



การกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยใช้สารลดแรงตึงผิว (ไตรตัน X-100) ร่วมกับปุ๋ยมูลวัว

Removal of Total Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soil with Used Lubricating Oil by Surfactant : Triton X-100, and Cow Manure Amendments

เสาวลักษณ์ สุทธิเจริญ^{1*}, จินดาวงศ์ วิบูลย์อุทัย¹, นุชนภา ประทุมไชย¹ และ ศุภชัย สุทธิเจริญ²

Saowalak Suttichareon^{1*}, Jindawan Wibuloutai¹, Nuchnapa Prathumchai¹ and Supachai Suttichareon²

¹ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Public Health, Mahasarakham University

² Department of Agricultural Technology, Faculty of Technology, Mahasarakham University

Received : 20 June 2022

Revised : 18 August 2022

Accepted : 24 January 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ความเข้มข้น 7% w/w (70,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) โดยใช้สารลดแรงตึงผิว คือ ไตรตัน X-100 ร่วมกับปุ๋ยมูลวัว โดยศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 คือ 0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Triton X-100) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% w/v (T-TX2) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มากที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 64.65 ± 1.25 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28) และในการศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่นำมาใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 โดยมีสัดส่วนการผสมระหว่างดินต่อปุ๋ยมูลวัว คือ 1:0.3 w/w, 1:0.5 w/w และ 1:0.7 w/w ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างดินในชุดทดลองที่มีอัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว เท่ากับ 1:0.5 (T-CM2) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มากที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 72.50 ± 1.48 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28) ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากชุดการทดลองที่ใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพียงอย่างเดียว คิดเป็นร้อยละ 7.85 ± 0.23 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ปุ๋ยมูลวัวร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้

คำสำคัญ : สารลดแรงตึงผิว ; ดินปนเปื้อน ; น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ; ปุ๋ยมูลวัว

Abstract



This study aims to evaluate the effects of surfactant: Triton X-100, and cow manure compost on the removal of total petroleum hydrocarbons (TPHs) from contaminated soil with used lubricating oil (ULO). Soils spiked with about 700 g kg^{-1} (7% w/w) of ULO were individually amended with 0.3% w/v, 0.5% w/v and 0.7% w/v of Triton X-100. One kilograms of soil amended with 0.5% w/v of Triton X-100 was mixed with cow manure compost in the ratio of 1:0.3 w/w, 1:0.5 w/w and 1:0.7 w/w soil mixture: cow manure compost. The results showed that the highest total petroleum hydrocarbons reduction efficiency of $64.65 \pm 1.25\%$ was achieved in the 0.5% w/v oil-contaminated remediated with Triton X-100, the highest TPH-removal of $72.50 \pm 1.48\%$ could also be achieved in the ratio of 1:0.5 w/w oil contamination condition with cow manure amendments for a 28-day experiment period. The results indicated that cow manure could significantly enhance TPH-removal (from 64% to 72%). The findings highlight the prospect of cow manure as a proper nutrient for enhanced remediation of hydrocarbon-contaminated soils.

Keywords : surfactant ; contaminated soil ; used lubricating oil ; cow manure

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ประกอบด้วยน้ำมันพื้นฐานและสารเติมแต่ง รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดสูงและส่วนผสมที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เพื่อลดการเสียดสีของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกล ซึ่งในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปมักเกิดจากการรั่วไหลของอุตสาหกรรม ตู้ซ่อมรถ การรั่วของเครื่องยนต์ และพฤติกรรมเชิงพาณิชย์อื่นๆ (Yu *et al.*, 2022) น้ำมันหล่อลื่นจะมีลักษณะเป็นของเหลวผสมสีน้ำตาลถึงสีดำที่ประกอบด้วยสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน น้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงสูง (C_{16} - C_{36}) ได้แก่ โพลีคลอไรเนตไบฟีนิล (polychlorinated biphenyl) คลอโรไดเบนโซฟูแรน (chloro dibenzofurans) อัลคิลเบนซีน (alkylbenzenes) แนฟทาซีน (naphthalene) เมทิลแนฟทาซีน (methylnaphthalenes) สารหล่อลื่น และผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว รวมถึงโลหะหนัก เช่น สังกะสี พลวง เหล็ก ตะกั่ว และโครเมียม เป็นต้น (Das *et al.*, 2019) ซึ่งสารมลพิษเหล่านี้จะถูกดูดซับไว้ในอนุภาคดินและอาจตกค้างยาวนานในดินและน้ำใต้ดิน ทำให้มีผลต่อสภาพแวดล้อมทางนิเวศวิทยาและสุขภาพของมนุษย์ได้ (Li *et al.*, 2020)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่นิยมนำมาใช้สำหรับกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในดิน ซึ่งสารดังกล่าวจะมีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Farrow *et al.*, 2017) ประเภทของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ สารเคมี (chemical surfactants) และสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (bio surfactants) ทั้งนี้ในการย่อยสลายสารมลพิษทางชีวภาพ จึงนิยมนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพมาใช้ในการบำบัดดิน (Ying, 2006) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์และมีคุณภาพสูง (Mulligan, 2005) โดยสารลดแรงตึงผิวแบบเคมีชนิดที่ไม่มีประจุ (non-ionic surfactants) เช่น Tween 80 และ Triton X-100 เป็นต้น (Chong *et al.*, 2014; Peng *et al.*, 2011) จึงเป็นสารที่นำมาใช้เพื่อปรับสภาพดินที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนอย่างมีประสิทธิภาพผ่านการชะล้างแบบคอลัมน์ โดยคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสารลดแรงตึงผิวที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดไมเซลล์ คือ การละลาย ซึ่งเป็นการละลายที่เกิดขึ้นเองของสาร โดยปฏิกิริยาผันกลับกับไมเซลล์ (micelles) ของสารลดแรงตึงผิวในตัวทำละลายเพื่อสร้างสารละลายไอโซโทรปิก (isotropic solution) ที่เสถียรในทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic stable) ด้วยการลดกิจกรรมทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic activity) ของวัสดุที่ละลายน้ำได้ (Rosen and Kunjappu, 2012) แม้ว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวสำหรับการชะล้างดิน (soil flushing) และการล้างดิน (soil washing) จะมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังให้ความสนใจเพียงเล็กน้อยกับการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุในการชะล้างดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช่แล้ว โดยการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ทำการกำจัดน้ำมันดิบออกจากดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ Tween 80, Brij 35 และ Triton X-100 (Farrow *et al.*, 2017) ในทางกลับกัน สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุบางชนิดอาจทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญไฮโดรคาร์บอน (Tarabukin, 2020) ดังนั้นเทคโนโลยีในการฟื้นฟูดินทางชีวภาพเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดินจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มสารอาหาร ได้แก่ แหล่งคาร์บอน (เช่น สารมลพิษอินทรีย์) ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Selberg *et al.*, 2013) เพื่อช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เช่น การใช้ปุ๋ยหมักในการบำบัดสารปนเปื้อนในดิน เป็นเทคนิคที่อาศัยความหลากหลายและการปรับตัวของจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่องระหว่างเชื้อที่อาศัยอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic) และอุณหภูมิสูง (thermophilic) ซึ่งการใช้วัสดุที่มีธาตุอาหารและสารอินทรีย์ปริมาณมากเป็นองค์ประกอบจะช่วยในการบำบัดทางชีวภาพของสารปนเปื้อนในดินได้ (Wu *et al.*, 2017) โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำปุ๋ยมูลสุกร ปุ๋ยมูลวัว ปุ๋ยมูลม้า และปุ๋ยมูลสัตว์ปีก มาใช้บำบัดกากตะกอนน้ำมันดิบ

