่สุด และมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายซากอินทรีย์สารใดๆ ที่ใส่ลงในดิน

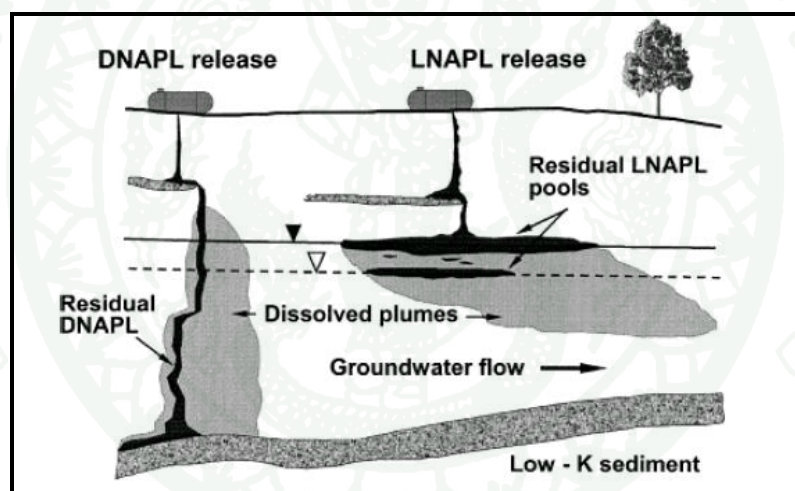
3.2 จุลินทรีย์ที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotrophic bacteria) และจุลินทรีย์ที่สร้างอาหารเองได้ (autotrophic bacteria) จุลินทรีย์ประเภทสร้างอาหารเองไม่ได้จะได้แหล่งคาร์บอน และพลังงานจากการย่อยสลายซากอินทรีย์ ส่วนประเภทสร้างอาหารเองได้จะได้รับพลังงานจากการออกซิไดซ์อนินทรีย์สาร และแหล่งพลังงานส่วนใหญ่จะได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ ในการย่อยสลายซากพืช ซากสัตว์ หรือขยะอินทรีย์จะเป็นกิจกรรมของจุลินทรีย์ประเภทสร้างอาหารเองไม่ได้ ส่วนประเภทสร้างอาหารเองได้จะเป็นตัวการสำคัญในการเปลี่ยนรูป (transformation) ของอนินทรีย์สารในดิน

3.3 จุลินทรีย์ชนิดไซโครฟิลิก (psychrophilic bacteria) จุลินทรีย์ชนิดเมโซฟิลิก (mesophilic bacteria) และจุลินทรีย์ชนิดเทอร์โมฟิลิก (thermophilic bacteria) จุลินทรีย์ประเภทไซโครฟิลิกจะเจริญเติบโตได้ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ประเภทเมโซฟิลิกจะเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส และประเภทเทอร์โมฟิลิกจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส ปรกติจุลินทรีย์ประเภทเมโซฟิลิกมีอยู่มากที่สุดในดิน เมื่อมีการย่อยสลายของกองอินทรีย์สาร เช่น กองปุ๋ยหมัก อุณหภูมิอาจสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงขีดที่จุลินทรีย์ประเภทเทอร์โมฟิลิกมีปริมาณอยู่มากที่สุด

4. การเคลื่อนตัวของน้ำมันในดิน (motion of oil spill in subsoil)

เนื่องจากน้ำมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวจากน้ำ โดยเรียกตามลักษณะของสารประกอบนี้ว่า non-aqueous phase liquid (NAPL) โดยมีการแบ่งชนิดของ NAPL ตามความหนาแน่นเป็น 2 ชนิด (เกรียงศักดิ์, 2546) ดังแสดงในภาพที่ 2 ได้แก่

1. Light non-aqueous phase liquid (LNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบา คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม
2. Dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ โดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent

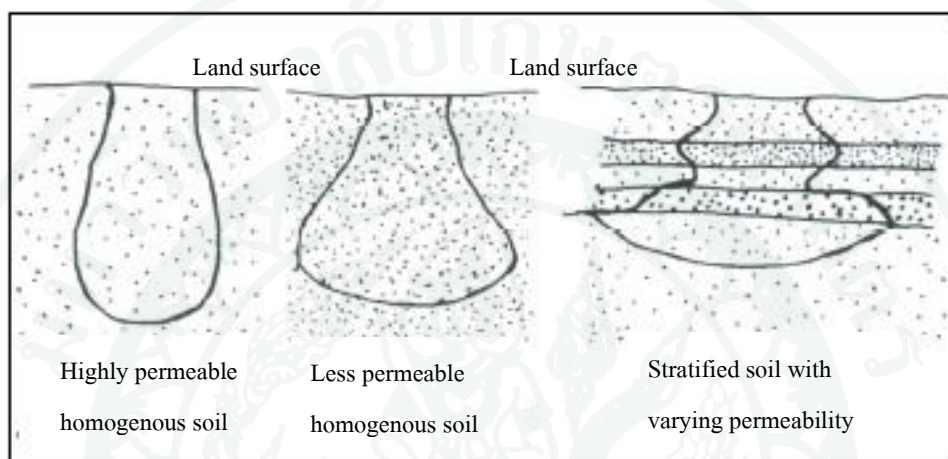


ภาพที่ 2 ลักษณะการรั่วไหลของสาร DNAPL และ LNAPL

ที่มา: Molson *et al.* (2002)

น้ำมันเมื่อหกหรือรั่วไหลลงบนพื้นดิน บางส่วนจะซึม (percolation) ลงตามช่องว่างของดิน (permeable soil) ลงตามแฉะด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และบางส่วนจะซึมออกด้านข้างของชั้นดิน ตามช่องว่างหรือรอยแยก (fissure) ของเนื้อดิน เมื่อเวลาผ่านไปจะไม่ยอมให้น้ำมันซึมผ่าน เนื่องจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำมันเร็วกว่าดินส่วนอื่น เช่นนี้เรียกว่า residual saturation

ขนาดและรูปแบบของน้ำมันเมื่อซึมลงในดิน ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของดิน เช่น เนื้อดิน ความหนาแน่นของดิน ความพรุนของดิน เป็นต้น รวมถึงชนิดและปริมาณของน้ำมันที่ซึมลงดิน โดยดินที่มีช่องว่างในดินสูง น้ำมันที่ซึมผ่านลงในดินจะมีรูปแบบคล้ายทรงกระบอกส่วนดินที่มีช่องว่างในดินน้อยจะมีรูปแบบการซึมคล้ายรูปทรงกรวย ดัง



ภาพที่ 3 รูปแบบของน้ำมันที่ซึมลงในดินที่มีช่องว่างในดิน (Soil Permeability) แตกต่างกัน

ที่มา: ชรัตน์ (2533)

อัตราการแทรกซึมของน้ำมัน (rate of penetration) ในดินจะสูงหรือต่ำขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำมันและคุณสมบัติทางกายภาพของดินนั้นๆ คือ ดินที่มีกรวดหรือทรายหยาบมาก น้ำมันสามารถแทรกซึมผ่านได้ในอัตราสูงกว่าดินที่มีอนุภาคดินเหนียวสูง นอกจากนี้ อัตราการแทรกซึมรวมทั้งขบวนการแทรกซึมของน้ำมันจะสิ้นสุดเมื่อ

1. ชั้นดินเต็มไปด้วยน้ำมัน ไม่สามารถระบายออกสู่ชั้นดินบริเวณใกล้เคียงได้
2. น้ำมันแทรกซึมถึงชั้นน้ำใต้ดิน
3. เกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำมัน (residual saturation) ในอนุภาคดิน

เมื่อน้ำมันเกิดการปนเปื้อนในดิน จะกระจายตัวในบริเวณต่างๆ ได้แก่ 1) ดูดซับติดกับผิวหน้าอนุภาคดิน 2) สร้างพันธะเชื่อมระหว่างอนุภาคดิน และ 3) แยกตัวอยู่บริเวณช่องว่างอนุภาคดิน โดยช่องว่างของอนุภาคดินพบน้ำมันใน 3 สถานะ คือ ละลายกับน้ำ แยกตัวออกจากน้ำ (NAPL)

และแก๊ส ซึ่งสามารถเกิดพร้อมกันได้ น้ำมันที่ตกค้างในดินนั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และเป็นโซ่ยาว โดยมีแรงต่างๆที่ควบคุมการดูดซับได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์อย่างอ่อน (weak van der waal) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen binding) และ พันธะน้ำและแคตไอออน (water and cation binding) (Yong *et al.*, 1994)

การเปลี่ยนรูปของน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนสามารถระเหยออกจากดินได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางชีวภาพและเคมี ประกอบด้วย 1) คุณสมบัติของน้ำมันที่ตกค้าง เช่น จุดเดือด ความดันไอ และค่าคงที่ของ Henry's law 2) สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ประเภทดิน ความชื้นในดิน และความเข้มข้นและความลึกของน้ำมันที่ปนเปื้อน อัตราการระเหยจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีความดันไอ และค่าคงที่ของ Henry's law สูง ดินปนเปื้อนเป็นดินทราย อากาศแห้งแล้ง และความเข้มข้นของน้ำมันที่ปนเปื้อนดินสูง (Lyman *et al.*, 1992)

การเปลี่ยนรูปน้ำมันไปสู่รูปอื่นๆ ได้แก่ การดูดซับ การระเหย ปฏิกิริยาเคมี การย่อยสลายโดยแสง และการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน ความเข้มข้นของน้ำมัน ระยะเวลาที่น้ำมันปนเปื้อนดิน

Pitter and Chudoba (1990) กล่าวว่าสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วย

1. ความชื้นเหมาะสม
2. มีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายน้ำมันได้
3. มีสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ (ฟอสเฟต แอมโมเนีย และสารอินทรีย์คาร์บอน)
4. มีสารอาหารรองสำหรับจุลินทรีย์ (กรดอะมิโน และวิตามิน)
5. อุณหภูมิอบอุ่น ($27 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (Mohammed *et al.*, 1992))
6. ความเป็นกรด-ด่าง ของดินเป็นกลาง
7. ดินระบายอากาศได้ดี
8. สารปนเปื้อนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
9. ปริมาณการปนเปื้อนน้ำมันสูงกว่าร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

5. ความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์และเขตรากพืช

เขตรากพืช (rhizosphere) เป็นบริเวณดินที่ห่อหุ้มราก ซึ่งมีกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณโดยรอบ ซึ่งจะเพิ่มอิทธิพลของสารอาหาร (โดยเฉพาะ ไนโตรเจน) ให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น มีการใช้คำว่า เขตรากพืช เพื่อให้ตรงกับคำว่า rhizosphere (ศุภมาส, 2529) ในปัจจุบัน เขตรากพืชมีคำจำกัดความที่กว้างขึ้นหมายถึงปริมาณดินทั้งหมดในบริเวณใกล้รากพืช จะครอบคลุมพื้นที่ห่างจากรากพืชอย่างน้อย 1 หรือ 2 มิลลิเมตร นับจากผิวราก ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และลักษณะของดินทั้งทางด้านชีวภาพ เคมี และกายภาพ โดยใช้ปริมาณจุลินทรีย์กำหนดขอบเขตบริเวณเขตรากพืช แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เขตรากพืชภายใน (inner rhizosphere) ได้แก่ พื้นที่ผิวรากของพืช และ เขตรากพืชภายนอก (outer rhizosphere) ได้แก่ บริเวณห่อหุ้มรากรวมถึงดินที่เกาะติดกับราก ซึ่งเรียกดินเขตรากพืชว่า rhizospheric soil

บทบาทเขตรากพืชและจุลินทรีย์

สารที่ขับจากรากพืช (root exudates) มีลักษณะคัดเลือกชนิดของจุลินทรีย์ คือจะพบแบคทีเรีย ประเภท short, gram-negative rods อยู่ปริมาณมาก จากการประมาณด้วยวิธีนับโคโลนีจากจานเพาะเชื้อ (plate count) ปริมาณมากกว่า 10^9 ต่อกรัมของดิน สำหรับรา แอคติโนมัยซีต และโปรโตซัว พบในปริมาณน้อยมาก

สารขับจากรากพืชเป็นสารที่ละลายน้ำได้ (water-soluble) และ สารประกอบที่สามารถแพร่ได้ (diffusible compound) มีหลายชนิด จัดเป็นกลุ่มหลักๆ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เปปไทด์ เอไมน์ วิตามิน กรดอินทรีย์ นิวคลีโอไทด์ ฟาโวนิน (Urin, 2001) แต่ในทางปฏิบัติได้รวมเอาสารอินทรีย์เอาไว้ด้วย ได้แก่ root lysate เมือกหุ้มราก (mucilate) เศษเยื่อหุ้มเซลล์ (cell wall residues) และ เซลล์ที่หลุดลอกจากราก (sloughage)

สารอินทรีย์ที่สำคัญได้แก่เมือกหุ้มราก (mucilate หรือ mucigel) เป็นสารที่ขับออกมาทำให้อนุภาคของดินเหนียวฟุ้งกระจาย เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวอนุภาคอันมีบทบาทต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารที่มีต่อพืช และยังทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันและหล่อลื่นแก่ราก เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ใกล้บริเวณราก และ sloughage cell คือเซลล์ที่หลุดลอกจากราก ทั้งจากหุ้มรากและเนื้อเยื่อโดยรอบของราก เซลล์ที่หลุดลอกออกนี้มีองค์ประกอบของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน จะทับถมและย่อยสลายกลายเป็นธาตุอาหารพืช (ศุภมาส, 2529) ซึ่งทั้งสารที่ขับจากราก

พืช และเซลล์ที่หลุดออกจากรากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 10-20 ของเนื้อเยื่อที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของพืชชนิดนั้นๆ (Schnoor *et. al.*, 1995)

Walton *et. al* (1994) พิจารณาว่าเมื่อเกิดสารกระตุ้นทางเคมีขึ้นในดินพืชจะตอบสนองโดยการสร้างสิ่งซึมเยิ้มขึ้น (exudates) ขึ้นในบริเวณเขตรากพืช มีผลทำให้จุลินทรีย์บริเวณนั้นย่อยสลายสารพิษได้มากขึ้น เพราะสารประกอบหรือเอนไซม์ที่หลั่งจากรากพืชได้ถือว่าเป็นเชื้อเพลิงและสัมพันธ์กับการย่อยสลายทางชีวภาพบริเวณเขตรากพืช

การบำบัดด้วยพืช

การบำบัดด้วยพืช (phytoremediation) คือ การใช้พืช และบริเวณเขตรากพืช (rhizosphere) นั้นๆ มาช่วยบำบัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยการกำจัด ลดความเป็นพิษ หรือเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปสารประกอบที่คงตัวยิ่งขึ้น ทำให้สารอินทรีย์ปนเปื้อนกระจายตัว ผ่านการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ ฟันฟูลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน และเพิ่มความชื้นให้แก่ดิน (Binet *et. al.*, 2000; Boyle and Shann, 1998) กระบวนการการบำบัดด้วยพืชเป็นกิจกรรมทางชีวภาพที่เกิดร่วมกันระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ในดินบริเวณเขตรากพืชและพืช (Oh, 2001) กระบวนการนี้สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (Seller, 1999) เช่น โลหะ สารปราบศัตรูพืช สารไวไฟ และน้ำมัน เป็นต้น (EPA, 1996)

กลไกการทำงานของ การบำบัดด้วยพืชประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพในบริเวณที่ปนเปื้อนสารพิษ (*In situ* bioremediation) โดยการเพิ่มอัตราการออกซิเดชันของแบคทีเรียที่ใช้สารประกอบคาร์บอนเป็นอาหาร และการดูดซับสารปนเปื้อนโดยรากพืช ซึ่งเรียกว่า การสกัดโดยพืช (phytoextraction) โดยมีขอบเขตการบำบัดตามความยาวของรากพืชในบริเวณที่เรียกว่าเขตรากพืช (Wong *et al.*, 1997) แต่การบำบัดด้วยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพดีในบริเวณที่มีสารปนเปื้อนเข้มข้นเล็กน้อย ถึงปานกลาง ซึ่งพืชจะมีการดูดซับสารพิษเมื่อมีการดูดน้ำ และสารอาหารในดินที่ปนเปื้อนเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืช หรือลดความเป็นพิษลง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซผ่านกระบวนการหายใจของพืช (EPA, 1996)

กลไกการบำบัดด้วยพืช สามารถแบ่งประเภทโดยวิธีการบำบัดสารปนเปื้อนนั่นๆ เช่น การสกัด การย่อยสลาย การกรอง การระเหย และการปรับให้เสถียร

การสกัดโดยพืช (phytoextraction) หรือที่เรียกอีกอย่างว่า การสะสมโดยพืช (phytoaccumulation) คือ การดูดซับและย้ายตำแหน่งของสารปนเปื้อนในดินโดยรากพืชไปสู่ส่วนอื่นๆ ของพืชที่โผล่พ้นดินขึ้นมา พืชที่ใช้ในการบำบัด เรียกว่า ไฮเปอร์แอคคูมูเลเตอร์ (hyperaccumulators)

การกรองโดยราก (rhizofiltration) คือ การดูดซับหรือการตกตะกอนบนรากพืช หรือการดูดซึมสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปสารละลายเข้าไปในรากพืช การกรองโดยรากคล้ายกับการสกัดโดยพืช แต่แตกต่างกันที่การกรองโดยรากนั้น พืชดูดซึมสารปนเปื้อนที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเป็นหลักมากกว่าในดิน การกรองโดยรากจะเกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนในน้ำรอบๆ บริเวณรากถูกดูดซับเข้าไปในรากหรือตกตะกอนบนรากพืช เนื่องจากกระบวนการไบโอติก (biotic) หรือ อะไบโอติก (abiotic) ซึ่งจากการดูดซับนั้นสารปนเปื้อนอาจจะอยู่ตามส่วนต่างๆ ของพืช การกรองโดยพืชเป็นการบำบัดแบบการจำกัดขอบเขตของสารปนเปื้อนโดยสารปนเปื้อนนั้นจะถูกตรึงหรือสะสมบนรากหรือภายในต้นพืช โดยตามธรรมชาติหากมีการตัดหรือการกำจัดต้นพืช สารปนเปื้อนที่สะสมอยู่ในต้นพืชนั้นก็就会被กำจัดไปด้วย

การย่อยสลายโดยพืช (phytodegradation) เป็นการทำลายสารปนเปื้อนโดยการนำไปใช้ของพืชรวมถึงกระบวนการเผาผลาญภายในต้นพืช นอกจากนี้เอนไซม์ที่ผลิตโดยพืชอาจจะทำลายสารปนเปื้อนที่เป็นเป้าหมาย กลไกหลักของวิธีนี้ คือ การดูดซับโดยพืช และการเผาผลาญ (metabolism) การย่อยสลายโดยพืชจะเหมาะสมอย่างมากสำหรับดินที่มีพื้นที่การปนเปื้อนมากและการปนเปื้อนไม่ลึกมาก สารประกอบที่นิยมใช้วิธีการนี้บำบัด เช่น ตัวทำละลายคลอรีเนตเต็ด ยาฆ่าวัชพืช ยาฆ่าแมลง และฟีนอล

การทำให้เสถียรโดยพืช (phytostabilization) ถูกนำมาใช้ในการบำบัดดิน ตะกอน และสลัดจ์ โดยสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินนั้นจะเกิดการดูดซับบนราก หรือการตกตะกอนของสารปนเปื้อนภายในบริเวณรากของพืช ปฏิกริยาทางเคมีและจุลชีววิทยาที่เกิดขึ้นบริเวณรากเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการทำให้เสถียรโดยพืชเพื่อบำบัดโลหะหนัก (สารหนู แคดเมียม โครเมียมทองแดง โปรทตะกั่ว และสังกะสี) ข้อเสียของการบำบัดแบบนี้ คือ สารปนเปื้อนที่ยังคงหลงเหลืออยู่ภายในบริเวณนั้นไม่สามารถจะกำจัดได้โดยตรง วิธีนี้อาจจะต้องการระยะเวลานานสำหรับการตรวจติดตามและการดูแลบำรุงรักษา เพื่อป้องกันสารปนเปื้อนที่อาจจะปลดปล่อยออกมาซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในอนาคต

การย่อยสลายโดยราก (rhizodegradation) เป็นการเปลี่ยนรูปที่แท้จริงของสารปนเปื้อนเพื่อทำลายผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในบริเวณราก บ่อยครั้งที่ใช้ศัพท์ว่าการย่อยสลายบริเวณราก (root-zone biodegradation) ที่ซึ่งรากจะผลิตบางสิ่งออกมา สิ่งที่เกิดออกมานี้ได้แก่ น้ำตาล กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ กรดไขมัน เอนไซม์ และสารประกอบอื่นๆ ข้อดีของการย่อยสลายโดยราก คือ สารปนเปื้อนจะถูกย่อยหรือเปลี่ยนรูปภายในพื้นที่ที่ปนเปื้อน นอกจากนี้กระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ (mineralization) จะทำให้สารปนเปื้อนเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย อย่างไรก็ตามการติดตั้งบริเวณรากให้แผ่ขยายออกไปอาจจะต้องอาศัยเวลา และบริเวณรากอาจจะถูกจำกัดเนื่องจากความชื้นของดิน ส่วนข้อเสีย คือ สิ่งที่รากปลดปล่อยออกมานั้นอาจจะไปส่งเสริมการเจริญเติบโตของประชากรจุลินทรีย์ซึ่งไม่มีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบที่เป็นเป้าหมาย นอกจากนี้จุลินทรีย์เหล่านี้อาจจะไปแย่งสารอาหารของพืชด้วย สารประกอบที่มีการปนเปื้อนแผ่เป็นบริเวณกว้างนิยมใช้วิธีนี้ในการกำจัด ซึ่งสารประกอบนั้น ได้แก่ ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (petroleum hydrocarbon) โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีน และตัวทำละลายคลอรีเนเตด

การเลือก และการออกแบบระบบการบำบัดด้วยพืช (Oh, 2001)

ข้อควรพิจารณาหลักในการเลือกระบบการบำบัดด้วยพืชประกอบด้วย

1. ประเภทของพื้นที่ และสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อน (น้ำ ดิน หรือ อากาศ)
2. ชนิดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อน
3. ศักยภาพในการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่ปนเปื้อน (เช่น ภูมิอากาศ ภูมิประเทศ)

ข้อจำกัดของการบำบัดด้วยพืช (Seller, 1999)

1. การประยุกต์นำมาใช้ในพื้นที่ ต้องการการเลือกชนิดของพืช การทดลอง และความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการเกษตรกรรม เหมาะสมกับการบำบัดสารปนเปื้อนชนิดนั้น
2. ความสามารถของรากพืชที่จะซอนไชลงสู่ดินและน้ำใต้ดินค่อนข้างน้อย โดยปกติน้อยกว่า 3 ฟุต และ 10 ฟุต ตามลำดับ
3. ระดับความเป็นพิษของสารปนเปื้อนมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช

4. สารปนเปื้อนที่สะสมในเนื้อเยื่อของพืช ยังคงต้องมีการบำบัด การกำจัดต่อไป ซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มในส่วนนี้
5. สารปนเปื้อนจะปลดปล่อยออกมาจากดินไปสู่น้ำก่อนที่จะถูกดูดซับโดยพืช ขึ้นตอนนี้จะจำกัดอัตราการดูดซับ
6. การบำบัดควรทดลองทุกฤดูกาล อัตราการบำบัดขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ และไม่สามารถคาดการณ์พื้นที่ที่ไม่มีการทดลองได้
7. การบำบัดด้วยพืชขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โรคพืช และศัตรูพืช

น้ำมันหล่อลื่น ประกอบด้วยโมเลกุลคาร์บอนตั้งแต่ 20 ถึง 70 โมเลกุล มีโครงสร้างแบบ Alkanes และ Polyaromatic hydrocarbon (PAHs) (เกรียงศักดิ์, 2546) Rezek *et. al.* (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้า ryegrass (*Lolium perenne*) ในการบำบัดดินปนเปื้อนสารอินทรีย์ประเภท โพลีอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (polyaromatic hydrocarbon: PAHs) ที่เกิดจากการทำลายล้างโดยระเบิด เมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 ในประเทศเยอรมัน ได้ปนเปื้อนอย่างยาวนานมากกว่า 10 ปี โดยนำดินมาบำบัดเป็นเวลา 18 เดือน ในการทดลองได้สังเกต PAHs 15 ชนิด และจากผลการทดลองพบว่า ryegrass สามารถย่อยสลาย fluoranthene และ pyrene ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนหลักที่พบในดินดั้งเดิม ได้มากที่สุด คือมากกว่าร้อยละ 50 แต่ข้อจำกัดของการทดลองนี้ คือ อายุของดินปนเปื้อน ซึ่งมีการปนเปื้อนเป็นเวลามากกว่า 10 ปี สารปนเปื้อนเกาะติดกับอนุภาคของดินอย่างเหนียวแน่น จึงทำให้การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ หรือการสกัดโดยพืชเกิดขึ้นได้ยาก นอกจากใช้ ryegrass เป็นพืชบำบัดดินปนเปื้อน PAHs แล้ว Lee *et. al.* (2008) ได้ใช้พืชพื้นเมืองของเกาหลีตระกูลหญ้าและถั่ว ได้แก่ *Panicum bisulcatum*, *Echinogalus crus-galli*, *Astragalus membranaceus*, และ *Aeschynomene indica* บำบัดดินปนเปื้อน phenanthrene และ pyrene ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม PAHs ทดลองในเรือนกระจกเป็นเวลา 80 วัน จากการทดลองพบว่าสามารถย่อยสลาย phenanthrene และ pyrene ได้มากกว่าร้อยละ 99 และ 77-94 ตามลำดับ และ *Echinogalus crus-galli* และ *Astragalus membranaceus* มีความเหมาะสมมากที่สุดในการบำบัดสารปนเปื้อน เนื่องจากมีความคงทน และสร้างเอนไซม์ปลดปล่อยสู่ดิน ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น

Euliss *et. al.* (2008) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พืช 7 ชนิด ได้แก่ willow (*Salix exigua*), poplar (*Populus spp.*), eastern gamagrass (*Tripsacum dactyloides*), arrowhead (*Sagittaria latifolia*), switchgrass (*Panicum virgatum*) และ sedge (*Carex stricta*) บำบัดตะกอนดินปนเปื้อนปิโตรเลียมบริเวณฝั่งแม่น้ำ โดยปลูกต้นกล้าของพืชที่ใช้บำบัดสูงประมาณ 5 เซนติเมตร ลงในกระถางที่มีดิน 10 กิโลกรัม ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 26-8-8 รดน้ำ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 12-

12-12 เดือนละครึ่ง ระยะเวลาการทดลอง 13 เดือน ผลการทดลองพบว่า sedge, switchgrass และ gamagrass สามารถย่อยสลายปิโตรเลียมได้มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น และ ไม่มีการปลูกพืชย่อยสลายได้เพียงร้อยละ 20 เท่านั้น นอกจากนี้พบว่าบริเวณเขตรากพืช (rhizosphere) ของ arrowhead และ sedge มีจำนวนของจุลินทรีย์ชนิดย่อยสลาย PAH (PAH-degrading bacteria) อยู่ปริมาณมากกว่าพืชชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirkpatrick *et. al.* (2008) ซึ่งศึกษาจำนวนจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายปิโตรเลียมบริเวณเขตรากพืช (rhizosphere) ของหญ้าชูดาน พบว่ามีจุลินทรีย์ประเภท ย่อยสลาย alkane, total hydrocarbon (TH) และ polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) มากกว่าดินนอกเขตรากพืชจำนวน 2.6, 3.4 และ 4.8 เท่า ตามลำดับ

สำหรับดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นนั้น พงษ์สิทธิ์ (2546) ได้ทำการบำบัดโดยอาศัยหลักการเดียวกับการหมักปุ๋ยซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีไบโอรีมีเดียชัน (Bioremediation) ซึ่งมีการเติมวัสดุร่วมในการหมักปุ๋ย ได้แก่ มูลสุกร ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีแร่ธาตุและมีเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณสูงและแฉะเพื่อเพิ่มความพรุนมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในดินปนเปื้อนได้ โดยพบว่า การหมักปุ๋ยที่มีค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 30 ต่อ 1 สามารถกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินร้อยละ 3.5 ได้สูงสุดที่ร้อยละ 60 ภายใน 40 วันของการหมักปุ๋ย อย่างไรก็ตามพบว่า วิธีการปรับค่าคาร์บอนและไนโตรเจนด้วยการเติมวัสดุต่างๆ ลงไปในดินเพื่อให้เหมาะสมกับการหมักปุ๋ยเป็นการเพิ่มปริมาตรดินปนเปื้อนค่อนข้างมากให้มีปริมาตรมวลดินสูงมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งดินที่บำบัดแล้วสูงขึ้นได้ โดยเฉพาะการบำบัดนอกพื้นที่ (*Ex situ* bioremediation) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาต่อมาโดยใช้การปลูกพืชช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยการหมักปุ๋ย โดยพบว่า การปลูกหญ้า นวลน้อยในดินที่ผ่านการบำบัดดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นได้อีก ร้อยละ 17 ในระยะเวลา 1 เดือนของการปลูก (ฉัฐพร, 2548)

จันทิรา (2551) ศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์จากดินร่วนปนทรายที่ ความเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5 (โดยน้ำหนักแห้ง) ด้วยหญ้าโคสโครอส เป็นเวลา 24 สัปดาห์ พบว่า สามารถบำบัดน้ำมันหล่อลื่นร้อยละ 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ร้อยละ 63.76 ส่วนความเข้มข้นของการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นร้อยละ 5 มีผลทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของหญ้า จากการตรวจสอบปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สะสมในต้นหญ้า ปรากฏว่า สะสมในรากร้อยละ 2.12 และ ในลำต้นร้อยละ 1.15 (โดยน้ำหนักแห้ง) และรูปแบบการย่อยสลายเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่ อยู่ระหว่าง 0.0943-0.2839 นอกจากนี้ ปิยนุช (2551) ได้ศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศใน

ดิน และกลุ่มไนตริฟายอิงแบคทีเรียในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดโดยหญ้า
โคสโครอส ทดสอบโดยวัดอัตราการหายใจและปริมาณอินทรีย์ในโตรเจนในรูปต่างๆ ที่ระยะเวลา
เท่ากับ 14, 28, 56, 84, 112 และ 168 วัน พบว่าอัตราการใช้ออกซิเจนหรืออัตราการหายใจในดิน
ลดลงตามความเข้มข้นของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการปลูกพืชช่วยเพิ่ม
อัตราการหายใจของดินปนเปื้อนโดยเฉพาะในดินปนเปื้อนที่ร้อยละ 3 และการปลูกพืชช่วยให้
กิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น

ลักษณะบางประการของพืชที่ใช้ในการทดลอง

หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD58)

แหล่งดั้งเดิม

หญ้ากินนีมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Panicum maximum* Jacq. และมีชื่อสามัญว่า Guinea Grass
หญ้ากินนีเป็นหญ้าพื้นเมืองของแอฟริกาเขตร้อนและเขตอบอุ่น แต่ปลูกกันแพร่หลายในอเมริกาใต้
หมู่เกาะอินเดียตะวันตก และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Humphreys, 1980) นำเข้ามาในประเทศไทย
ครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ. 2444 โดยเจ้าพระยาสุริยวงศ์ (ชาญชัย, 2511) และต่อมาในปี พ.ศ. 2518 นายกีร์
โรแบร์ ที่ปรึกษา กรป. กลาง ได้นำหญ้ากินนีสีม่วงจากประเทศไอเวอรี โคสต์ ทวีปแอฟริกา นำเข้าสู่
ประเทศไทยปลูกครั้งแรกที่จังหวัดสกลนคร โดยใช้พันธุ์ K187B และปัจจุบันใช้ชื่อ TD58 (กอง
อาหารสัตว์, 2537)

ลักษณะทั่วไป

หญ้ากินนีสีม่วงเป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี (ชาญชัย, 2511) ลำต้นมีลักษณะตั้งตรง และมีหน่อ
แตกออกทำให้มองดูคล้ายกอตระไคร้ จัดเป็นพวก bunch forming habit หรือ tuft forming habit
หรือ shoot forming habit ที่มีเหง้าใต้ดินสั้นๆ (บุญฤา, 2528) ลำต้นอาจสูงตั้งแต่ 0.5-4.5 เมตร ใบมีสี
เขียว อ่อนนุ่ม กว้างประมาณ 3.5 เซนติเมตร ยาวอาจถึง 100 เซนติเมตร (อารีย์, 2526) หญ้ากินนีสี
ม่วงมีลักษณะเด่นคือ ส่วนของข้อ ปล้องและเมล็ดมีสีม่วงอมเขียว ใบค่อนข้างใหญ่และดก สดส่วน
ของใบมากกว่าลำต้น มีการแตกกอดี (ภาพที่ 4) และมีการฟื้นตัวหลังการเก็บเกี่ยวเร็วกว่าหญ้ากินนี
สายพันธุ์ธรรมดา ช่อดอกเป็นแบบ open panicles มีสีเขียวหรือสีม่วง (สุวานถ, 2537) กลุ่มดอกย่อย
ยาวประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร ดอกย่อยอันล่างเป็นดอกตัวผู้ไม่มีเมล็ด ส่วนดอกย่อยอันบนเป็นดอก

ตัวเมีย ยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร พร้อมจะพัฒนาไปเป็นเมล็ดได้ (อารีย์, 2526) หนูกินนี้สีม่วงมีช่วงเวลาของการเจริญเติบโตก่อนออกดอกอยู่ระหว่าง 90-110 วัน ความสูงเมื่อเริ่มออกดอกประมาณ 220 เซนติเมตร (ศศิธร และคณะ, 2536) เมล็ดมีรูปร่างทรงยาวรี ความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ใน 1 กรัม มีเมล็ด 1,200-2,400 เมล็ดแล้วแต่พันธุ์ เมล็ดหนูกินนี้มีระยะพักตัว เมล็ดที่เก็บใหม่ ๆ จะมีความงอกต่ำ ต้องใช้ระยะพักตัวอย่างน้อย 6 เดือนเมล็ดจึงจะมีความงอกสูง (กอบแก้ว, 2535 และอารีย์, 2526)



ภาพที่ 4 หนูกินนี้สีม่วง

ที่มา: กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2552)
การปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม

หนูกินนี้สีม่วงเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีฝนตกเฉลี่ยมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี (สายัณห์, 2540) เนื่องจากมีระบบรากหยั่งลงไปได้ลึกและแข็งแรง ทำให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีพอสมควร ขึ้นได้ในดินหลายชนิดแต่จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อปลูกในดินที่อุดมสมบูรณ์ และมีการระบายน้ำดี หนูกินนี้มีการตอบสนองต่อยุ่ได้ดี ไม่ทนต่อน้ำค้างแข็งแต่ทนทานต่อสภาพร่มเงา และการถูกไฟไหม้ (บุญฤา, 2528) ไม่ทนต่ออากาศเย็นและสภาพน้ำท่วมขัง (อารีย์, 2526) ภายใต้อากาศน้ำขัง 5-10 วัน หนูกินจะมีชีวิตอยู่รอดได้ 90-100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะตายหมดถ้ามีน้ำขังนานกว่า 20 วัน (Anderson, 1970) จึงเหมาะจะปลูกได้ไม้ใหญ่หรือในสวนป่า (กอบแก้ว, 2535) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Stur (1990) ที่พบว่าหนูกินนี้สายพันธุ์ต่างๆ เป็นหนูกินที่ให้ผลผลิตสูงสุดภายใต้สภาพร่มเงาที่มีแสงน้อย หนูกินนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 14.2-22.9 องศาเซลเซียส และทนต่อดินเค็มได้ในระดับปานกลาง (Skerman and Riverose, 1990)

