

อภินันทนาการ



ศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน
ในดินและน้ำใต้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
Natural Attenuation Potential of 1,2-Dichloroethane
in Soil and Groundwater from Map Ta Phut Industrial Estate

นางสาวนฤมล ตั้งใจ
นางสาวนลิตา ศรีอักษร

รหัส 54361749 มหาวิทยาลัยนเรศวร
รหัส 54361756 11 ต.ค. 2560
เลขทะเบียน 1-7195849
เลขเรียกหนังสือ 45

น.ร.ค.
2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนในดิน
และน้ำใต้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวนฤมล ตั้งใจ รหัส 54361749
นางสาวนลิตา ศรีอักษร รหัส 54361756

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

Janaphon Penrit
.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)

อำนาจ เตโชวานิชย์
.....กรรมการ
(อาจารย์ อำพล เตโชวานิชย์)

วิลาวลัย คณิตชัยเดชา
.....กรรมการ
(ดร. วิลาวลัย คณิตชัยเดชา)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนในดินและน้ำใต้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวนฤมล ตั้งใจ รหัส 54361749 นางสาวนลิตา ศรีอักษร รหัส 54361756
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนในดินและน้ำใต้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด โดยใช้ตัวแทนของดินตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง คือ D3-17m D4-4m D4-11m D11-14m และ D19-15m โดยทำแบบจำลองการทดลอง 2 ส่วนคือ การศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดและการศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยธรรมชาติบำบัดโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น โดยในการศึกษาศักยภาพในโดยวิธีธรรมชาติบำบัดนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทดลองโดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพและการทดลองโดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเคมี การทดลองทั้งสองนี้จะทดลองที่ความเข้มข้น 100 mg/L และ 2000 mg/L ในขณะที่การศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยธรรมชาติบำบัดโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น จะทำการกระตุ้นด้วย EHC 10 g/L และ KNO_3 505 mg/L ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L โดยการทดลองทั้งหมดจะอยู่ภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศ เพื่อประเมินศักยภาพของธรรมชาติบำบัดของดินและน้ำใต้ดินจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบว่าการสลายโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศสามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้เพียง 8.65% กระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศสามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 13.34% การฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นแบบการกระตุ้นด้วย EHCTM สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 74% และการกระตุ้นด้วย NO_3 สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 77%

ดังนั้นการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีทางธรรมชาติบำบัดที่อาศัยกระบวนการทางชีวภาพ ถึง 5.84 เท่า โดยการกระตุ้นด้วย NO_3 มีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามด้วยการกระตุ้นด้วย EHCTM กระบวนการทางกายภาพเคมี แบบไร้อากาศ และกระบวนการทางชีวภาพ แบบกระบวนการทางชีวภาพ แบบไร้อากาศตามลำดับ

Project title Natural Attenuation Potential of 1,2-Dichloroethane in Soil and Groundwater from Map Ta Phut Industrial Estate

Name Miss. Naruemon Tangjai ID. 54361749
 Miss. Nalita Sriaksorn ID. 54361756

Project advisor Dr. Tanapon Phenrat

Major Environmental Engineering

Department Civil Engineering

Academic year 2014

.....

Abstract

This research evaluated natural attenuation of 1, 2-dichloroethane (1,2-DCA) in soil and groundwater from a contaminated site in Map Ta Phut Industrial Estate. Five representative soil and groundwater samples included D3-17m, D4-4m, D4-11m, D11-14m and D19-15m. This experiment involved 2 parts, natural attenuation potential of 1, 2- DCA by biodegradation and abiotic degradation as well as natural attenuation potential of 1, 2- DCA enhanced by EHC and NO₃ as an amendment. Natural attenuation was stimulated by 10 g/L of EHC and 505 mg/L of NO₃. All of the experiments were under anaerobic condition. The efficiency of 1, 2-DCA degradation by intrinsically biotic process was 8.65% while the efficiency of intrinsically abiotic process was 13.34%. Interestingly, the efficiency of enhanced biodegradation by EHC and NO₃ were 74% and 77%, respectively.