(Ubani and Atagana, 2018) ซึ่งมีปริมาณธาตุอาหาร (ไนโตรเจน) ค่อนข้างสูง ทำให้ช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในภาคตะกอนน้ำมันดิบได้

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 และศึกษาอัตราส่วนของการนำปุ๋ยมูลวัวมาใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (Total petroleum hydrocarbons; TPHs) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดลองจะทำการเก็บจากพื้นที่ชุ่มมรดก ณ บ้านเลขที่ 106 หมู่ที่ 4 ตำบลนาสีนวน อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม โดยจะแบ่งเป็น 2 ตัวอย่าง ดังนี้

1.1 ตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

ทำการเก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว สำหรับเป็นข้อมูลอ้างอิงปริมาณน้ำมันในการเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์เพื่อใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างบริเวณที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจำนวน 5 จุด จุดละ 1 กิโลกรัม โดยเก็บในแนวดิ่งลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร (ภาพที่ 1) จากนั้นนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันจะได้ดินรวมทั้งหมดเป็น 5 กิโลกรัม แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

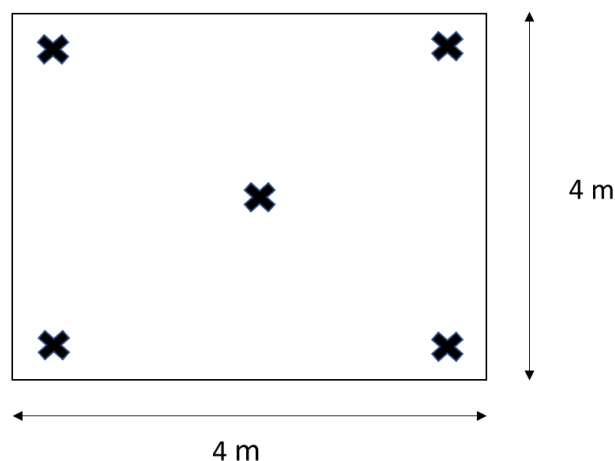


Figure 1 Soil sampling point ; five points were gathered in a contaminated site.

1.2 ตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น สำหรับใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์เพื่อใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทำให้การสุ่มเก็บตัวอย่างบริเวณที่ไม่มีการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อลื่น โดยจะเก็บห่างจากคู่อ้อมรถเป็นระยะ 100 เมตร จำนวน 26 จุด จุดละ 2 กิโลกรัม ซึ่งเก็บในแนวตั้งลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร (ภาพที่ 2) จากนั้นนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันจะได้ดินรวมทั้งหมดเป็น 52 กิโลกรัม แล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