การปลูก

หญ้ากีนีสีม่วงสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งการใช้เมล็ดและการใช้หน่อพันธุ์ การปลูกหญ้ากีนีสีม่วงเพียงอย่างเดียว การปลูกด้วยเมล็ดควรใช้เมล็ดอัตรา 1-2 กิโลกรัมต่อไร่ ปลูกโดยการหว่านไม่ต้องกลบ หรือปลูกเป็นหลุมระยะระหว่างหลุม 50x50 เซนติเมตร สำหรับการปลูกด้วยหน่อพันธุ์ในพื้นที่ 1 ไร่ ใช้หน่อพันธุ์ประมาณ 400 กิโลกรัม ปลูกหลุมละ 3 ต้น และการปลูกหญ้ากีนีสีม่วงร่วมกับถั่วเวอร์นาโนสไดโล ควรปลูกหญ้าโดยใช้ระยะปลูก 75 เซนติเมตร และโรยถั่วระหว่างแถว (กองอาหารสัตว์, 2552) นอกจากนี้ หญ้ากีนีสีม่วงยังสามารถปลูกร่วมกับพืชอื่นได้อีกหลายชนิด และพื้นที่ปลูกควรมีความชื้นเพียงพอ หรือมีการชลประทานช่วยในระยะแรก เพราะทำให้หญ้าตั้งตัวได้ดีและรวดเร็ว (Bogdan, 1977)

การใส่ปุ๋ย

ในการปลูกหญ้ากีนีสีม่วง ควรใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 15-15-15 ในอัตรา 50-100 กิโลกรัมต่อไร่ และควรใส่ปุ๋ยหลังเก็บเกี่ยวพืชทุกครั้งในอัตรา 10 กิโลกรัมในโตรเจนต่อไร่ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Tudsri *et al.* (1988) ที่ศึกษาอัตราปุ๋ยในโตรเจนที่เหมาะสมต่อการตัดแต่ละครั้งในหญ้ากีนีสี หญ้าบัพเฟล และหญ้าไรด์ พบว่าอัตราปุ๋ยในโตรเจนที่เหมาะสมต่อการตัดแต่ละครั้งจะสูงประมาณ 10-15 กิโลกรัมในโตรเจนต่อไร่ต่อการตัดหนึ่งครั้ง ซึ่งเท่ากับปุ๋ยยูเรียประมาณ 20-30 กิโลกรัมต่อไร่ และโดยทั่วไปหญ้ากีนีสีม่วงตอบสนองต่อปุ๋ยในโตรเจนได้ดีกว่าปุ๋ยฟอสเฟต (เฉลิมพล, 2530) สายพันธ์ (2540) แนะนำว่า การปลูกหญ้ากีนีสีม่วงให้ได้ผลดี นอกจากการใส่ปุ๋ยในโตรเจน ควรใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (ปุ๋ยสูตร 0-46-0) อัตรา 20-30 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี และปุ๋ยโพแทสเซียม (ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์) อัตรา 20-30 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี แต่ทั้งนี้ยังต้องขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดินด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืช

- 1.1 เมล็ด หน่อกิ่งนิ่มม่วง (ได้รับความอนุเคราะห์ จากภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)
- 1.2 ดินร่วนปนทราย
- 1.3 น้ำมันหล่อลื่น 4 จังหวะ HONDA ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (ได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัท เตชะจรัส สอนค้า ออโตโมบิล จำกัด)
- 1.4 กระถาง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร)

2. อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ด

- 2.1 เมล็ดมะเขือเทศสีดำ
- 2.2 ถ้วยพลาสติกสำหรับเพาะเมล็ด
- 2.3 กระดาษฟรอนด์

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 3.1 ชุดสกัดซอกซ์เลต (Soxhlet)
- 3.2 ชุดกลั่นเฮกเซน
- 3.3 คอลัมน์ Solid phase extraction (SPE) ยี่ห้อ Vertical ชนิด Vertipak™ Silica tubes 10,000 mg/60mL
- 3.4 เครื่องวัดโออาร์พี (ORP meter) ยี่ห้อ Hanna Instrument รุ่น HI 255
- 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC 6890 Agilent Technologies Model: G 1530A
- 3.6 เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ (Total Organic Carbon Analysis) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น TOC-V_{CSH} วิเคราะห์ดินโดย solid sample module - SSM-5000A

- 3.7 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH รุ่น DR/4000U
 3.8 เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ Precisa รุ่น 240A
 3.9 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Metrohm
 3.10 ตู้อบ 105 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Memmert
 3.11 เครื่องแก้วต่างๆ

วิธีการ

1. แผนการทดลอง

วางแผนการแต่ละชุดการทดลองแบบ Randomized Complete Block design จำนวน 5 ชุดการทดลอง ชุดละ 3 ซ้ำ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แผนการทดลองแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น	วิธีการดำเนินการ
1	0, 28.6, 50.5 g/kg soil	ไม่ปลูกหญ้า, ปลูกหญ้า
2	36.9 g/kg soil	ไม่ปลูกหญ้า, ตัดลำต้นหญ้า, ปลูกหญ้าใหม่
3	0, 30.3 g/kg soil	ปลูกหญ้า 2, 3, 4 ต้น/กระถาง
4	30.1 g/kg soil	C/N Ratio = 10/1, 28/1, 48/1
5	30.1 g/kg soil	ความลึกดิน 0-20, 21-40, 41-60 เซนติเมตร

2. การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดลอง

2.1 การวิเคราะห์ดิน

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการวิจัย โดยลักษณะเนื้อดิน ส่งวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และวิเคราะห์

พารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น ความเป็นกรดด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียมไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน

2.2 การสังเคราะห์ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

การสังเคราะห์ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ปรับลักษณะเนื้อดินที่ผ่านการวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว (ทราย ร้อยละ 22, ทรายแป้ง ร้อยละ 27, ดินเหนียว ร้อยละ 51) ให้เป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ตาม Soil Textural Triangle (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) ซึ่งดินร่วนปนทรายเหมาะกับการเจริญเติบโตของหญ้า และช่วยระบายอากาศได้ดี โดยมีลักษณะเนื้อดินดังนี้ ทราย ร้อยละ 50-90 ทรายแป้ง ร้อยละ 5-35 ดินเหนียว ร้อยละ 0-20 ดังนั้นต้องผสมทราย ในอัตราส่วนดิน: ทราย เท่ากับ 1: 1.75 ดินร่วนปนทรายที่ได้จากการผสมใหม่มีลักษณะเนื้อดิน คือ ทราย ร้อยละ 72 ทรายแป้ง ร้อยละ 10 ดินเหนียว ร้อยละ 18 เมื่อปรับอัตราส่วนของดินแล้ว ทิ้งไว้อย่างน้อย 7 วัน เพื่อให้ดินผสมเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ HONDA ที่ผ่านการใช้งานแล้วให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ภาคผนวก ก) จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 14 วัน เพื่อให้ดินดูดซับน้ำมันก่อนจึงนำมาใช้ในการทดลอง วิเคราะห์ปริมาณน้ำมันในดินก่อนการทดลอง ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการได้แสดงไว้ดังตารางที่ 6

2.3 การเตรียมพืชที่ใช้ในการบำบัด

เพาะต้นกล้าหญ้ากีนีสีม่วงด้วยเมล็ด ในถาดเพาะกล้าขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร ลึก 6 เซนติเมตร เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง คัดเลือกต้นกล้าที่มีขนาดลำต้น และความสูงใกล้เคียงกัน คือสูงประมาณ 10-15 เซนติเมตร

ตารางที่ 6 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ก่อนการผสมน้ำมันหล่อลื่น)

Parameter		
pH		7.33
Moisture Content	%	0.84
Oil content	g/kg.soil	0.2
Organic Carbon	%	0.91
Total Nitrogen	%	0.05
Ammonium Nitrogen	mg/kg.soil	2.76
Nitrite Nitrogen	mg/kg.soil	0.00
Nitrate Nitrogen	mg/kg.soil	0.00
C:N ratio		16.90
HUB	logMPN/g.soil	0.00
Soil Texture		sandy loam
Sand	%	71.64
Silt	%	9.82
Clay	%	18.54

หมายเหตุ HUB: Hydrocarbon Utilizing Bacteria

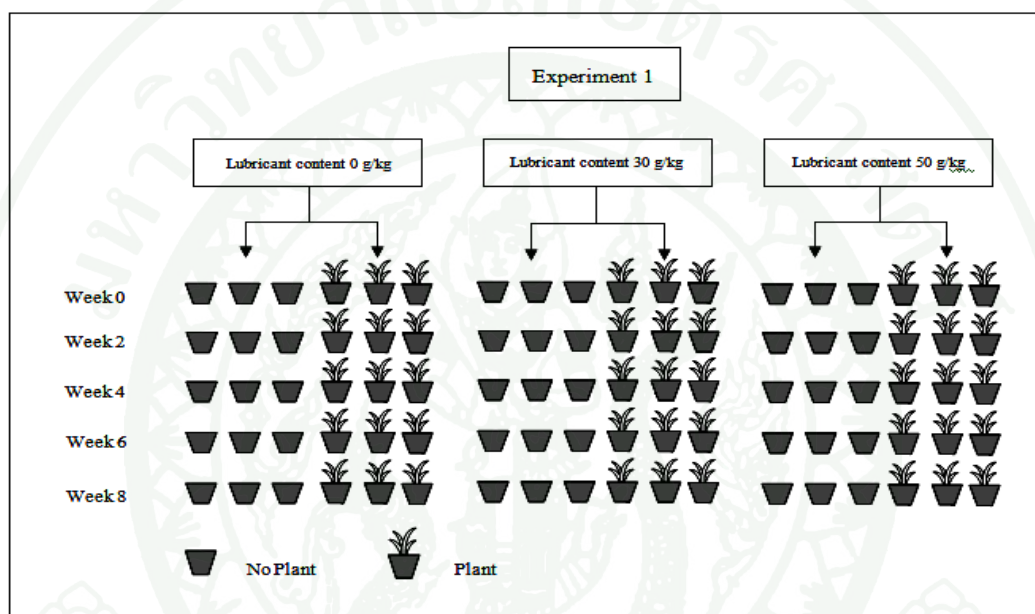
3. การทดลอง

3.1 การศึกษาปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด 5 ชุดการทดลอง คือ

ชุดการทดลองที่ 1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ในการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นของหญ้างินนิสีม่วง กับดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นคือ 0, 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยในการทดลอง ใช้กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ใส่ดินกระถางละ 1,500 กรัม ปลูกต้นหญ้างินนิสีม่วง กระถางละ 1 ต้น ทำการ

ทดลอง 3 ซ้ำ โดยเตรียมทั้งหมด 24 กระถางต่อความเข้มข้น ซึ่งเป็นกระถางปลูกหญ้ากินนีสีม่วง 12 กระถาง และไม่ปลูกพืช 12 กระถาง (ชุดควบคุมการย่อยสลายด้วยตัวเอง) จำนวนกระถางที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 72 กระถาง ตามแผนผังการปลูกในภาพที่ 5 เก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมทั้งการเจริญเติบโตของพืช (ตารางที่ 7) ทุก 2 สัปดาห์ เป็นเวลา รวมทั้งหมด 8 สัปดาห์



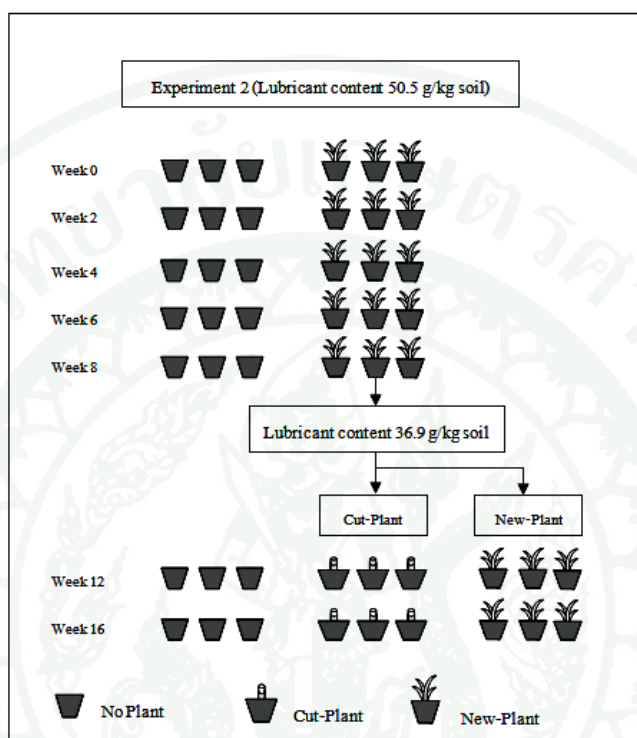
ภาพที่ 5 การวางแผนปลูกศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการปลูกพืชซ้ำเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

นำดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นชุดการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุดของหัวข้อที่ 2.1 คือดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50 กรัมต่อ กิโลกรัมดินแห้ง มาบำบัดอีกครั้ง ซึ่งเหลือน้ำมันอยู่ 36.9 กรัมต่อ กิโลกรัมดินแห้ง โดยการตัดลำต้นและการปลูกพืชชนิดนั้นใหม่ โดยเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ไม่ปลูกพืช

โดยตัดลำต้นของหญ้ากินนีสีม่วงเหนือผิวดิน 10 เซนติเมตร จำนวน 6 กระถาง เพื่อให้พืชเจริญเติบโตใหม่ และปลูกพืชใหม่ จำนวน 6 กระถาง และชุดควบคุม จำนวน 6 กระถาง รวมเตรียมทั้งหมด 18 กระถาง (ภาพที่ 6) เพื่อศึกษาผลของการปลูกซ้ำต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการ

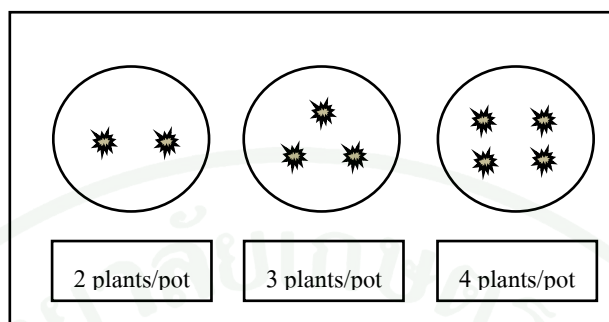
บำบัด เก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมทั้งการเจริญเติบโตของพืช (ตารางที่ 7) ทุก 4 สัปดาห์ เป็นเวลารวมทั้งหมด 16 สัปดาห์



ภาพที่ 6 การวางแผนปลูกศึกษาผลของการบำบัดซ้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลองที่ 3 การศึกษาผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด

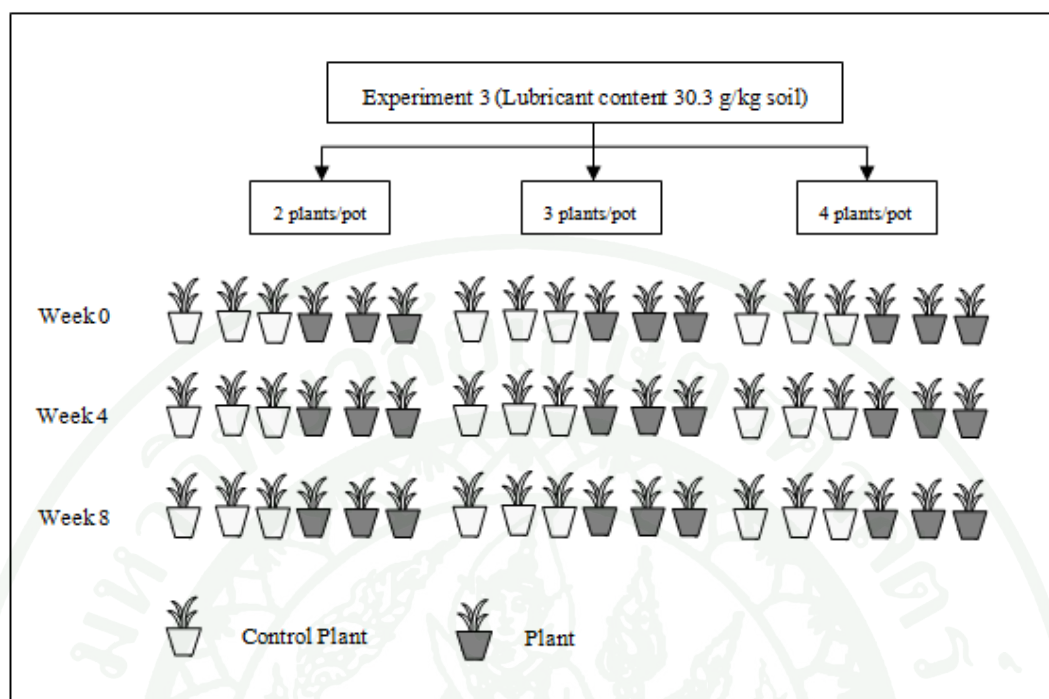
จากผลการทดลองข้อที่ 2.1 เลือกค่าความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นให้ได้เท่ากับค่าความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากข้อที่ 2.1 คือ ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง แบ่งดินใส่กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร กระถางละ 1,500 กรัม ปลูกพืชให้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ค่า คือ กระถางละ 2, 3 และ 4 ต้น (ภาพที่ 7) โดยเตรียมทั้งหมด 12 กระถางต่อความหนาแน่น ซึ่งเป็นกระถางปลูกหญ้ากีนีสี่มวงในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 6 กระถาง และกระถางปลูกหญ้ากีนีสี่มวงในดินที่ไม่มีการปนเปื้อน 6 กระถาง (ชุดควบคุม เพื่อดูผลของความหนาแน่นต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืช) จำนวนกระถางที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 36 กระถาง ตามแผนผังการปลูกในภาพที่ 8 โดยเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมทั้งการเจริญเติบโตของพืช ทุก 4 สัปดาห์ เป็นเวลารวมทั้งหมด 8 สัปดาห์



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการปลูกพืช

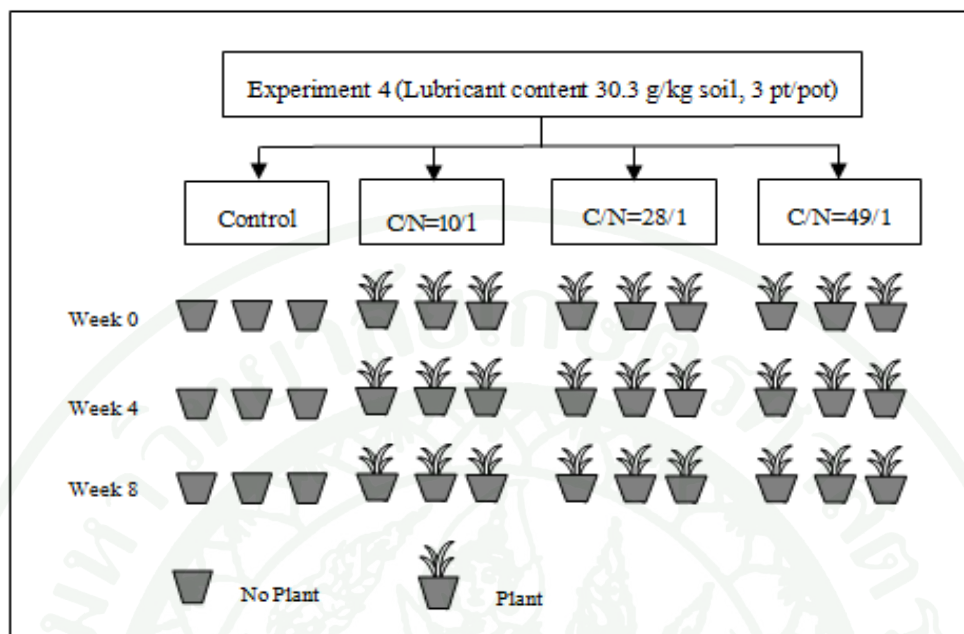
ชุดการทดลองที่ 4 การศึกษาผลของการปรับ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด

เนื่องจากดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูง จึงทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกว้าง ทำให้การย่อยสลายในดินเป็นไปได้ช้า เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่มีปริมาณไนโตรเจนในการนำไปสร้างเซลล์อย่างเพียงพอ (ศุภมาศ, 2545) จากงานวิจัยของ Lee *et al.* (2007) ได้ทำการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 10/1, 20/1 และ 50/1 ด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต แต่ดินที่ใช้ในการทดลองปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นเพียง 0.93 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ซึ่ง Peltola *et al.* (2006) ทดลองปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินปนเปื้อนน้ำมัน 40-60 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เท่ากับ 5/1, 10/1, 20/1 และ 50/1 ด้วยปุ๋ยยูเรีย และเมทิลลีนยูเรีย ซึ่งจากทั้งสองงานวิจัยมีข้อมูลสนับสนุนว่าการใส่ปุ๋ยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน และเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย



ภาพที่ 8 การวางแผนปลูกศึกษาผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด

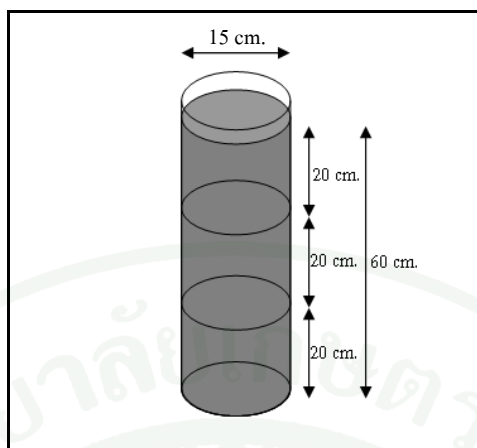
จากผลการทดลองข้อที่ 2.3 เลือกความหนาแน่นของพืชที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัด สูงที่สุด คือ กระถางละ 3 ต้น และเตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นให้ได้เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ ประสิทธิภาพสูงสุดจากข้อที่ 2.1 คือ ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง แบ่ง ดินใส่กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร กระถางละ 1,500 กรัม โดย เตรียมทั้งหมด 36 กระถาง ตามแผนผังการปลูกในภาพที่ 9 เติมหาตุอาหารไนโตรเจนสองชนิดใน รูปของปุ๋ยยูเรีย โดยแบ่งการเติมเป็น 3 รูปแบบ คือ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 10/1, 28/1 และ 49/1 (ภาคผนวก ก) โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการปรับอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน เก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมทั้ง มวลพืช ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง



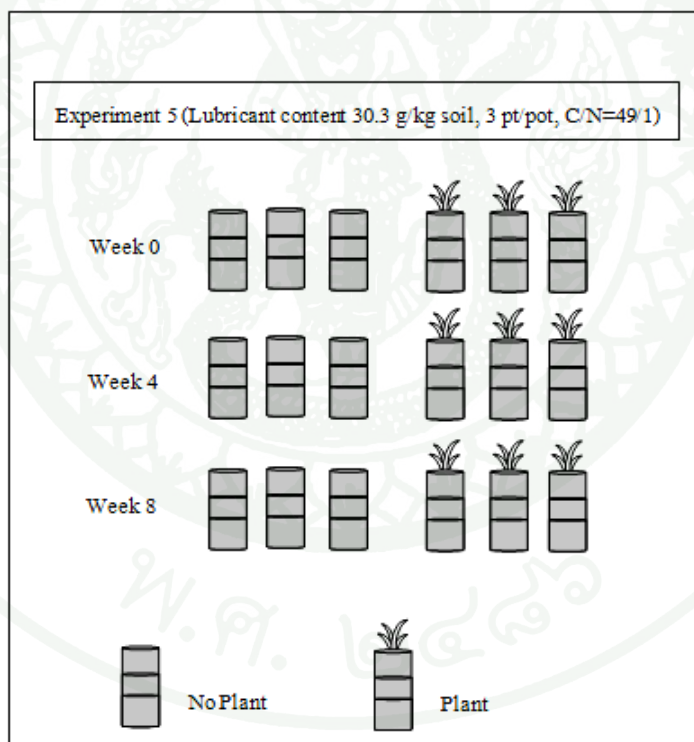
ภาพที่ 9 การวางแผนปลูกศึกษาผลของการเติมธาตุอาหารต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ชุดการทดลองที่ 5 การศึกษาผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด

จากผลการทดลองข้อที่ 2.4 เลือกความหนาแน่นของพืช คือ กระจ่างละ 3 ต้น และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่สุด คือ 49/1 เตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นให้ได้เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากข้อที่ 2.1 คือ ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง แบ่งดินใส่กระจ่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยเตรียมทั้งหมด 4 กระจ่าง ตามแผนผังการปลูกในภาพที่ 10 วิเคราะห์ดินตามความลึกของดิน จำนวน 3 ระดับ คือ 0-20, 21-40 และ 41-60 เซนติเมตร (ภาพที่ 11) โดยเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมทั้งการเจริญเติบโตของพืช ทุก 4 สัปดาห์ เป็นเวลารวมทั้งหมด 8 สัปดาห์



ภาพที่ 10 ลักษณะกระถางปลูกพืช



ภาพที่ 11 การวางแผนปลูกศึกษาผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด

3.2 การควบคุมปัจจัยระหว่างการทดลอง

ปัจจัยที่ควบคุมระหว่างการทดลองได้แก่ การรดน้ำ โดยรดวันละ 1 ครั้ง ในช่วงเช้า (เวลา 8.00-9.00 น.) กระจายละประมาณ 25 มิลลิลิตร มีการเก็บน้ำชะที่เกิดจากการรดน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันหล่อลื่น (ภาพที่ 12) ซึ่งเก็บถูกรวบรวมน้ำชะไว้ในภาชนะที่บดแสงเพื่อป้องกันปฏิกิริยาการย่อยสลายที่เกิดจากแสง



ภาพที่ 12 การเก็บน้ำชะจากกระถางทดลอง

ปริมาณแสง ในการทดลองได้ตั้งกระถางไว้บนชั้นชั้นบันได บริเวณระเบียง ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม 2 อาคาร 8 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีบริเวณนี้จะมีแสงส่องถึงทั้งวัน แต่จะมีแดดแรงในช่วงเช้า ดังนั้นจึงติดตั้งหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สำหรับปลูกพืช เพื่อควบคุมความเข้มแสงให้มีปริมาณใกล้เคียง กันทุกหน่วยการทดลองตลอดทั้งวัน ยี่ห้อ Toshiba ขนาด 30 วัตต์ จำนวน 8 หลอด สูงจากชั้นวาง 80 เซนติเมตร (ภาพที่ 13) เพื่อป้องกันใบ หญ้าสัมผัสกับหลอดไฟ ความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย 43,000-65,000 ลักซ์



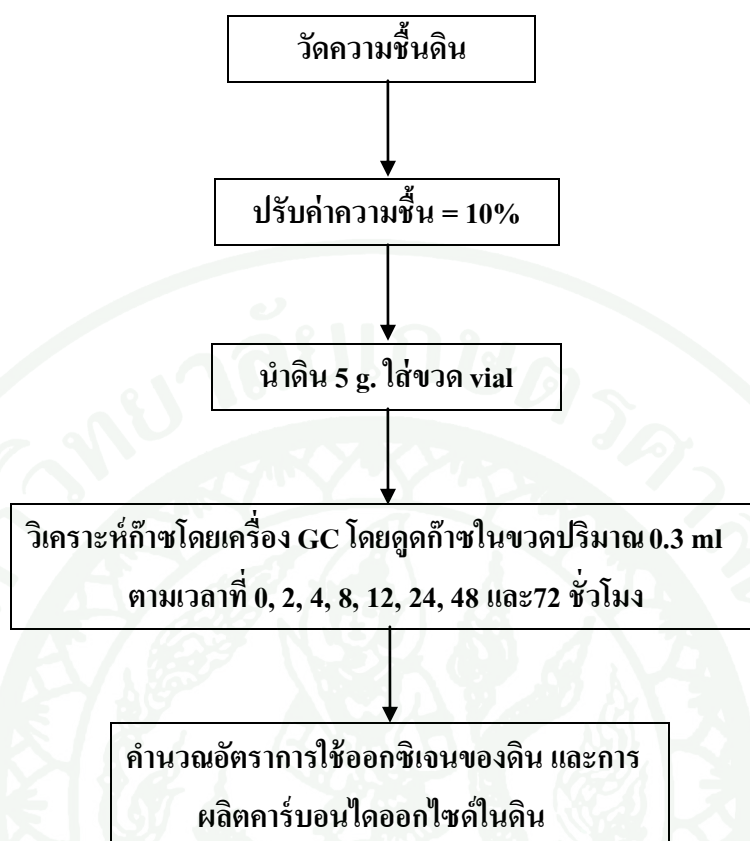
ภาพที่ 13 ชั้นวางกระถาง และลักษณะการติดตั้งหลอดไฟ

4. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินในกระบวนการบำบัด

4.1 อัตราการใช้ออกซิเจน (Oxygen Uptake Rate: OUR) และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Product Rate: CPR) (ปิยนุช, 2551)

อัตราการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในดินขึ้นอยู่กับจำนวนจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ในดิน ในการทดลองครั้งนี้จึงนำดินในแต่ละชุดการทดลองมาทดสอบหาอัตราการใช้ออกซิเจนของดิน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในดิน โดยการศึกษากิจกรรมจุลินทรีย์ในดินตามระยะเวลาของการบำบัดที่เวลา 0, 2, 4, และ 8 สัปดาห์ มีวิธีดังนี้ (ภาพที่ 14)

- 1) นำดินจากการเตรียมมาวัดความชื้น แล้วปรับความชื้น โดยการเติมน้ำเพื่อให้ความชื้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 10
- 2) นำดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปลูกพืช และไม่ปลูกพืช จากการเตรียมมาแบ่งใส่ขวด ขวดละ 5 กรัม มีจำนวนขวดทั้งหมด 16 ขวด โดยแบ่งเป็นส่วนที่ดินมีการปลูกพืช 8 ขวด และดินไม่มีการปลูกพืช 8 ขวด
- 3) นำเข็มดูดก๊าซในขวดปริมาณ 0.10 มิลลิลิตร ฉีดเข้าสู่เครื่อง Gas Chromatograph (GC 6890 Series) ตามเวลาที่ 0, 2, 4, 8, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
- 4) เรียกผลดูของการฉีดจาก Data analysis



ภาพที่ 14 การวิเคราะห์หาอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์

4.2 ปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Utilizing Bacteria: HUB)

แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สามารถประมาณจำนวนได้จากการนับค่าทางสถิติขึ้นอยู่กับจำนวนที่เป็นไปได้มากที่สุดของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อหลายๆ หลุมอาหารในอนุกรมของการทำเจือจาง (serial dilution) ในการวิเคราะห์หาปริมาณแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจะใช้ระบบเลี้ยงเชื้อแบบ 5 หลุม และอนุกรม 3 การเจือจาง (3 serial dilution) (กรรณิการ์, 2544; Lee *et. al.*, 2007) มีวิธีดังนี้

- 1) ชั่งดิน 10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) 90 มิลลิลิตร แกว่ง 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ตั้งให้ตกตะกอน 5 นาที
- 2) ทำการเจือจางตัวอย่างแบบอนุกรม เลือกอนุกรมที่เหมาะสม 3 การเจือจาง

- 3) คัดตัวอย่างเชื้อจากอนุกรมที่เหมาะสม 10 ไมโครลิตร ใส่หลุมอาหาร เติม อาหาร เลี้ยงเชื้อ Bushnell-Hass medium 250 ไมโครลิตร เติมน้ำมันหล่อลื่น 5 ไมโครลิตร เพื่อเป็นแหล่ง คาร์บอนให้กับแบคทีเรีย
- 4) บ่มเชื้อในตู้เพาะเชื้อที่อุณหภูมิห้อง 20 วัน
- 5) เติมสารละลาย resazurin (0.1 กรัมต่อลิตร) 10 ไมโครลิตร บ่มเชื้อในตู้เพาะเชื้อที่ อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง
- 6) นับจำนวนหลุมที่ให้ผลบวก (สีชมพู) ในแต่ละการเจือจาง นำไปคำนวณหาค่า MPN index

4.3 กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส (Dehydrogenase Activity)

เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส เป็นตัวที่สามารถบ่งชี้ถึงกิจกรรมทางชีวภาพ และจำนวน จุลินทรีย์ในดินได้ เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีในดินซึ่งตัวให้อิเล็กตรอน ให้กับตัวรับอิเล็กตรอน ในการทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส หากจากปริมาณ Triphenyl formazan: TPF ที่เกิดจากการรีดิวซ์ 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride: TTC ในดิน (Tabatabai, 1982)

- 1) ชั่งดิน 20 กรัม เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 0.2 กรัม ผสมให้เข้ากัน
- 2) แบ่งใส่หลอด หลอดละ 6 กรัม เติม 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride: TTC 3% 1 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) เติมเมทานอล หลอดละ 10 มิลลิลิตร ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 1 นาที กรอง สารละลายผ่านสำลี และล้างตัวกรองจนสีแดงหายไป ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
- 4) วัดความเข้มของสี โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 485 นาโน เมตร ใช้เมทานอลเป็นแบล็ก
- 5) คำนวณความเข้มข้นของ Triphenyl formazan: TPF จากกราฟมาตรฐาน

4.4 กิจกรรมของเอนไซม์คาตาเลส (Catalase Activity)

กิจกรรมของเอนไซม์คาตาเลส ใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ใช้อากาศ (aerobic microorganism) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนจุลินทรีย์ใช้อากาศ เอนไซม์คาตาเลส

เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นน้ำและออกซิเจน ซึ่งในการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์คาตาเลส ใช้วิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับ Lee *et.al.* (2007) โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นซับสเตรต แต่ทำการวัดออกซิเจนที่เกิดขึ้น โดยเครื่องวิเคราะห์โครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph)

5. การทดสอบความเป็นพิษของดินที่ผ่านการบำบัด

การทดสอบความเป็นพิษของดินที่ผ่านการบำบัด โดยการศึกษาการงอกของเมล็ดมะเขือเทศสีดำ ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยพืชแล้ว ใช้วิธีของ Florida's On-line Composting Center (2002) โดยมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) เลือกเมล็ดมะเขือเทศสีดำที่เสียออก โดยการแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืน คัดเมล็ดที่ลอยน้ำทิ้งไป
- 2) นำดินปนเปื้อนของแต่ละหน่วยการทดลองหน่วยละ 5 กรัม มาทดลองการงอกของเมล็ด
- 3) นำเมล็ดมะเขือเทศสีดำที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว 10 เมล็ด ปลูกในดินปนเปื้อนที่ผสมกับน้ำกลั่นอัตราส่วน 1: 1
- 4) ชุดควบคุม คือ การแช่เมล็ดมะเขือเทศสีดำที่ผ่านการคัดเลือกแล้วในน้ำกลั่น
- 5) ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด และบันทึกผลการงอกเมื่อเวลาผ่านไป 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

การคำนวณร้อยละการงอกของเมล็ด

$$\text{ร้อยละการงอกของเมล็ด} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอก} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ}}$$

6. การวิเคราะห์พารามิเตอร์

6.1 ความถี่ของการวิเคราะห์พารามิเตอร์

เก็บตัวอย่างทุกกระถางของแต่ละสภาวะ (3 ซ้ำ) ผสมให้เข้ากันเป็น 1 ตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ดัชนี (ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในระหว่างการปลูกพืชบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความถี่ของการเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

Parameter	Frequency	
	Exp. 1	Exp. 2,3, 4 and 5
เนื้อดิน	เริ่มต้นการทดลอง	
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
ความเป็นกรดต่าง	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
ความชื้น (ร้อยละ)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
น้ำมันหล่อลื่น (ร้อยละ)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
องค์ประกอบน้ำมัน (มก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
อะโรมาติกในน้ำมัน	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
สารอินทรีย์วัตถุ (ก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
สารอินทรีย์คาร์บอน (ก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 28 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
สารอินทรีย์ไนโตรเจน (มก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 28 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
ไนโตรเจน (มก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 28 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
ไนโตรเจน (มก./กก. ดิน)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
คาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมล/ก. ดิน)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
ออกซิเจน (มิลลิโมล/ก. ดิน)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
กิจกรรมของเอนไซม์คาตาเลส	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
การเจริญเติบโตของพืช (ชม.)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
มวลชีวภาพ (ก.)	วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56	วันที่ 0, 28 และ 56
การงอกของเมล็ด	สิ้นสุดการทดลอง	

6.2 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อหาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