Thus, Natural attenuation Potential of 1, 2- DCA by enhanced biodegradation is more efficiency than natural attenuation potential of 1, 2- DCA by intrinsic biodegradation as much as 5.84.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างดีจาก ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ การให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์อำพล เตโชวานิชย์ และดร. วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา รวมถึงอาจารย์ทุกท่านให้คำปรึกษาและให้ข้อมูลความรู้และข้อเสนอแนะต่างๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับการประสานงานและคำแนะนำในการดำเนินโครงการที่ติดตลอดระยะเวลาในการทำปริญญาวิทยานิพนธ์

ขอบคุณห้องปฏิบัติการอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือตอนล่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร คณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นางสาวนฤมล ตั้งใจ
นางสาวนลิตา ศรีอักษร
พฤษภาคม 2558

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 มลพิษทางดิน (Soil Pollution).....	5
2.2 สาเหตุของการปนเปื้อนสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนในสิ่งแวดล้อม.....	7
2.3 สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane).....	9
2.4 เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน.....	11
2.5 การบำบัดโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Attenuation).....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	15
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	15
3.2 ลักษณะและองค์ประกอบของดินที่นำมาทำการวิจัย.....	17
3.3 กระบวนการเตรียมสารละลายมาตรฐาน.....	22
3.4 ขั้นตอนการเตรียมดินที่นำมาทำการวิจัย.....	22
3.5 การศึกษาสัณญาณภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน.....	24
3.6 วิธีการวัดค่าเพื่อหาปริมาณสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	30
4.1 Calibration Curve ของสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน.....	30
4.2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (K_d).....	31
4.3 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศ.....	32
4.4 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศ.....	34
4.5 การศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศ.....	36
4.6 การเปรียบเทียบข้อมูลจากสมการ Exponential Decay.....	38
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 บทสรุป.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical properties).....	10
3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียในตัวอย่างดิน.....	19
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (K_d).....	31
4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า R	39
4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_L	40
4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_0	41
4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า k	42



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
3.1 Resazurin Sodium salt.....	16
3.2 สารละลายรีซาซูริน0.0056%.....	16
3.3 ลักษณะของดินที่นำมาทำการวิจัย.....	17
3.4 ขั้นตอนการเตรียมดินที่นำมาทำการวิจัย.....	23
3.5 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบ ไร้อากาศ.....	24
3.6 การทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน.....	25
3.7 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ.....	26
3.8 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHC™.....	27
3.9 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้KNO ₃	28
3.10 ขั้นตอนการเก็บแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยเครื่องโทมาโทกราฟี.....	29
4.1 Calibration Curve.....	30
4.2 แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินของแต่ละตัวอย่าง (%).....	31
4.3 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L.....	32
4.4 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L.....	33
4.5 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L.....	34
4.6 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L.....	35
4.7 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHC™ ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L.....	36
4.8 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ NO ₃	37

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.9 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2 DCA ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L.....	43
4.10 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2 DCA ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2000 mg/L.....	44
4.11 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2 DCA.....	45
4.12 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น 100 mg/L.....	47
4.13 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L.....	48
4.14 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา.....	49



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

1,2-DCA	=	ไดคลอโรอีเทน
GC	=	Gas Chromatography
ml.	=	มิลลิลิตร
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
g/L	=	กรัมต่อลิตร



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันประเทศต่างๆทั่วโลกกำลังประสบปัญหาวิกฤตการณ์จากภาวะมลพิษในสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนและการสะสมของสารเคมีและของเสียอันตราย ซึ่งปัญหาเหล่านี้ล้วนเกิดจากการผลิตและการใช้สารเคมีในปริมาณมากในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การบริโภค และการประกอบกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ ประกอบกับการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ซึ่งทำให้สารพิษรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดอุบัติเหตุท่อส่งน้ำมันรั่วในทะเลอ่าวไทย(พ.ศ.2556) เป็นต้น การฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติที่ปนเปื้อนเหล่านี้ให้กลับมาคืนสภาพดั้งเดิมมีสามารทำได้มากกว่า 60 วิธี ซึ่งมีตั้งแต่วิธีแบบดั้งเดิมที่ใช้มานาน (Conventional technology) เช่นการสูบน้ำใต้ดินปนเปื้อนขึ้นมาบำบัด (Pump-and-treat) จนถึงเทคโนโลยีขั้นสูงสมัยใหม่ (Novel technology) เช่นการใช้วัสดุนาโนที่ทำปฏิกิริยาสลายสารปนเปื้อนได้แบบในที่ (In situ treatment) อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีที่สำคัญมากที่สุดอันหนึ่งในทางปฏิบัติคือการบำบัดโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Attenuation)