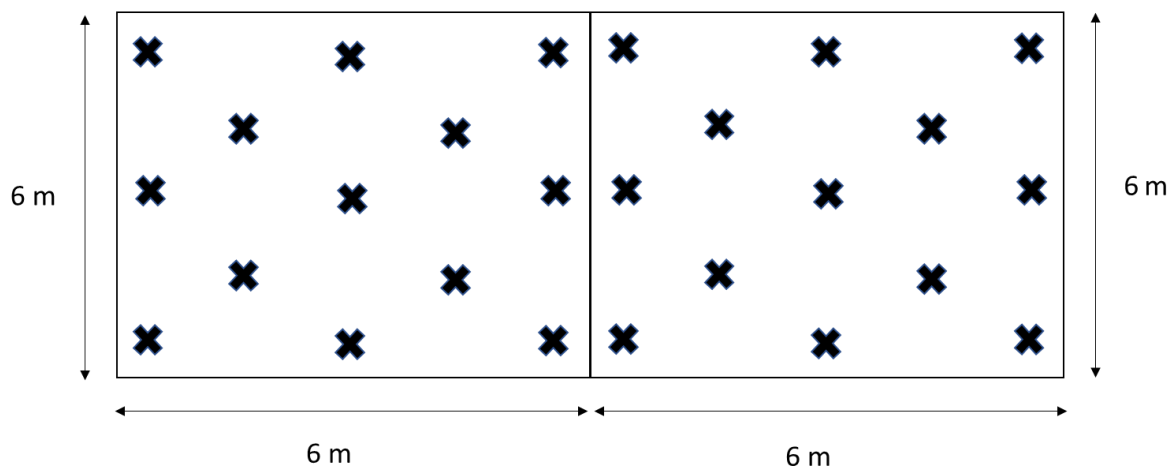


Figure 2 Soil sampling point; twenty-six points were gathered in an uncontaminated site.

2. การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์

การเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง จะนำตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น ปริมาณ 52 กิโลกรัม มาตากในที่ร่มและอากาศถ่ายเท ทำการบดดินด้วยโม่ให้ละเอียดแล้วร่อนดินผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อคัดแยกเศษวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่เนื้อดินออก โดยร่อนดินให้ได้ปริมาณ 20 กิโลกรัม แล้วนำมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่มีความเข้มข้น 7% w/w (70,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) ซึ่งอ้างอิงมาจากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น (ตารางที่ 2) ที่เก็บมาจากคู่อ้อมรถ จากนั้นนำดินที่ผสมน้ำมันหล่อลื่นแล้วใส่ลงในภาชนะ ปิดฝาให้สนิท ทิ้งไว้อย่างน้อยประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อให้ดินได้ดูดซับน้ำมันหล่อลื่นก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ

3. การเตรียมวัสดุร่วมที่ใช้ในการทดลอง

3.1 สารลดแรงตึงผิว Triton X-100

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลอง คือ Triton™ X-100 (laboratory grade) จากบริษัท Sigma-Aldrich (นำเข้าโดย บริษัท เอส.เอ็ม.เคมีคอล ซัพพลาย จำกัด, ประเทศไทย) ทำการเตรียมสารลดแรงตึงผิวแต่ละความเข้มข้น ได้แก่ 0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v เพื่อศึกษาความเหมาะสมของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

3.2 ปุ๋ยมูลวัว

นำปุ๋ยมูลวัวจากภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ (ตารางที่ 1) ก่อนที่จะนำมาผสมร่วมกับดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นและสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อศึกษาสัดส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่เหมาะสมร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น โดยมีสัดส่วนการผสมระหว่างดินต่อปุ๋ยมูลวัว ได้แก่ 1:0.3, 1:0.5 และ 1:0.7

4. การศึกษาปริมาณของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

นำสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 มาเตรียมความเข้มข้น คือ 0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v โดยใช้ปิเปตดูดสาร Triton X-100 มาอย่างละ 0.28, 0.47 และ 0.66 มิลลิลิตร ตามลำดับ แล้วให้น้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสาร Triton X-100 แต่ละความเข้มข้น (0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 7% w/w ปริมาณ 1 กิโลกรัม แล้วนำลงในภาชนะบรรจุขนาด 1 ลิตร พร้อมปิดฝา ซึ่งแต่ละชุดจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ เป็นระยะเวลา 28 วัน และทำการเก็บตัวอย่างทุกสัปดาห์ตลอดระยะเวลาการทดลอง คือ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยรายละเอียดแต่ละชุดการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 1 (ชุดที่ 1)

5. การศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

เตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น 7% w/w ปริมาณ 1 กิโลกรัม นำมาเติมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ความเข้มข้น 0.50% w/v (ผลการลดลงของสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดจากข้อ 4) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาผสมกับปุ๋ยมูลวัวด้วยอัตราส่วน (ดิน : ปุ๋ยมูลวัว) แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1:0.3, 1:0.5 และ 1:0.7 ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะใช้ดิน 1 กิโลกรัม และเติมปุ๋ยมูลวัว 300, 500 และ 700 กรัม ตามลำดับ โดยมีการเติมน้ำกลั่นเพื่อควบคุมความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ร้อยละ 40 แล้วนำลงในภาชนะบรรจุขนาด 1 ลิตร พร้อมปิดฝา ซึ่งแต่ละชุดจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ เป็นระยะเวลา 28 วัน และทำการเก็บตัวอย่างทุกสัปดาห์ตลอดระยะเวลาการทดลอง คือ 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยรายละเอียดแต่ละชุดการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 1 (ชุดที่ 2)



Table 1 Experimental treatments and acronyms

	Experimental treatments	Acronyms
Exp.No.1		
	1.1 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + water (Control)	CT1
	1.2 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.3% w/v)	T-TX1
	1.3 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.5% w/v)	T-TX2
	1.4 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.7% w/v)	T-TX3
Exp.No.2		
	2.1 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.5% w/v) (Control)	CT2
	2.2 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.5% w/v) + cow manure (300 g)	T-CM1
	2.3 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.5% w/v) + cow manure (500 g)	T-CM2
	2.4 Soil 1 kg + Oil 7% w/w + Triton X-100 (0.5% w/v) + cow manure (700 g)	T-CM3

6. การหาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นในดิน

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (Total petroleum hydrocarbons; TPHs) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น โดยวิธี Soxhlet extraction และ gravimetric (Mishra *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2018) ซึ่งในการหาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนในดิน จะประเมินได้จากการลดลงของสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\% \text{TPHs Removal} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

โดย $\% \text{TPHs Removal}$ = ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน (ร้อยละ)