Parameter	Method
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	Thermometer
ความเป็นกรดด่าง	pH meter
ความชื้น (ร้อยละ)	Dry at 105°C
น้ำมันห่อลิ้น (ร้อยละ)	Soxhlet extraction
องค์ประกอบน้ำมันห่อลิ้น (มก./ก.)	Flash Chromatography
อะโรมาติกในน้ำมัน	Gas Chromatography-Mass Spectrometry
สารอินทรีย์วัตถุ (ก./กก. ดิน)	Dichromate oxidation
สารอินทรีย์คาร์บอน (ก./กก. ดิน)	Total Organic Carbon Analyzer; TOC
สารอินทรีย์ไนโตรเจน (มก./กก.)	Acid digestion/ spectrometric method
แอมโมเนียม-ไนโตรเจน (มก./กก.)	KCl extraction /spectrometric method
ไนไตรต์-ไนโตรเจน (มก./กก.)	K_2SO_4 extraction /spectrometric method
ไนเตรท-ไนโตรเจน (มก./กก.)	KCl extraction /spectrometric method
คาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิโมล/กรัมดิน)	Gas Chromatograph; GC
ออกซิเจน (มิลลิโมล/กรัมดิน)	Gas Chromatograph; GC
จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน	The most probable number method; MPN
กิจกรรมของเอนไซม์คาตาเลส	H_2O_2 / Gas Chromatograph; GC
กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส	Reduce TTC to TPF/spectrometric method
การเจริญเติบโตของพืช (ซม.)	Measuring in plant/root and leave length
มวลชีวภาพ (กรัม)	Dry at $75-100^{\circ}\text{C}$ / weight
การงอกของเมล็ด	Determine ratio of seed germination

ผลและวิจารณ์

การทดลองนี้เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นในดินด้วยพืช ซึ่งพืชที่ใช้ในการทดลอง คือ หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD58) ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นโดยการผสมดินร่วนปนทรายกับน้ำมันหล่อลื่นเบนซิน 4 จังหวะฮอนด้า (HONDA) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ให้ได้ความเข้มข้น 0, 30 และ 50 กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยแบ่งการทดลองเป็น 5 ชุด ได้แก่ การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่น 0, 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ต่อประสิทธิภาพการบำบัด การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาผลของการปลูกพืชซ้ำเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด การทดลองชุดที่ 3 ศึกษาผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาผลของการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด และการทดลองชุดที่ 5 ศึกษาผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยการทดลองแต่ละชุดการทดลองได้ทำซ้ำ 3 ชุด ระยะเวลาการบำบัดชุดละ 56 วัน โดยรายละเอียดการทดลองมีดังนี้

1. คุณสมบัติดิน

ผลการวิเคราะห์ดิน/ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ ที่ใช้ในการทดลองแต่ละชุด แสดงดังตารางที่ 9 ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองต้องเตรียมขึ้นก่อนการทดลองแต่ละครั้ง จึงทำให้ค่าความเข้มข้นน้ำมันที่ปนเปื้อนในดินเริ่มต้นแปรปรวนเล็กน้อย โดยอยู่ระหว่าง 28 - 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง และผลจากการวิเคราะห์พบว่า พีเอชของดินมีค่าเป็นกลางเหมาะแก่การย่อยสลายทางชีวภาพ และการเจริญเติบโตของพืช ยกเว้น ดินปนเปื้อนในชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการผสมสารละลายปุ๋ยยูเรีย ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10/1 มีค่าพีเอชเป็นด่างแก่ (9.1) องค์ประกอบของน้ำมัน กลุ่มอิมิตัว เป็นพวกอัลเคน ซึ่งมักถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่าย (Balba *et al.*, 1998) มีสัดส่วนร้อยละ 53-58 กลุ่มอะโรมาติก ประกอบด้วยพวกที่เป็นโมโนอะโรมาติก และโพลีอะโรมาติกซึ่งสารกลุ่มนี้จะถูกย่อยสลายยากและมีความเป็นพิษสูง มีสัดส่วนร้อยละ 34-38 และกลุ่มมีซัว มีสัดส่วนร้อยละ 7.7-9.0 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในดินทำให้ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงขึ้น จึงทำให้สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก (95/1 ถึง 152/1) อาจไม่เพียงพอ กับความต้องการของพืชและจุลินทรีย์ พบจำนวนจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนในดิน 1 กรัม มีประมาณ 0-1.98 logMPN เนื่องจากดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินเตรียมขึ้น มีความชื้นในดินต่ำมาก ไม่เหมาะต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเพิ่มความชื้นในช่องว่างดินประมาณร้อยละ 60

จำนวนจุลินทรีย์จะเพิ่มมากขึ้น (West *et al.*, 1989) จากงานวิจัย Lee *et al.* (2007) พบว่าบางพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเป็นระยะเวลานาน (30-40 ปี) มีจำนวนแบคทีเรียกลุ่มนี้มากถึง 8.6 logMPN

ตารางที่ 9 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ก่อนการทดลองแต่ละชุด

Parameter		lubricant contaminated Soil, g/kg soil					
		Control	28.6 ^{1/}	50.5 ^{1/}	36.9 ^{2/}	30.3 ^{3/}	30.1 ^{4/}
pH		7.33	7.19	7.05	7.30	6.72	9.1/7.6/7.7
Moisture Content	%	0.84	0.95	1.25	13.85	1.06	1.12
Oil content	g/kg soil	0.2	28.60	50.50	36.91	30.30	30.10
Saturated	g/kg soil	-	14.34	26.84	21.18	20.12	19.24
Aromatic	g/kg soil	-	12.22	19.09	12.19	10.86	8.22
Polar	g/kg soil	-	2.40	45.66	3.52	2.02	2.64
Organic Carbon	%	0.91	3.86	6.06	5.81	5.17	5.83/5.64/5.56
Total Nitrogen	%	0.05	0.04	0.04	0.07	0.04	0.59/0.20/0.11
Ammonium Nitrogen	mg/kg soil	2.76	0.60	3.92	8.38	0.79	3.09
Nitrite Nitrogen	mg/kg soil	0.00	0.00	0.00	10.75	1.07	0.00
Nitrate Nitrogen	mg/kg soil	0.00	0.00	8.70	3.01	0.76	9.49
C:N ratio		16.90	96.43	151.50	83.00	129.25	10/28/49
HUB ^{5/}	logMPN/g soil	0.00	0.00	1.12	5.33	1.98	1.38

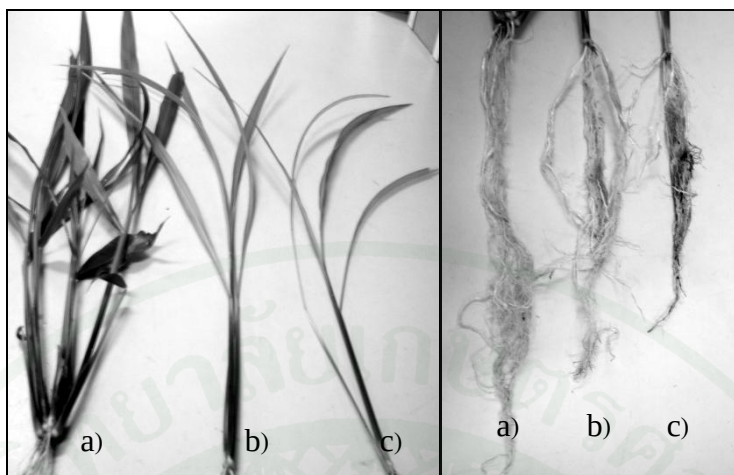
หมายเหตุ ^{1/}ชุดการทดลองที่ 1, ^{2/}ชุดการทดลองที่ 2, ^{3/}ชุดการทดลองที่ 3, ^{4/}ชุดการทดลองที่ 4 และ 5
^{5/}Hydrocarbon Utilizing Bacteria

2. การเจริญเติบโตของเหู้ากินนีสีม่วง

การเจริญเติบโตของเหู้ากินนีสีม่วง วิเคราะห์จากความสูงของลำต้น ความยาวของราก และมวลชีวภาพของลำต้นและราก ตามระยะเวลา แสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลอง 56 วัน

จากการทดลองแต่ละชุดมีผลต่อการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง โดยชุดการทดลองที่ 1 ทำการปลูกหญ้ากีนีสีม่วงในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น) พบว่า ความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดิน มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง จากภาพที่ 15 แสดงลักษณะการเจริญเติบโตของหญ้าชุดควบคุมที่ปลูกในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นเปรียบเทียบกับที่ปลูกในดินปนเปื้อน เมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นเวลา 56 วัน พบว่าหญ้าในชุดควบคุม มีความสูงลำต้น และความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 97 และ 79 เซนติเมตร ตามลำดับ ลักษณะลำต้นมีการแตกกอ 3 กอต่อต้น ใบมีสีเขียวเข้ม มวลชีวภาพเฉลี่ยของลำต้นและราก 6.9 และ 1.9 กรัม ตามลำดับ ส่วนหญ้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 2 ความเข้มข้น การเจริญเติบโตแตกต่างกับชุดควบคุม หญ้าไม่มีการแตกกอ ลำต้นลีบเล็ก ใบแคบ และใบมีสีเขียวอ่อน-เหลือง แต่หญ้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เจริญเติบโตได้ดีกว่า หญ้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ตารางที่ 10) ในส่วนของรากหญ้าที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสามารถแผ่กระจายได้ดี แต่ยังมีรากได้น้อยกว่าหญ้าที่ปลูกในชุดควบคุม นอกจากนี้บริเวณรากของหญ้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีคราบน้ำมันเคลือบอยู่ สีเหลืองเข้มดำ ซึ่งคราบเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อการดูดแร่ธาตุ อาหาร การถ่ายเทอากาศ และการปล่อยสารบางอย่างออกจากราก ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของหญ้า และการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในเขตราก (ศุภมาส, 2529)

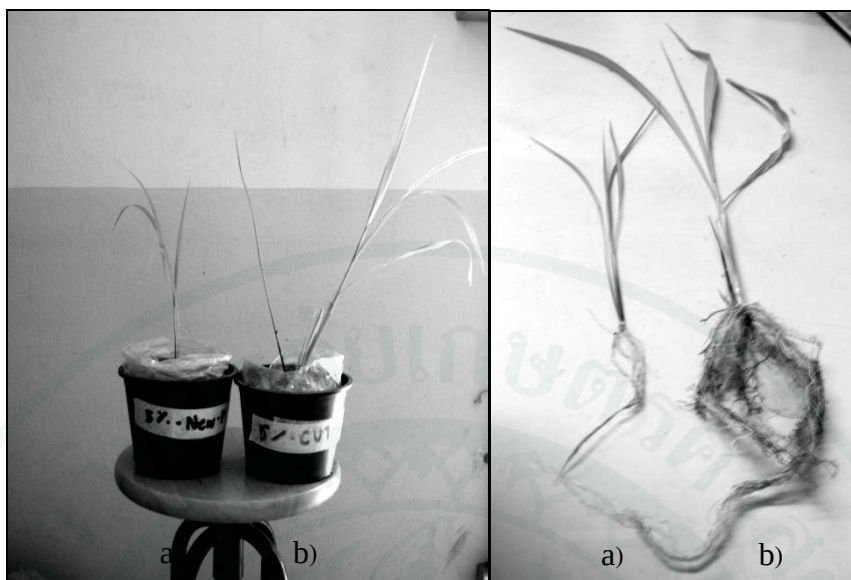
เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างของการเจริญเติบโตของหญ้าด้วยวิธีทางสถิติ พบว่า การเจริญเติบโตของหญ้าทั้งความสูง/ยาว และมวลชีวภาพของลำต้นและราก ในดินไม่ปนเปื้อน และดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น (28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่เมื่อทดสอบความแตกต่างของการเจริญเติบโตของหญ้าในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินมากกว่า 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช



ภาพที่ 15 ลำต้น (ซ้าย) และราก (ขวา) ของหญ้านิสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 1 ที่ระยะเวลา 56 วัน

- a) หญ้านิสีม่วงชุดควบคุม (ไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น)
- b) หญ้านิสีม่วงที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง
- c) หญ้านิสีม่วงที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

ชุดการทดลองที่ 2 ปลูกหญ้าในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ที่ผ่านการบำบัดมาแล้วเป็นเวลา 56 วัน โดยปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินก่อนทำการทดลองชุดที่ 2 เท่ากับ 36.9 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยเปรียบเทียบระหว่างการปลูกหญ้าใหม่ และการตัดลำต้นที่ 10 เซนติเมตรเหนือพื้นดิน พบว่า การเจริญเติบโตของลำต้นและรากของหญ้าของวิธีการปฏิบัติทั้ง 2 วิธี แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 16) โดยหญ้าที่ตัดลำต้นเจริญเติบโตได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เพราะการตัดลำต้น/กอหญ้ากระตุ้นให้เกิดการสร้างหน่อ และพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของลำต้นและรากทั้งความสูง/ยาวและมวลชีวภาพ สูงกว่าการบำบัด 56 วันแรก (ชุดการทดลองที่ 1) ส่วนหญ้าที่ปลูกใหม่ พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของลำต้นและรากทั้งความสูง/ยาวและมวลชีวภาพ ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัด 56 วันแรก และการบำบัดซ้ำด้วยการตัดลำต้นหญ้า เพราะหญ้าต้องใช้เวลาช่วงแรกปรับตัวให้เข้ากับสารปนเปื้อนในดิน อีกทั้งอีกทั้งน้ำมันหล่อลื่นที่เหลืออยู่เป็นส่วนของที่ย่อยสลายยาก มวลโมเลกุลสูง อีกทั้งสารอาหารที่เป็นประโยชน์ในดินเหลือน้อยลง



ภาพที่ 16 การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 2 ที่ระยะเวลา 56 วัน

- a) บำบัดซ้ำโดยปลูกหญ้ากีนีสีม่วงใหม่
- b) บำบัดซ้ำโดยตัดลำต้นหญ้ากีนีสีม่วง

การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วงในชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความหนาแน่น เปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งปลูกหญ้าในดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น (ตารางที่ 9 และภาพที่ 17) พบว่า หญ้าในชุดควบคุมที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นเจริญเติบโตได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากความเป็นพิษของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดิน ยกเว้นความสูง/ยาว ลำต้นและรากในชุดการทดลองที่ปลูกหญ้า 3 ต้นต่อกระถาง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

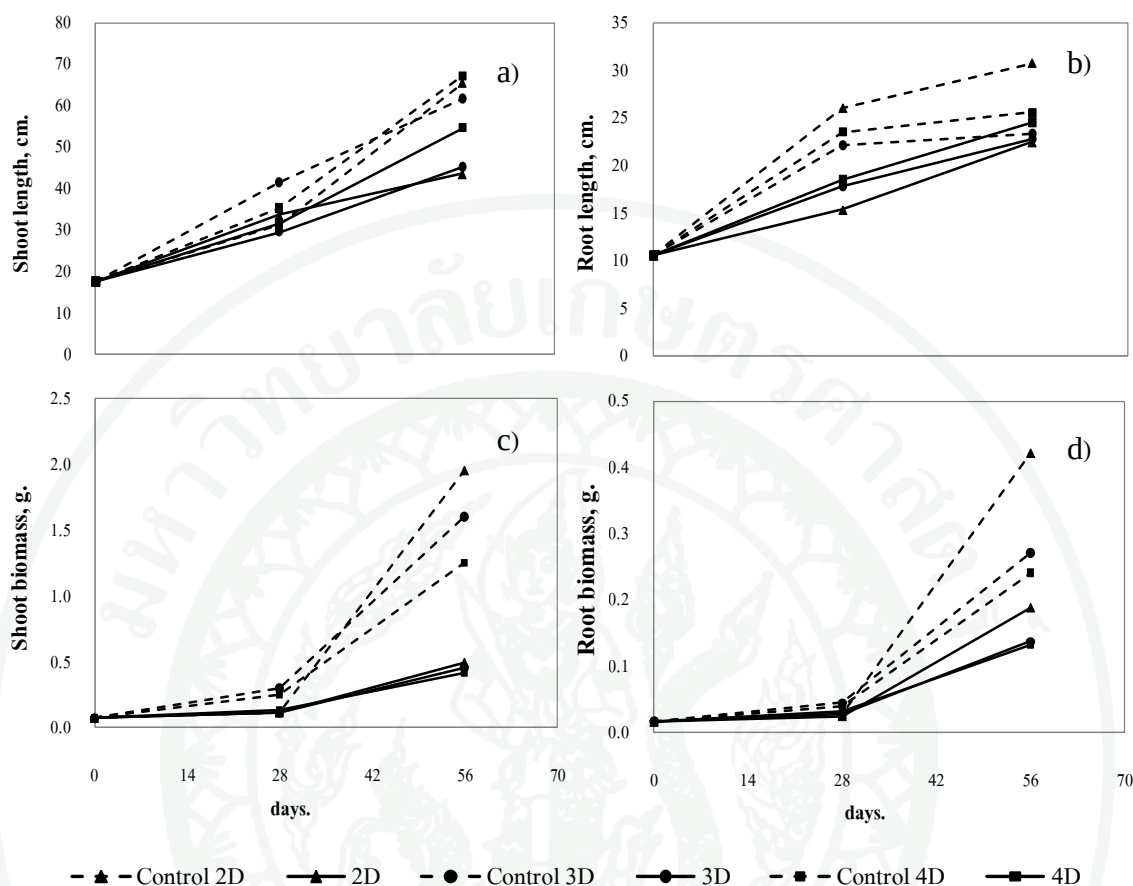
เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่น โสภณ (2541) กล่าวว่า การปลูกหญ้าที่มีจำนวนต้นต่อพื้นที่มาก เกิดการแข่งขันกันรับแสงแดดจะเจริญเติบโตด้านความสูง ส่วนต้นหญ้าที่ปลูกห่างนั้นมีพื้นที่ระหว่างต้นมากจึงเกิดการเจริญเติบโตไปด้านข้าง สอดคล้องกับการทดลอง พบว่า ลำต้นของหญ้าเมื่อสิ้นสุดการทดลอง หญ้าที่ปลูก 4 ต้นต่อกระถาง มีความสูงเฉลี่ยมากกว่า 3 และ 2 ต้นต่อกระถาง ตามลำดับ ตรงข้ามกับมวลชีวภาพ คือ หญ้าที่ปลูก 2 ต้นต่อกระถาง มีมวลชีวภาพเฉลี่ยมากกว่า 3 และ 4 ต้นต่อกระถาง ตามลำดับ ในส่วนของราก มีอิทธิพลจากพื้นที่/ปริมาณดินเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้ทั้ง 3 ความหนาแน่นในชุดการทดลองที่ปลูกในดินปนเปื้อนความยาวมีค่าใกล้เคียงกันคือ 23-25 เซนติเมตร

เนื่องจากการเจริญเติบโตของหญ้าที่วัดจากความสูง/ยาว มวลชีวภาพของลำต้นและรากทั้งในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อน อีกทั้งลักษณะของลำต้นที่ลีบเล็ก ไม่มีการแตกหน่อ และใบที่มีสีเขียวอ่อน-เหลือง ซึ่งเป็นอาการของพืชที่ขาดธาตุไนโตรเจน (วงจันทร์, 2535) ซึ่งธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของพืช มีหน้าที่รับส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจ ในโตรเจนที่พืชได้รับจึงมีอิทธิพลอย่างสูงต่อการเจริญเติบโต ซึ่งในชุดการทดลองที่ 4 ได้ปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยใช้สารละลายปุ๋ยยูเรีย พบว่า หญ้ากีนีสีม่วงไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในดินปนเปื้อนที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10/1 (ปุ๋ยยูเรีย 12.0 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) เพราะค่าพีเอชในดินเป็นค่าสูง (pH=9.1) แต่ในอัตราส่วน 28/1 และ 49/1 หญ้าตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนได้ดีมากเจริญเติบโตได้ดีกว่าหญ้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยยูเรียอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) คือ เมื่อสิ้นสุดการทดลองการเจริญเติบโตของลำต้นใกล้เคียงกับชุดควบคุม มีการแตกกอ 2-3 กอต่อต้น ใบมีสีเขียวเข้ม แต่เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างของการเจริญเติบโตของหญ้าด้วยวิธีทางสถิติระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 28/1 และ 49/1 พบว่า การเจริญเติบโตของลำต้นทั้งความสูงและมวลชีวภาพไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในส่วนของราก ชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 49/1 เจริญเติบโตได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แสดงว่าการใส่ปุ๋ยยูเรีย (ไนโตรเจน) เป็นการกระตุ้นการเจริญเติบโตในส่วนของใบและลำต้นได้ดีกว่าราก

ตารางที่ 10 สรุปการเจริญเติบโตของหญ้างูกินนีสีม่วงในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

		Exp. 1			Exp. 2		Exp. 3			Exp. 4			Exp. 5
Plant Growth		Oil content, g oil/kg soil			Re-treatment		Density, plants/pot			C/N Ratio			Soil
		Control	28.5	50.5	Cut-Plant	New-Plant	2	3	4	10/1	28/1	49/1	Depth
Shoot	length, cm	96.97	71.60	61.65	66.33	33.45	43.58	45.23	54.71	-	81.13	88.83	91.33
	growth rate, cm/day	1.09	0.64	0.48	1.01	0.32	0.46	0.49	0.66	-	1.17	1.31	1.35
	biomass, g	6.93	1.06	0.90	1.38	0.21	0.50	0.46	0.41	-	5.72	6.07	6.27
	growth rate, g biomass /day	0.121	0.018	0.016	0.020	0.002	0.007	0.007	0.006	-	0.101	0.107	0.111
Root	length, cm	79.13	36.00	19.83	33.57	18.80	22.50	22.85	24.55	-	37.40	52.10	61.10
	growth rate, cm/day	1.19	0.35	0.17	0.24	0.17	0.21	0.22	0.25	-	0.47	0.73	1.09
	biomass, g	1.85	0.53	0.35	1.03	0.14	0.19	0.14	0.13	-	1.25	1.75	1.95
	growth rate, g biomass /day	0.031	0.010	0.006	0.012	0.002	0.003	0.002	0.002	-	0.022	0.031	0.035

หมายเหตุ - หญ้างูกินนีสีม่วงไม่สามารถเจริญเติบโต



ภาพที่ 17 การเจริญเติบโตของหญ้านิสีม่วง ความหนาแน่นต่างๆ ที่ปลูกในดินปนเปื้อน น้ำมันหล่อลื่น เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในชุดการทดลองที่ 3

- a) ความสูงของลำต้นหญ้านิสีม่วง
- b) ความยาวของรากหญ้านิสีม่วง
- c) มวลชีวภาพของลำต้นหญ้านิสีม่วง
- d) มวลชีวภาพของรากหญ้านิสีม่วง

ในชุดการทดลองที่ 5 ได้จากการนำสถานะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดจากชุดการทดลองที่ 1-4 มาใช้ คือ ปลูกหญ้านิสีม่วง 3 ต้นต่อกระถาง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง และปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 การเจริญเติบโตของหญ้านิสีม่วงจึงมีลักษณะใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 4 (ภาพที่ 18) ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 แตกต่างกันในส่วนของความยาวราก โดยรากของหญ้าสามารถยังลึกลงสู่ความลึกของกระถาง ซึ่งมีความยาวรากเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 61 เซนติเมตร เนื่องจากใช้กระถางที่มีความลึก 60 เซนติเมตร



ภาพที่ 18 การเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ในชุดการทดลองที่ 5 ที่ระยะเวลา 56 วัน

3. การเปลี่ยนแปลงน้ำมันในดิน

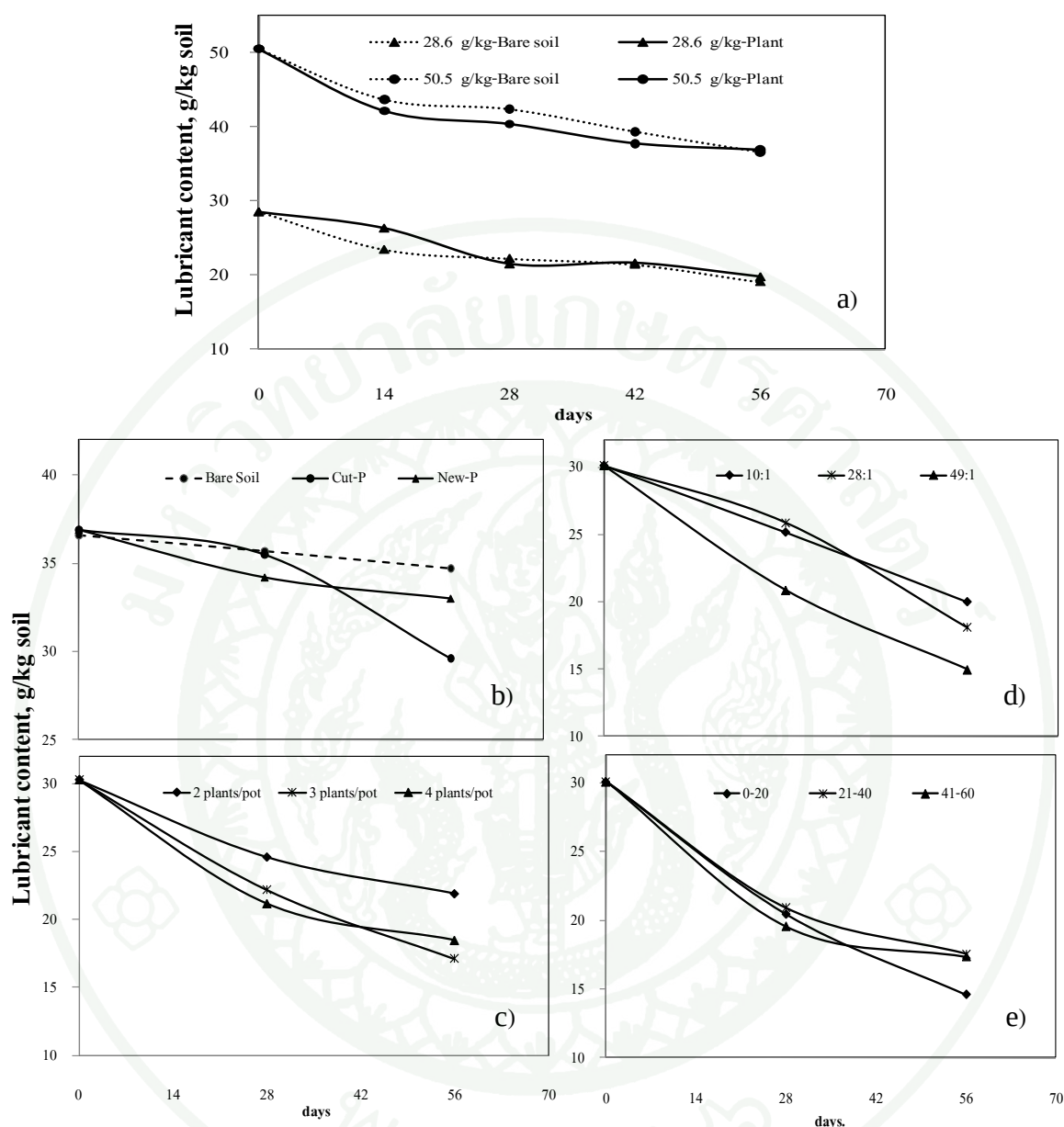
3.1 การเปลี่ยนแปลงน้ำมันทั้งหมดในดิน

การศึกษาผลการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยหญ้ากีนีสีม่วง ได้ทำการทดลองโดยใช้ดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่น 0, 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยทำการทดลองชุดละ 56 วัน ปริมาณการเปลี่ยนแปลงน้ำมันในดิน แสดงดังภาพที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันทั้งหมด องค์ประกอบน้ำมันและการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง แสดงดังตารางที่ 11

ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่น 0, 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้หญ้ากีนีสีม่วง 1 ต้นต่อกระถาง เปรียบเทียบกับไม่ปลูกหญ้า ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดที่สกัดได้เริ่มต้นการทดลอง พบว่า ดินที่ไม่มีการผสมน้ำมันหล่อลื่นมีค่า 0.2 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง อาจเป็นน้ำมันที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตในดิน และจากการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ระหว่างการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในดินทั้งสองระดับความเข้มข้น มีแนวโน้มลดลง

ตลอดระยะเวลาการทดลอง ทั้งในชุดการทดลองที่มีการปลูกหญ้า และไม่ปลูกหญ้า (ภาพที่ 19 (a)) ทั้งนี้หญ่ากินนี้สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อดินมีความเข้มข้นน้ำมัน 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง และการปลูกหญ้าให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับการไม่ปลูกพืชคือ ร้อยละ 30 และ 33 ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 56 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจำนวนพืชไม่เหมาะสมกับปริมาณดินปนเปื้อน (Gerhardt *et al.*, 2009) โดยการย่อยสลายจะเกิดขึ้นสูงในระยะเวลา 28 วันแรก และพบว่าอัตราการย่อยสลายในดินที่มีการปลูกหญ่าสูงกว่าไม่ปลูกหญ่าเล็กน้อย และองค์ประกอบของน้ำมันถูกย่อยสลายแตกต่างกัน โดยจะกล่าวในหัวข้อ 3.2 ถัดไป ส่วนดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีผลยับยั้งการเติบโตของพืช ทำให้ชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชมีประสิทธิภาพการบำบัดเพียงร้อยละ 27 ใกล้เคียงกับการไม่ปลูกพืช

ชุดการทดลองที่ 2 เมื่อนำปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ที่ผ่านการบำบัดมาแล้ว 56 วัน (จากชุดการทดลองที่ 1) มาบำบัดซ้ำโดยการปลูกต้นกล้าใหม่และตัดลำต้นของหญ่า เปรียบเทียบกับดินปนเปื้อนที่ไม่ปลูกพืช ซึ่งวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นก่อนการทดลองได้เท่ากับ 36.9 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ภาพที่ 19 (b)) พบว่า การตัดลำต้นของหญ่าแล้วปล่อยให้เจริญเติบโตอีกครั้ง เป็นเวลา 56 วัน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 20 มากกว่าการปลูกหญ่าชนิดนั้นใหม่ ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 11 ส่วนดินปนเปื้อนที่ไม่ปลูกพืช ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียง ร้อยละ 5 สอดคล้องกับมวลชีวภาพของทั้งลำต้นและรากจากการตัดลำต้นมีค่ามากกว่าการปลูกใหม่ (ภาพที่ 16 และตารางที่ 10) เพราะการตัดลำต้นได้กระตุ้นให้เกิดการแตกหน่อ รวมทั้งมีระบบรากเดิม การเจริญเติบโตในช่วงแรกเกิดจากการใช้อาหารสำรองที่พืชสะสมไว้แหล่งสะสมคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดของหญ่ากินนีนั่น คือราก (Navarro – Chavira *et al.*, 1983) ส่วนการเจริญเติบโตในระยะหลัง ขึ้นอยู่กับการสังเคราะห์แสงของใบที่เกิดขึ้นใหม่ ส่วนการปลูกใหม่หญ่าต้องใช้ระยะเวลาช่วงแรกปรับตัวให้เข้ากับสารปนเปื้อนในดิน อีกทั้งอีกทั้งน้ำมันหล่อลื่นที่เหลืออยู่เป็นพื้นที่ย่อยสลายยาก มวลโมเลกุลสูง (Lee *et al.*, 2007) จึงอาจทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันในดิน

- ผลของความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นต่อประสิทธิภาพการบำบัด (ชุดที่ 1)
- ผลของการบำบัดซ้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด (ชุดที่ 2)
- ผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด (ชุดที่ 3)
- ผลของการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด (ชุดที่ 4)
- ผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด (ชุดที่ 5)

ชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความหนาแน่นพืชต่อประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งทำการแปรผันความหนาแน่นของหญ้าต่างกัน 3 ค่า คือ 2, 3 และ 4 ต้นต่อกระถาง ในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ตารางที่ 11 และภาพที่ 19 (c)) พบว่า การปลูกหญ้า 3 ต้นต่อกระถาง ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด คือปริมาณน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดร้อยละ 44 และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบน้ำมันแต่ละตัว พบว่า ให้ประสิทธิภาพบำบัด กลุ่มอิมัลชัน ร้อยละ 47 และกลุ่มอะโรมาติก ร้อยละ 34 โดยอัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง รองลงมาคือปลูกหญ้า 4 ต้นต่อกระถาง ให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันทั้งหมดร้อยละ 39 หรือสามารถบำบัดองค์ประกอบน้ำมัน กลุ่มอิมัลชัน (ร้อยละ 44) และกลุ่มอะโรมาติก (ร้อยละ 34) อัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นสูงกว่าการปลูกหญ้า 3 ต้นต่อกระถาง ที่ระยะเวลา 28 วันแรก และหลังจากนั้น อัตราการย่อยสลายลดลง เนื่องมาจากความหนาแน่นของต้นหญ้าต่อพื้นที่สูงมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช การปลูกหญ้า 2 ต้นต่อกระถาง ปริมาณน้ำมันในดินลดลงอย่างต่อเนื่อง ให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำสุดเพียงร้อยละ 28 ซึ่งต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 (ร้อยละ 30) ที่มีการปลูกหญ้า 1 ต้นต่อกระถาง ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในดินเริ่มต้นในชุดการทดลองที่ 3 มากกว่าชุดที่ 1 แต่จากการทดลองชุดนี้การเจริญเติบโตของหญ้าที่วัดจากมวลชีวภาพของลำต้นและรากทั้งในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อน ควรมีการเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช

ชุดการทดลองที่ 4 ศึกษาผลของการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้สารละลายปุ๋ยยูเรีย ปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10/1, 28/1 และ 49/1 ในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ภาพที่ 19 (d)) พบว่า หญ้าสามารถเจริญเติบโตได้ดีใกล้เคียงชุดควบคุมในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 49/1 รองลงมา 28/1 แต่ที่อัตราส่วน 10/1 พบว่า หญ้าไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เนื่องจากพืชในดินเป็นด่างแก่ (9.1) ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นในดินสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของหญ้า คือที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 49/1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ผ่านมา (1-3) โดยบำบัดน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดได้ ร้อยละ 50 หรือสามารถบำบัดองค์ประกอบของน้ำมัน กลุ่มอิมัลชัน ร้อยละ 61 และกลุ่มอะโรมาติก ร้อยละ 47 การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง รองลงมาเป็นอัตราส่วน 28/1 และ 10/1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดได้ ร้อยละ 40 และ 34 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันทั้งหมด องค์ประกอบน้ำมันและการเจริญเติบโตของหญ่ากินนี้สีม่วง

Treatment	Removal, %				Treatment	Removal, %			
	TEM.	Saturated	Aromatic	Polar		TEM.	Saturated	Aromatic	Polar
Exp.1 Concentration	Lubricant content 28.6 g/kg soil				Exp.1 Concentration	Lubricant content 50.5 g/kg soil			
Bare soil	33.22	40.61	29.69	2.42	Bare soil	27.53	16.73	42.01	30.44
Single plant	30.42	22.16	50.80	-33.63	Single plant	26.95	21.08	36.12	22.87
Exp.3 Grasses density	Lubricant content 30.3 g/kg soil				Exp.2 Re-treatment	Lubricant content 36.9 g/kg soil			
2 pt./pot	27.72	33.63	26.02	-58.89	Bare soil	5.23	18.28	2.06	-74.76
3 pt./pot	43.56	46.99	34.41	-48.96	Cut-plant	19.81	46.54	38.29	-52.76
4 pt./pot	38.94	43.89	33.68	-33.95	New-plant	10.59	24.74	18.22	-101.15
Exp.4 C/N ratio	Lubricant content 30.1 g/kg soil				Exp.5 Soil depth	Lubricant content 30.1 g/kg soil			
10/1	33.56	36.99	29.15	22.14	0-20 cm.	51.53	53.66	42.44	64.24
28/1	39.88	45.75	31.35	23.57	21-40 cm.	41.65	46.24	30.44	42.95
48/1	50.33	60.75	46.44	-13.59	41-60 cm.	42.34	45.41	35.79	40.24