การบำบัดตามธรรมชาติ หมายถึง การใช้กระบวนการทางธรรมชาติในการควบคุมการแพร่กระจาย ลดความเข้มข้น และปริมาณของสารเคมีอันตรายในพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อปกป้องสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อน (EPA, 1999) โดยการบำบัดแบบตามธรรมชาตินี้ต้องสำเร็จลุล่วงในระยะเวลาที่สมเหตุสมผล คือไม่นานจนเกินไป และไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในระดับที่ยอมรับไม่ได้จากการเลือกทำการบำบัดโดยวิธีนี้ การบำบัดตามธรรมชาติมิได้ใช้กระบวนการทางวิศวกรรมอื่นช่วยนอกจากการติดตามผลโดยบ่อเฝ้าระวังและการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวัด

สาร 1, 2 DCA จัดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน ทั้งยังสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สาร 1, 2 DCA เป็นสารตั้งต้นในการผลิต vinyl chloride เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ polyvinylchloride หรือ PVC เช่น ท่อประปา วัสดุก่อสร้าง ฉนวนและบรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ ทัมเบาะรถยนต์ เครื่องใช้ภายในบ้าน และชิ้นส่วนรถยนต์ รวมทั้งเป็นสารที่ใช้เป็นตัวทำละลายและเติมในน้ำมันที่มีสารตะกั่วเพื่อกำจัดสารตะกั่ว การนำสาร 1, 2 DCA มาใช้ในกระบวนการผลิตนั้น ก่อให้เกิดการตกค้างในดินบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว ทำให้ดินในบริเวณเหล่านั้นมีการปนเปื้อนสาร 1, 2 DCA ซึ่งการปนเปื้อนนี้สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ดินมีการปนเปื้อนเป็นบริเวณกว้าง ทั้งยังทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน การที่จะบำบัดสารที่ตกค้างในดินนั้น มักมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง ซึ่งการบำบัดด้วย

วิธีธรรมชาติจะมีภาระค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีธรรมชาติบำบัดมาใช้ในการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2DCA เพื่อเป็นแนวทางในการใช้พื้นที่ปนเปื้อนจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยธรรมชาติบำบัด
- 1.2.2 เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ
- 1.2.3 เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้รับความรู้เรื่องวิธีการบำบัดทางธรรมชาติ
- 1.3.2 ได้รับความรู้เรื่องสาร 1, 2 DCA ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย
- 1.3.3 ได้ทำการทดลองกระบวนการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยกระบวนการธรรมชาติบำบัด
- 1.3.4 ได้ประเมินกระบวนการทางธรรมชาติบำบัดที่ดีที่สุดในการสลายสาร 1, 2 DCA ในดิน เพื่อเป็นแนวทางในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจริงต่อไป

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

เป็นโครงการประเมินศักยภาพของวิธีการธรรมชาติบำบัดที่ใช้ในการสลายสาร 1, 2 DCA ที่ตกค้างในดิน เพื่อแสวงหากระบวนการบำบัดทางธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสลายสาร 1, 2 DCA ซึ่งกระบวนการดังกล่าวได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพเคมี กระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้นด้วย EHC และกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้นด้วย NO_3

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1. ค่าถ่ายเอกสาร	500	บาท
2. ค่าปริ๊นเล่ม	500	บาท
3. ค่าเช่าเล่มวิทยานิพนธ์	1,000	บาท
รวมค่าใช้จ่าย	2,000	บาท (สองพันบาทถ้วน)



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 มลพิษทางดิน (Soil Pollution)

ทรัพยากรดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่สามารถทำให้เพิ่มขึ้นมาได้แต่ลักษณะของดินเองก็มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและจะเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นเมื่อถูกรบกวนซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปในสภาพที่ดีขึ้นหรือคงลักษณะคงเดิมเมื่อถูกใช้อย่างถูกต้อง แต่เมื่อใดที่มีการใช้อย่างไม่ถูกวิธี ทรัพยากรดินจะเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เสื่อมโทรมลงทันทีและเมื่อได้เปลี่ยนแปลงไปจนถึงระดับหนึ่งแล้ว การที่จะแก้ไขให้กลับสู่สภาพเดิมจะทำได้ยากมาก(ณรงค์ ฅ เชียงใหม่,มลพิษสิ่งแวดล้อม ,(2525),น.125.) ฉะนั้นการศึกษาเพื่อหาทางใช้ทรัพยากรดินอย่างถูกต้องจึงเป็นสิ่งที่จะต้อง

2.1.1 คำจำกัดความ

ดิน (soil) หมายถึง เทหวัตถุธรรมชาติ (natural body) ที่เกิดจากการสลายตัวของหิน และแร่ธาตุต่างๆ ผสมคลุกเคล้ากับอินทรีย์วัตถุ ซึ่งปกคลุมผิวดินโลก อยู่เป็นชั้นบางๆ เป็นวัตถุที่คำนวณการเจริญเติบโตและการทรงตัวของพืช ดินประกอบด้วยแร่ธาตุ ที่เป็นของแข็ง อินทรีย์วัตถุ น้ำ และอากาศ ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน(กรมพัฒนาที่ดิน)

มลพิษดิน หมายถึง ดินที่เสื่อมค่าไปจากเดิม และหรือมีสารมลพิษเกินขีดจำกัดจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และผลนามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของพืช และสัตว์ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม (เกษม จันทรแก้ว. 2530 : 162)

2.1.2 สาเหตุการเกิดมลพิษดิน

การที่มนุษย์ต้องใช้ประโยชน์จากที่ดินเพื่อการดำรงชีวิต การพัฒนาด้านเทคโนโลยี การเปลี่ยนแปลงจากภาคการเกษตรเป็น ภาคอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อความเจริญทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้มนุษย์ใช้ประโยชน์จากที่ดินโดยขาดความระมัดระวังส่งผลให้ดินเกิดการปนเปื้อนสารพิษ การประกอบการในภาคอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางดินได้ ดังนี้

2.1.2.1 มลพิษทางดินจากสารเคมี

สารเคมีหรือสารพิษ ที่ส่งผลให้เกิดมลพิษทางดิน มักจะเป็นสารเคมีหรือสารพิษที่เป็นโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโอกาสปนเปื้อนสู่ดินได้ง่าย เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โปรทสังกะสี เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น การที่มนุษย์นำโลหะหนักมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การผลิตแบตเตอรี่ การถลุงโลหะ การผลิตสี การทำเหมืองแร่ ฯลฯ ส่งผลให้มีสารเคมีที่เป็นโลหะหนักถูกถ่ายเทออกสู่พื้นดินเพิ่มมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นพื้นดินบริเวณที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือพื้นดินบริเวณอื่นที่เป็นแหล่งรองรับสารเคมีเหล่านี้ จนทำให้พื้นดินเสื่อมคุณภาพและส่งผลกระทบต่อประชาชนผู้อาศัยในบริเวณนั้นถึงขั้นเสียชีวิต

2.1.2.2 มลพิษทางดินจากของเสียหรือสิ่งปฏิกูล

ในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมก่อให้เกิดของเสีย หรือสิ่งปฏิกูลอื่น นอกเหนือจากของเสียที่ปนเปื้อนสารเคมี การทิ้งของเสียหรือสิ่งปฏิกูลเหล่านี้สู่พื้นดินมักจะเป็น อาหารของเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ในดิน เช่นอุตสาหกรรมอาหารมักมีการใช้จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์และ แบคทีเรียช่วยในการผลิต จุลินทรีย์เหล่านี้หากถูกปล่อยทิ้งออกมาก็จะเป็นอาหารอย่างดีของเชื้อโรค ที่อาศัยอยู่ในดินทำให้เชื้อโรคเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และอาจทำให้เกิดโรคติดต่อได้นอกจากนี้ หากมีการทิ้งของเสียหรือสิ่งปฏิกูลสะสมเป็นเวลานานก็อาจทำให้เกิดการเน่าเสียและทำให้ดินเสื่อม คุณภาพได้