W_1 = น้ำหนักของน้ำมันในดินเริ่มต้นการทดลอง (กรัม/กิโลกรัมดินแห้ง)

W_2 = น้ำหนักของน้ำมันในดินหลังการทดลอง (กรัม/กิโลกรัมดินแห้ง)

7. การหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon utilizing bacteria; HUB)

ในการหาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HUB) จะใช้วิธี bacterial count method (Fashina, Adesanwo, and Adebisi, 2016) โดยการนำตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองปริมาณ 10 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว 90 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วทำการเจือจางตัวอย่างแบบอนุกรม (ten fold dilution) ทำการดูดตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ของเซลล์จุลินทรีย์ในรูปแขวนลอยที่ระดับความเจือจางที่เหมาะสม ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Mineral Salt Medium (MSM) Agar ที่ผสมน้ำมันหล่อลื่น 1% (v/v) โดยผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน หรือจนสังเกตเห็นโคโลนีชัดเจน จากนั้นนับโคโลนีและคำนวณปริมาณจุลินทรีย์ในหน่วย logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง โดยปริมาณจุลินทรีย์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{จำนวนโคโลนี/กรัมดินแห้ง} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีต่อจานเลี้ยงเชื้อ (เฉลี่ย)} \times \text{dilution factor}}{\text{น้ำหนักดินแห้ง}} \quad (2)$$

8. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 และปุ๋ยมูลวัวเพื่อกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมัน โดยใช้ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ($P = 0.01$) โดยใช้วิธีของ Tukey's (Honestly Significant Difference) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คือ Minitab (Version 18)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวอย่างก่อนการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวอย่างก่อนการทดลอง จะทำการเก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมัน ดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมัน ดินสังเคราะห์ และปุ๋ยมูลวัว เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่าความชื้นในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นและปุ๋ยมูลวัวมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ร้อยละ 14.06±0.44 และ 14.06±0.18 ตามลำดับ ในส่วนของดินไม่ปนเปื้อนและดินสังเคราะห์มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 0.45±0.02 และ 0.03±0.01 ตามลำดับ ค่าของแข็งทั้งหมดในดินสังเคราะห์และดินไม่ปนเปื้อนมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ที่ร้อยละ 99.97±0.56 และ 99.55±0.87 ตามลำดับ ถัดมาคือดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นและปุ๋ยมูลวัวมีค่าอยู่ที่ 85.94±0.78 และ 85.94±0.75 ตามลำดับ ค่า pH ในดินทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 6.26 – 6.48 ส่วนปุ๋ยมูลวัวมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 9.26±0.62 ปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นและในดินสังเคราะห์มีปริมาณอยู่ที่ 76,420±1,430 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 7.64 (w/w) และ 76,630±1,120 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 7.66 (w/w) ตามลำดับ จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) ในดินปนเปื้อนน้ำมันและดินสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4.90 – 4.95 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ซึ่งพบว่าในดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมัน จะมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 2.48±0.46 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง และปุ๋ยมูลวัว



มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 5.75 ± 0.67 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ปริมาณคาร์บอน พบว่าในปุ๋ยมูลวัวมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 31.25 ± 2.23 ซึ่งในดินทั้ง 3 ชนิด พบว่าดินปนเปื้อนน้ำมันและดินสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ร้อยละ 2.79 ± 0.78 และ 2.87 ± 0.03 ตามลำดับ และดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 1.06 ± 0.65 ปริมาณไนโตรเจน พบว่าในปุ๋ยมูลวัวมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 1.48 ± 0.37 ส่วนดินทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.14 - 0.15$ สำหรับลักษณะเนื้อดินของดินปนเปื้อนน้ำมันและดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy loam) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น Sand (ทราย), Silt (ดินทรายแป้ง) และ Clay (ดินเหนียว) เท่ากับ ร้อยละ 57.39 ± 0.13 , 26.04 ± 0.33 และ 16.57 ± 0.66 ในดินปนเปื้อนน้ำมัน และร้อยละ 50.96 ± 0.24 , 16.66 ± 0.52 และ 12.38 ± 0.47 ในดินที่ไม่ปนเปื้อน ตามลำดับ

Table 2 The physicochemical properties of soil and cow manure

Parameter	Contaminated soil	Uncontaminated soil	Synthetic contaminated soil	Cow manure
Moisture content (%)	14.06 ± 0.44	0.45 ± 0.02	0.03 ± 0.01	14.06 ± 0.18
Total solid (%)	85.94 ± 0.78	99.55 ± 0.87	99.97 ± 0.56	85.94 ± 0.75
pH	6.48 ± 0.20	6.26 ± 0.15	6.27 ± 0.45	9.26 ± 0.62
TPHs ⁽¹⁾ (mg kg ⁻¹ of dry weight)	$76,420 \pm 1,430$	N/A	$76,630 \pm 1,120$	N/A
HUB ⁽²⁾ (logCFU kg ⁻¹ of dry weight)	4.90 ± 0.23	2.48 ± 0.46	4.95 ± 0.42	5.75 ± 0.67
Total carbon (%)	2.79 ± 0.78	1.06 ± 0.65	2.87 ± 0.03	31.25 ± 2.23
Total nitrogen (%)	0.15 ± 0.04	0.14 ± 0.07	0.15 ± 0.02	1.48 ± 0.37
Soil texture	Sandy loam	Sandy loam	N/A	N/A
- sand (%)	57.39 ± 0.13	50.96 ± 0.24	N/A	N/A
- silt (%)	26.04 ± 0.33	16.66 ± 0.52	N/A	N/A
- clay (%)	16.57 ± 0.66	12.38 ± 0.47	N/A	N/A

⁽¹⁾Total petroleum hydrocarbons

⁽²⁾Hydrocarbon utilizing bacteria

N/A = not available

2. ผลการศึกษาปริมาณของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs)