หมายเหตุ TEM.: Total extractable matter (Oil content), pt : plant

ชุดการทดลองที่ 5 ศึกษาผลของความลึกของดินต่อประสิทธิภาพการบำบัด จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อเลือกสถานะที่เหมาะสมมากที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง พบว่า การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยใช้หญ้ากีนีนิ่ม่วง 3 ต้นต่อกระถาง และปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 พบว่า จากการวัดความยาวรากของหญ้ามี่ค่าเฉลี่ย 61.10 เซนติเมตร โดยที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดทั้งน้ำมันทั้งหมด (ร้อยละ 52) หรือสามารถบำบัดองค์ประกอบน้ำมัน กลุ่มอิมัลชัน (ร้อยละ 54) และกลุ่มอะโรมาติก (ร้อยละ 42) และกลุ่มมีซัว (ร้อยละ 64) เนื่องจากที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตรระบบรากเจริญเติบโตได้ดีทั้งแนวราบและแนวดิ่ง และบริเวณผิวหน้าของดินมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้โดยตรง (Hutchinson *et al.*, 2001) ส่วนที่ระดับความลึก 21-40 และ 41-60 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 42)

เมื่อพิจารณาย้อนกลับไปยัง กรณีการบำบัดซ้ำอีกครั้ง เป็นเวลาอีก 56 วัน โดยการตัดลำต้นเหนือพื้นดิน 10 เซนติเมตร เพื่อให้แตกหน่อใหม่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ให้เพิ่มสูงขึ้นได้ (เพิ่มขึ้นร้อยละ 20) ดังนั้น หากทำการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยใช้หญ้ากีนีนิ่ม่วง 3 ต้นต่อกระถาง และปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 (ชุดการทดลองที่ 5) คาดว่า ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นได้มากกว่าร้อยละ 71

3.2 ปริมาณน้ำมันในน้ำชะ

จากการทดลองได้มีการเก็บน้ำชะที่เกิดจากการรดน้ำในชุดการทดลองที่ 1 ในดิน/ดินปนเปื้อนที่ไม่มีการปลูกพืช เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่อาจสูญหายเนื่องจากการรดน้ำ แสดงดังตารางที่ 12 และ 13 ซึ่งพบว่าดินดินที่มีการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นทำให้เกิดน้ำชะในปริมาณสูงถึงร้อยละ 30 และ 38 ของปริมาณน้ำที่ใส่รด ทั้งนี้เนื่องจากดินที่ปนเปื้อนมีน้ำมันหล่อลื่นเคลือบเม็ดดิน และแทรกอยู่บริเวณช่องว่างของดิน แต่จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกชะ พบว่า น้ำมันถูกชะออกมาเพียงร้อยละ 0.003 ของน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมดที่ปนเปื้อนในดิน เป็นเพราะว่า น้ำมันยึดเกาะกับอนุภาคดินด้วยพันธะต่างๆ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์อย่างอ่อน (weak van der waal) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen binding) และ พันธะน้ำและแคตไอออน (water and cation binding) สอดคล้องกับการทดลองของ Yong *et al.* (1994) ซึ่งทดสอบการเคลื่อนที่ของน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันดิบ พบว่า น้ำมันส่วนใหญ่จะเคลือบบริเวณเม็ดดิน (ร้อยละ 85.3) รองลงมาแทรกด้วย

บริเวณช่องว่างของดิน (ร้อยละ 8.2) ระเหยสู่บรรยากาศและถูกย่อยสลายตามธรรมชาติ (ร้อยละ 4.3) และถูกชะโดยน้ำฝนเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 2.2) ในระยะเวลา 7 ปี

ตารางที่ 12 ปริมาณน้ำชะที่เกิดจากการรดน้ำเป็นเวลา 56 วัน (ชุดการทดลองที่ 1)

Day	Watering, mL	Leachate, mL		
	25 mL/day	0 g oil/kg soil	28.6 g oil/kg soil	50.5 g oil/kg soil
14	350	39	130	169.5
28	350	24	107	127
42	350	30	93.3	128.5
56	350	35	87.5	110.4
Total	1400 (100%)	128 (9.14%)	417.8 (29.84%)	535.4 (38.24%)

ตารางที่ 13 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สกัดได้จากน้ำชะ (ชุดการทดลองที่ 1)

Lubricant contaminated soil	Lubricant in soil		Lubricant in leachate	
	g oil/kg soil	g oil	mg oil/L	mg oil
28.6 g oil/kg soil	28.6	42.9	3.38	1.41 (0.003%)
50.5 g oil/kg soil	50.5	75.75	4.52	2.42 (0.003%)

3.3 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

จากการทดลองแยกองค์ประกอบน้ำมันโดยวิธีแฟลตโครมาโทกราฟี สามารถแยกองค์ประกอบประกอบได้ 4 กลุ่ม คือ แอสฟาทีน อิมตัว อะโรมาติก และเรซิน ในการแสดงผลได้รวมกลุ่มแอสฟาทีน และ เรซิน ไว้ด้วยกัน เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก มวลโมเลกุลสูง ปริมาณองค์ประกอบในแต่ละกลุ่มเริ่มต้นต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณน้ำมันหล่อลื่นในดินจากการเตรียมแต่ละชุดการทดลองต่างกัน ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวและอะโรมาติก

สูญหายไปจากดินจากระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ouch ขั้ว โดยพืช และจากระบวนการย่อยสลายโดยแสง แต่ในกลุ่มมีข้าว (แอสพาทีนและเรซิน) มีปริมาณเพิ่มขึ้น อาจมาจากส่วนที่เหลือจากระบวนการย่อยสลายกลุ่มอิมตัวและอะโรมาติกจะกลายเป็นสารกลุ่มมีข้าว (Lee *et al.*, 2007)

การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันในแต่ละชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 วิเคราะห์วันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56 ชุดการทดลองที่ 3 วิเคราะห์วันที่ 0, 28 และ 56 และชุดการทดลองที่ 4 วิเคราะห์วันที่ 0 และ 56 แสดงผลดังตารางที่ 11 และภาพที่ 20, 21 และ 22

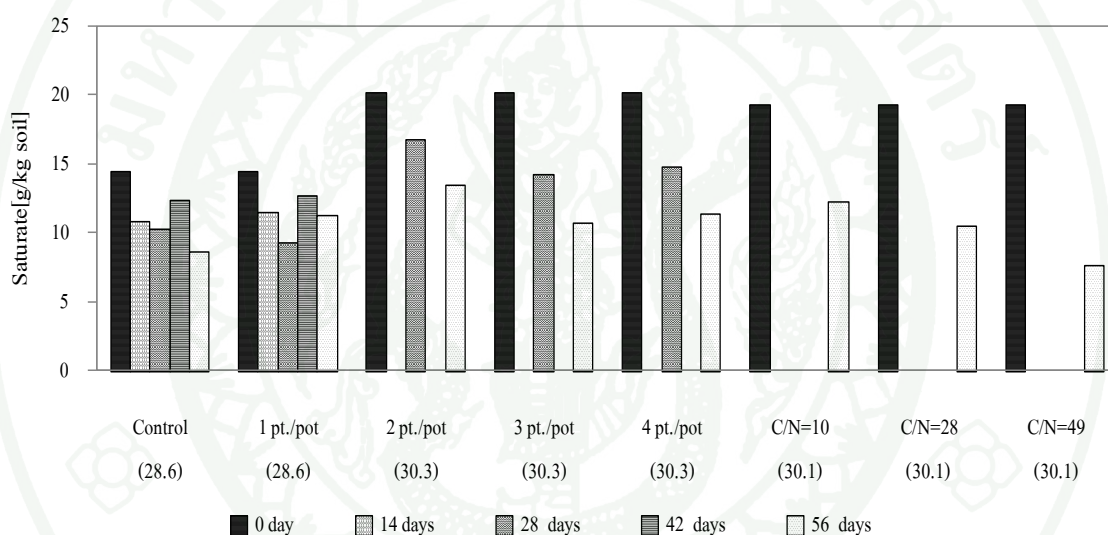
3.3.1 องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัว

ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ภาพที่ 20) เริ่มต้นการทดลองมีค่า 14.3, 20.1 และ 19.2 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (SD = 3.12 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คิดเป็นร้อยละ 50-64 ขององค์ประกอบทั้งหมด องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวเป็นกลุ่มที่ถูกย่อยสลายง่ายที่สุด เพราะโครงสร้างส่วนใหญ่สารประกอบอัลเคน ได้แก่ โซลัน (C_{10} - C_{20}) โซยาว (C_{20} - C_{40}) และแบบมีกิ่งก้าน โดยความยากง่ายในการย่อยสลายคือ โซลันถูกย่อยสลายได้ดีกว่า โซยาว และแบบมีกิ่งก้าน ตามลำดับ (Balba *et al.*, 1998)

ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า มีปริมาณลดลงในทุกชุดการทดลอง ลดลงมากที่สุดในชุดการทดลองที่ 4 การปลูกหญ้า 3 ต้นต่อการถาง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ที่มีการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1 มีค่าลดลง 11.7 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง คิดเป็นร้อยละ 61 รองลงมา คือ ในชุดการทดลองที่ 3 การปลูกหญ้า 3 ต้นต่อการถาง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ลดลง 9.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง คิดเป็นร้อยละ 47 จากชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการวิเคราะห์ถี่มากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวพบว่า ในช่วง 28 วันแรกมีแนวโน้มลดลง แต่ในวันที่ 42 มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงอีกครั้งในวันที่ 56 อาจเกิดจากการย่อยสลายขององค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกในช่วงแรก กลายเป็นน้ำมันกลุ่มอิมตัวสะสมขึ้น แต่หลังจากนั้นเมื่ออัตราการย่อยสลายกลุ่มอะโรมาติกลดลง แต่อัตราการย่อยน้ำมันกลุ่มอิมตัวยังคงคงที่ จึงทำให้ปริมาณน้ำมันกลุ่มอิมตัวลดลงอีกครั้ง

3.3.2 องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติก

ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดิน (ภาพที่ 21) เริ่มต้นการทดลองมีค่า 12.2, 10.9 และ 8.2 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (SD = 2.04 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 27-43 ขององค์ประกอบทั้งหมด น้ำมันกลุ่มอะโรมาติก ประกอบด้วยโมโนอะโรมาติก และโพลีอะโรมาติก ซึ่งมีสารหลายตัวในกลุ่มโพลีอะโรมาติกเป็นสารก่อมะเร็ง และอนุพันธ์ที่เกิดจากการย่อยสลายมีความเป็นพิษสูง (Balba *et al.*, 1998) ความสามารถในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของสารประกอบ

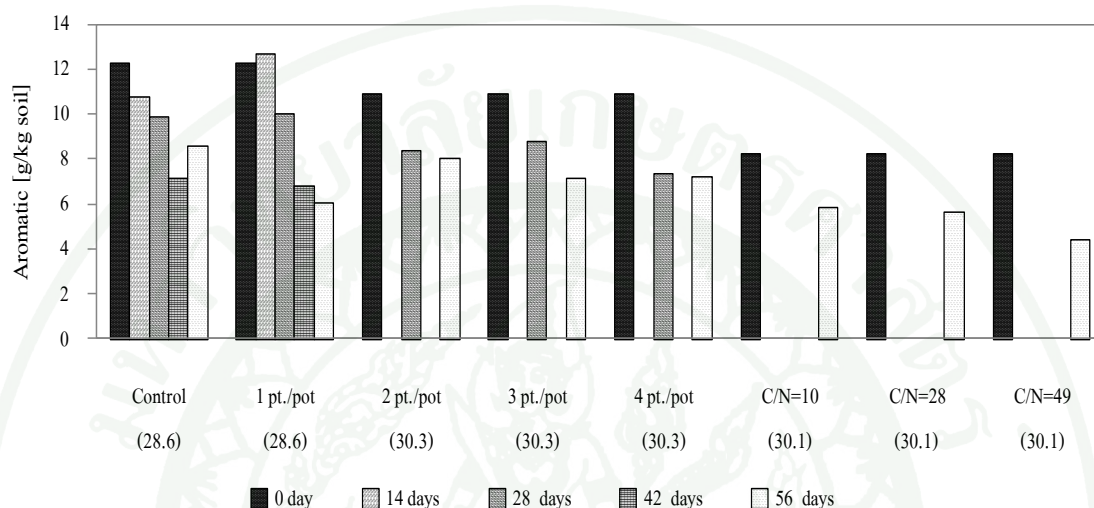


ภาพที่ 20 ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

หมายเหตุ () คือ ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในดิน, กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

จากการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ปริมาณปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกมีแนวโน้มลดลงในทุกชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่มีปริมาณลดลงมากที่สุด คือ การปลูกหญ้า 1 ต้นต่อตาราง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ลดลง 6.2 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง คิดเป็นร้อยละ 51 รองลงมา คือ ในชุดการทดลองที่ 4 การปลูกหญ้า 3 ต้นต่อตาราง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ที่ปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 49/1 มีค่าลดลง 3.8 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง คิดเป็นร้อยละ 46 ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน ซึ่งพบว่า ในชุดการทดลองที่ 1 มีจำนวนสูงกว่าชุด

การทดลองอื่น คือ 9.4 logMPN ต่อกรัมดินแห้ง (ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.1) ซึ่งผลการทดลองนี้บอกเป็นนัยได้ว่าการย่อยสลายกลุ่มอะโรมาติกไม่เกี่ยวข้องกับพืชหรือกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรากพืช

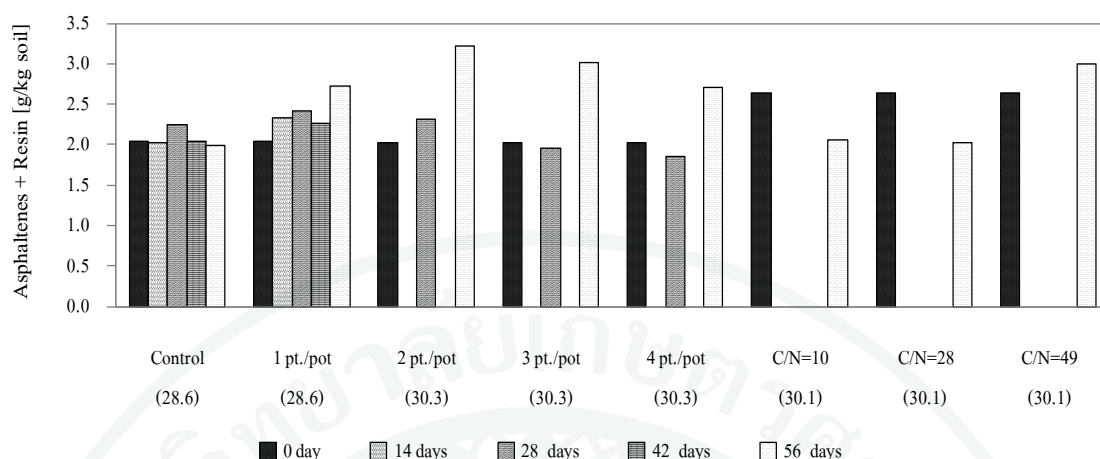


ภาพที่ 21 ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติกในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

หมายเหตุ () คือ ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในดิน, กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

3.3.3 องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีซัว

องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีซัว หมายถึง กลุ่มแอสฟาทีน คืออนุภาคเล็กๆ ที่กระจายตัวในน้ำมัน และกลุ่มเรซิน คือของแข็งที่ละลายได้ในน้ำมัน ซึ่งสารประกอบทั้งสองกลุ่มเป็นพวกมีซัว จึงได้แสดงผลรวมกัน ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีซัวในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดิน (ภาพที่ 22) เริ่มต้นการทดลองมีค่า 2.04, 2.02 และ 2.64 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (SD = 0.35 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่น้อยที่สุดในน้ำมันหล่อลื่น คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 7.1-7.8 ขององค์ประกอบทั้งหมด ระหว่างการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เพราะว่าองค์ประกอบกลุ่มนี้ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ยากมาก และอาจเพิ่มมาสารประกอบที่เหลือจากกระบวนการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพขององค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอื่น โดยในชุดการทดลองที่ 3 เพิ่มขึ้นจากปริมาณเริ่มต้นถึงร้อยละ 25-37 จากการศึกษาของ Balba *et al.* (1998) รายงานว่า องค์ประกอบน้ำมันกลุ่มแอสฟาทีนมีลักษณะคล้ายอิฐมวล ไม่ละลายน้ำ และไม่เปื้อนพิษต่อสิ่งแวดล้อม



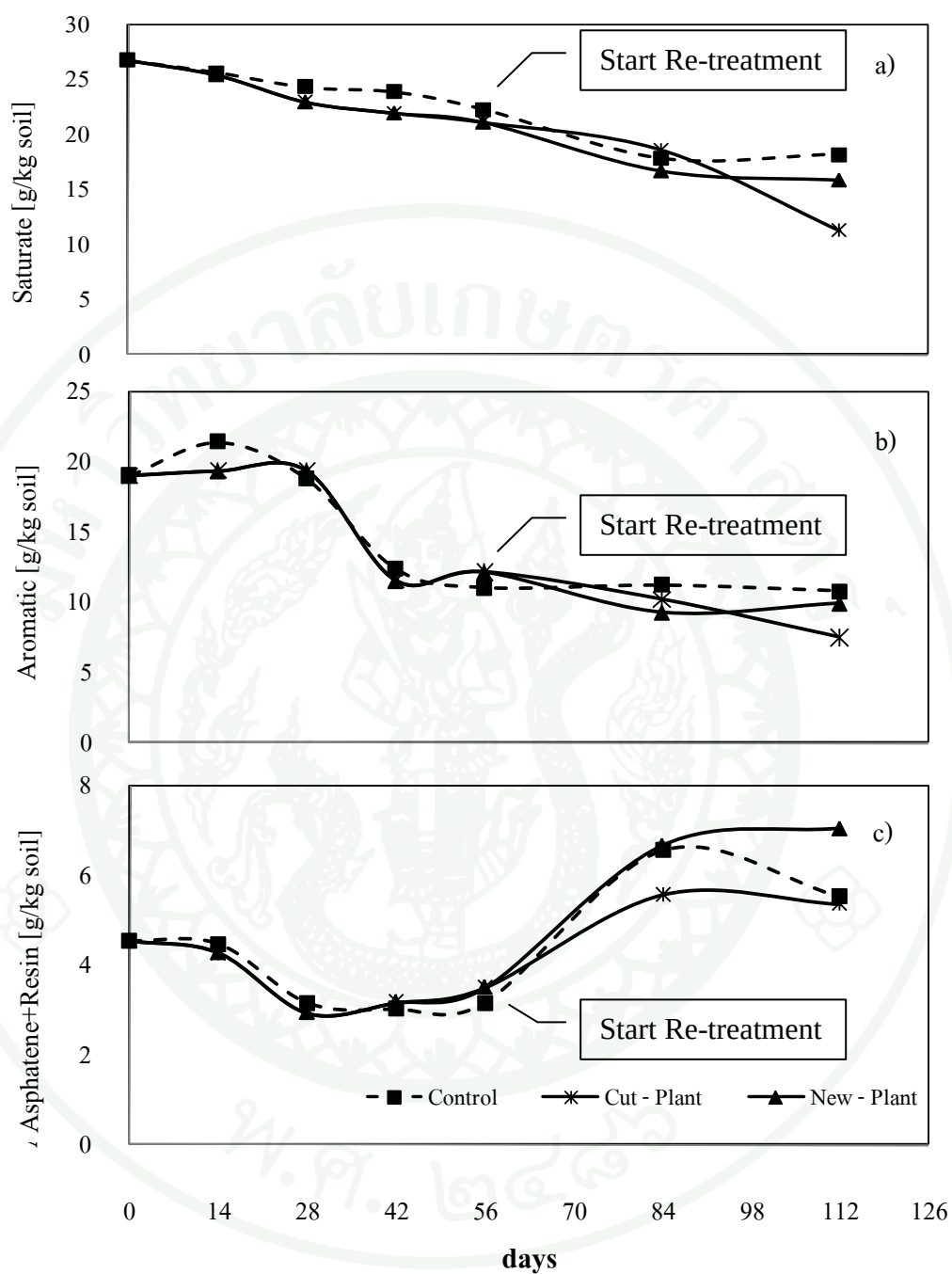
ภาพที่ 22 ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีขี้ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

หมายเหตุ () คือ ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในดิน, กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

3.4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง

ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีระยะเวลาการบำบัดทั้งหมด 112 วัน แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก (ชุดการทดลองที่ 1) บำบัดดินปนเปื้อนด้วยหญ้ากินนีสีม่วง 1 ต้นต่อกระถาง เป็นเวลา 56 วัน วิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันวันที่ 0, 14, 28, 42 และ 56 ช่วงที่สอง (ชุดการทดลองที่ 2) บำบัดดินปนเปื้อนซ้ำด้วยการปลูกหญ้าใหม่ และตัดลำต้นเดิมของหญ้า เป็นเวลา 56 วัน วิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันวันที่ 0, 28 และ 56 แสดงผลดังตารางที่ 10 และภาพที่ 23

จากผลการทดลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบน้ำมันแต่ละตัว ใกล้เคียงกับหัวข้อที่ 3.2 จากการนำชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มาพิจารณาร่วมกันจะเห็นแนวโน้มชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องจากระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ปริมาณองค์ประกอบน้ำมัน กลุ่มอิมัลซิไฟเออร์ และมิซิว เริ่มต้นการทดลองมีปริมาณ 26.8, 19.1 และ 4.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 53, 38 และ 9 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองช่วงแรก ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันทุกตัวในดินปนเปื้อนที่ไม่ปลูกหญ้าและปลูกหญ้า คือ ดินปนเปื้อนที่ปลูกหญ้า บำบัดองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมัลซิไฟเออร์ และมิซิว ได้ร้อยละ 21, 36 และ 30 ตามลำดับ ส่วนดินปนเปื้อนที่ไม่ปลูกหญ้าบำบัดได้ร้อยละ 16, 42 และ 22 ตามลำดับ หลังจากการบำบัดซ้ำในช่วงที่สองแต่ละชุดการทดลองสามารถสังเกตเห็นความแตกต่าง โดยกลุ่มอิมัลซิไฟเออร์การย่อยสลายคงที่



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.1 กรัมต่อ กิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 2)

a) ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัว

b) ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอะโรมาติก

c) ปริมาณองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มมีซัว

ตลอดการทดลอง แต่ในชุดการทดลองตัดลำต้นของต้นหญ้ามีอัตราย่อยสลายกลุ่มอิมตัวสูงในช่วงวันที่ 84-112 กลุ่มอะโรมาติกมีอัตราการย่อยสลายสูงในช่วงวันที่ 28-42 หลังจากนั้นเริ่มคงที่ อาจเป็นเพราะกลุ่มอะโรมาติกมีโครงสร้างเป็นวงแหวนในช่วงแรกจุลินทรีย์ต้องปล่อยเอนไซม์มาย่อยให้โครงสร้างเล็กลงก่อนจึงสามารถย่อยสลายได้ ส่วนกลุ่มมีขั้วเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการบำบัดซ้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 112 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ตัดลำต้นของต้นหญ้าสามารถบำบัดองค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอิมตัวและอะโรมาติกได้เพิ่มขึ้นสูงสุด คือ ร้อยละ 47 และ 38 ตามลำดับ

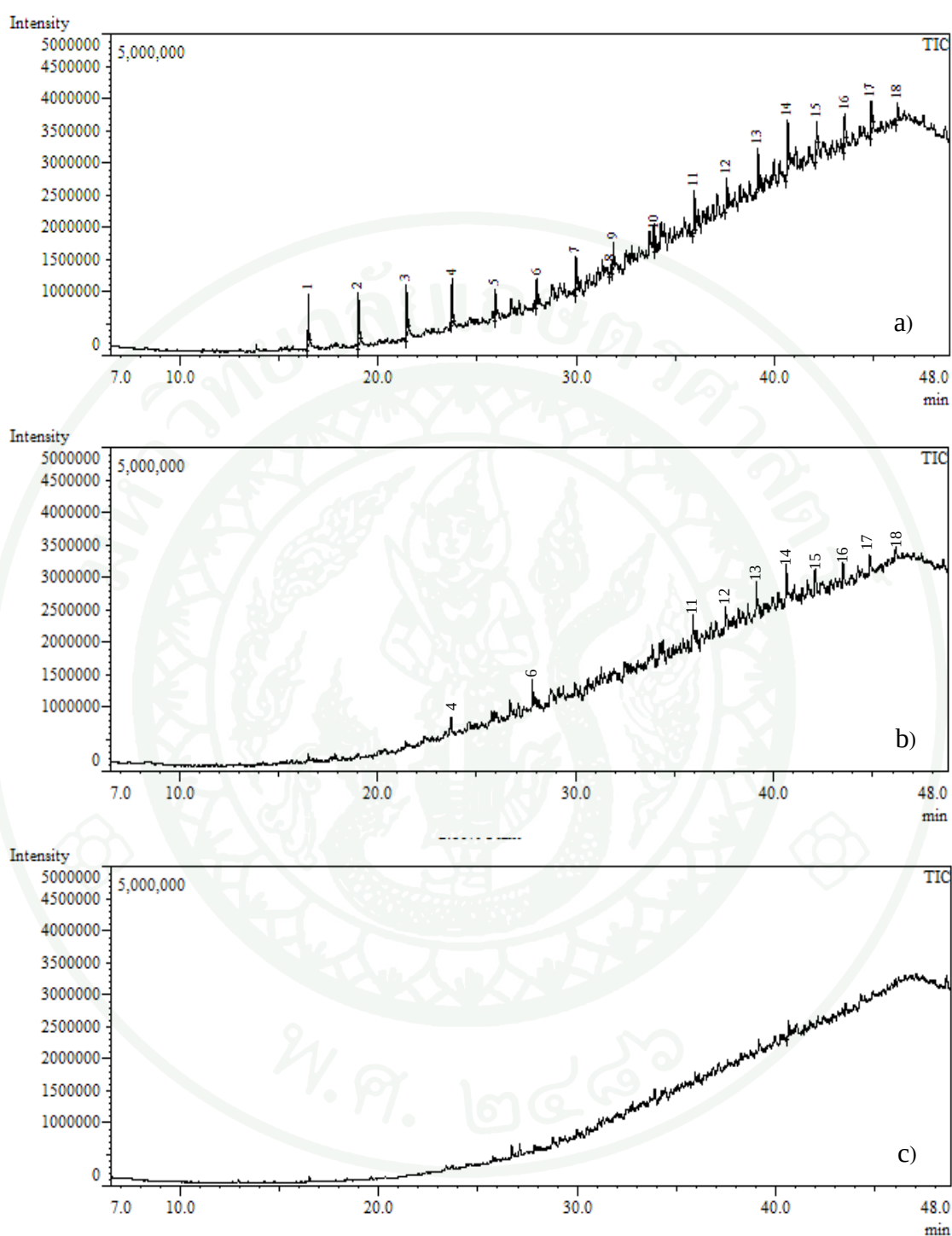
3.5 ชนิดสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันด้วย Gas Chromatography-Mass Spectrometry; GC-MS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่น เปรียบเทียบตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ก่อนและสิ้นสุดการทดลองแต่ละชุด แสดงดังตารางที่ 14 และภาพที่ 24, 25 และ 26

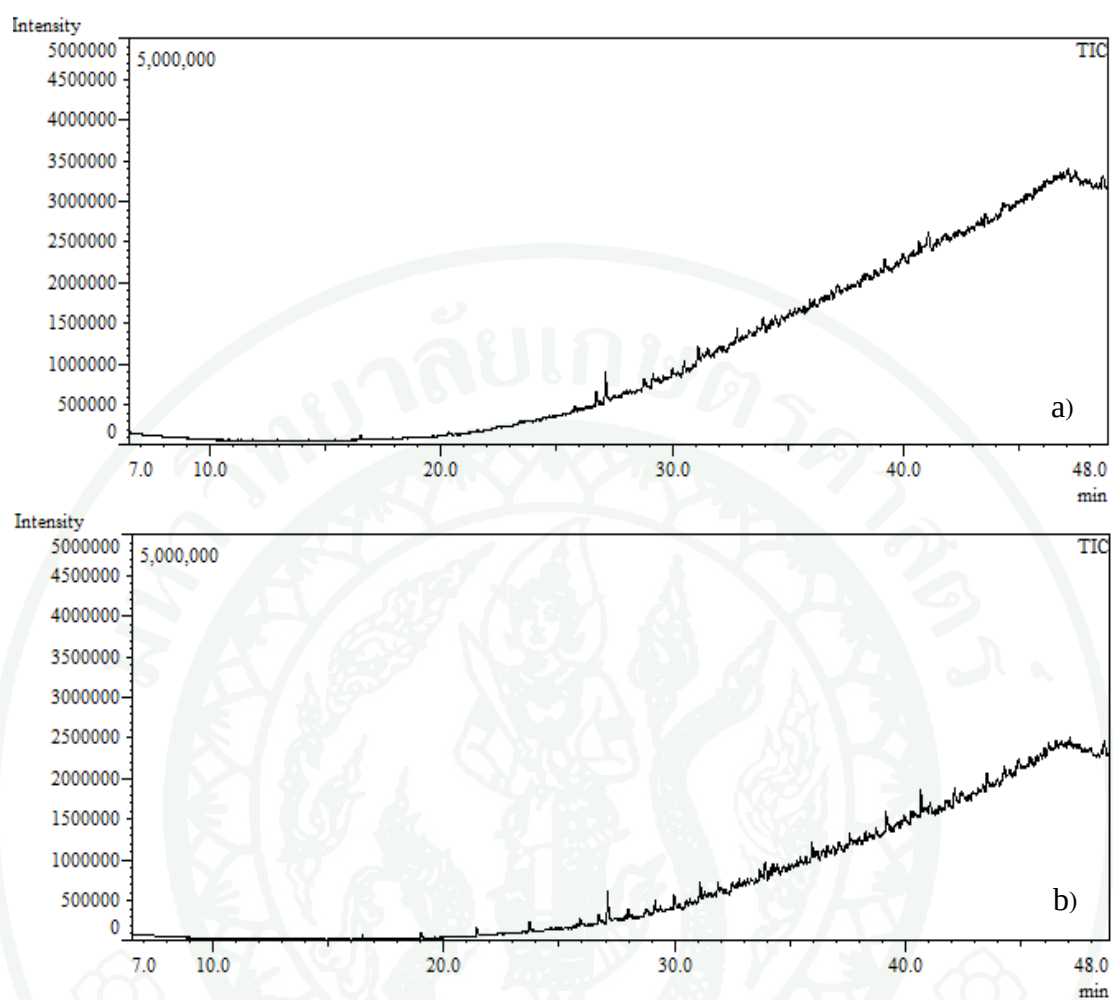
เมื่อทำการวิเคราะห์ชนิดสารประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อเริ่มต้นการทดลองพบสารประกอบ 18 ชนิด (ภาพที่ 24 (a)) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มอิมตัวพวกอัลเคนโซ่ยาว (C_{14} - C_{54}) พบสารโพลีอะโรมาติก 2 ชนิด คือ Phenanthrene และ Anthracene แต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อสังเกตจากพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งทาง EPA จัดว่าสารสองชนิดนี้เป็นสารมลพิษ คืออาจก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ หรือ มะเร็ง (Sinha *et al.*, 2003) แต่จากสมบัติทางเคมีของสารมีความสามารถระเหยได้เมื่อถูกแสงแดด และสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในดิน (เกรียงศักดิ์, 2546) เมื่อสิ้นสุดการทดลองทุกชุดจึงไม่พบสารทั้งสองชนิดนี้ ส่วนสารชนิดอื่นๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในดินปนเปื้อนที่ไม่มีการปลูกหญ้า (ภาพที่ 24 (b)) ยังคงมีสารประกอบพวกอัลเคนโซ่ยาว (C_{30} - C_{54}) โมลโมเลกุลสูงปรากฏอยู่หลายตัว ในขณะที่พวกโซ่สั้น (C_{14} - C_{16}) และสารโพลีอะโรมาติกถูกย่อยสลายไปหมด ส่วนในชุดการทดลองที่ปลูกพืชพบว่าไม่ปรากฏฟิสิกของสารประกอบชนิดใดเลย (ภาพที่ 24 (c) และภาพที่ 24) แสดงว่าการปลูกพืชเพิ่ม/ส่งเสริมประสิทธิภาพการย่อยสลายขององค์ประกอบน้ำมันที่มีโมลโมเลกุลสูง แต่เมื่อพิจารณาการบำบัดตามความลึกของดินปนเปื้อน (ภาพที่ 25) พบว่า สามารถบำบัดได้ที่มีความลึก 0-40 เซนติเมตร แต่ที่ความลึก 41-60 เซนติเมตร พบชนิดสารประกอบเช่นเดียวกับดินปนเปื้อนก่อนการบำบัด แต่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อพิจารณาจากความสูงกราฟ และพื้นที่ใต้กราฟ และไม่พบสารโพลีอะโรมาติก 2 ชนิด คือ Phenanthrene และ Anthracene

ตารางที่ 14 ชนิดสารประกอบในน้ำมันหล่อลื่นที่วิเคราะห์โดย Gas Chromatography-Mass Spectrometry; GC-MS

Peak	Retention Time	Compound Name	Formula
1	16.493	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀
2	19.019	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
3	21.434	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
4	23.731	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
5	25.917	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
6	27.998	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
7	29.985	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈
8	31.725	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀
9	31.875	Hexacosane	C ₂₆ H ₅₄
10	33.967	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀
11	35.947	triacontane	C ₃₀ H ₆₂
12	37.580	Hexacosane	C ₃₂ H ₆₆
13	39.156	Hexatriacontane	C ₃₆ H ₇₄
14	40.660	Tetracontane	C ₄₀ H ₈₂
15	42.117	Tetratetracontane	C ₄₄ H ₉₀
16	43.526	Tetrapentacosan	C ₅₄ H ₁₁₀
17	44.860	butyl-octyl-diphenylamine	C ₂₄ H ₃₅ N
18	46.193	Tetrapentacosa	C ₅₄ H ₁₁₀



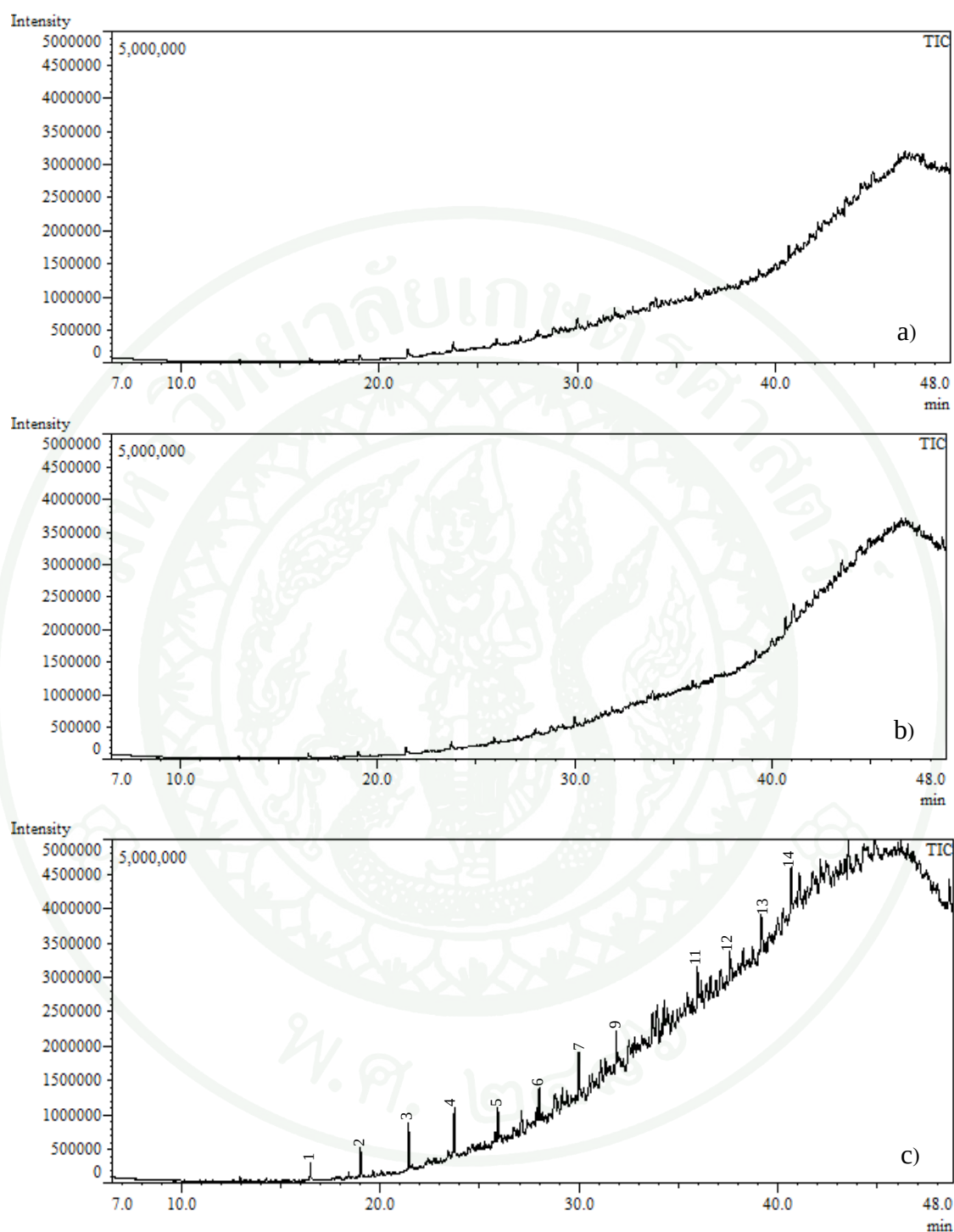
ภาพที่ 24 องค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง(ชุดที่ 1)
 a) เมื่อเริ่มต้นการทดลอง
 b) ไม่มีการปลูกหญ้า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 56 วัน
 c) มีการปลูกหญ้า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 56 วัน