จากการศึกษาความเหมาะสมของปริมาณสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งใช้ความเข้มข้นอยู่ที่ 0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v ตามลำดับ เมื่อทดสอบหาปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ที่เหลืออยู่ในดินปนเปื้อนน้ำมัน พบว่าในตัวอย่างดินแต่ละชุดการทดลอง (T-TX1, T-TX2 และ T-TX3) ในวันเริ่มต้นการทดลอง (วันที่ 0) มีค่าเท่ากับ $7,5870 \pm 190$, $7,6130 \pm 140$ และ $7,6240 \pm 130$ มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ดินแห้ง ตามลำดับ จากนั้นในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว (CT1) แสดงดังภาพที่ 3 (A) ซึ่งในทางกลับกันประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างดินทุกชุดการทดลอง (T-TX1, T-TX2 และ T-TX3) แสดงในภาพที่ 3 (B) ซึ่งผลของปริมาณสาร TPHs ที่เหลืออยู่และประสิทธิภาพการกำจัดสาร TPHs แต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.01$) โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ความเข้มข้น 0.5% w/v (T-TX2) มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสาร TPHs มากที่สุด มีค่าอยู่ที่ $26,700 \pm 290$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง และมีประสิทธิภาพการกำจัดสาร TPHs ร้อยละ 65.08 ± 0.38 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28)

2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HUB)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HUB) ในชุดการทดลองที่ใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น พบว่าในตัวอย่างดินแต่ละชุดการทดลอง (T-TX1, T-TX2 และ T-TX3) ในวันเริ่มต้นการทดลอง (วันที่ 0) มีค่าเท่ากับ 5.21 ± 0.23 , 5.77 ± 0.18 และ 5.50 ± 0.10 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ซึ่งในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4 (A) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.24 - 5.55, 5.35 - 5.62 และ 5.42 - 5.57 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ HUB แต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.01$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว (CT1) จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในวันที่ 7 มีค่าอยู่ที่ 7.13 ± 0.08 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง จากนั้นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14, 21 และ 28) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.40 - 6.64 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง

3. ผลการศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่ใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

3.1 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs)

จากการศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่ใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้อัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว อยู่ที่ 1:0.3, 1:0.5 และ 1:0.7 ตามลำดับ เมื่อทดสอบหาปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ที่เหลืออยู่ในดินปนเปื้อนน้ำมัน พบว่าในตัวอย่างดินทุกชุดการทดลอง (T-CM1, T-CM2 และ T-CM3) ในวันเริ่มต้นการทดลอง (วันที่ 0) มีค่าเท่ากับ $76,780 \pm 240$, $77,870 \pm 550$ และ $77,440 \pm 580$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ จากนั้นในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3 (C) ซึ่งในทางกลับกันประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างดินทุกชุดการทดลอง (T-CM1, T-CM2 และ T-CM3) แสดงในภาพที่ 3 (D) ซึ่งผลของปริมาณสาร TPHs ที่เหลืออยู่และประสิทธิภาพการกำจัดสาร TPHs แต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.01$) โดยพบว่าในชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว ที่ 1:0.5 (T-CM2) มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสาร TPHs มากที่สุด มีค่าอยู่ที่ $21,870 \pm 300$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง และมีประสิทธิภาพการกำจัดสาร TPHs ร้อยละ 72.12 ± 0.38 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28)

3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HUB)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HUB) ในชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยมูลวัวร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (Triton X-100) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น พบว่าในตัวอย่างดินแต่ละชุดการทดลอง (T-CM1, T-CM2 และ T-CM3) ในวันเริ่มต้นการทดลอง (วันที่ 0) มีค่าเท่ากับ 5.13 ± 0.11 , 5.24 ± 0.18 และ 5.19 ± 0.18 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ซึ่งในวันที่ 7 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกชุดการทดลอง มีค่าอยู่ที่ 7.29 ± 0.21 , 8.30 ± 0.13 และ 7.26 ± 0.28 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ จากนั้นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 14, 21 และ 28) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.46 – 7.66, 8.39 – 8.56 และ 7.43 – 7.59 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4 (B) แสดงให้เห็นว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ HUB แต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.01$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินในชุดทดลองที่มีอัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว อยู่ที่ 1:0.5 (T-CM2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมปุ๋ยมูลวัว (CT2) จะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.26 – 5.44 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง

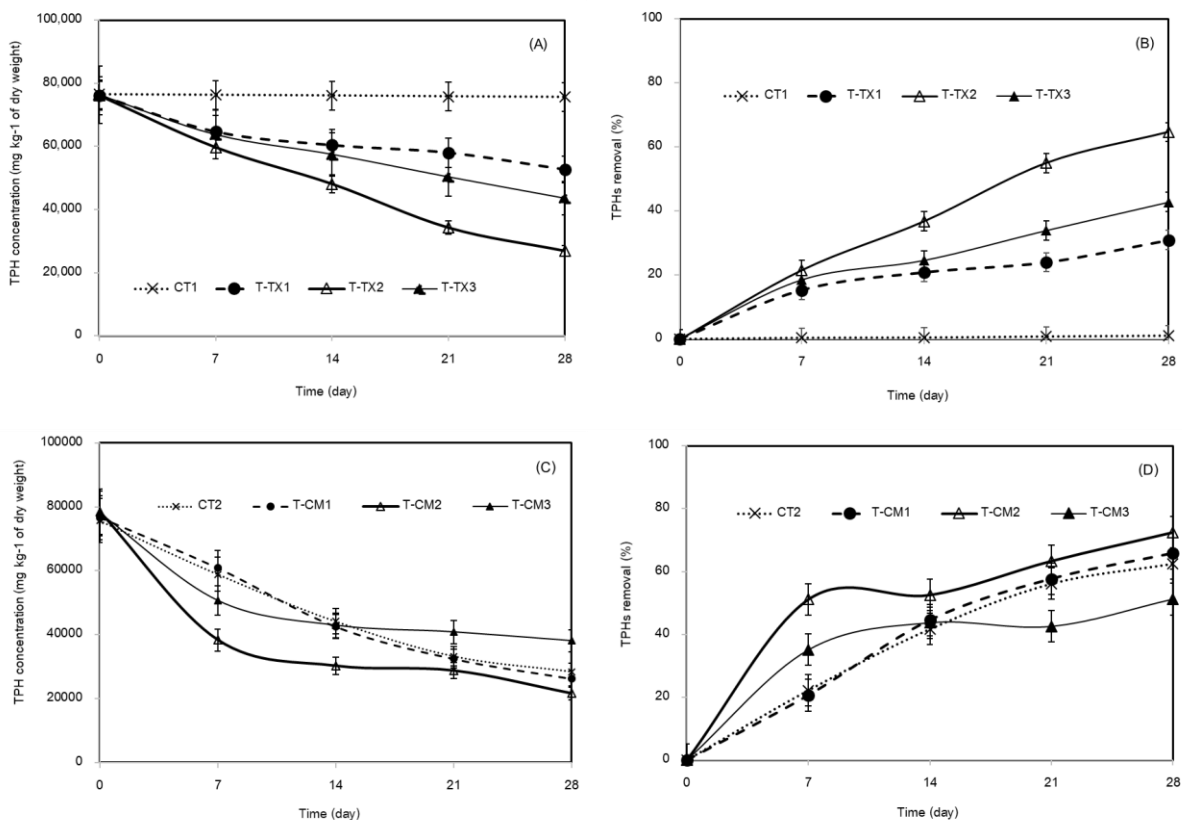


Figure 3 Changes in TPH concentration during the bioremediation period in (A) TPH concentration of Exp.No.1 (B) ; Removal TPHs of Exp.No.1 (C) TPH concentration of Exp.No.2 and (D) Removal TPHs of Exp.No.2. (Error bars, SD = 3)

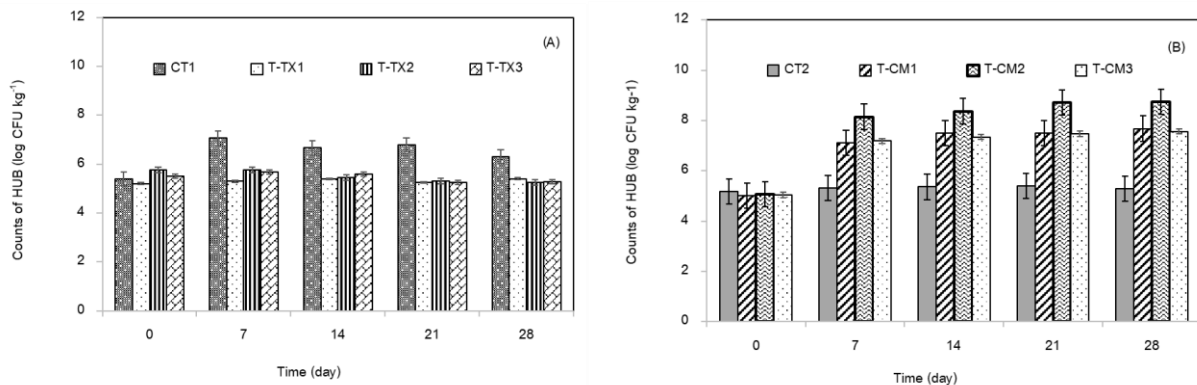


Figure 4 Effect of soil contaminated with hydrocarbons on hydrocarbon utilizing bacteria (HUB) count in (A) HUB counts in Exp.No.1 and (B) HUB counts in Exp.No.2. (Error bars, SD = 3)

วิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวอย่างก่อนการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวอย่างก่อนการทดลอง พบว่าในตัวอย่างดินปนเปื้อนน้ำมันที่เก็บจากพื้นที่จริง มีปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) อยู่ที่ $76,420 \pm 1,430$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 7.64 (w/w) ดังนั้นจึงนำผลที่ได้มาเป็นข้อมูลอ้างอิงปริมาณน้ำมันเริ่มต้นในการเตรียมตัวอย่างดินสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง โดยการเก็บตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันมาเตรียมในห้องปฏิบัติการ จากนั้นเติมน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วลงไป ในดินเพื่อให้ได้ความเข้มข้นปริมาณ 7% w/w ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ในดินสังเคราะห์ พบว่ามีค่าอยู่ที่ $76,630 \pm 1,120$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 7.66 w/w สอดคล้องกับรายงานของ Naowasarn and Leungprasert, (2016) ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วอยู่ในช่วง 5 – 20% w/w เพื่อทำการฟื้นฟูดินปนเปื้อนน้ำมัน โดยใช้ปุ๋ยมูลไก่เป็นวัสดุร่วมในการทำปุ๋ยหมักซึ่งพบว่าความเข้มข้นน้ำมันที่ 5% w/w มีประสิทธิภาพดีที่สุด และรายงานของ Bodor *et al.*, (2020) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาร inorganic nutrients และเชื้อจุลินทรีย์ ในการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในดินที่มีความเข้มข้นน้ำมันประมาณ 5,000 กรัม/กิโลกรัม ในส่วนของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงกิจกรรมการย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในดิน จากการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) ในดินทั้ง 3 ชนิด พบว่าดินปนเปื้อนน้ำมันและดินสังเคราะห์ซึ่งมีน้ำมันหล่อลื่นเป็นองค์ประกอบหลักจะมีปริมาณจุลินทรีย์มากกว่าดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 4.90 ± 0.23 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง และ 4.95 ± 0.42 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้ในดินที่ไม่ปนเปื้อนน้ำมันมีค่าอยู่ที่ 2.48 ± 0.46 logCFU/กิโลกรัมดินแห้ง เนื่องจากในดินปนเปื้อนน้ำมันและดินสังเคราะห์มีน้ำมันหล่อลื่นเป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับให้จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณคาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมันและดินสังเคราะห์ พบว่ามีปริมาณคาร์บอน

มากกว่าดินที่ไม่ปนเปื้อน โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 2.79 ± 0.78 , 2.87 ± 0.03 และ 1.06 ± 0.65 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) และปริมาณคาร์บอนในปุ๋ยมูลวัวมีค่ามากกว่าดินทั้ง 3 ชนิด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Naowasarn and Leungprasert, (2019) รายงานไว้ในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) และคาร์บอนมากกว่าในดินที่ไม่ปนเปื้อน นอกจากนี้ยังพบว่า ในปุ๋ยมูลไก่มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอน (HUB) และคาร์บอนมากกว่าในดินทั้ง 2 ชนิดเช่นกัน

2. ผลการศึกษาปริมาณของสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

ในชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ระดับความเข้มข้น 0.3% w/v, 0.5% w/v และ 0.7% w/v ซึ่งมีสัญลักษณ์แต่ละชุดการทดลอง คือ T-TX1, T-TX2 และ T-TX3 ตามลำดับ พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.5% w/v (T-TX2) มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มากที่สุด มีค่าอยู่ที่ $26,700 \pm 2,900$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ร้อยละ 65.08 ± 0.38 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Minoui and Minai-Tehrani, (2009) ซึ่งได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดิบ (crude oil) และสาร PAHs ในดิน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 – 0.25% พบว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ 0.025% มีการลดลงของสารทั้ง 2 ชนิดมากที่สุด หลังจากสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 4 เดือน ในส่วนของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน (HUB) พบว่าในตัวอย่างดินทุกชุดการทดลอง (T-TX1, T-TX2 และ T-TX3) ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง อาจเนื่องมาจากสภาวะในตัวอย่างดินไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น ปริมาณอากาศ ความชื้น ธาตุอาหาร (N และ P) เป็นต้น ดังงานวิจัยของ Alvim and Pontes, (2018) ได้ทำการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันดีเซล พบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมอากาศมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่มีการเติมอากาศมีผลทำให้จุลินทรีย์มีการเพิ่มจำนวนมากขึ้น รวมถึงงานวิจัยของ Nwogu *et al.* (2015) ได้นำมูลแพะมาช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับดินที่ปนเปื้อนสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน พบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมมูลแพะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร TPHs และมีการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าชุดที่ไม่มีการเติม บ่งบอกได้ว่าปริมาณธาตุอาหารมีความจำเป็นในการช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในดิน อย่างไรก็ตามในส่วนของชุดควบคุม (CT1) ซึ่งไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 จะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ในวันที่ 7 และคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสาร Triton X-100 อาจมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้ คล้ายกับงานวิจัยของ Liu *et al.*, (2021) ได้ทำการศึกษผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวในการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน พบว่าเมื่อเติมสาร SDBS ในดิน จะไปทำการยับยั้งการแพร่กระจายของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับความเข้มข้นสูงๆ อาจทำให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

3. ผลการศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่ใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น

ในชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราส่วนของปุ๋ยมูลวัวที่ใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้อัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว อยู่ที่ 1:0.3, 1:0.5 และ 1:0.7 ซึ่งมีสัญลักษณ์แต่ละชุดการทดลอง คือ T-CM1, T-CM2 และ T-CM3 ตามลำดับ พบว่าในชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วน ดิน : ปุ๋ยมูลวัว ที่ 1:0.5 (T-CM2) มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มากที่สุด มีค่าอยู่ที่ $21,870 \pm 300$ มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ร้อยละ 72.12 ± 0.38 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28) แสดงให้เห็นว่าการนำปุ๋ยมูลวัวมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 มีประสิทธิภาพการกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) เพิ่มขึ้นมากกว่าชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งเติมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปุ๋ยมูลวัวเป็นการเพิ่มธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน มีผลทำให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตและช่วยย่อยสลาย สารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ในดินได้ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน (HUB) โดยพบว่าทุกชุดการทดลอง (T-CM1, T-CM2 และ T-CM3) ที่เติมปุ๋ยมูลวัวมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าชุดการทดลองที่เติมสารลดแรงตึงผิว (Triton X-100) เพียงอย่างเดียวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ogbeh, Tsokar, and Salifu, (2018) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของปริมาณธาตุอาหารเพื่อกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) โดยการเติมมูลวัว มูลสัตว์ปีก และปุ๋ย NPK พบว่าสามารถกำจัดสาร TPHs ได้มากกว่า 60% โดยมีปริมาณการเติมธาตุอาหารแต่ละชนิดอยู่ที่ 125 กรัม, 100 กรัม และ 10.5 กรัม ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

การกำจัดสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) ที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% w/v มีประสิทธิภาพการกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) มากที่สุด และเมื่อนำปุ๋ยมูลวัวมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่อัตราส่วน 1:0.5 (ดิน : ปุ๋ยมูลวัว) มีประสิทธิภาพการกำจัดสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPHs) เพิ่มสูงขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28) นอกจากนี้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายไฮโดรคาร์บอน (HUB) สามารถใช้สาร TPHs ที่อยู่ในดินเป็นแหล่งคาร์บอน รวมทั้งได้รับธาตุอาหาร (ไนโตรเจน) จากปุ๋ยมูลวัว เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสามารถย่อยสลายสาร TPHs ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 และการใช้ปุ๋ยมูลวัวร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 สามารถลดปริมาณสาร TPHs ในดินปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่แช่แล้วได้



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการคณะกรรมการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณรายได้คณะกรรมการวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2561 ประเภทอาจารย์และบุคลากรสายสนับสนุน (เลขที่สัญญา 002/2561) เพื่อสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Alvim, G. M., and Pontes, P. P. (2018). Aeration and sawdust application effects as structural material in the bioremediation of clayey acid soils contaminated with diesel oil. *International Soil and Water Conservation Research*, 6 (3), 253-260.
- Bodor, A., Petrovszki, P., Erdeiné Kis, Á., Vincze, G. E., Laczi, K., Bounedjoum, N., Szilágyi, Á., Szalontai, B., Feigl, G., Kovács, K. L., Rákhely, G., and Perei, K. (2020). Intensification of ex situ bioremediation of soils polluted with used lubricant oils: A comparison of biostimulation and bioaugmentation with a special focus on the type and size of the inoculum. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (11), 1-17.
- Chong, Z.-Y., Xiao-Yong, L., Xiu-Lan, Y., Lu, S., Dan, Z., and Liang, T. (2014). Enhanced desorption of PAHs from manufactured gas plant soils using different types of surfactants. *Pedosphere*, 24 (2), 209-219.
- Das, G., Revathy, M. S., Angajala, G., and Sundaravel, B. (2019). Treatability of a used Lube Oil from Contaminated Soil. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8 (4S2), 467-471.
- Farrow, T., Ketebu, O., and Eterigho, E. (2017). The effect of surfactant concentration on crude oil removal from contaminated soil. *Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2 (2), 487-493.
- Fashina, T., Adesanwo, O., and Adebiji, F. (2016). Influence of humic acid on biodegradation of petroleum hydrocarbons in oil-contaminated soils. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38 (17), 2624-2632.



- Li, X., Wu, B., Zhang, Q., Liu, Y., Wang, J., Xu, D., Li, F., Ma, F., and Gu, Q. (2020). Effects of soil properties on the remediation of diesel-contaminated soil by Triton X-100-aided washing. *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (18), 23323-23330.
- Liu, J., Xu, L., Zhu, F., and Jia, S. (2021). Effects of surfactants on the remediation of petroleum contaminated soil and surface hydrophobicity of petroleum hydrocarbon degrading flora. *Environmental Engineering Research*, 26 (5), 200384-200390.
- Minoui, S., and Minai-Tehrani, D. (2009). Effect of Triton X-100 on bioremediation of PAHs of medium crude oil in soil. *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability*, 3 (2), 79-83.
- Mishra, S., Jyot, J., Kuhad, R. C., and Lal, B. (2001). In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium. *Current Microbiology*, 43 (5), 328-335.
- Mulligan, C. N. (2005). Environmental applications for biosurfactants. *Environ Pollut*, 133 (2), 183-98.
- Naowasarn, S., and Leungprasert, S. (2016). Bioremediation of Oil-contaminated Soil Using Chicken Manure. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 25 (7), 739-756.
- Naowasarn, S., and Leungprasert, S. (2019). Abundance and diversity of hydrocarbon utilizing bacteria in the oil-contaminated soils throughout a remedial scheme using compost amendment. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 41 (1), 12-20.
- Nwogu, T. P., Azubuike, C. C., and Ogugbue, C. J. (2015). Enhanced Bioremediation of Soil Artificially Contaminated with Petroleum Hydrocarbons after Amendment with *Capra aegagrus hircus* (Goat) Manure. *Biotechnology Research International*, 2015 (-), 1-7.
- Ogbeh, G. O., Tsokar, T. O., and Salifu, E. (2018). Optimization of nutrients requirements for bioremediation of spent-engine oil contaminated soils. *Environmental Engineering Research*, 24 (3), 484-494.



- Peng, S., Wu, W., and Chen, J. (2011). Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness. *Chemosphere*, 82 (8), 1173-1177.
- Rosen, M. J., and Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and interfacial phenomena*. John Wiley & Sons.
- Selberg, A., Juuram, K., Budashova, J., and Tenno, T. (2013). Biodegradation and leaching of surfactants during surfactant-amended bioremediation of oil-polluted soil. *Applied Bioremediation-Active and Passive Approaches*, 123-147.
- Tarabukin, D. V. (2020). Assessment of the lowland bog biomass for ex situ remediation of petroleum-contaminated soils. *Environments*, 7 (10), 86.
- Ubani, O., and Atagana, H. (2018). Measuring the effect of co-composting Crude Oil sludge with pig, cow, horse and poultry manures on the degradation of selected Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Archives of Environmental Protection*, 44 (1), 77-86.
- Wang, Y., Liang, J., Wang, J., and Gao, S. (2018). Combining stable carbon isotope analysis and petroleum-fingerprinting to evaluate petroleum contamination in the Yanchang oilfield located on loess plateau in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (3), 2830-2841.
- Wu, H., Lai, C., Zeng, G., Liang, J., Chen, J., Xu, J., Dai, J., Li, X., Liu, J., and Chen, M. (2017). The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37 (6), 754-764.
- Ying, G.-G. (2006). Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment International*, 32 (3), 417-431.
- Yu, W., Sang, Y., He, L., and Zhu, L. (2022). Remediation performance and charring behaviors in sustainable thermal desorption of lube oil-contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (1), 121-130.