ภาพที่ 25 องค์ประกอบน้ำมันในดิน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 56 วัน

a) ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ปลุกหญ้า 3 ต้นต่อกระถาง (ชุดที่ 3)

b) ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 49/1 (ชุดที่ 4)



ภาพที่ 26 องค์ประกอบน้ำมันในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดที่ 5)

a) ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร

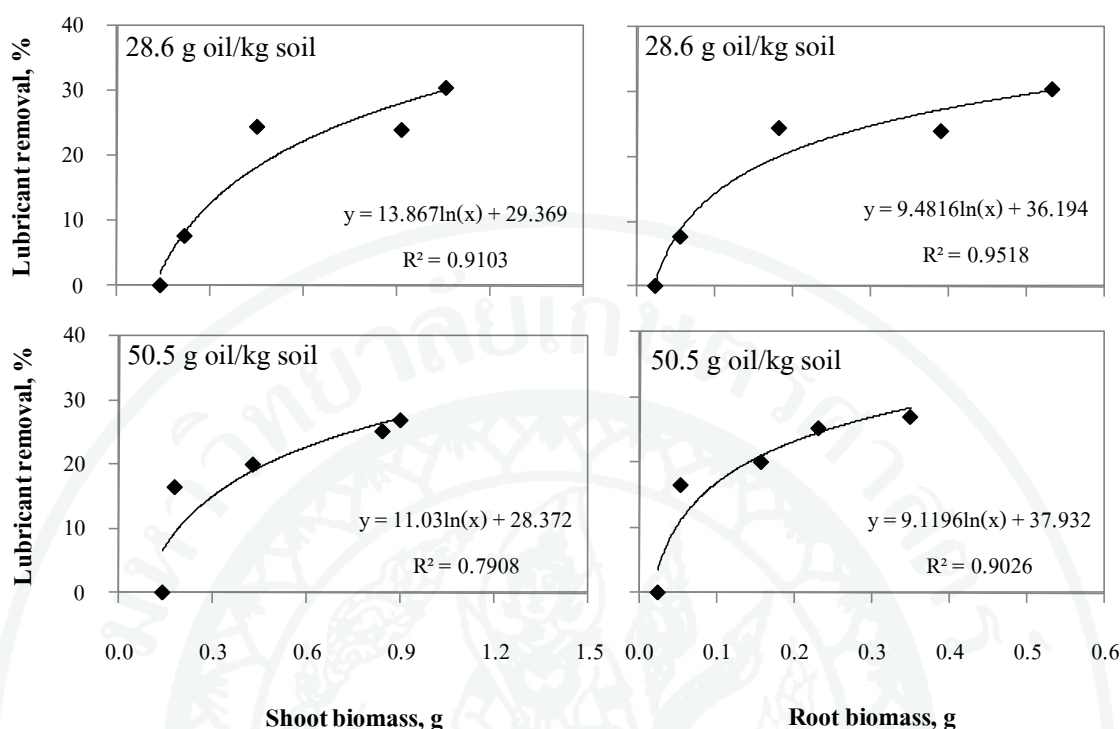
b) ระดับความลึก 21-40 เซนติเมตร

c) ระดับความลึก 41-60 เซนติเมตร

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญ้าและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญากินนี้สีม่วงที่ใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ กับประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่า ในชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการปลูกหญ้า 1 ต้นต่อกระถางในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโกรัมดินแห้ง และ ชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการปลูกหญ้าความหนาแน่นต่างๆ ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโกรัมดินแห้ง ทั้งมวลของลำต้นและรากของหญากินนี้สีม่วงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในเชิงเส้นโค้ง หรือแบบลอการิทึม (logarithm regression) (ภาพที่ 27 และ 28) โดยลักษณะของแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นโดยมีมีลักษณะการเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันนั้นขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการย่อยสลายขององค์ประกอบน้ำมัน ส่วนการเจริญเติบโตของพืชอาจถูกจำกัดเนื่องจากการปรับตัวให้เข้ากับสารพิษ หรือปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในดิน แต่เมื่อมีการใส่ปุ๋ยยูเรียเพื่อปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโกรัมดินแห้ง มีผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญ้าและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นมีความสัมพันธ์กันโดยตรง มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน (linear regression) โดยมีความสัมพันธ์ในระดับสูงมาก ($R^2 = 0.97-0.99$) (ภาพที่ 29) แสดงว่าการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน หรือการใส่ปุ๋ย ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น และ ในขณะเดียวกันได้เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในดิน

ดังนั้นทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด (กำจัดได้ร้อยละ 100) ต้องใช้หญ้าที่เจริญเติบโตขนาดใดในรูปมวลชีวภาพ สามารถคำนวณได้จากสมการ และจากชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัมต่อกิโกรัมดินแห้ง ด้วยหญากินนี้สีม่วง 3 ต้นต่อกระถาง โดยใส่ปุ๋ยยูเรียเพื่อปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 49/1 จากการคำนวณพบว่า ต้องใช้หญ้าที่มีมวลชีวภาพของลำต้นและราก เท่ากับ 11.77 และ 3.41 กรัม ตามลำดับ โดยใช้เวลา 110 วัน (อัตราการเจริญเติบโตของลำต้นและราก เท่ากับ 0.107 และ 0.031 กรัมต่อวัน ตามลำดับ, ตารางที่ 9)



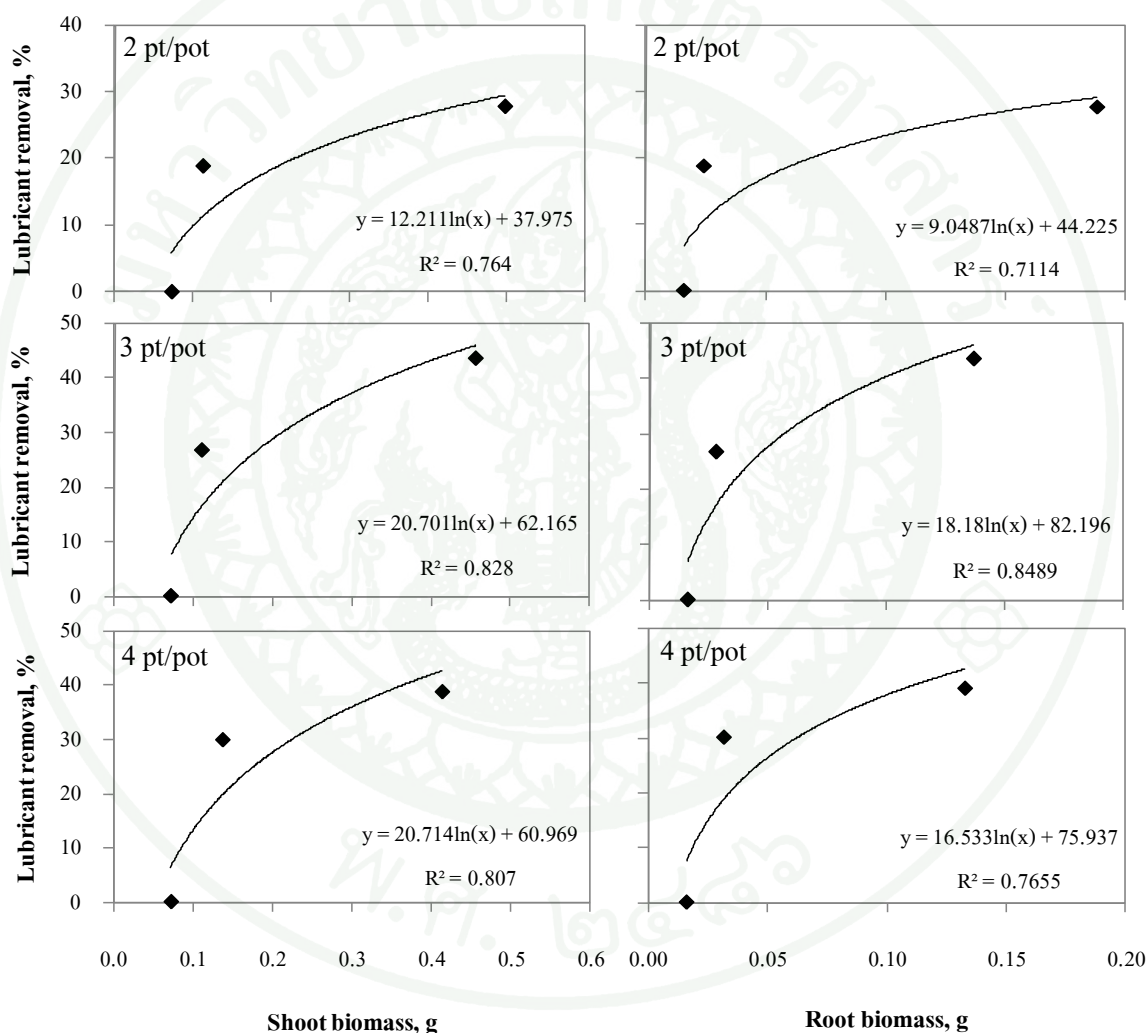
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญาและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 1)

4. กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

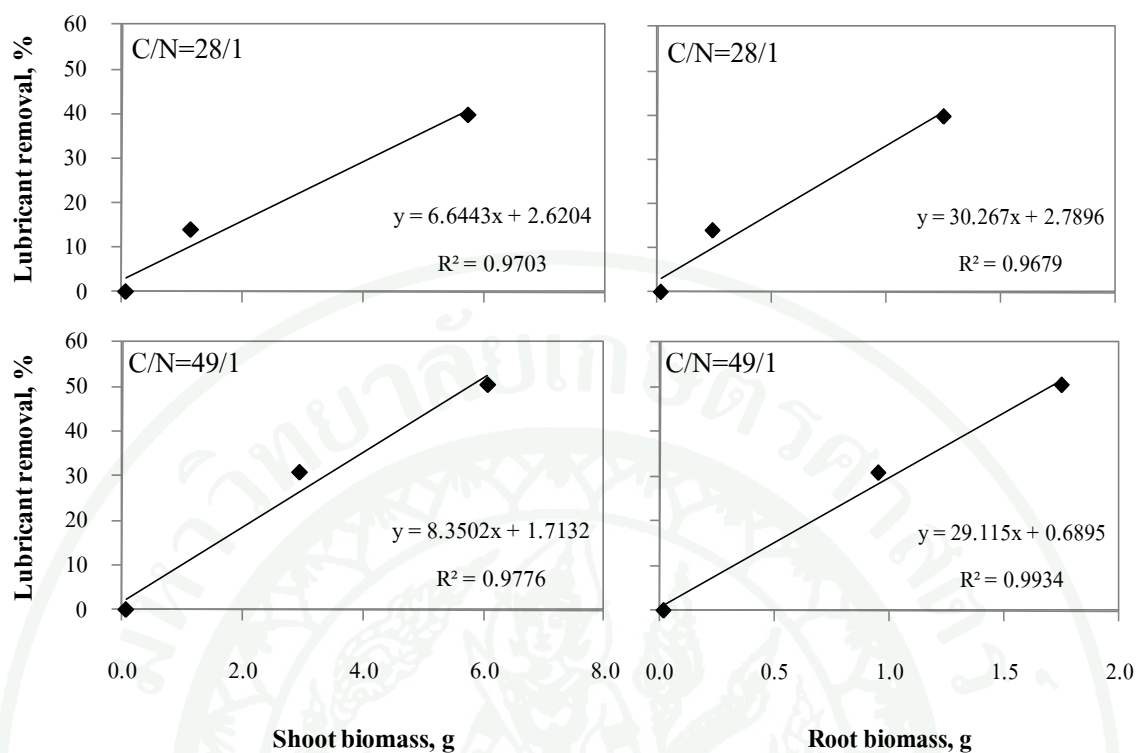
4.1 แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Utilizing Bacteria: HUB)

จากการทดลองหาจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น (ภาพที่ 30) เมื่อเริ่มการทดลองไม่พบแบคทีเรียกลุ่มนี้ เนื่องจากดินปนเปื้อนได้มาจากการสังเคราะห์ ความชื้นต่ำ (ร้อยละ 0.8-1.2) สภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต (สุกมาศ, 2545) แต่เมื่อทำการทดลอง มีการรดน้ำเพิ่มความชื้นในดิน แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 14 วันแรกของการทดลอง และเริ่มคงที่ จำนวนแบคทีเรียมีค่าเฉลี่ย $4.96 \pm 0.56 \log \text{MPN}$ ต่อกรัมดินแห้ง ซึ่งปริมาณแบคทีเรียกลุ่มนี้ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างชุดการทดลองที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ และระหว่างการปลูกพืชและไม่ปลูกพืช อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่พบว่าดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ปลูกหญ้า จำนวน

แบคทีเรียเพิ่มสูงถึง 9.34 logMPN ต่อกรัมดินแห้ง โดยดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระยะคงที่ (stationary phase) ตั้งแต่วันที่ 28-42 แต่ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน กลับเข้าสู่ระยะตาย (death phase) หลังวันที่ 28 ซึ่งการลดจำนวนลงแบคทีเรียอาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำมันลดลง หรือเกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารจำเป็น เช่น ไนโตรเจน เป็นต้น



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลเหี่ยวและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น 30.3 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง โดยมีความหนาแน่นเหี่ยวแตกต่างกันคือ 2, 3 และ 4 ต้นต่อกระถาง (ชุดการทดลองที่ 3)

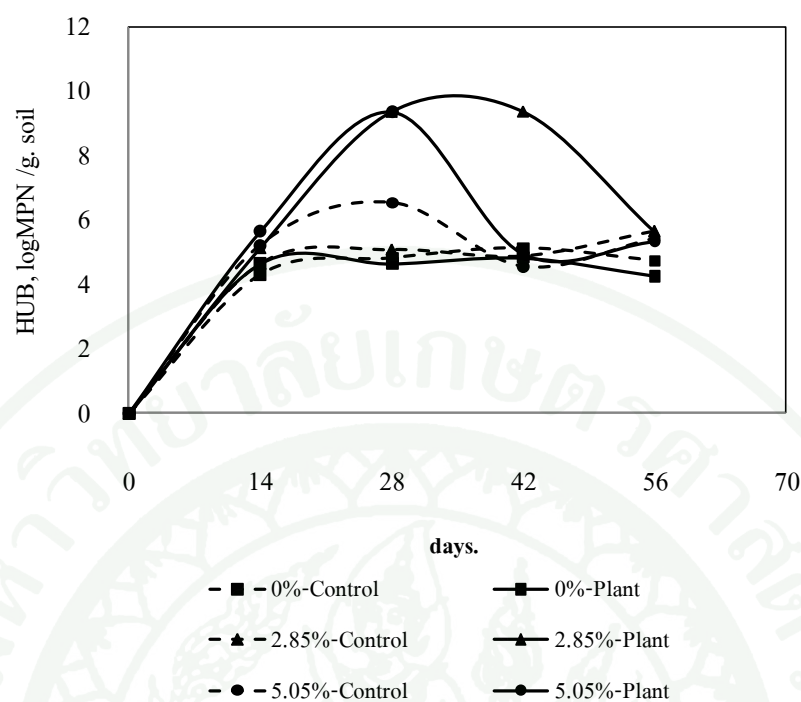


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลหญาและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัม ต่อกลีโกรัมดินแห้ง โดยมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกันคือ 28/1 และ 49/1 (ชุดการทดลองที่ 4)

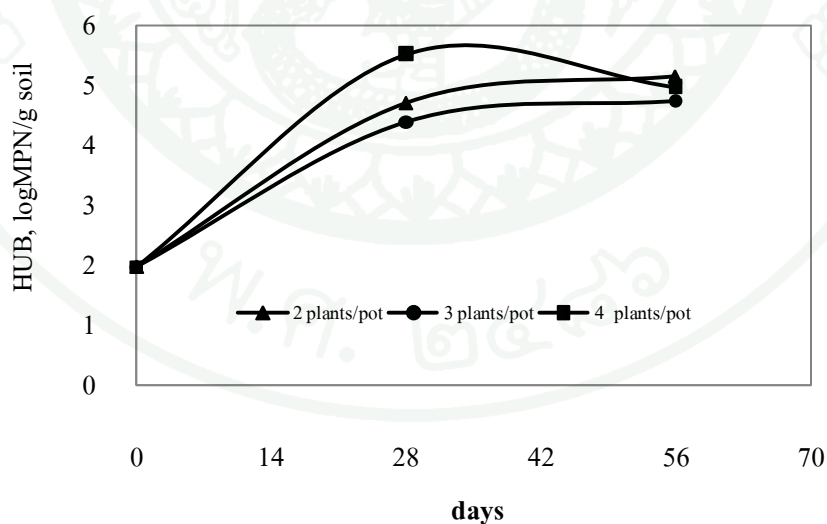
ดังนั้นแสดงว่าดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น และการปลูกหญ้าเป็นช่วยเพิ่มจำนวนแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้ สอดคล้องกับชุดการทดลองที่ 3 ในชุดการทดลองที่ปลูกพืช 4 ต้นต่อกระถางมีจำนวนแบคทีเรียสูงสุด (ภาพที่ 31) แบคทีเรียจะใช้คาร์บอนจากน้ำมันหล่อลื่นเป็นแหล่งพลังงาน และการปลูกพืชมีระบบรากซึ่งสามารถขับสาร (root exudates) ที่เป็นอาหารต่อแบคทีเรีย และการแผ่กระจายของรากทำให้ดินมีความพรุนมากขึ้นเกิดการถ่ายเทออกซิเจน (สุกมาศ, 2529)

4.2 อัตราการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน

อัตราการหายใจของพืชวัดจากอัตราการใช้ออกซิเจน (Oxygen Uptake Rate: OUR) และอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Produce Rate: CPR) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยตรง เป็นพารามิเตอร์ที่วัดกิจกรรมและระบบเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ อีกทั้งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยวิธีชีวภาพ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่นกับจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ชุดการทดลองที่ 1)

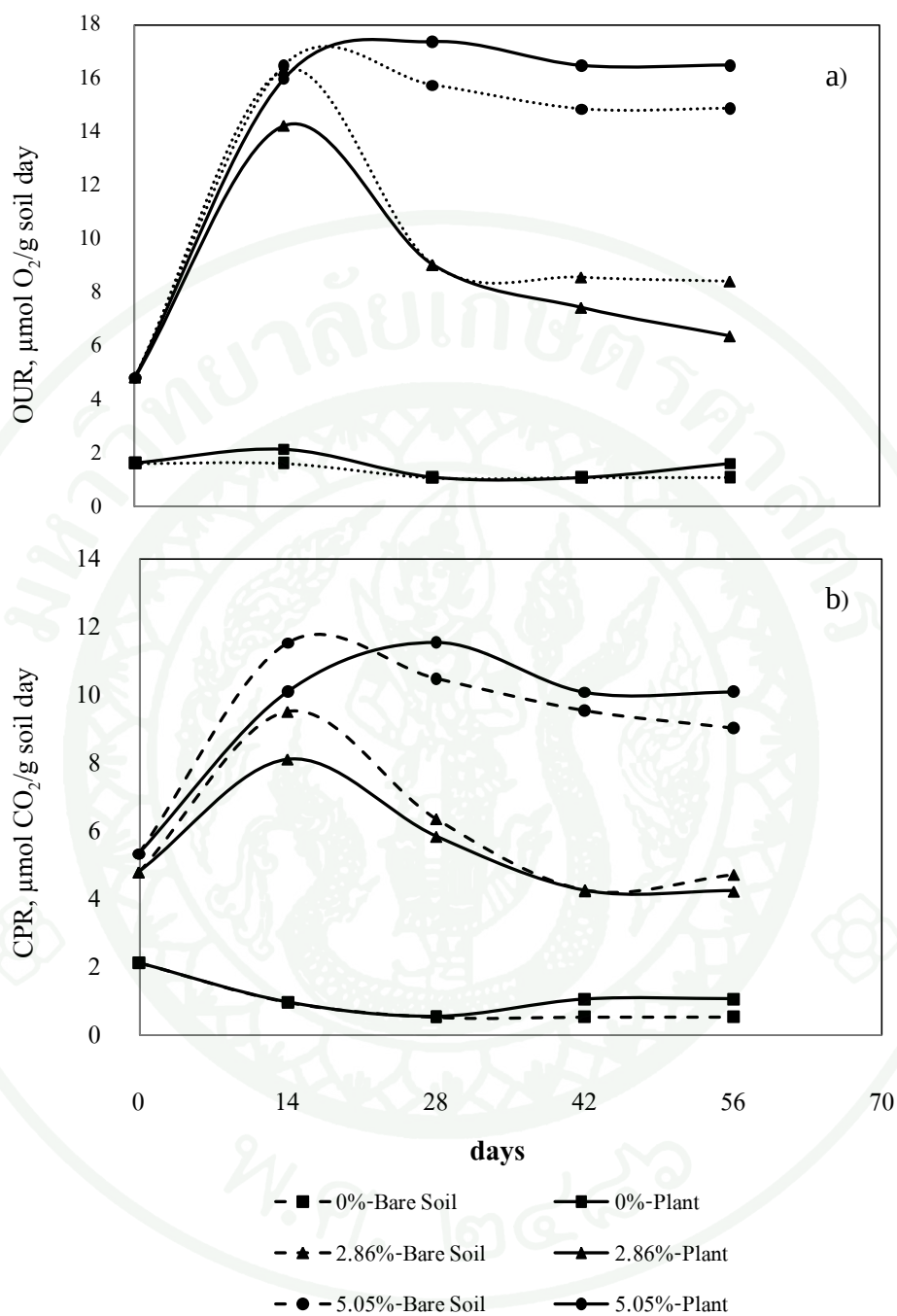


ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นหญ้ากีนีสีม่วงกับจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ชุดการทดลองที่ 3)

จากผลการทดลองทั้งอัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ ในแต่ละความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทั้งกรณีปลูกพืชและไม่ปลูกพืช

สอดคล้องกับปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในดิน กล่าวคืออัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งแต่ละความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยมีค่าสูงสุดในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ในสัปดาห์ที่ 4 (วันที่ 28) และค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง ส่วน ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง อัตราการหายใจเกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 14 และลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงวันที่ 28 และเริ่มคงที่ ส่วนดินไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นมีอัตราการหายใจต่ำ และค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง และพบว่าการปลูกพืชสามารถเพิ่มอัตราการหายใจของจุลินทรีย์ในดินได้เล็กน้อย ในกรณีดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ในสัปดาห์ที่ 5-9 ของการทดลอง ซึ่งคาดว่าอาจสืบเนื่องจากการเจริญเติบโต เพราะมวลรากเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว (ตารางผนวกที่ ค7) แต่จากการทดสอบทางสถิติพบว่าการปลูกพืชและไม่ปลูกพืชไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า Respiration quotient (RQ) เป็นค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการหายใจในการทดลองทุกชุด แสดงดังตารางที่ 15 ค่า RQ สามารถอธิบายเป็นนัยถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินขณะทำการทดลอง โดยทั่วไปการย่อยสลายไขมันหรือน้ำมัน ค่า RQ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เพราะในโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูง ดังนั้นในกระบวนการย่อยสลายจึงต้องใช้ออกซิเจนจำนวนมากในการออกซิไดซ์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในดินเริ่มต้นค่า RQ มีค่ามากกว่า 1 เล็กน้อย (1.1-1.3) แสดงว่าดินที่ใช้ในการทดลองเริ่มต้นมีกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนร่วมอยู่ด้วยหรือมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่า RQ ต่ำลง (0.5-1.0) แสดงถึงมีกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งพบในการทดลองส่วนใหญ่ (ชุดการทดลองที่ 1, 3, 4 และ 5) ยกเว้นชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการบำบัดซ้ำ มีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสูงกว่าการใช้ออกซิเจน ทั้งนี้เพราะการทดลองบำบัดซ้ำใช้เวลาในการทดลองถึง 112 วัน ใช้เวลานานกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ระหว่างการทดลอง พบว่า ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา แสดงว่าเกิดภาวะไร้ออกซิเจน จุลินทรีย์ที่อาศัยในดินเป็นกลุ่มอื่นที่ตัวรับอิเล็กตรอนไม่ใช้ออกซิเจน (Aon *et al.*, 2001) สำหรับชุดการทดลองที่มีการปรับค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนพบว่า การเติมปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณสูงทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนสูง (2.8-3.3) และลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากเกิดการใช้ออกซิเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชัน



ภาพที่ 32 อัตราการใช้ออกซิเจน (a) และอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (b) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น ในชุดการทดลองที่ 1

ตารางที่ 15 ค่า Respiration quotient: RQ ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นในแต่ละชุดการทดลอง

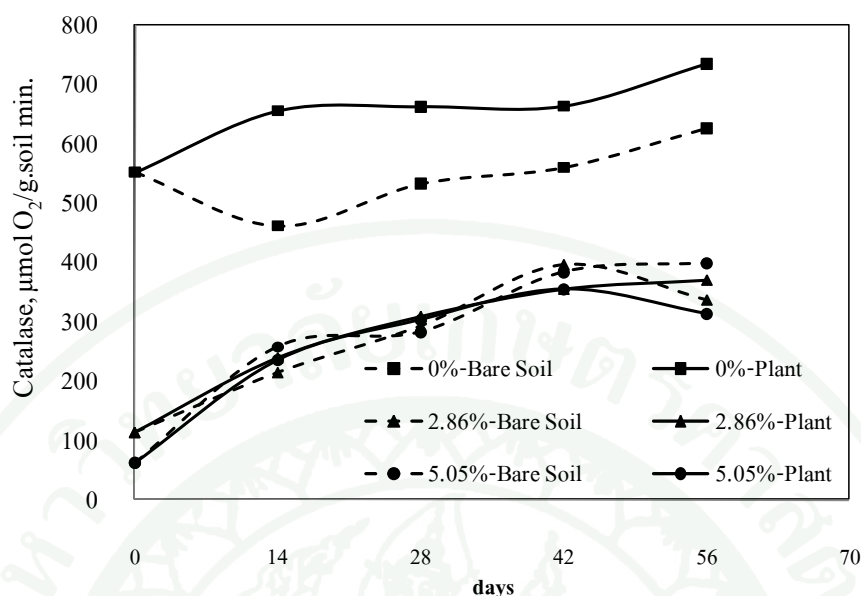
Exp. No.	Lubricant conc., g/kg soil	Condition	Respiration quotient: RQ		
			Day 0	Day 28	Day 56
1	0	Bare soil	1.33	0.50	0.50
		1 pt/pot	1.33	0.50	0.67
	28.6	Bare soil	1.00	0.71	0.56
		1 pt/pot	1.00	0.65	0.67
	50.5	Bare soil	1.11	0.67	0.61
		1 pt/pot	1.11	0.67	0.61
2	36.9	Bare soil	0.61	1.20	1.60
		1 pt/pot, Cut Plant	0.61	1.42	1.36
		1 pt/pot, New Plant	0.61	1.60	1.52
3	30.3	2 pt/pot	1.13	0.79	0.80
		3 pt/pot	1.13	0.85	0.77
		4 pt/pot	1.13	0.83	0.62
4	30.1	3 pt/pot, C:N=10:1	3.33	0.82	1.00
		3 pt/pot, C:N=30:1	2.83	1.00	0.91
		3 pt/pot, C:N=50:1	0.81	1.00	1.00
5	30.1	3 pt/pot, C:N=50:1, 0-20 cm.	0.81	1.00	0.92
		3 pt/pot, C:N=50:1, 21-40 cm.	0.81	0.90	1.11
		3 pt/pot, C:N=50:1, 41-60 cm.	0.81	1.00	1.00

4.3 กิจกรรมเอนไซม์อะตาลเลส

เอนไซม์อะตาลเลสเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์กลุ่มใช้อากาศ จึงสามารถใช้ประเมินจำนวนจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้ จากการทดลองพบว่า กิจกรรมของเอนไซม์อะตาลเลสในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง (ตารางที่ 16) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่าการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น มีผลลดกิจกรรมของเอนไซม์อะตาลเลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) สำหรับดินที่ไม่ปนเปื้อน พบว่า การปลูกพืชช่วยเพิ่มกิจกรรมเอนไซม์อะตาลเลสอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 33) แสดงว่ารากพืชมีส่วนส่งเสริมให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศมีจำนวนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่มีน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในดิน พบว่า ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสูงจะมีกิจกรรมของเอนไซม์อะลาคาลเฟสต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินปนเปื้อนที่ปลูกพืช และไม่ปลูกพืช พบว่ามีค่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 33) ทั้งนี้เพราะเมื่อรากพืชสัมผัสกับสารพิษจะหลั่งเอนไซม์อะลาคาลเฟสออกมา (Brzezinska *et al.*, 2001) สอดคล้องกับข้อมูลกิจกรรมของเอนไซม์อะลาคาลเฟสที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนหญ้าต่อพื้นที่ (ตารางที่ 16) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของพืชในรูปของมวลชีวภาพ (ตารางที่ 10) ความสมบูรณ์ของรากมีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟส โดยพบว่าชุดการทดลองที่ 2 (การบำบัดซ้ำ) การปลูกหญ้าใหม่ทำให้กิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟสลดลง เนื่องจากหญ้าที่นำมาปลูกในชุดการทดลองนี้เจริญเติบโตได้ไม่ดี (ตารางที่ 10 และ ภาพที่ 16) ส่วนการใส่ปุ๋ยในโตรเจนส่งเสริมให้กิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟสเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10/1 มีกิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟสสูงถึง 1.7 มิลลิโมลออกซิเจนต่อกรัมดินต่อนาที ณ วันที่ 28 ของการทดลอง ซึ่งเกิดจากมีกระบวนการไนตริฟิเคชันสูง ซึ่งไนตริฟายอิงแบคทีเรียเป็นกลุ่มที่ใช้อากาศ ดังนั้นจึงสามารถผลิตเอนไซม์อะลาคาลเฟสได้ แต่เมื่อพิจารณาการเกิดกิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟสตามความลึกของดิน พบว่าไม่มีความแตกต่าง แสดงว่ากระกระจายตัวของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศอย่างสม่ำเสมอในดินลึก 0-60 เซนติเมตร

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันกับกิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่มีการปลูกหญ้า และไม่มีการปลูกหญ้า ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ (ภาพที่ 34) พบว่า ประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกิจกรรมเอนไซม์อะลาคาลเฟส โดยมีความสัมพันธ์กันสูง ($R^2 = 0.88-0.98$) แสดงว่าเอนไซม์อะลาคาลเฟสส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะในดินที่มีความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นสูง



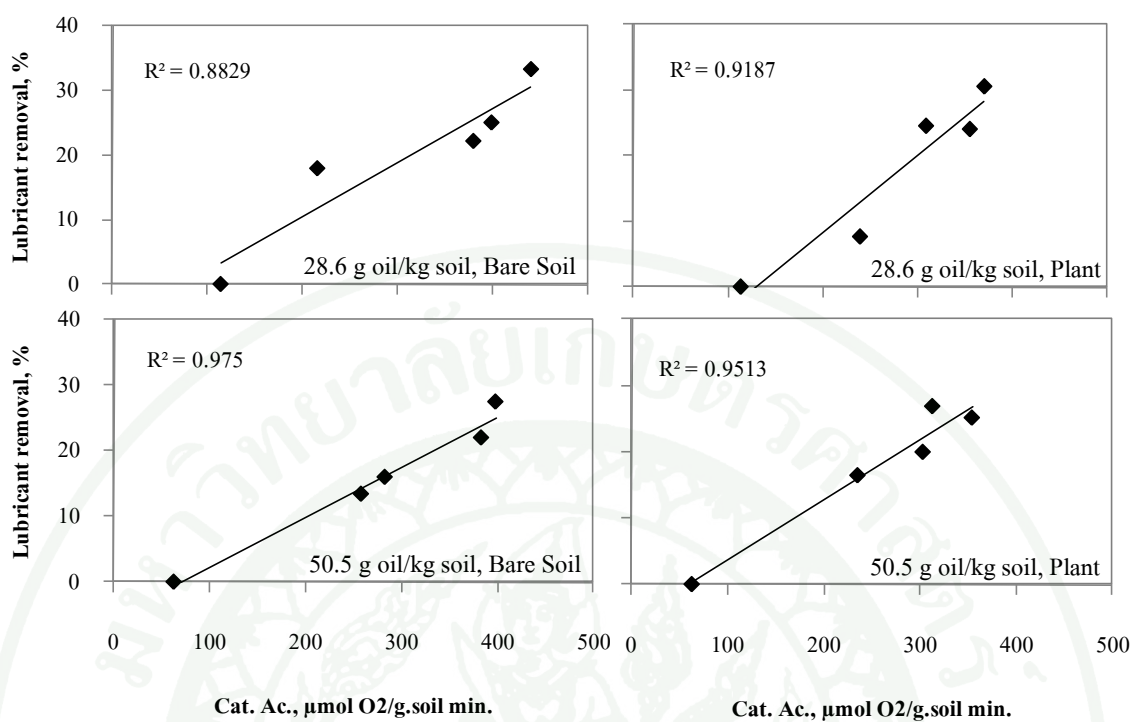
ภาพที่ 33 กิจกรรมเอนไซม์คะตะเลสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า และปลูกหญ้าในชุดการทดลองที่ 1

4.4 กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส

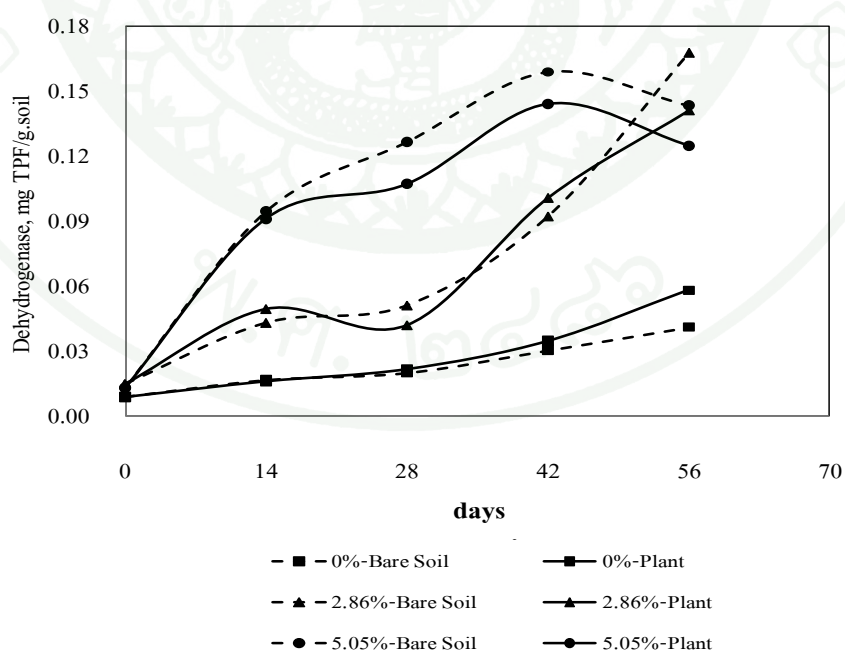
เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์ทุกชนิด ใช้เป็นดัชนีชี้วัดกิจกรรมทางชีวภาพในดิน มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินทางชีวภาพ โดยเฉพาะในขั้นตอนการส่งผ่านโปรตอนและอิเล็กตรอนให้กับตัวรับ จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่น โดยในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นมีกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสสูงกว่าดินไม่ปนเปื้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และในดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีกิจกรรมสูงกว่าในดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Achuba *et al.* (2008) ที่พบว่าความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่นมีอิทธิพลเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสในดิน

กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองในดินทุกชุดที่มีและไม่มีการปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น (ภาพที่ 35) ทั้งนี้ในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนที่มีการปลูกพืชจะมีค่าเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสแตกต่างกับชุดการทดลองที่มีการปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในกรณีดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสูง (50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) พบว่า หลังวันที่ 14 ของการทดลองดินที่ไม่ปลูกพืชมีค่าเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสสูงกว่าดินที่ปลูกพืช อย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากค่าออกซิเจนและความชื้นในดินมีผลต่อเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส โดยแปรผันตรงกับความชื้นและแปรผกผันกับออกซิเจนในดิน (Włodarczyk *et al.*, 2009) ซึ่งจากข้อมูลค่าความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่วัดจากค่าศักย์รีดอกซ์ (ตารางภาคผนวก ก1) พบว่า ระหว่างการทดลองดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นมีแนวโน้มของความชื้นเพิ่มขึ้น คือ ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 1 เป็น 9 สำหรับชุดการทดลองที่ปลูกหญ้า และจากร้อยละ 1 เป็น 11 สำหรับชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า ส่วนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 1 เป็น 14 สำหรับชุดการทดลองที่ปลูกหญ้า และร้อยละ 1 เป็น 15 สำหรับชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า แสดงว่าหญ้าดึงน้ำไปใช้และรากเพิ่มความพรุนให้กับดินช่วยระบายความชื้นในดินได้ ในทางกลับกันเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ซึ่งจากข้อมูลค่าศักย์รีดอกซ์พบว่า ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ลดลงจาก 280 เป็น 250 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลองที่ปลูกหญ้า และร้อยละ 280 เป็น 244 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า ส่วนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ลดลงจาก 300 เป็น 113 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลองที่ปลูกหญ้า และ 300 เป็น 151 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า จากรายงานของ Dowley *et al.* (2009) กล่าวว่า ค่าศักย์รีดอกซ์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชควรมีค่ามากกว่า 300 มิลลิโวลต์ ในขณะที่สภาวะไร้อากาศในดินเกิดขึ้นเมื่อค่าศักย์รีดอกซ์มีค่าระหว่าง 200 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ดังนั้นในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้งมีสภาวะไร้อากาศ แสดงว่าเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสเกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มแฟลคคาเททิฟหรือไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถผลิตเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสได้ดีกว่ากลุ่มใช้ออกซิเจน (Włodarczyk *et al.*, 2009)



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์คะตะเลสและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในชุดการทดลองที่ 1



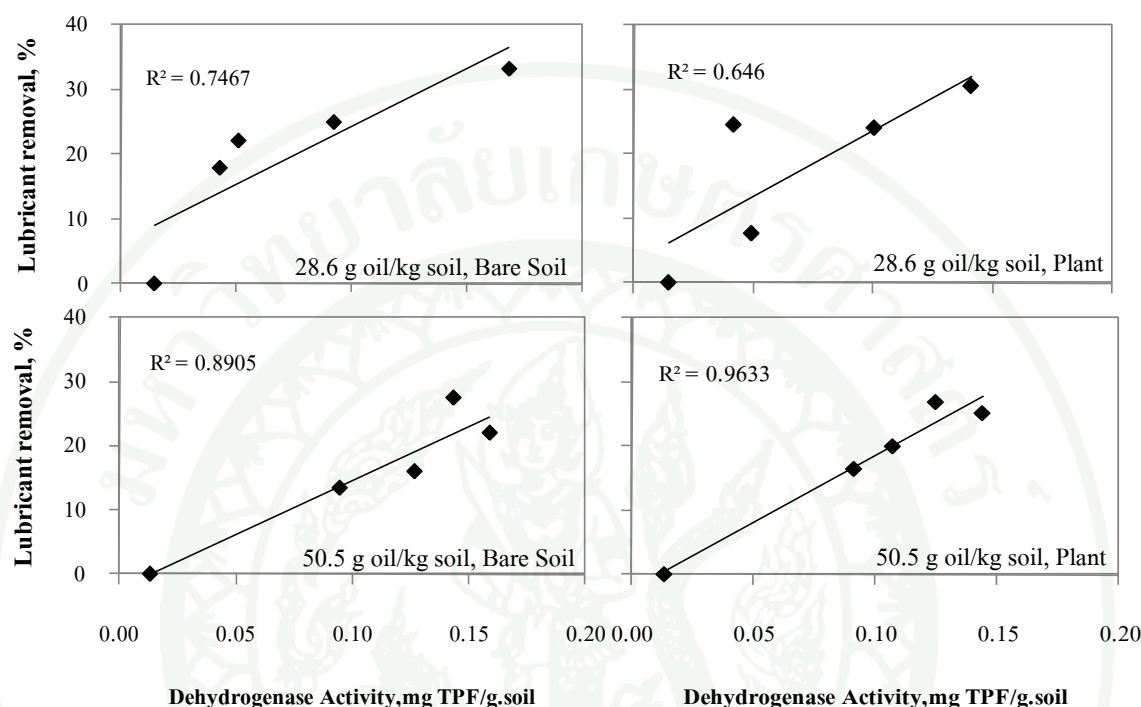
ภาพที่ 35 กิจกรรมของดีไฮโดรจีเนสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างชุดการทดลองที่ไม่ปลูกหญ้า และปลูกหญ้าในชุดการทดลองที่ 1

ตารางที่ 16 กิจกรรมเอนไซม์ของคะตะเลสในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง

Exp. No.	Lubricant conc., g/kg soil	Condition	Catalase, $\mu\text{molO}_2/\text{g soil min.}$		
			Day 0	Day 28	Day 56
1	0	Bare soil	552.6	532.9	626.4
		1 pt/pot	552.6	663.4	735.3
	28.6	Bare soil	140.6	293.7	337.7
		1 pt/pot	140.6	308.8	370.2
	50.5	Bare soil	62.1	282.7	398.4
		1 pt/pot	62.1	303.1	313.1
2	36.9	Bare soil	398.4	353.1	439.6
		1 pt/pot, Cut Plant	313.1	345.7	349.6
		1 pt/pot, New Plant	313.1	218.8	298.1
3	30.3	2 pt/pot	231.0	377.3	368.2
		3 pt/pot	231.0	370.2	334.6
		4 pt/pot	231.0	348.1	401.0
4	30.1	3 pt/pot, C:N=10:1	352.4	1745.1	1469.6
		3 pt/pot, C:N=30:1	294.4	435.4	514.1
		3 pt/pot, C:N=50:1	127.7	316.8	289.9
5	30.1	3 pt/pot, C:N=50:1, 0-20 cm.	127.7	373.6	319.7
		3 pt/pot, C:N=50:1, 21-40 cm.	127.7	473.2	284.7
		3 pt/pot, C:N=50:1, 41-60 cm.	127.7	495.3	335.7

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันกับกิจกรรมเอนไซม์ฟอสโฟโรจีเนส ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นความเข้มข้น 28.6 และ 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง เปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่มีการปลูกหญ้า และไม่มีการปลูกหญ้า ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ (ภาพที่ 36) พบว่า ประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกิจกรรมของเอนไซม์ฟอสโฟโรจีเนส โดยในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสูง (50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) มีความสัมพันธ์กันสูง ($R^2 = 0.89-0.96$) แสดงว่าส่วนเอนไซม์ดี

ไฮโดรเจนจะยับยั้งการย่อยสลายในดินที่มีสารปนเปื้อนความเข้มข้นสูง ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้ส่วนมากเกิดจากจุลินทรีย์พวกแฟกคัลเททีฟ หรือ พวกที่ไม่ใช้อากาศ



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสและประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นในชุดการทดลองที่ 1

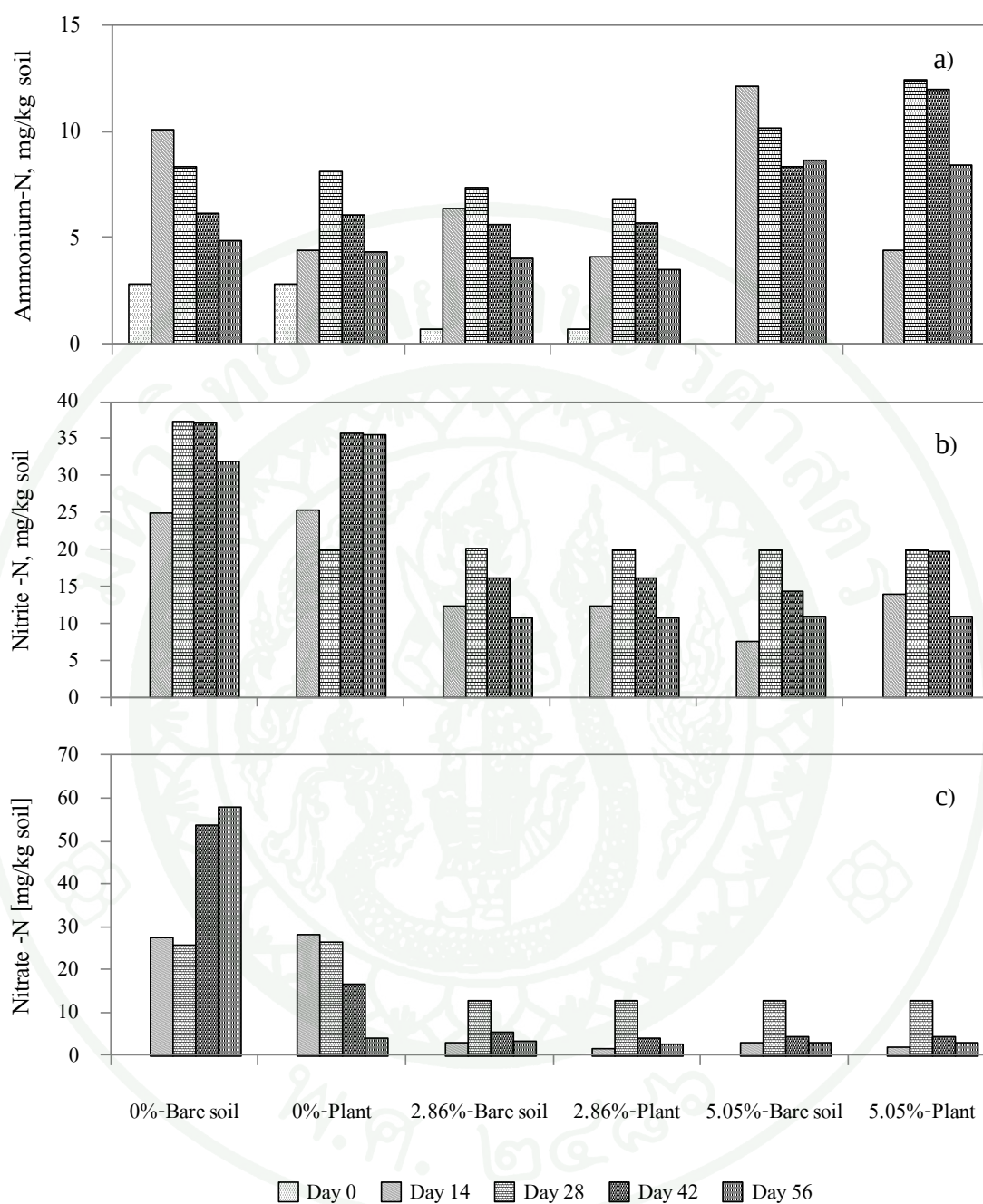
4.5 กิจกรรมของกลุ่มไนโตริไฟอิงแบคทีเรีย

ไนโตรเจนในดิน จะมีการเปลี่ยนแปลงรูป และแปรสภาพตลอดเวลา การแปรสภาพของไนโตรเจนส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางชีววิทยา ซึ่งมีเอนไซม์และจุลินทรีย์ในดินเข้ามาเกี่ยวข้อง แอมโมเนียจะเกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งมีการเปลี่ยนสารประกอบอะมิโนหรือกรดอะมิโนเป็นแอมโมเนีย และเมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นแอมโมเนียม ซึ่งจุลินทรีย์และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ บางส่วนจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรต์ และไนเตรท ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยไนโตริไฟอิงแบคทีเรีย จากการทดลองได้วิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนทุก 14 วัน ในช่วง 56 วัน ของการทดลอง แสดงผลดังภาพที่ 37

ขณะเริ่มต้นการทดลองปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนต่ำ คือ ในชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 และ 5.05 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินทุกชุดการทดลอง มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ ในช่วง 14-28 วันแรกของการทดลอง ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ส่วนช่วงหลังที่มีแนวโน้มลดลง เพราะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน แอมโมเนียมจะเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรท ชุดการทดลองที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงสุด คือ ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 5.05 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง อาจเป็นเพราะในชุดการทดลองนี้มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสูงสนับสนุนให้มีจุลินทรีย์หลายชนิดเพิ่มจำนวนขึ้น ในกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) ซึ่งมีอยู่หลายชนิดในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงไนไตรท์และไนเตรทในโตรเจนในดินทุกชุดการทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียมไนโตรเจน แต่แตกต่างกันที่ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในโตรเจน ในชุดควบคุมมีปริมาณสูงกว่าในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น สอดคล้องกับงานวิจัยของปิยนุช (2551) แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นหรือสารปนเปื้อนในดินอาจเป็นพิษมีผลยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย หรืออาจเกิดจากปริมาณออกซิเจนในดินไม่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียกลุ่มนี้ เพราะถ้ามีค่าค่าศักย์รีดอกซ์ในดินต่ำกว่า 250 มิลลิโวลต์ มีผลชะลอการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (ศุภมาส, 2545) ซึ่งจากค่าศักย์รีดอกซ์ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นทั้งสองความเข้มข้นพบว่าลดลงตามระยะเวลาการทดลอง (ตารางภาคผนวก ก1) เพราะสภาพที่อากาศไม่เพียงพอจะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนในดินนั้นยากที่จะคาดคะเน เพราะมีการสูญหายจากดินได้หลายรูปแบบ เช่น ในรูปของก๊าซจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งการปลูกพืชมีผลส่งเสริมกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เนื่องมาจากการหายใจของราก ทำให้ออกซิเจนลดลง และสารรากขับทำให้มีอัตราการหายใจของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น (ศุภมาส, 2545) และนอกจากนี้พืชยังถูกไปใช้ในการสังเคราะห์องค์ประกอบของเซลล์และสารที่ให้พลังงาน ซึ่งจากการทดลองปริมาณไนเตรทในโตรเจนในชุดควบคุมเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ในดินที่ปลูกหญ้ามีปริมาณต่ำกว่าดินที่ไม่ปลูกหญ้า ส่วนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นไม่มีความแตกต่าง ซึ่งจากผลการเจริญเติบโตของหญ้าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หญ้าเจริญเติบโตไม่ดี แสดงอาการขาดธาตุไนโตรเจน



ภาพที่ 37 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (a) ไนไตรท์ไนโตรเจน (b) และ ไนเตรทไนโตรเจน (c) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปลูกพืชและไม่ปลูกพืช (ชุดการทดลองที่ 1)

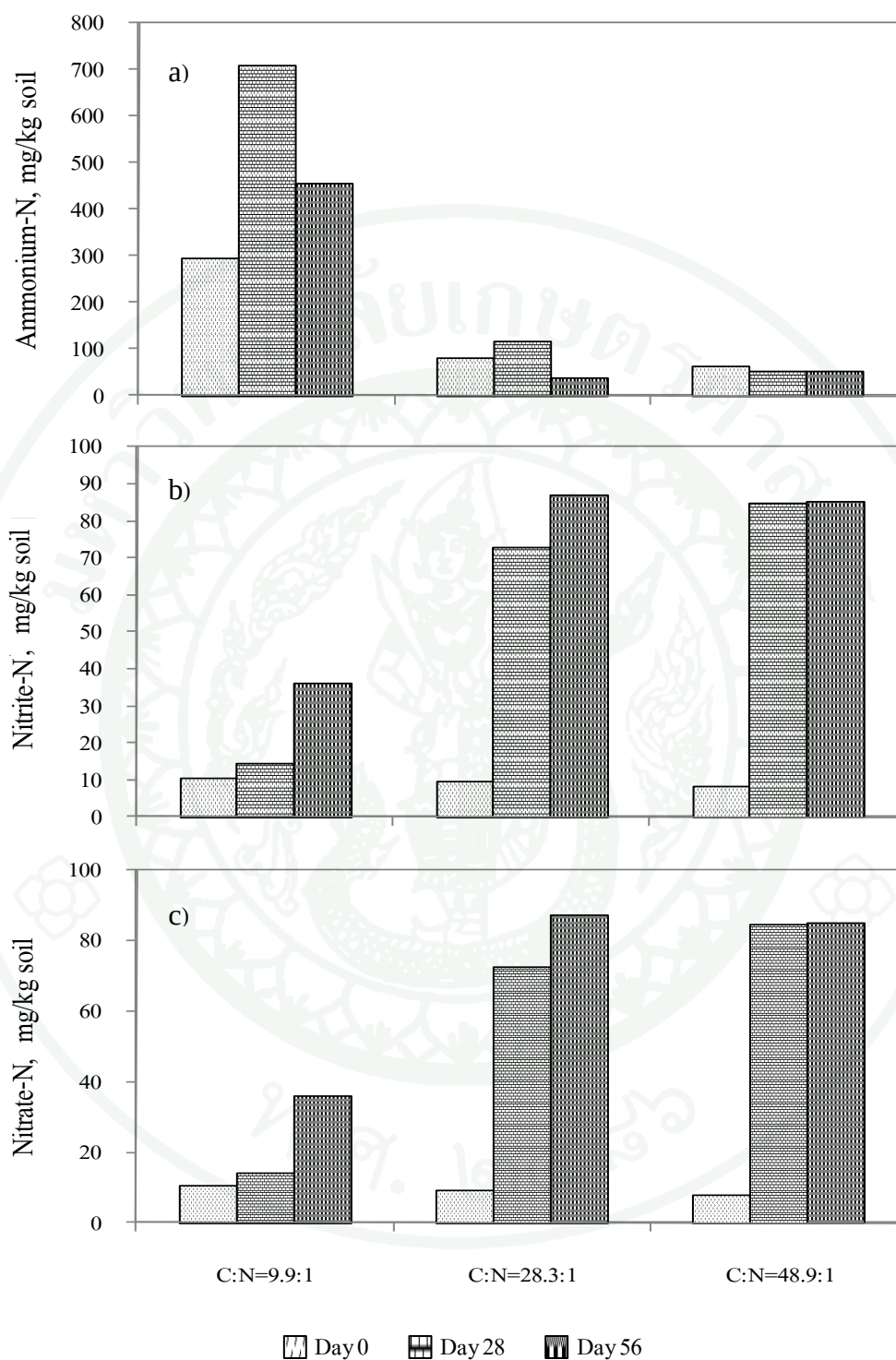
ดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น มีอินทรีย์วัตถุคาร์บอนจำนวนมากเป็นแหล่งพลังงานให้กับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน ซึ่งมีการเพิ่มขยายประชากรของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มากขึ้น จะมีการใช้ไนโตรเจนมากขึ้นด้วย ซึ่งถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากขึ้นจะส่งผลให้ไม่มีรูปที่เป็นประโยชน์หรือไม่มีการสะสมไนโตรเจน Lal and Kimble (2000) สังเกตว่าค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่กว้าง ทำให้มีความต้องการไนโตรเจนมากขึ้น ต้องมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนอินทรีย์ไปเป็นฮิวมัส ในชุดการทดลองที่ 4 มีการใช้ปุ๋ยยูเรียปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ซึ่งปุ๋ยยูเรียเป็นตัวเพิ่มไนโตรเจนให้กับดิน เพราะดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสูงจะมี อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่กว้าง ซึ่งในกรณีดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 28.6 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงถึง 110/1 และในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 50.5 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง มีค่า 151/1 (ตารางภาคผนวก ก3) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่กว้างมาก หลังจากทำการปรับอัตราส่วนแล้วได้ผลดังตารางที่ 17 และจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน แสดงผลดังภาพที่ 38

จากการทดลองพบว่าหลังผสมปุ๋ยยูเรียแล้ว ในดินที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 9.9/1 ดินมีค่าพีเอชเป็นด่างแก่ เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสยูเรียเป็นแอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ประกอบกับมีไนโตรเจนสูงถึง 5,900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง จึงทำให้เกิดแอมโมเนียมคาร์บอเนตมาก สอดคล้องกับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนที่เกิดขึ้น พบว่า ในวันที่ 28 เกิดแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงถึง 711 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ภาพที่ 38) แสดงว่าเกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันสูง และพบว่าในช่วงเวลานี้เกิดการหายใจของดิน และจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอนสูงเช่นกัน แสดงว่าเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) ในกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน แต่มีรายงานว่า ถ้ามีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (ศุภมาส, 2545) จะยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองเพราะปริมาณไนไตรท์ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนในดินที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10/1 เกิดขึ้นน้อยกว่า ดินที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 28/1 และ 49/1 ซึ่งทั้งสองชุดการทดลองนี้มีการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในดินใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 17 ปริมาณปุ๋ยยูเรีย และลักษณะดินระหว่างการทดลองที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน (ชุดการทดลองที่ 4)

C/N Ratio	Urea, g/kg soil	pH			TOC, %		TN, %		C/N Ratio	
		0 d.	28 d.	56 d.	0 d.	56 d.	0 d.	56 d.	0 d.	56 d.
10/1	12.0	9.10	8.47	7.75	5.83	4.94	0.59	0.16	9.88	30.64
28/1	4.0	7.57	7.39	6.92	5.64	4.67	0.20	0.05	28.27	96.35
49/1	2.4	7.66	6.76	6.58	5.56	3.56	0.11	0.04	48.92	93.72

อิทธิพลของปุ๋ยยูเรียเมื่อใส่ลงไปดินระยะแรกจะมีผลทำให้ดินเป็นด่าง แต่ต่อมาเมื่อแอมโมเนียมไอออนถูกออกซิไดซ์จะก่อให้เกิดผลตกค้างเป็นกรด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพีเอชในดินสามารถชี้วัดอัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ (Peltola *et al.*, 2006) คือ ถ้าดินชุดใดมีค่าพีเอชลดลงมาก แสดงว่าอัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันสูง ซึ่งจากการทดลองดินที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 28/1 และ 49/1 มีปริมาณไนโตรเจนในดิน และไนเตรทในดินใกล้เคียงกัน แต่การเปลี่ยนแปลงพีเอชในดินที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 49/1 มีค่ามากกว่า แสดงว่าอัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันสูงกว่า ซึ่งจากงานวิจัยของ Peltola *et al.* (2006) พบว่าอัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ 8.8 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกิโลกรัมดินแห้งต่อวัน ในดินปนเปื้อนน้ำมันความเข้มข้นสูง (35-59 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) และ Deni and Penninckx (1999) พบว่า อัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ 11.4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกิโลกรัมดินแห้งต่อวัน ในดินปนเปื้อนน้ำมันความเข้มข้นต่ำ (0.25-0.40 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง)



ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (a) ไนไตรท์ไนโตรเจน (b) และ ไนเตรทไนโตรเจน (c) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน (ชุดการทดลองที่ 4)

5. สมดุลมวลน้ำมันหล่อลื่น

การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยพืช เป็นการใช้กระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ในดินบริเวณเขตรากพืชและพืช จากการทดลองชุดที่ 5 วิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่สะสมในหญ้า พบว่า ในส่วนของรากมีปริมาณน้ำมันสะสมมากกว่าลำต้น คิดเป็นร้อยละ 2.3 และ 1.6 ต่อน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ แสดงว่าน้ำมันที่หายไปจากดินบางส่วนถูกเคลื่อนย้ายสู่ลำต้นและรากของหญ้า และจากการคำนวณสมดุลมวลของน้ำมันหล่อลื่นดังสมการที่ 2 แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 18 (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

$$\text{การย่อยสลายอย่างแท้จริง} = \text{ปริมาณน้ำมันเริ่มต้น} - (\text{น้ำมันหล่อลื่นในต้น} + \text{น้ำมันหล่อลื่นในราก} + \text{น้ำมันหล่อลื่นที่เหลือในดิน}) \quad (1)$$

ตารางที่ 18 สมดุลมวลน้ำมันหล่อลื่นที่ 56 วัน ของการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30.1 กรัม ต่อกลีโกรัมดินแห้ง (ชุดการทดลองที่ 5)

Depth, cm.	Lubricant in soil, g.		Lubricant in plant, mg.		Bioremediation, g.
	Before treated	After treated	Shoot	Root	
0-20	90.3	43.8		36.2	46.4
21-40	90.3	52.7	108.3	17.5	37.5
41-60	90.3	52.1		9.9	38.2
Total	270.9	148.6	108.3	63.6	122.1
	(100%)	(54.9%)	(0.04%)	(0.02%)	(45.1%)

จากการคำนวณ พบว่า ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่หายไปจากดินส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ร้อยละ 42-51 ของปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในดิน ส่วนถูกเคลื่อนย้ายไปสะสมในพืชเพียง ร้อยละ 0.01-0.12 ส่วนในน้ำชะที่เกิดจากการรดน้ำมีปริมาณน้ำมันปนเปื้อนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันทั้งหมด (น้อยกว่า ร้อยละ 0.02) จึงไม่นำมาคำนวณ ดังนั้นการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยพืชในการทดลองครั้งนี้จึงเป็นการย่อยสลายโดยราก (rhizodegradation) เป็นการเปลี่ยนรูปที่แท้จริงของสารปนเปื้อนเพื่อทำลายผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในบริเวณเขตราก ซึ่งรากจะผลิตสารบางอย่างออกมา ได้แก่

น้ำตาล กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ กรดไขมัน เอนไซม์ และสารประกอบอื่นๆ จะส่งเสริมการเจริญเติบโตของประชากรจุลินทรีย์ให้ย่อยสลายสารปนเปื้อน (Urin, 2001)

6. การทดสอบความเป็นพิษของดินต่อการงอกเมล็ด

การทดสอบความเป็นพิษของดินต่อการงอกของเมล็ดนั้น ได้ทำการทดสอบในที่มืด ซึ่งการทดสอบก่อนนำเมล็ดมาทดลอง จะมีการนำเมล็ดมาแช่น้ำเป็นเวลา 1 คืน แล้วจึงทำการคัดเมล็ดที่ลอยทิ้ง และนำเมล็ดที่ไม่ลอยมาทำการทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ด โดยค่าปกติของร้อยละการงอกของเมล็ดควรมีค่าน้อยร้อยละ 80 จึงถือว่าปุ๋ยหรือดินนั้นสามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูกได้ (CCQC, 2001) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้เมล็ดมะเขือเทศเพื่อทดสอบการงอกของเมล็ด โดยได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินปนเปื้อนจากชุดการทดลอง ในวันแรกและวันสุดท้ายของกระบวนการบำบัด โดยทดสอบการงอกของเมล็ดในดินปนเปื้อนที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปนเปื้อนเท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยชุดควบคุมการงอกของเมล็ด คือ การทดสอบการงอกของเมล็ดบนสำลีที่มีน้ำกลั่น

จากผลการทดสอบความเป็นพิษของดินต่อการงอกของเมล็ด (ตารางที่ 19) พบว่าน้ำมันหล่อลื่นทำให้ดินเป็นพิษ ยับยั้งการงอกของเมล็ด เมื่อเปรียบเทียบกับดินไม่ปนเปื้อนซึ่งมีการงอกของเมล็ดร้อยละ 88 ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นไม่สูงกว่า 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ก่อนการบำบัดมีการงอกของเมล็ดเท่ากับร้อยละ 13 ยกเว้นดินที่มีการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10/1 มีค่าร้อยละ 6 ส่วน เนื่องจากดินมีความเป็นด่างสูง ($\text{pH} = 9.1$) ส่วนดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่า 50 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ทำให้ดินมีความเป็นพิษสูงเมล็ดจึงไม่สามารถงอกได้ แต่หลังการบำบัดเกือบทุกชุดการทดลองร้อยละการงอกของเมล็ดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำมันในดินลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างชุดการทดลองที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช หลังการทดลองพบว่า ดินที่ปลูกพืช/ผ่านการบำบัดด้วยพืช (ชุดการทดลองที่ 1) มีผลทำให้ร้อยละการงอกเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบความเป็นพิษของดินต่อการงอกของเมล็ดหลังการบำบัดในทุกชุดการทดลองมีค่าร้อยละการงอกของเมล็ดน้อยกว่าร้อยละ 80 จึงถือว่าดินนี้ไม่สามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูกได้ (CCQC, 2001) แต่จากการนำดินปนเปื้อนไปบำบัดซ้ำเป็นเวลาอีก 56 วัน (ชุดการทดลองที่ 2) โดยการตัดลำต้นแล้วปล่อยให้แตกออ พบว่าดินหลังการบำบัดซ้ำมีความเป็นพิษลดลง ทำให้การงอกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 25 ดังนั้นหากเรานำดินที่ผ่านการบำบัดแล้วในชุดการทดลองที่

5 นำไปบำบัดซ้ำ คาดว่าความเป็นพิษของดินจะลดลง และอาจทำให้การงอกของเมล็ดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 94 ซึ่งจะทำให้ดินนั้นสามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูกได้

ตารางที่ 19 การงอกของเมล็ดมะเขือเทศในดินปนเปื้อนก่อนและหลังการบำบัดในแต่ละชุดการทดลอง

Exp. No.	Lubricant content, g/kg soil	Condition	Seed germination, %	
			Before treated	After treated
	0	Control	80	
1	0	Bare soil	88	88
		1pt/pot	88	100
	28.6	Bare soil	13	25
		1pt/pot	13	38
	50.5	Bare soil	0	25
		1pt/pot	0	25
2	36.9	Bare soil	25	25
		Cut-Plant	25	50
		New-Plant	25	38
3	30.3	2 pt/pot	13	38
		3 pt/pot	13	56
		4 pt/pot	13	44
4	30.1	3 pt/pot, C/N=10/1	6	31
		3 pt/pot, C/N=28/1	13	50
		3 pt/pot, C/N=49/1	13	63
5	30.1	3 pt/pot, C/N=49/1, 0-20 cm	13	69
		3 pt/pot, C/N=49/1, 21-40 cm	13	63
		3 pt/pot, C/N=49/1, 41-60 cm	13	31

หมายเหตุ ร้อยละการงอกของเมล็ดมะเขือเทศถูกหารด้วย 0.80 ยกเว้นชุดควบคุม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษา หาวิธีการดำเนินการที่เหมาะสมในการใช้ หนุ่กินนิสีม่วง ในการ บำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่น ความหนาแน่นของพีช การเติมธาตุอาหาร ความลึกของดิน และการปลูกพีชซ้ำ ร่วมกับการศึกษาการเจริญเติบโตของพีช และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การใช้หนุ่กินนิสีม่วงบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นในดิน สามารถลดปริมาณน้ำมันในดินได้ โดยการปลูกหนุ่กเป็น การเพิ่มอัตราการออกซิเดชัน และกระตุ้นแบคทีเรียที่ใช้สารอาหารประเภทคาร์บอนเป็นแหล่งอาหาร

2. หนุ่กินนิสีม่วงสามารถเจริญเติบโตได้ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 30 และ 50 กรัมต่อกิโลกรัมดิน แต่อัตราการเจริญเติบโตต่ำมาก เนื่องจากมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกว้าง หรือขาดธาตุไนโตรเจนที่ช่วยในการเจริญเติบโต

3. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนที่มีน้ำมันหล่อลื่นไม่ควรสูงกว่า 30 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง บำบัดได้ลึกตลอดความยาวราก แต่มีประสิทธิภาพสูงที่ความลึก 0-20 เซนติเมตร ความหนาแน่นของต้นหนุ่กที่เหมาะสมคือ 3 ต้นต่อกระถาง การใส่ปุ๋ยยูเรีย 2.4 กรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง (อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 49/1) และตัดลำต้นของหนุ่กทุก 56 วัน ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดและการเจริญเติบโตของพีชเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71 ที่ระยะเวลาทั้งหมด 112 วัน

4. องค์ประกอบน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกกำจัดมากที่สุดคือ กลุ่มอิมัลชัน เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ รองลงมาคือ กลุ่มอะโรมาติก ส่วนกลุ่มมีขี้ผึ้งเพิ่มขึ้นหลังการทดลอง เนื่องจากเกิดจากผลิตภัณฑ์รองของการย่อยสลายขององค์ประกอบน้ำมันกลุ่มอื่น แต่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

5. ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และในดินที่มีสารอินทรีย์ (น้ำมันหล่อลื่น) สูง จะมีการหายใจของจุลินทรีย์สูง แต่ดินที่มีการ

ปนเปื้อนน้ำมันมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศ เพราะยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์อะมิโนเอส โดยจะพบจุลินทรีย์กลุ่มใช้อากาศมากในชุดควบคุมที่มีการปลูกหญ้า ในขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสเกิดขึ้นสูงเมื่อดินมีการปนเปื้อนสูง ความชื้นสูง และปริมาณออกซิเจนในดินต่ำ ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้พบมากในดินที่มีจุลินทรีย์กลุ่มแฟคัลเททีฟหรือกลุ่มไม่ใช้อากาศ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายน้ำมันนั้นเป็นกลุ่มแฟคัลเททีฟ

6. ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน แต่มีผลยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เนื่องจากมีปริมาณไนเตรทที่สะสมในดินมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่เมื่อมีการเติมปุ๋ยยูเรียซึ่งเป็นการเพิ่มไนโตรเจนในดินในปริมาณที่เหมาะสม สามารถกระตุ้นการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี

7. ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่หายไปจากดินส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในดิน ร้อยละ 42-51 จัดเป็นการย่อยสลายโดยราก (rhizodegradation) เป็นการเปลี่ยนรูปที่แท้จริงของสารปนเปื้อนเพื่อทำลายผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในบริเวณเขตราก

8. กระบวนการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยพืชช่วยลดความเป็นพิษของดินต่อการงอกของเมล็ดมะเขือเทศ โดยมีการงอกของเมล็ดเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการบำบัด และดินสามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูกได้เมื่อผ่านการบำบัดในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (ข้อที่ 3)

ข้อเสนอแนะ

1. แนวทางการนำผลการทดลองไปใช้ประโยชน์

การบำบัดดินปนเปื้อนด้วยพืช สิ่งที่ต้องคำนึงถึงซึ่งได้จากการวิจัยครั้งนี้ มีดังนี้

1.1 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดินขณะเริ่มต้นการทดลองควรเตรียมให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลองแต่ละชุด

1.2 อิทธิพลของปุ๋ยยูเรียเมื่อใส่ลงไปในวันระยะแรกจะมีผลทำให้ดินเป็นด่าง แต่ต่อมาเมื่อแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ออกซิไดซ์จะก่อให้เกิดผลตกค้างเป็นกรด ดังนั้นควรเปลี่ยนชนิดของปุ๋ย เช่น เมทิลีนยูเรีย (methylene urea)

1.3 นอกจากปุ๋ยไนโตรเจนแล้ว ในการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยพืช ควรคำนึงถึงปริมาณธาตุอาหารชนิดอื่นที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม

1.4 หลังการบำบัดดินปนเปื้อน ควรมีการวิเคราะห์สารอาหารในพืช เช่น ปริมาณโปรตีน เนื่องจากพืชที่ใช้เป็นหญ้าอาหารสัตว์ และปริมาณโลหะหนัก เพราะในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่หลายชนิด ผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวจะสามารถหาวิธีการจัดการพืชได้ หากไม่มีสารพิษปนเปื้อนสามารถนำไปเป็นอาหารสัตว์ได้ แต่ถ้ามีโลหะหนักปนเปื้อนต้องนำพืชไปทำลายอย่างถูกวิธี

2. การศึกษาวิจัยในอนาคต

2.1 การศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยพืช ควรศึกษาชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด และทำการคัดแยกเชื้อนั้น เพื่อใช้เป็นเชื้อเร่งในกระบวนการย่อยสลาย หรือนำดินปนเปื้อนจากพื้นที่ปนเปื้อนจริงมาผสมเพื่อจะได้มีเชื้อที่สามารถปรับตัวเข้ากับสารปนเปื้อนชนิดนั้นๆ แล้ว

2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ดินจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจริง และทำการบำบัด ณ พื้นที่ที่มีการปนเปื้อน

2.3 การศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยพืช ร่วมกับการเติมวัสดุเพิ่มความพรุนให้ดิน เช่น ขี้เลื่อย แกลบ เพื่อเพิ่มช่องว่างอากาศในดิน ลดการสะสมความชื้นในดิน



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2549. **สรุปการใช้รถยนต์และน้ำมันเชื้อเพลิง.**

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2553. **สรุปการผลิต นำเข้า จำหน่าย ส่งออกน้ำมัน**

เชื้อเพลิง. สถิติการจัดหาและจัดจำหน่าย. แหล่งที่มา:

<http://www.doeb.go.th/information/information.htm>, 12 มีนาคม 2553.

กรรณิการ์ สิริสิงห. 2544. **เคมีของน้ำไฮโดรคอกและการวิเคราะห์.** คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี

สถาบันราชภัฏจันทรเกษม, กรุงเทพฯ.

กฤตินี กาญจนภา. 2539. **ไบโอรีมิดิเอชันของดินปนเปื้อนน้ำมันดิบ .** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ,

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2551. **หญ้ากินนีสีม่วง.** แหล่งที่มา:

<http://www.doe.go.th/library/html/detail/guinea/guinea2.html>, 13 สิงหาคม 2551.

กอบแก้ว ตรงคงสิน. 2535. **พืชอาหารสัตว์เขตร้อน.** ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช

คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย.** พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จันทร์เพ็ญ จำแก้ว. 2540. **สภาพและปัญหาน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในประเทศไทยและการประเมิน**

เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการบำบัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี.

จันทร์หา อิ่มใจ. 2551. การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นโดยการใช้หญ้าโครสโครส.
การศึกษาค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เฉลิมพล แซมเพชร. 2530. หญ้าและถั่วอาหารสัตว์เมืองร้อน. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ชรินทร์ รุ่งเรืองศิลป์. 2533. น้ำมัน. กองวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการ
สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ชาญชัย มณีคุลย์. 2511. บันทึกประวัติการนำเข้าอาหารสัตว์เข้าประเทศ. สัตวแพทย์สาร 1: 1-15.

ณัฐพร ลิ้มปนิชวัฒน์. 2548. การบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นโดยวิธีการหมักทำปุ๋ยร่วมกับการ
ฟื้นฟูด้วยพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนบดี จินดาอภ. 2547. แนวทางการรวบรวมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากอู่ซ่อมรถยนต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บุญฤา วิไลพร. 2528. พืชอาหารสัตว์เขตร้อนและการจัดการ. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะ
เกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร. 2544. เชื้อเพลิงและสาร
หล่อลื่น. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

ปิยนุช ใจแก้ว. 2551. กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่บำบัดด้วยพืช.
การศึกษาค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์สิทธิ์ บุญรักษา. 2546. การบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นผ่านกระบวนการหมักทำปุ๋ยโดย
ใช้มูลสุกรเป็นวัสดุร่วมในการหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มณเฑียร กังสกีเทียม. 2539. **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 7. สมาคมศิษย์เก่า
วิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วงจันทร์ วงศ์แก้ว. 2535. **หลักสรีรวิทยาของพืช**. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศศิธร ถิ่นนคร เจริญรัฐ น้อยสุวรรณ และศรัณยา วิทยานุภาพยืนยง. 2536. **อิทธิพลของระยะตัดที่มี
ต่อลักษณะประจำพันธุ์ และผลผลิตของหญ้ากินนี 4 พันธุ์**. รายงานผลการวิจัย ประจำปี
2528-2533. ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ปากช่อง.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2529. **จุลชีววิทยาของดิน เพื่อผลิตผลทางการเกษตร**. พิมพ์ครั้งที่ 2.
ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2539. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

_____. 2545. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

ศูนย์แลกเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2546. **แนวทางการจัดการ น้ำมันหล่อลื่นใช้
แล้ว**. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย.

สนิท อักษรแก้ว. 2532. **ป้าชายเลน นิเวศน์วิทยาและการจัดการ**. หจก. คอมพิวเตอร์ แอดเวอร์
ไทซิงค์, กรุงเทพฯ.

สายันห์ ทัดศรี. 2540. **พืชอาหารสัตว์เขตร้อนการผลิตและการจัดการ**. ภาควิชาพืชไร่
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2548. **หญ้าอาหารสัตว์และหญ้าพื้นเมืองในประเทศไทย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
กรุงเทพฯ.

สิริพร แก่นสียา. 2546. แนวทางการจัดเก็บน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว . วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 7 ฉบับที่ 26 เมษายน-มิถุนายน 2546.

สุวนาถ สุขขะเกตุ. 2537. อิทธิพลของควมถี่ในการตัดต่อผลผลิตและคุณภาพของหญ้า 4 ชนิดที่มีลักษณะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โสภณ ชินเวโรจน์. 2541. อิทธิพลของปุ๋ยไนโตรเจน และระยะปลูกต่อผลผลิตเมล็ดหญ้างินนี้สีม่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาลัยเกษตรศาสตร์.

อารีย์ วรรณวัฒน์. 2526. พืชอาหารสัตว์หลักและปฏิบัติ. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 222 น.

เอิบ เขียวรัตน์. 2533. ดินของประเทศไทย ลักษณะการแตกกระจายและการใช้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Achuba, F.I. and B.O. Peretiemo-Clarke. 2008. Effect of spent engine oil on soil catalase and dehydrogenase activities. **Int. Agrophysics** (22): 1-4.

Alexander M. 1977. **Introduction to soil microbiology**. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York .

Anderson, E. R. 1970. Effect of flooding on tropical pastures. pp. 591-594. In **Proc. 11th Int. Grasslds. Congr.** Surfurs Paradise, Australia.

Aon, M. A., D. E. Sarena, J .L. Burgos and S. Cortassa. 2001. Interaction between gas exchange rate, physical and microbiological properties in soils recently subjected to agriculture. **Soil and Tillage Research** (60): 163-171.

Atlas, R. M. 1995. **Handbook of Media for Environment Microbiology**. University of Louis ville, CRC Press, Inc.

- Balba, M. T., N. Al-Awadhi and R. Al-Daher. 1998. Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation. **J. Microbiological Methods.**(32): 155–164.
- Belimov, A.A., V. I. Safronova, T. A. Sergeyeva, T. N. Egorova, V. A. Matveyeva, V. E. Tsyganov, A. Y. Borisov and I. A. Tikhonovich. 2001. Characterization of plant growth-promoting rhizobacteria isolated from polluted soils and containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase. **Canadian Journal of Microbiology** (47): 642-652.
- Binet, P., J. M. Portal., and C. Leval. 2000. Dissipation of 3-6 ring polycyclic aromatic in the rhizosphere of ryegrass. **Soil Biol. Biochem** (32): 2011-2017.
- Black, C.A. 1965. **Method of Soil Analysis**. Academic Press, Inc.
- Bogdan, A. V. 1977. **Tropical Pasture and Fodder Plants**. Longman Inc, New York. 475 p.
- Boyle, J. J. and J. R. Shann. 1998. The influence of planting and soil characteristics on mineralization of 2,4,5-T in rhizosphere soil . **J. Environ. Q.** (27): 704-709.
- Brzezinska, M., Z. Stepniewska and W. Stepniewski. 2001. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater. **Polish Journal of Environmental Studies** (10): 307-311.
- C-A-B Internationnal. 1993. **Tropical Soil Biology and Fertility a Handbook of Method**. 2nd ed.University of Oxford. Oxford, UK.
- California Compost Quality Council. 2001. **Compost Maturity Index**. CCQC, California.

- Deni, J. and M. J. Penninckx. 1999. Nitrification and autotrophic nitrifying bacteria in a hydrocarbon-polluted soil. **Applied and Environmental Microbiology**. (65): 4008-4013.
- Dowley, A., R. Fitzpatrick, A. Cass and W. Besz. 2009. **Measurement of redox potential (Eh) in periodically waterlogged viticultural soils**. Available Source. <http://geosis-naip-nbsslup.org/pdf/biological/>, December 28, 2009
- Duponnois, R., M. Kisa, K. Assigbetse, Y. Prin, J. Thioulouse, M. Issartel, P. Moulin and M. Lepage. 2006. Fluorescent pseudomonads occurring in macrotermes subhyalinus mound structures decrease Cd toxicity and improve its accumulation in sorghum plants. **Science of the Total Environment** (370): 391-400.
- EPA. 1996. **A Citizen's Guide to Bioremediation**. Available Source: <http://www.epa.gov/swertiol/download/citizens/bioremediation.pdf>. August 1, 2008.
- Euliss, K., C. Ho, A.P. Schwab, S. Rock and M. K. Banks. 2008. Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone. **Bioresource Technology**. (99): 1961–1971.
- Florida's On-line Composting Center. 2002. **Compost Maturity Test**. Available Source: <http://www.compostinfo.com/tutorial/MaturityTests.html>. August 8, 2008.
- Gerhardt, K. E., X. Huang, B. R. Glick and B. M. Greenberg. 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. **Plant Science** (176): 20–30.
- Hutchinson, S. L., A. P. Schwab and M. K. Banks. 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: Effect of irrigation techniques and scheduling. **J. Environ. Qual.** (30): 1516–1522.

- Kirkpatrick, W. D., P. M. White, D. C. Wolf, G. J. Thoma and C. M. Reynolds. 2008. Petroleum-degrading microbial numbers in rhizosphere and non-rhizosphere crude oil-contaminated soil. **International Journal of Phytoremediation**. (10): 210 – 221.
- Lal, R. and J. M. Kimble. 2000. Tropical ecosystems and global C cycle, pp. 3-32. *In* R. Lal, J. M. Kimble and B. A. Stewart, eds. **Global Climate Change and Tropical Ecosystem. Advances in Soil Science..** CRC Press, New York.
- Lee, S., S. Lee, D. Kim and J. Kim. 2007. Degradation characteristics of waste lubricants under different nutrient conditions. **Journal of Hazardous Materials**. (143): 65-72.
- Lee, S., W. Lee , C. Lee and J. Kim. 2008. Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. **Journal of Hazardous Materials**. (153): 892–898.
- Lymam, W. J., Reidy, P. J., and Levy, B. 1992. **Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments**. C. K. Smoley, Inc., Chelsea, Michigan.
- Mohammed, A. M. O., R. N. Yong and C. H. Cheung. 1992. Temperature dependence of soil water potential. **Geotechnical Testing Journal**. (3): 330-339.
- Molson, J.W., E.O. Frind, D.R. Van Stempvoort and S. Lesage. 2002. Humic acid enhanced remediation of an emplaced diesel source in groundwater. **Journal of Contaminant Hydrology**. (54): 277-305.
- Mueller Associates. 1989. **Waste Oil: Reclaiming Technology, Utilization and Disposal**. Noyes Data Corporation, New Jersey.
- Navarro - Chavira, G. and B. D. Mckersie. 1983. Effect of clipping on the carbohydrate composition of different morphological parts of guinea grass (*Panicum maximum* Jacq.). **Trop. Agric. (Trinidad)**. 60 (3): 189-193.

- Oh, C. H. 2001. Phytoremediation Technologies. **Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook**. CRC Press Washington, D. C.: 5.6-1 – 5.6-13.
- Oudot, J., F. X. Merlin and P. Pinvidic. 1998. Weathering rates of oil components in a biodegradation experiment in estuarine sediments. **Marine Environment Research** (45): 113-125.
- Peltola, R., M. Salkinoja-Salonen, J. Pulkkinen, M. Koivunen, A. Turpeinen, T. Aarnio and M. Romantschuk. 2006. Nitrification in polluted soil fertilized with fast- and slow-releasing nitrogen: A case study at a refinery landfarming site. **Environmental Pollution**. (143): 247-253
- Pitter, P., and J. Chudoba. 1990. **Biodegradation of Organic Substances in the Aquatic Environment**. CRC Press, Ann Arbor, Michigan: 7-31.
- Rezek, J., C. in der Wiesche., M. Mackova., F. Zadrazil and Tomas Macek. 2008. The effect of ryegrass (*Lolium perenne*) on decrease of PAH content in long term contaminated soil. **Chemosphere**. (70): 1603–1608.
- Schnoor, J. L., L. A. Licht, S. C. McCutcheon, N. L. Wolfe and L. H. Carreira. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. **Environ. Sci. Technol.** (29): 318-323.
- Seller, K. 1999. **Fundation of Hazardous Waste Site Remediation**. Lewis Publisher, New York.
- Sinha, R. K., S. Herat and P. K. Tandon. 2003. Phytoremediation: Role of plants in contaminant site management, pp. 315-330. In S. C. McCutcheon and J. L. Schnoor, eds. **Phytoremediation : transformation and control of contaminants**. Wiley-Interscience, New Jersey.

- Skerman, P. J. and F. Riverose. 1990. **Tropical Grasses**. FAO Plant Production and Protection Series(23). Rome, Italy. 834 p.
- Soil Survey Division Staff. 1993. **Handbook of Soil Survey Manual**. 18th ed. U.S. Department of Agriculture
- Stur, W. W. 1990. Screening forage species for shade tolerance. A preliminary report. pp. 58-63. *In* H. M. Shelton and W. W. Stur (Eds). Forage for Plantation Crops. Proceeding of a workshop. Sanur Beach. Bali, Indonesia 27-29 June 1990. **ACIAR Proceedings**(32): 16 p.
- Tabatabai, M. A. 1982. Soil Enzymes, pp. 903-940. **Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties Second Edition**. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin USA.
- Thailand's Oil Business. 2551. สถานการณ์และการกักตุนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว. คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมัน. แหล่งที่มา: <http://www.ptit.org/oilbusiness/knowledge/knowledge09.html>, 16 พฤศจิกายน 2551.
- Tudsri, S., S. Pooreesrisak, P. Sornprasit and W. Nuparmyuenyoung. 1988. Nitrogen fertilizer response of pasture grasses in Muak Lek area. **Thai J. Soil and Fert.** (8): 125-133.
- Urin, N.C. 2001. Type, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil grown plants, pp 19-39. *In* R. Pinton, Z. Varanini and P. Nonnipieri, eds. **Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface**. Marcel Dekker, New York:
- Walton, B. A., Guthrie, E. A. and Christman, R.F. 1994. Rhizosphere microbial communities as a plant defence against toxic substances in soil, pp 82-92. *In*: T. A. Anderson, J. R. Coats, eds. **Bioremediation Through Rhizosphere Technology**. American Chemical Society, Washington, D. C.

- West, A.W., G.P. Sparling, and T.W. Speir. 1989. Microbial activity gradually dried or rewetted soils as governed by water and substrate availability. **Aust. J. Soil Res.** (27): 747–757.
- White, P. M., D. C. Wolf, G. J. Thoma and C. M. Reynolds. 2006. Phytoremediation of alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons in a crude oil-contaminated soil. **Water, Air, & Soil Pollution** (169): 207-220.
- Wlodarczyk, T., M. Brzezinska and P. Szarlip. 2009. Some physical factors influencing the dehydrogenase activity in soils (review). Available Source. <http://geosis-naip-nbsslup.org/pdf/biological/>, December 28, 2009
- Wong, J.H.C, C.H. Lim and G.L. Nolm. 1997. **Design of Remediation Systems**. Lewis Publishers, Washington, D.C., U.S.A.
- Yong , R. N., L. F. Mohammed and A. M. O. Mohammed. 1994. Retention and Transport of Oil Residue in a Sandy Lome Soil. *In* Tracey A.O Shay and Keith B. Hoddinott, eds. **Analysis of Soil Contaminated with Petroleum Constituent**. ASTM STP 1221, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การเตรียมดินสำหรับการทดลอง

ภาคผนวก ก

การเตรียมดินสำหรับการทดลอง

1. การเตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

ร้อยละน้ำหนักแห้งของดิน เท่ากับ 99.84

ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เท่ากับ 0.87

1.1 การเตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นร้อยละ 3 (100 กก.)

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณดินที่ใช้} &= (\text{ปริมาณดินที่ต้องการ} - \text{ปริมาณน้ำมันปนเปื้อน}) / \text{ร้อยละ ดินแห้ง} \\ &= (100.00 - 3.00) / 0.9984 \text{ กก.} \\ &= 97.16 \text{ กก.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณน้ำมัน} &= \text{น้ำหนักน้ำมันที่ต้องการ} / \text{ความหนาแน่นน้ำมัน} \\ &= 3.00 / 0.87 \text{ ลิตร} \\ &= 3.45 \text{ ลิตร}\end{aligned}$$

ดังนั้น ใช้ ดินร่วนปนทราย 97.16 กก. โดยน้ำหนักเปียก
น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 3.45 ลิตร

1.2 การเตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นร้อยละ 5 (100 กก.)

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณดินที่ใช้} &= (\text{ปริมาณดินที่ต้องการ} - \text{ปริมาณน้ำมันปนเปื้อน}) / \text{ร้อยละ ดินแห้ง} \\ &= (100.00 - 5.00) / 0.9984 \text{ กก.} \\ &= 95.15 \text{ กก.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณน้ำมัน} &= \text{น้ำหนักน้ำมันที่ต้องการ} / \text{ความหนาแน่นน้ำมัน} \\ &= 5.00 / 0.87 \text{ ลิตร} \\ &= 5.75 \text{ ลิตร}\end{aligned}$$

ดังนั้น ใช้ ดินร่วนปนทราย 95.15 กก. โดยน้ำหนักเปียก
น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 5.75 ลิตร

2. การเตรียมดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นกรณีควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ค่าอินทรีย์คาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นมีค่า เท่ากับ ร้อยละ 5.40 ในโตรเจนที่ใช้ผสมกับดิน คือ ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 ซึ่งจากการวิเคราะห์มีไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 448 ก./กก.ปุ๋ย ต้องการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังนี้

2.1) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 10 ต่อ 1

ดิน 1 กก. มีอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ	54.0	ก.
ต้องเพิ่มไนโตรเจน	5.40	ก.
ดังนั้นต้องใส่ปุ๋ยยูเรีย	$5.40/0.448 =$	12.05 ก./กก.ดิน

2.2) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 30 ต่อ 1

ดิน 1 กก. มีอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ	54.0	ก.
ต้องเพิ่มไนโตรเจน	1.80	ก.
ดังนั้นต้องใส่ปุ๋ยยูเรีย	$1.80/0.448 =$	4.02 ก./กก.ดิน

2.3) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 50 ต่อ 1

ดิน 1 กก. มีอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ	54.0	ก.
ต้องเพิ่มไนโตรเจน	1.08	ก.
ดังนั้นต้องใส่ปุ๋ยยูเรีย	$1.08/0.448 =$	2.41 ก./กก.ดิน



ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ความหนาแน่น

ความหนาแน่นสามารถหาได้โดยการนำดินบรรจุในภาชนะที่ทราบน้ำหนักและปริมาตร และเติมตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะนั้น กระแทกเบาๆ 3 ครั้ง ชั่งน้ำหนักภาชนะที่มีตัวอย่างดินทำซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักดิน}}{\text{ปริมาตรดิน}}$$

การวิเคราะห์ความชื้น

ปริมาณความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในดิน

ปริมาณของแข็งรวม หมายถึง ปริมาณดินแห้ง

วิธีการวิเคราะห์มีขั้นตอน ดังนี้ นำดินที่ทำการสุ่มตัวอย่างแล้วประมาณ 10 กรัม ใส่ถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 75 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 วัน จนกระทั่งตัวอย่างดินแห้งสนิท คือ น้ำหนักตัวอย่างดินคงที่

$$\text{การคำนวณ} \quad W = \frac{(W1 - W2) \times 100}{W1}$$

เมื่อ

เมื่อ

W = เปอร์เซ็นต์ของความชื้น

W1 = น้ำหนักของดินก่อนอบ

W2 = น้ำหนักของดินหลังจากอบจนแห้ง

$$TS = 100 - W$$

เมื่อ

TS = เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของแข็งรวม

การวิเคราะห์ pH โดย pH Meter (Black, 1965)

ใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2.5 โดยน้ำหนัก เช่น ใช้ดิน 10 กรัม ต่อการเติมน้ำกลั่น 25 มล. ใช้แท่งแก้วคนให้ดินและน้ำเข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ในขณะที่วางทิ้งไว้ให้มีการคนเป็นครั้งคราว ก่อนวัด pH ต้องปรับ pH Meter ด้วย Buffer Solution pH 4 และ 7 ก่อนแล้วจึงดำเนินการวัด pH ของดินตัวอย่าง

การวิเคราะห์อุณหภูมิ

อุณหภูมิสามารถหาได้โดยทำการวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดที่ระดับความลึกของกระถางเท่ากับ 10 ซม. โดยทำการสุ่ม อย่างน้อย 3 ตำแหน่ง อ่านค่าในแต่ละความลึกในเวลา 5 นาที แล้วหาค่าเฉลี่ย

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

สารเคมี

- 1) $K_4Cr_2O_7$
- 2) $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
- 3) Conc H_2SO_4

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

- 1) 1 N $K_4Cr_2O_7$: ชั่ง $K_4Cr_2O_7$ 49.04 กรัม (อบที่ $105^\circ C$ เป็นเวลา 3 ชม.) ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร
- 2) 1 N FAS : ชั่ง $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 196.07 กรัม ละลายในน้ำร้อน เติม Conc H_2SO_4 15 มล. ปรับปริมาตร 500 มล. เก็บไว้ในขวดสีชาเพื่อป้องกันแสง
- 3) Ferriin indicator : ชั่ง 1,10-phenantrolinemonohydrate 1.485 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติม FAS 8 มล. ปรับปริมาตร 100 มล.

หมายเหตุ

การเตรียม 1 N FAS ไม่สามารถเตรียมให้มีความเข้มข้นที่แน่นอนได้เนื่องจาก Fe^{2+} ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ ระหว่างการเตรียมและระหว่างการเก็บรักษา การนำสารละลาย FAS มาใช้ในการวิเคราะห์แต่ละครั้งต้องทำการปรับเทียบ (standardize) กับสารละลายมาตรฐาน 1 N $\text{K}_4\text{Cr}_2\text{O}_7$ เพื่อหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอน ณ เวลานั้นๆ

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ชั่งดิน 1 กรัม (กรณีดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 0.2 กรัม) ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 250 มล.
- 2) ปิเปต 1 N $\text{K}_4\text{Cr}_2\text{O}_7$ 10 มล. ใส่ตัวอย่างดิน แก้วเบาๆ เพื่อให้สารละลายกับตัวอย่างดินเข้ากัน
- 3) เติม Conc H_2SO_4 10 มล. (ค่อยๆ ปล่อยกรดลงในตัวอย่าง เพื่อป้องกันการกระเด็นของอนุภาคดิน) แก้วเบาๆ เพื่อให้สารละลายกับตัวอย่างดินเข้ากัน อีกครั้ง ทิ้งไว้ 30 นาที
- 4) เติมน้ำกลั่น 50 มล. หยด Ferroin indicator 3-4 หยด
- 5) นำมาไทเทรตกับ 1 N FAS (จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง) จดปริมาตร 1 N FAS ที่ใช้
- 6) หาค่าความเข้มข้นที่แท้จริงของ FAS โดยการหาค่าเบส ดังนี้ ปิเปต 1 N $\text{K}_4\text{Cr}_2\text{O}_7$ 10 มล. เติม Conc H_2SO_4 10 มล. ดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่าง ปริมาตร FAS ที่ใช้กับเบสค์ นำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนได้

$$\text{การคำนวณ OM} = \frac{6.717 \text{ N } (V_B - V_S)}{W}$$

เมื่อ	OM	=	อินทรีย์วัตถุ ; กรัม/กิโลกรัมดิน
	N	=	ความเข้มข้นที่แท้จริงของ FAS ; นอร์มอล
	V_B	=	ปริมาตรของ $\text{K}_4\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่ใช้ไทเทรตเบสค์ ; มล.
	V_S	=	ปริมาตรของ $\text{K}_4\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง ; มล.
	W	=	น้ำหนักตัวอย่าง ; กรัม

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total –Nitrogen) (Black, 1965)

สารเคมี

- 1) Selenium power
- 2) lithium sulphate
- 3) hydrogen peroxide 30 %
- 4) Conc H_2SO_4

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

- 1) สารละลายสำหรับการสกัด : ชั่ง KCl 150 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.
- 2) N1 Reagent : ชั่ง Sodium Salicylate 34 กรัม Sodium Citrate 25 กรัม และ Sodium Tartate 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 750 มล. เติม Sodium Nitroprusside 0.12 กรัม ละลายจนหมดและปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.
- 3) N2 Reagent : ชั่ง NaOH 30 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 750 มล. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และเติม Sodium Hypochlorite Solution 5 % 10 มล. และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.

วิธีการวิเคราะห์

1) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1.1) นำ Ammonium Sulfate 7 กรัม มาอบที่ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น (Dessicator)

1.2) นำ Ammonium Sulfate ที่อบแล้ว 4.714 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มล

1.3) ดูดสารละลาย 1000 ไมโครกรัม/มล. $NH_4^+ - N$ 50 มล. มาละลายในน้ำกลั่น 500 มล. จะได้สารละลาย 100 ไมโครกรัม/มล. $NH_4^+ - N$

1.4) ดูดสารละลาย 100 ไมโครกรัม/มล. $NH_4^+ - N$ มา 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 มล. ละลายในน้ำกลั่น 100 มล. ได้สารละลาย 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครกรัม/มล. $NH_4^+ - N$

2) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

- 2.1) นำดินตัวอย่างมา 0.2 กรัม ใส่ในขวดเจดาล เติม Digestion mixture 4.4 มล.
- 2.2) นำไปย่อยที่อุณหภูมิ 360 °ซ เป็น เวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สารละลาย ไม่มีสี และตะกอนเป็นสีขาว
- 2.3) เติมน้ำกลั่น 50 มล. เขย่าให้เข้ากัน ปรับปริมาตรเป็น 100 มล.
- 2.4) ใช้กระบอกตวง Digestion mixture 50 มล. ใส่ในขวดเจดาล ดำเนินการย่อยที่อุณหภูมิเดียวกันกับตัวอย่างดิน

3) การวิเคราะห์หาไนโตรเจนทั้งหมด

- 3.1) ดูดสารมาตรฐาน, ตัวอย่าง และน้ำกลั่น อย่างละ 0.1 มล. ใส่ลงในหลอด
- 3.2) เติมสารละลาย N1 Reagent จำนวน 5 มล. เขย่าทันทีและตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
- 3.3) เติมสารละลาย N2 Reagent จำนวน 5 มล. เขย่าทันทีและตั้งทิ้งไว้ 1 ชม.
- 3.4) นำไปวัดค่า absorbance ที่ 655 nm.

การคำนวณ

พลอตกราฟระหว่างค่า absorbance ที่ได้ไป และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เพื่อใช้หาค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง และแปลงค่านำมาคำนวณโดยสูตร

$$\text{Total-N} = \frac{CV}{W}$$

เมื่อ	Total-N	=	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ; ไมโครกรัม / กรัม
	C	=	ความเข้มข้นของตัวอย่างลบด้วยความเข้มข้นของน้ำกลั่น (Blank); ไมโครกรัม / มล.
	V	=	ปริมาตรของตัวอย่าง ; มล.
	W	=	น้ำหนักตัวอย่าง ; กรัม

การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียม (C-A-B International, 1993)

สารเคมี

- 1) Ammonium Sulfate
- 2) KCl
- 3) NaOH
- 4) Sodium Hypochlorite Solution 5%
- 5) Sodium Nitroprusside
- 6) Sodium Salicylate
- 7) Sodium Tartate
- 8) Sodium Citrate

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

- 1) สารละลายสำหรับการสกัด : ชั่ง KCl 150 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.
- 2) N1 Reagent : ชั่ง Sodium Salicylate 34 กรัม Sodium Citrate 25 กรัม และ Sodium Tartate 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 750 มล. เติม Sodium Nitroprusside 0.12 กรัม ละลายจนหมด และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.
- 3) N2 Reagent : ชั่ง NaOH 30 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 750 มล. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และเติม Sodium Hypochlorite Solution 5% 10 มล. และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.

วิธีการวิเคราะห์

- 1) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Stock Standard Solution)
 - 1.1) นำ Ammonium sulfate 7 กรัม มาอบที่ 1050C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น (Dessicator)
 - 1.2) นำ Ammonium sulfate ที่อบแล้วมา 4.714 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1,000 มล. จะได้สารละลาย 1,000 ไมโครกรัม/มล. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

1.3) คูณสารละลาย 1,000 ไมโครกรัม/มล. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 50 มล. มาละลายในน้ำกลั่น 500 มล. จะได้สารละลาย 100 ไมโครกรัม/มล. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

1.4) คูณสารละลาย 100 ไมโครกรัม/มล. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ มา 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 มล. ละลายในน้ำกลั่น 100 มล. ได้สารละลาย 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครกรัม/มล. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

2) การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

2.1) นำดินตัวอย่างมา 10 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มล. เติมสารละลาย 2 N KCl จำนวน 100 มล.

2.2) นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 30 นาที

2.3) นำไป Centrifuge แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง No.42 นำส่วนที่ใส่ไปใช้ในการวิเคราะห์

3) วิธีการวิเคราะห์หาแอมโมเนียม

3.1) คูณสารละลายมาตรฐาน, ตัวอย่าง และน้ำกลั่น (Blank) อย่างละ 0.1 มล. ใส่ลงในหลอดทดลองอย่างละ 1 หลอด

3.2) เติมสารละลาย N1 Reagent จำนวน 5 มล. เขย่าทันที และตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

3.3) เติมสารละลาย N2 Reagent จำนวน 5 มล. เขย่าทันที และตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

3.4) นำไปวัดค่า absorbance ที่ 655 nm.

การคำนวณ

พลอตกราฟระหว่างค่า absorbance ที่ได้ไป และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง และแปลงค่านำมาคำนวณโดยสูตร

$$\text{NH}_4^+ - \text{N} = \frac{CV}{W}$$

เมื่อ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ = ปริมาณแอมโมเนียม ; ไมโครกรัม / กรัม

C = ความเข้มข้นของตัวอย่างลบด้วยความเข้มข้นของน้ำกลั่น (Blank); ไมโครกรัม / มล.

V = ปริมาตรของตัวอย่าง ; มล.
W = น้ำหนักตัวอย่าง ; กรัม

การวิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์ (Black, 1965)

สารเคมี

- 1) KCl
- 2) HCl
- 3) N-(1-naphthyl)-ethylenediamine hydrochloride
- 4) Sodium nitrite
- 5) Sulfanilamide

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

- 1) สารละลายสำหรับการสกัด : ชั่ง KCl 149.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรจนครบ 1000 มล.
- 2) Diazotizing reagent : ละลายซัลฟานิลาไมด์ 0.5 กรัม ใน HCl 2.4 N (HCl 37.7 % 19.5 มล. ในน้ำกลั่น 100 มล.) และปรับปริมาตรเป็น 100 มล. เก็บในตู้เย็น
- 3) Coupling reagent : ละลาย N-(1-naphthyl)-ethylenediamine hydrochloride 0.3 กรัม HCl 0.12 N (HCl 37.7 % 9.4 มล. ในน้ำกลั่น 1000 มล.) และปรับปริมาตรเป็น 100 มล. เก็บในตู้เย็น

วิธีการวิเคราะห์

1) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

- 1.1) ชั่ง Sodium nitrate 0.247 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มล. จะได้สารละลาย 50 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_2^- - \text{N}$
- 1.2) เตรียม Standard Solution จาก Stock Solution 2 มล. ปรับปริมาตรเป็น 100 มล. จะได้สารละลาย 1 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_2^- - \text{N}$

1.3) ดูดสารละลาย 50 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ มา 0 , 1, 2 , 3, 4, 5 และ 6 มล. ละลายในน้ำกลั่น 50 มล. ด้วย KCl 2 M ได้สารละลาย 0 , 1, 2 , 3, 4, 5 และ 6 มล. ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ดูด Standard solution ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ อย่างละ 2 มล.

2) การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

- 2.1) นำดินตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มล.
- 2.2) เติมสารละลาย 2 N KCl 50 มล. นำไปเขย่า 30 นาที ด้วยความเร็วรอบ 120 rpm จากนั้นกรองตัวอย่างหรือ นำไปเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง 30 นาที
- 2.3) นำไป Centrifuge แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง No. 42 เพื่อนำส่วนที่ใสไปใช้ในการวิเคราะห์

3) การวิเคราะห์

- 3.1) ดูดสารละลายมาตรฐาน ตัวอย่าง อย่างละ 2 มล.
- 3.2) เติมน้ำกลั่น 43 มล. ลงในหลอดทดลอง ปิดฝาแล้วเขย่า
- 3.3) เติมสารละลาย Diazotizing reagent จำนวน 1 มล. เขย่าทันที และตั้งทิ้งไว้ 5 นาที
- 3.4) เติมสารละลาย Coupling reagent จำนวน 1 มล. เขย่าทันทีและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
- 3.5) เติมน้ำกลั่นจนกระทั่งมีปริมาตร 50 มล. ปิดฝาเขย่า
- 3.6) นำไปวัดค่า absorbance ที่ 540 nm.

การคำนวณ

พลอตกราฟระหว่างค่า absorbance ที่ได้ไป และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง และแบลงค์ นำมาคำนวณโดยสูตร

$$\text{NO}_2^- - \text{N} = \frac{CV}{W}$$

เมื่อ $\text{NO}_2^- - \text{N}$ = ปริมาณไนโตรเจน ; ไมโครกรัม / กรัม

C	=	ความเข้มข้นของตัวอย่างลบด้วยความเข้มข้นของน้ำกลั่น (Blank); ไมโครกรัม / มล.
V	=	ปริมาตรของตัวอย่าง ; มล.
W	=	น้ำหนักตัวอย่าง ; กรัม

การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท (C-A-B International, 1993)

สารเคมี

- 1) K_2SO_4
- 2) KNO_3
- 3) NaOH
- 4) Salicylic acid
- 5) conc. H_2SO_4

การเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์

- 1) สารละลายสำหรับการสกัด : ชั่ง K_2SO_4 87 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรจนครบ 1000 มล.
- 2) NaOH 4 M : ชั่ง NaOH 160 กรัมละลายในน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และปรับปริมาตรเป็น 1000 มล.
- 3) Salicylic acid 5% : ชั่ง Salicylic acid 5 กรัม ละลายใน conc. H_2SO_4 95 มล. ใช้ได้ภายใน 1 วัน ถ้าเก็บในที่มืดหรือเย็นเก็บได้ 7 วัน

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Stock Standard Solution)

- 1.1) นำ Potassium nitrate 10 กรัม มาอบที่ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นใน dessicator

1.2) ชั่ง Potassium nitrate ที่อบแล้วมา 7.223 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1,000 มล. จะได้สารละลาย 1,000 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_3^- - \text{N}$

1.3) ดูดสารละลาย 1,000 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 25 มล. มาละลายในน้ำกลั่น 500 มล. ได้สารละลาย 50 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_3^- - \text{N}$

1.4) ดูดสารละลาย 50 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ มา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 มล. ละลายในน้ำกลั่น 50 มล. ได้สารละลาย 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ไมโครกรัม / มล. $\text{NO}_3^- - \text{N}$

2. การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

2.1) นำดินตัวอย่าง 10 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มล.

2.2) เติมสารละลาย 0.5 N K_2SO_4 จำนวน 20 มล. และเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 30 นาที

2.3) นำไป Centrifuge แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง No. 42 เพื่อนำส่วนที่ใสไปใช้ในการวิเคราะห์

3. การวิเคราะห์หาไนเตรท

3.1) ดูดสารละลายมาตรฐาน ตัวอย่าง และน้ำกลั่น อย่างละ 0.5 มล. ใส่ในหลอดทดลองอย่างละ 1 หลอด

3.2) เติมสารละลาย Salicylic acid จำนวน 1 มล. เขย่าทันทีและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที

3.3) เติมสารละลาย NaOH จำนวน 10 มล. เขย่าทันทีและตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

3.4) นำไปวัดค่า absorbance ที่ 410 nm.

การคำนวณ

พลอตกราฟระหว่างค่า absorbance ที่ได้ไป และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เพื่อหาค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง และแปลงค่านำมาคำนวณโดยสูตร

$$\text{NO}_3^- - \text{N} = \frac{\text{CV}}{\text{W}}$$

เมื่อ $\text{NO}_3^- - \text{N}$ = ปริมาณไนเตรท ; ไมโครกรัม / กรัม

C	=	ความเข้มข้นของตัวอย่างลบด้วยความเข้มข้นของน้ำกลั่น (Blank); ไมโครกรัม / มล.
V	=	ปริมาตรของตัวอย่าง ; มล.
W	=	น้ำหนักตัวอย่าง ; กรัม

การวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบน้ำมันในดิน (Oudot *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2007)

ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในดิน (Total extractable matter: TEM) วิเคราะห์โดยวิธี Soxhlet extraction และองค์ประกอบของน้ำมัน ซึ่งได้แก่ แอสฟาทีน กลุ่มอิมิตัว อะโรมาติก และเรซิน วิเคราะห์โดย column chromatography หรือ flash chromatography

เครื่องมือ

- 1) เครื่องสำหรับสกัด, Soxhlet พร้อมด้วยขวดสำหรับสกัด ขนาด 125 มล.
- 2) ทิมเบิล (thimble)
- 3) Electric heating mantle
- 4) อ่างไอน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 85 °C
- 5) อ่างน้ำแข็ง
- 6) column chromatography: solid phase extraction (SPE) ประเภท Silica Tubes 10,000 mg./60 mL. ยี่ห้อ VertiPak™
- 7) Whatman GF/A glass-microfiber
- 8) เครื่องอุตสาหกรรม

สารเคมี

- 1) Chloroform (AR. Grade)
- 2) n-Hexane (AR. grade และ HPLC grade)
- 3) Dichloromethane (AR. grade และ HPLC grade)
- 4) Methanol (AR. Grade)
- 5) Na₂SO₄ (อบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ชั่งดินปนเปื้อน 10 กรัม ซึ่งทราบปริมาณน้ำหนักแห้งของดิน เดิม Na_2SO_4 10 กรัม ผสมให้เข้ากัน ใส่รวมลงไปในทิมเบิล (thimble) สกัดด้วยชุดสกัดซอกซ์เลต โดยใช้ไคลโรฟอร์ม (chloroform) 100 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลาย สกัดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตรา 20 รอบต่อชั่วโมง
- 2) กลั่นตัวทำละลายจากขวดสกัดในน้ำร้อน 85 องศาเซลเซียส ทำให้เย็น โดยนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งหาน้ำหนักของน้ำมันทั้งหมด (Total Extracable matter: TEM)
- 3) ชะขวดสกัดด้วยเฮกเซน (hexane) 60 มิลลิลิตร นำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิก 5 นาที กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman GF/A glass-microfiber ส่วนที่ไม่ละลายในเฮกเซนจะติดบนผิวกระดาษกรอง คือ องค์ประกอบของน้ำมันที่เรียกว่า เอสพาทีน ทำให้แห้ง โดยนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งหาน้ำหนักของเอสพาทีน
- 4) ส่วนที่ละลายในเฮกเซน เรียกว่า มัลทิน ประกอบด้วยกลุ่มอิมิตัว อะโรมาติก และ เรซิน องค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้จะถูกแยกออกโดยวิธี solid-liquid chromatography ซึ่งใช้คอลัมน์ solid phase extraction โดยผ่านเฮกเซนที่ได้จากการกรองลงในคอลัมน์ กลั่นตัวทำละลาย (เฮกเซน) จากขวดในน้ำร้อน 85 องศาเซลเซียส ทำให้เย็น โดยนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งหาน้ำหนักของน้ำมันอิมิตัว
- 5) ผ่านตัวทำละลายผสมระหว่าง เฮกเซน กับไดคลอโรมีเทน อัตราส่วน 60: 40 โดยปริมาตร ลงในคอลัมน์ กลั่นตัวทำละลายผสมจากขวดในน้ำร้อน 85 องศาเซลเซียส ทำให้เย็น โดยนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งหาน้ำหนักของอะโรมาติก เก็บตัวอย่างสารละลาย 1.5 มิลลิลิตร โดยชะด้วยตัวทำละลายผสมระหว่าง เฮกเซน กับไดคลอโรมีเทน (HPLC grade) เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์สารประกอบอะโรมาติกในน้ำมันหล่อลื่น ด้วยเครื่อง GC-MS
- 6) ผ่านเมทานอล ลงในคอลัมน์ กลั่นตัวทำละลายจากขวดในน้ำร้อน 85 องศาเซลเซียส ทำให้เย็น โดยนำไปใส่ในเดสิคเคเตอร์ ชั่งหาน้ำหนักของเรซิน

การคำนวณ

$$\text{Oil as \% dry solids} = \frac{\text{gain in weight of flask(g)} \times 100}{\text{Weight of wet solids (g)} \times \% \text{ dry solids}}$$

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ **Bushnell Hass Medium** (Atlas, 1995)

สารเคมี

1) KH_2PO_4	1.00	กรัม
2) K_2HPO_4	1.00	กรัม
3) NH_4NO_3	1.00	กรัม
4) Cholesterol	0.30	กรัม
5) $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.20	กรัม
6) FeCl_3	0.05	กรัม
7) $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	กรัม

การเตรียม

ผสมสารทั้งหมด ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชให้ได้ 7.0 ± 0.2 ที่ 25°C นำไปฆ่าเชื้อ (autoclave) โดยใช้ความดัน 15 psi อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 นาที



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

ตารางผนวกที่ ค1 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พืช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter day	Temp.[°C]					pH					ORP [mV.]					MC [%]				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0%-Bare soil	28.0	27.0	30.8	22.0	28.0	7.33	7.38	7.48	7.50	7.16	259.35	265.65	298.95	258.70	277.80	0.84	1.46	2.45	3.14	3.51
0%-Plant	28.0	27.0	31.8	22.0	28.5	7.33	7.34	7.56	7.77	7.55	259.35	307.85	322.80	249.85	260.20	0.84	1.28	1.97	2.81	3.12
2.85%-Bare soil	28.0	27.0	30.3	21.5	29.0	7.19	7.35	7.55	7.60	7.27	280.30	285.45	323.45	235.30	244.90	0.95	3.99	7.05	8.46	10.58
2.85%-Plant	28.0	27.0	30.0	22.5	28.5	7.19	7.39	7.59	7.41	7.46	280.30	271.95	317.10	242.50	250.00	0.95	3.71	6.55	7.83	8.69
5.05%-Bare soil	28.0	27.0	31.5	22.0	30.0	7.05	7.30	7.49	7.55	7.26	300.15	285.45	301.25	100.45	150.50	1.25	4.52	9.08	13.56	15.02
5.05%-Plant	28.0	27.0	31.3	22.0	29.0	7.05	7.27	7.38	7.47	7.30	300.15	266.90	282.80	83.25	112.95	1.25	4.22	8.19	10.18	13.85

ตารางผนวกที่ ค2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter day	Total extract matter [%]					Asphaltenes + Resin [mg/g.soil]					Saturate[mg/g.soil]					Aromatic[mg/g.soil]				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0.02%-Bare soil	0.02	0.05	0.04	0.03	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.02%-Plant	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.86%-Bare soil	2.86	2.35	2.23	2.15	1.91	2.04	2.02	2.24	2.04	1.99	14.34	10.71	10.18	12.30	8.51	12.22	10.76	9.88	7.16	8.60
2.86%-Plant	2.86	2.64	2.16	2.17	1.99	2.04	2.34	2.41	2.26	2.73	14.34	11.37	9.21	12.66	11.16	12.22	12.69	9.98	6.78	6.01
5.05%-Bare soil	5.05	4.37	4.24	3.94	3.66	4.57	4.49	3.17	3.03	3.18	26.84	17.73	20.38	23.94	22.35	19.09	21.48	18.85	12.43	11.07
5.05%-Plant	5.05	4.22	4.04	3.78	3.69	4.57	4.30	2.95	3.18	3.52	26.84	18.49	18.03	22.03	21.18	19.09	19.41	19.42	11.59	12.19

ตารางผนวกที่ ค3 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และ
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter	OM [%]		TOC [%]		TN [%]		C:N	
	0	56	0	56	0	56	0	56
0%-Control	0.89	0.48	0.91	0.62	0.05	0.04	16.90	14.09
0%-Plant	0.89	1.06	0.91	1.02	0.05	0.06	16.90	16.45
2.85%-Control	4.01	3.04	3.86	3.34	0.04	0.06	110.20	56.61
2.85%-Plant	4.01	2.43	3.86	3.21	0.04	0.06	110.20	57.32
5.05%-Control	5.38	4.04	5.43	5.23	0.04	0.06	150.83	83.02
5.05%-Plant	5.38	3.17	5.43	5.81	0.04	0.07	150.83	83.00

ตารางผนวกที่ ค4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์
ในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter	OUR [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil day}$]					CPR [$\mu\text{mol CO}_2/\text{g soil day}$]				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0%-Bare soil	1.60	1.60	1.05	1.06	1.06	2.13	0.97	0.52	0.53	0.53
0%-Plant	1.60	2.12	1.06	1.05	1.59	2.13	0.96	0.53	1.05	1.06
2.85%-Bare soil	4.79	16.28	9.00	8.53	8.38	4.79	9.50	6.35	4.26	4.71
2.85%-Plant	4.79	14.24	9.01	7.41	6.33	4.79	8.11	5.83	4.23	4.22
5.05%-Bare soil	4.79	16.46	15.72	14.83	14.85	5.32	11.53	10.48	9.53	9.02
5.05%-Plant	4.80	15.95	17.34	16.45	16.47	5.32	10.10	11.56	10.08	10.09

ตารางผนวกที่ ค5 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter day	Ammonium-N [mg/kg soil]					Nitrite -N [mg/kg soil]					Nitrate -N [mg/kg soil]				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0%-Control	2.76	10.06	2.59	6.13	7.59	0.00	24.84	37.26	37.09	31.97	0.00	27.26	25.63	53.57	57.94
0%-Plant	2.76	4.34	2.40	6.06	7.16	0.00	25.18	19.90	35.74	35.47	0.00	27.97	26.27	16.56	4.02
2.85%-Control	0.60	6.38	1.58	5.61	6.88	0.00	12.23	19.94	16.03	10.66	0.00	2.82	12.77	5.15	3.12
2.85%-Plant	0.60	4.07	1.08	5.62	6.29	0.00	12.25	19.81	16.07	10.63	0.00	1.63	12.70	3.95	2.58
5.05%-Control	0.00	12.16	4.52	8.34	11.52	0.00	7.40	19.80	14.26	10.70	0.00	2.86	12.65	4.13	2.82
5.05%-Plant	0.00	4.37	6.85	11.98	11.27	0.00	13.80	19.88	19.68	10.75	0.00	1.72	12.67	4.27	3.01

ตารางผนวกที่ ค6 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 1

parameter	HUB [logMPN/g soil]					Dehydrogenase Activity [mg TPF/g soil]					Catalase Activity [μ mol O ₂ /g soil min]				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0%-Control	0	4.30	4.82	5.13	4.74	0.009	0.016	0.020	0.030	0.041	552.57	462.13	532.93	560.25	626.36
0%-Plant	0	4.65	4.65	4.82	4.27	0.009	0.016	0.022	0.034	0.058	552.57	656.08	663.36	664.19	735.29
2.85%-Control	0	4.64	5.08	4.88	5.65	0.015	0.043	0.051	0.092	0.168	113.37	214.74	378.42	397.45	438.91
2.85%-Plant	0	5.14	9.36	9.37	5.65	0.015	0.049	0.042	0.101	0.141	113.37	239.16	308.80	354.95	370.22
5.05%-Control	0	5.23	6.53	4.56	5.42	0.013	0.094	0.127	0.159	0.143	62.11	257.85	282.68	383.38	398.38
5.05%-Plant	0	5.65	9.36	4.96	5.33	0.013	0.091	0.107	0.144	0.125	62.11	235.09	303.13	354.43	313.10

ตารางผนวกที่ ค7 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ่กีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 1

Conc.,%	Length [cm]										Biomass [g]									
	shoot					root					shoot					root				
	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56	0	14	28	42	56
0%	35.30	45.10	62.87	74.77	96.97	10.70	36.00	39.13	65.37	79.13	0.14	0.40	1.81	3.80	6.93	0.02	0.07	0.30	0.69	1.85
2.86%	35.30	43.40	46.53	60.57	71.60	10.70	28.00	26.40	27.00	36.00	0.14	0.22	0.45	0.91	1.06	0.02	0.06	0.18	0.39	0.53
5.05%	35.30	42.60	45.27	56.73	61.65	10.70	12.75	16.40	17.83	19.83	0.14	0.18	0.43	0.84	0.90	0.02	0.05	0.16	0.23	0.35

ตารางผนวกที่ ค8 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน ชุดการทดลองที่ 2

parameter day	Temp.[^o C]			pH			ORP [mV]			MC [%]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Control	30.00	31.50	29.50	7.26	7.38	6.79	150.50	144.10	81.70	8.3	11.8	8.5
Cut-Plant	29.00	31.50	30.00	7.30	7.58	6.82	112.95	162.50	295.95	6.0	10.4	6.5
New-Plant	29.00	31.50	29.00	7.30	7.41	7.08	112.95	215.65	229.30	6.0	10.1	8.8

ตารางผนวกที่ ค9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน ชุดการทดลองที่ 2

parameter	Total extract matter [%]			Asphaltenes + Resin [mg/g soil]			Saturate[mg/g soil]			Aromatic[mg/g soil]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Control	3.66	3.57	3.47	3.18	6.59	5.55	22.35	17.87	18.27	11.07	11.24	10.84
Cut-Plant	3.69	3.55	2.96	3.52	5.59	5.38	21.18	18.67	11.32	12.19	10.23	7.53
New-Plant	3.69	3.42	3.30	3.52	6.70	7.08	21.18	16.77	15.94	12.19	9.33	9.97

ตารางผนวกที่ ค10 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนทั้งหมด
ชุดการทดลองที่ 2

parameter day	OM [%]		TOC [%]		TN [%]	
	0	56	0	56	0	56
Control	4.04	4.79	5.23	5.16	0.06	0.01
Cut-Plant	3.17	4.83	5.81	4.18	0.07	0.01
New-Plant	3.17	5.12	5.81	5.12	0.07	0.01

ตารางผนวกที่ ค11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ใน
ดิน ชุดการทดลองที่ 2

parameter day	OUR [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil day}$]			CPR [$\mu\text{mol CO}_2/\text{g soil day}$]		
	0	28	56	0	28	56
Control	14.85	10.23	13.19	9.02	12.28	21.11
Cut-Plant	16.47	6.31	12.97	10.09	8.93	17.64
New-Plant	16.47	5.18	11.11	10.09	8.30	16.93

ตารางผนวกที่ ค12 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 2

parameter day	Ammonium-N, mg/kg soil			Nitrite-N, mg/kg soil			Nitrate-N, mg/kg soil		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Control	11.52	28.54	8.45	10.70	10.57	10.86	2.82	3.75	4.68
Cut-Plant	11.27	10.42	6.40	10.75	10.60	10.96	3.01	4.27	4.98
New-Plant	11.27	10.47	4.18	10.75	7.11	7.68	3.01	3.72	5.15

ตารางผนวกที่ ค13 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรม
จุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 2

parameter day	HUB, logMPN/g soil			Deh. Ac., mg TPF/g soil			Cat. Ac., $\mu\text{mol O}_2/\text{g soil min}$		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Control	5.65	4.25	7.03	0.143	0.196	0.266	398.38	353.12	439.57
Cut-Plant	5.42	5.25	8.03	0.125	0.177	0.199	313.10	345.65	349.58
New-Plant	5.33	3.77	7.03	0.125	0.143	0.154	313.10	218.76	298.1

ตารางผนวกที่ ค14 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 2

Condition	Length [cm]						Biomass [g]					
	shoot			root			shoot			root		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Cut-Plant	10.00	62.63	66.33	19.83	21.57	33.57	0.24	0.61	1.38	0.35	0.66	1.03
New-Plant	15.45	21.25	33.45	9.32	16.97	18.80	0.09	0.13	0.21	0.02	0.05	0.14

ตารางผนวกที่ ค15 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน
ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	Temp.[$^{\circ}\text{C}$]			pH			ORP [mV]			MC [%]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
2 plants/pot	30	32	26	6.72	6.98	7.08	341.05	315.85	296.85	1.17	3.05	6.41
3 plants/pot	30	32	26	6.72	6.95	7.10	341.05	343.55	291.35	1.17	5.61	7.08
4 plants/pot	30	32	26	6.72	7.11	7.06	341.05	333.70	274.00	1.17	4.94	8.03

ตารางผนวกที่ ค16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน
ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	TEM [%]			Pol [mg/g soil]			Sat. [mg/g soil]			Aro.[mg/g soil]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
2 plants/pot	3.03	2.46	2.19	2.02	2.31	3.21	20.12	16.64	13.35	10.86	8.35	8.03
3 plants/pot	3.03	2.22	1.71	2.02	1.96	3.01	20.12	14.17	10.67	10.86	8.77	7.12
4 plants/pot	3.03	2.12	1.85	2.02	1.85	2.71	20.12	14.73	11.29	10.86	7.33	7.20

ตารางผนวกที่ ค17 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนทั้งหมด
ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	OM [%]		TOC [%]		TN [%]	
	0	56	0	56	0	56
2 plants/pot	5.45	4.77	5.17	4.48	0.14	0.08
3 plants/pot	5.45	4.47	5.17	4.95	0.14	0.10
4 plants/pot	5.45	4.85	5.17	4.35	0.14	0.10

ตารางผนวกที่ ค18 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ใน
ดิน ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	OUR [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil day}$]			CPR [$\mu\text{mol CO}_2/\text{g soil day}$]		
	0	28	56	0	28	56
2 plants/pot	4.21	7.37	5.30	4.73	5.85	4.22
3 plants/pot	4.21	6.71	4.76	4.73	5.68	3.68
4 plants/pot	4.21	6.28	6.84	4.73	5.23	4.23

ตารางผนวกที่ ค19 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	Ammonium-N [mg/kg soil]			Nitrite-N [mg/kg soil]			Nitrate-N [mg/kg soil]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
2 plants/pot	0.79	2.64	11.83	1.07	7.16	8.13	0.76	1.70	4.35
3 plants/pot	0.79	3.96	15.06	1.07	3.58	6.63	0.76	2.07	13.12
4 plants/pot	0.79	3.93	15.02	1.07	5.34	6.61	0.76	1.65	10.49

ตารางผนวกที่ ค20 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรม
จุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 3

parameter day	HUB [logMPN/g soil]			Deh. Ac., mg TPF/g soil			Cat. Ac., $\mu\text{mol O}_2/\text{g soil min}$		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
2 plants/pot	1.98	5.38	4.75	0.058	0.058	0.069	230.96	377.29	368.21
3 plants/pot	1.98	6.54	4.99	0.058	0.063	0.061	230.96	370.22	334.57
4 plants/pot	1.98	5.73	5.17	0.058	0.060	0.089	230.96	348.09	400.95

ตารางผนวกที่ ค21 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ่ากินนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 3

Condition	Length [cm]						Biomass [g]					
	Shoot			Root			Shoot			Root		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
Control 1D	35.30	62.87	96.97	10.70	39.13	79.13	0.14	1.81	6.93	0.02	0.30	1.85
1D	35.30	46.53	71.60	10.70	26.40	36.00	0.14	0.45	1.06	0.02	0.18	0.53
Control 2D	17.65	31.20	65.45	10.55	26.10	30.85	0.07	0.12	1.96	0.02	0.03	0.42
2D	17.65	33.60	43.58	10.55	15.35	22.50	0.07	0.11	0.50	0.02	0.02	0.19
Control 3D	17.65	41.57	61.75	10.55	22.17	23.35	0.07	0.30	1.60	0.02	0.04	0.27
3D	17.65	29.50	45.23	10.55	17.85	22.85	0.07	0.11	0.46	0.02	0.03	0.14
Control 4D	17.65	35.23	67.15	10.55	23.55	25.60	0.07	0.26	1.25	0.02	0.04	0.24
4D	17.65	31.51	54.71	10.55	18.50	24.55	0.07	0.14	0.41	0.02	0.03	0.13

ตารางผนวกที่ ค22 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน
ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	Temp.[°C]			pH			ORP [mV]			MC [%]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56	0	28	56
9.9:1	31.5	32.0	30.5	9.10	8.47	7.75	98.65	113.00	105.20	0.59	7.49	8.87
28.3:1	31.5	32.0	30.5	7.57	7.39	6.92	221.35	230.10	127.95	0.48	5.81	8.21
48.9:1	31.5	32.0	30.5	7.66	6.76	6.58	169.45	318.50	137.30	1.75	6.80	8.85

ตารางผนวกที่ ค23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน
ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	TEM [%]			Pol. [mg/g soil]		Sat. [mg/g soil]		Aro.[mg/g soil]	
	0	28	56	0	56	0	56	0	56
9.9:1	3.01	2.52	2.00	2.639	2.054	19.242	12.12	8.22	5.82
28.3:1	3.01	2.59	1.81	2.639	2.017	19.242	10.438	8.22	5.643
48.9:1	3.01	2.08	1.50	2.639	2.997	19.242	7.552	8.22	4.403

ตารางผนวกที่ ค24 การเปลี่ยนแปลงอินทรียวัตถุ อินทรียคาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และ
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	OM [%]		TOC [%]		TN [%]		C:N Ratio	
	0	56	0	56	0	56	0	56
9.9:1	5.143	6.950	5.834	4.935	0.591	0.161	9.88	30.64
28.3:1	6.219	8.014	5.642	4.671	0.200	0.048	28.27	96.35
48.9:1	5.503	5.078	5.564	3.564	0.114	0.038	48.92	93.72

ตารางผนวกที่ ค25 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ใน
ดิน ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	OUR [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil day}$]			CPR [$\mu\text{mol CO}_2/\text{g soil day}$]		
	0	28	56	0	28	56
9.9:1	0.00	32.09	5.32	0.00	26.31	5.32
28.3:1	0.00	2.63	11.53	0.00	2.63	10.48
48.9:1	0.01	3.67	6.31	0.01	3.67	6.31

ตารางผนวกที่ ค26 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	Ammonium-N [mg/kg soil]			Nitrite-N [mg/kg soil]			Nitrate-N [mg/kg soil]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
9.9:1	293.81	710.64	454.49	10.32	14.25	36.12	28.47	49.87	12.58
28.3:1	79.14	114.63	37.79	9.32	72.77	87.10	8.49	1.58	0.43
48.9:1	63.09	50.05	51.81	8.01	84.62	84.97	45.31	0.59	0.61

ตารางผนวกที่ ค27 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรม
จุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio day	HUB [logMPN/g soil]			Deh. Ac. [mg TPF/g soil]			Cat. Ac. [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil min}$]		
	0	28	56	0	28	56	0	28	56
9.9:1	1.52	6.23	3.99	0.129	8.794	0.058	352.43	1745.12	1469.63
28.3:1	2.38	3.73	4.21	0.069	0.890	0.060	294.39	435.41	514.11
48.9:1	4.15	5.75	5.24	0.292	0.384	0.059	127.65	316.78	289.91

ตารางผนวกที่ ค28 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้างินนิสีม่วง ชุดการทดลองที่ 4

C:N ratio	Length [cm.]				Biomass [g.]			
	shoot		root		shoot		root	
	0	56	0	56	0	56	0	56
10:1	15.70	0	11.23	0	0.07	0	0.01	0
30:1	15.70	81.13	11.23	37.40	0.07	5.72	0.01	1.25
50:1	15.70	88.83	11.23	52.10	0.07	6.07	0.01	1.75

ตารางผนวกที่ ค29 การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ พีเอช ศักย์รีดอกซ์ และความชื้นในดิน
ชุดการทดลองที่ 5

Condition	Depth [cm.]	pH			ORP [mV.]			MC [%]		
		0	28	56	0	28	56	0	28	56
Bare Soil [3.01% Oil]	0 - 20	7.46	7.42	6.92	279.75	306.25	150.80	0.60	1.09	3.86
	21 - 40	7.46	7.83	7.34	279.75	263.00	126.65	0.60	1.93	7.76
	41 - 60	7.46	7.71	7.26	279.75	259.30	126.70	0.60	2.09	7.70
C:N=48.9:1	0 - 20	7.66	6.96	5.73	169.45	240.65	229.55	1.75	2.72	3.59
	21 - 40	7.66	6.91	5.66	169.45	234.25	222.15	1.75	3.49	6.19
	41 - 60	7.66	6.93	6.11	169.45	220.20	194.95	1.75	3.32	6.59

ตารางผนวกที่ ค30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันหล่อลื่น และองค์ประกอบน้ำมันในดิน
ชุดการทดลองที่ 5

Condition	Depth [cm.]	TEM [%]			Pol. [mg/g soil]		Sat. [mg/g soil]		Aro. [mg/g soil]	
		0	28	56	0	56	0	56	0	56
Bare Soil [3.01% Oil]	0 - 20	3.01	2.69	2.52	2.64	5.97	19.24	11.29	8.22	7.96
	21 - 40	3.01	2.72	2.59	2.64	3.75	19.24	14.37	8.22	7.81
	41 - 60	3.01	2.71	2.46	2.64	3.40	19.24	13.16	8.22	8.04
48.9:1	0 - 20	3.01	2.04	1.46	2.64	0.94	19.24	8.92	8.22	4.73
	21 - 40	3.01	2.09	1.76	2.64	1.51	19.24	10.34	8.22	5.72
	41 - 60	3.01	1.96	1.74	2.64	1.58	19.24	10.50	8.22	5.28

ตารางผนวกที่ ค31 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนทั้งหมด และ
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ชุดการทดลองที่

Condition	Depth [cm.]	OM [%]		TOC [%]		TN [%]		C:N Ratio	
		0	56	0	56	0	56	0	56
Bare Soil [3.01% Oil]	0 - 20	4.64	6.60	5.78	4.48	0.06	0.06	94.56	78.96
	21 - 40	4.64	4.88	5.78	4.67	0.06	0.09	94.56	54.92
	41 - 60	4.64	5.90	5.78	4.93	0.06	0.11	94.56	43.57
C:N=48.9:1	0 - 20	5.50	4.01	5.67	3.60	0.11	0.07	49.84	47.97
	21 - 40	5.50	4.34	5.67	3.81	0.11	0.10	49.84	36.39
	41 - 60	5.50	4.09	5.67	3.86	0.11	0.16	49.84	23.95

ตารางผนวกที่ ค32 การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ออกซิเจน และการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ใน
ดิน ชุดการทดลองที่ 5

Condition	Depth [cm.]	OUR [$\mu\text{mol O}_2/\text{g soil day}$]			CPR [$\mu\text{mol CO}_2/\text{g soil day}$]		
		0	28	56	0	28	56
Bare Soil [3.01% Oil]	0 - 20	0.00	12.04	5.85	0.00	10.47	6.38
	21 - 40	0.00	16.28	5.19	0.00	13.66	4.67
	41 - 60	0.00	12.15	6.89	0.00	10.03	5.83
C:N=48.9:1	0 - 20	0.01	5.31	13.13	0.01	5.31	12.08
	21 - 40	0.01	5.30	4.63	0.01	4.77	5.15
	41 - 60	0.01	5.22	3.11	0.01	5.22	3.11

ตารางผนวกที่ ค33 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน ชุดการทดลองที่ 5

Condition	Depth [cm.]	Ammonium-N [mg/kg soil]			Nitrite-N [mg/kg soil]			Nitrate-N [mg/kg soil]		
		0	28	56	0	28	56	0	28	56
Bare Soil [3.01% Oil]	0 - 20	3.09	0.00	15.63	0.00	24.00	11.12	49.49	6.09	2.75
	21 - 40	3.09	0.00	9.36	0.00	24.07	11.09	49.49	3.78	2.45
	41 - 60	3.09	0.00	6.21	0.00	24.06	11.04	49.49	22.45	3.47
C:N=48.9:1	0 - 20	63.09	59.47	40.63	0.00	18.55	18.52	8.01	51.40	59.01
	21 - 40	63.09	145.89	56.25	0.00	77.25	18.52	8.01	41.06	79.35
	41 - 60	63.09	158.32	128.01	0.00	76.17	14.62	8.01	47.59	107.20

ตารางผนวกที่ ค34 การเปลี่ยนแปลงจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน และกิจกรรม
จุลินทรีย์ในดิน ชุดการทดลองที่ 5

Condition	Depth [cm.]	HUB, logMPN/g soil			Deh. Ac., mg TPF/g soil			Cat. Ac., $\mu\text{mol O}_2/\text{g soil min}$		
		0	28	56	0	28	56	0	28	56
Bare Soil	0 - 20	3.38	6.54	4.21	0.082	0.053	0.048	140.61	243.36	406.34
[3.01% Oil]	21 - 40	3.38	5.73	5.22	0.082	0.048	0.038	140.61	338.00	678.05
	41 - 60	3.38	5.73	3.75	0.082	0.050	0.054	140.61	346.13	573.78
C:N=48.9:1	0 - 20	5.15	4.38	4.98	0.292	0.038	0.040	127.65	373.61	319.70
	21 - 40	5.15	4.20	3.22	0.292	0.038	0.040	127.65	473.23	284.71
	41 - 60	5.15	4.20	3.23	0.292	0.041	0.041	127.65	495.29	335.66

ตารางผนวกที่ ค35 การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วง ชุดการทดลองที่ 5

C:N ratio	Depth [cm]	Length [cm.]				Biomass [g.]			
		shoot		root		shoot		root	
		0	56	0	56	0	56	0	56
C:N=50:1	0 - 20								1.11
	21 - 40	15.7	91.33	11.23	61.1	0.068	6.27	0.014	0.54
	41 - 60								0.30



ภาคผนวก ง
สมุดรวมเวลาน้ำมันหล่อลื่น

ภาคผนวก ง

สมมูลมวลน้ำมันหล่อลื่น

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกย่อยสลายอย่างแท้จริง

จากการทดลองชุดที่ 5 แบ่งการย่อยสลายตามระดับความลึกของกระถาง คือ ที่ระดับ 0-20, 21-40 และ 41-60 เซนติเมตร

ปริมาณดินทั้งหมด	$3 * 3$	=	9	กิโลกรัม
ปริมาณน้ำมันในดินเริ่มต้นแต่ละชั้น	$3 * 30.1$	=	90.3	กรัม
ปริมาณน้ำมันในดินเริ่มต้นทั้งหมด	$3 * 3 * 30.1$	=	270.1	กรัม
ปริมาณน้ำมันในดินหลังการบำบัด				
ระดับ 0-20 เซนติเมตร	$(3,000 \text{ g} * 1.46\%)$	=	43.8	กรัม
ระดับ 21-40 เซนติเมตร	$(3,000 \text{ g} * 1.76\%)$	=	52.7	กรัม
ระดับ 41-60 เซนติเมตร	$(3,000 \text{ g} * 1.74\%)$	=	52.1	กรัม
ปริมาณน้ำมันในดินหลังการบำบัดทั้งหมด		=	148.6	กรัม
ปริมาณน้ำมันที่สะสมในลำต้น	$(6.84 \text{ g} * 1.58\%)$	=	108.3	มิลลิกรัม
ปริมาณน้ำมันที่สะสมในราก				
ระดับ 0-20 เซนติเมตร	$(0.53 \text{ g} * 2.26\%)$	=	36.2	มิลลิกรัม
ระดับ 21-40 เซนติเมตร	$(0.26 \text{ g} * 2.26\%)$	=	17.5	มิลลิกรัม
ระดับ 41-60 เซนติเมตร	$(0.15 \text{ g} * 2.26\%)$	=	9.9	มิลลิกรัม
ปริมาณน้ำมันที่สะสมในรากทั้งหมด		=	63.6	มิลลิกรัม

สมการที่ใช้ในการคำนวณการย่อยสลายอย่างแท้จริง คือ

$$\text{การย่อยสลายอย่างแท้จริง} = \text{ปริมาณน้ำมันเริ่มต้น} - (\text{น้ำมันหล่อลื่นในดิน} + \text{น้ำมันหล่อลื่นในราก} + \text{น้ำมันหล่อลื่นที่เหลือในดิน})$$

การย่อยสลายอย่างแท้จริงที่ระดับ 0-20 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} &= 90.3 \text{ กรัม} - (0.1083 \text{ กรัม} + 0.0362 \text{ กรัม} + 43.8 \text{ กรัม}) \\ &= 46.4 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

การย่อยสลายอย่างแท้จริงที่ระดับ 21-40 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} &= 90.3 \text{ กรัม} - (0.1083 \text{ กรัม} + 0.0175 \text{ กรัม} + 52.7 \text{ กรัม}) \\ &= 37.5 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

การย่อยสลายอย่างแท้จริงที่ระดับ 41-60 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} &= 90.3 \text{ กรัม} - (0.1083 \text{ กรัม} + 0.0099 \text{ กรัม} + 52.1 \text{ กรัม}) \\ &= 38.2 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นการย่อยสลายอย่างแท้จริงทั้งหมด เท่ากับ 122.1 กรัม หรือ ร้อยละ 45.1



ภาคผนวก จ

การทดสอบทางสถิติ

ตารางผนวกที่ จ1 ผลการทดสอบการเจริญเติบโตของหญ้ากีนีสีม่วงทุกชุดการทดลอง ด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Exp.	Condition comparision	Length		Biomass	
		shoot	root	shoot	root
1	0%-2.86% oil	0.054	0.016	0.014	0.054
	0%-5.05% oil	0.001	0.002	0.009	0.013
	2.86-5.05% oil	0.271	0.036	0.660	0.360
2	Cut-P - New-P	0.021	0.032	0.096	0.116
3	2 pt/pot [0%-3.03% oil]	0.017	0.425	0.000	0.025
	3 pt/pot [0%-3.03% oil]	0.139	0.883	0.000	0.000
	4 pt/pot [0%-3.03% oil]	0.030	0.000	0.000	0.000
4	C/N=28/1 [3 pt/pot, 0%-3.01% oil]	0.072	0.000	0.000	0.000
	C/N=49/1 [3 pt/pot, 0%-3.01% oil]	0.026	0.000	0.000	0.000
	C/N=28/1 [3 pt/pot, 3.03%-3.01% oil]	0.000	0.002	0.000	0.000
	C/N=49/1 [3 pt/pot, 3.03%-3.01% oil]	0.000	0.000	0.000	0.000
	C/N=28/1 - C/N=49/1 [3 pt/pot, 3.01% oil]	0.339	0.005	0.445	0.014

ตารางผนวกที่ จ2 ผลการทดสอบกิจกรรมจุลินทรีย์ในดินชุดการทดลองที่ 1 ด้วยวิธีทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Condition comparision	HUB	Dehydrogenase	Catatalase	OUR	CPR	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$
0%-2.86% oil	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0%-5.05% oil	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01
2.86%-5.05% oil	0.66	0.03	0.48	0.00	0.00	0.00	0.85	0.65
[Plant-Non Plant] 0% oil	0.43	0.24	0.03	0.18	0.18	0.31	0.46	0.20
[Plant-Non Plant] 2.86% oil	0.15	0.54	0.68	0.09	0.13	0.19	0.49	0.08
[Plant-Non Plant] 5.05% oil	0.26	0.05	0.26	0.13	0.61	0.84	0.17	0.57

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวณัฐฐา แสงนรินทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 29 เมษายน 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และกองทุน ดร. ชีระ พันธุ์มวนิช