2.1.2.3 มลพิษทางดินจากน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งที่ถูกปล่อยออกมาจากภาคอุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น น้ำเสียและน้ำที่มีอุณหภูมิสูง สำหรับน้ำเสีย เป็นน้ำที่มาจากกระบวนการชะล้างผ่านสารเคมีหรือผ่านการใช้ประโยชน์แล้วจึงมักปนเปื้อนด้วย เชื้อโรคและสารพิษ หากมีการปล่อยลงสู่พื้นดินก็จะทำให้ดินปนเปื้อนเชื้อโรคและสารพิษไปด้วยส่วน น้ำที่มีอุณหภูมิสูงแม้ว่าจะไม่ได้ปนเปื้อนเชื้อโรคและสารพิษแต่ก็ มีผลกระทบทำให้เนื้อดินหรือ สิ่งมีชีวิตในดินเกิดความเปลี่ยนแปลงโดยเสื่อมคุณภาพลงและหากเกิดเป็นระยะเวลาานก็จะทำให้ ยากแก่การฟื้นฟูที่ดินให้กลับสู่สภาพดีดั้งเดิม

2.1.2.4 มลพิษทางดินจากอากาศเสีย

ในแหล่งที่มีโรงงานอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือมีการจราจรที่คับคั่งจะมีสารพิษจากท่อไอเสียของโรงงานและรถยนต์ที่ถูกปล่อยออกมาฟุ้งกระจายในอากาศสูงกว่าบริเวณอื่น สารพิษเหล่านี้ เมื่อปลิวตกลงสู่พื้นดินก็จะเกิดการสะสมในดิน เมื่อมีปริมาณมากก็จะทำให้กลายเป็นมลพิษขึ้นในดิน ได้(สุมาลี เทพสุวรรณ, ทรัพยากรดินในประเทศไทย:สถานภาพ ปัญหา มาตรการจัดการ ,กรุงเทพมหานคร:มหาวิทยาลัยมหิดล,2539,น.83.)

2.1.3 มาตรฐานคุณภาพดิน

เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพดินเป็นปัญหาที่สำคัญ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม แห่งชาติจึงกำหนดมาตรฐานคุณภาพดินขึ้น โดยเป็นมาตรฐานการปนเปื้อนของสารอันตรายที่ยอมให้ มีได้ในดินโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรือผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่สัมผัสดินทั้ง ทางตรงและทางอ้อม โดยมีการแบ่งมาตรฐานคุณภาพดินออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการใช้ประ โยชน์ในที่ดิน คือ มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และมาตรฐาน คุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งรวมถึง มาตรฐานคุณภาพดินในเขตอุตสาหกรรมด้วย

สำหรับในเขตอุตสาหกรรมนั้น มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพดินสำหรับสารเคมีที่เป็น สารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนัก สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ รวมถึงสารพิษอื่นๆอีกหลาย ประเภท ทั้งนี้ได้กำหนดมาตรฐานของสาร 1,2-ไดคลอโรเอเทน สำหรับคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อ การอยู่อาศัยและเกษตรกรรม คือ ต้องไม่เกิน 3.5 กรัมต่อกิโลกรัม และมาตรฐานของสาร 1,2-ไดคลอ โรเอเทนสำหรับคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม คือ ต้องไม่เกิน 7.6 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน)

2.2 สาเหตุของการปนเปื้อนสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนในสิ่งแวดล้อม

สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเป็นสารตั้งต้นในการผลิต vinyl chloride เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ polyvinylchloride หรือ PVC เช่น ท่อประปา วัสดุก่อสร้าง ฉนวนและบรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ ฝ้าเบาะรถยนต์ เครื่องใช้ภายในบ้าน และชิ้นส่วนรถยนต์ โดยในรายละเอียดส่วนนี้จะมุ่งเน้นที่ การผลิต polyvinylchloride หรือ PVC เนื่องจาก ในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างดินที่มีการปนเปื้อน จากบริษัทแห่งหนึ่งซึ่งผลิต PVC

พีวีซีหรือพอลิไวนิลคลอไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสมบัติอยู่ในช่วงกว้างซึ่งขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งที่ประกอบอยู่ในสูตรของสารคอมพาวด์จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีสามารถถูกนำไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย



การจัดเรียงตัวของหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ส่วนใหญ่จะเชื่อมต่อกันแบบหัวต่อหาง (Head-to-Tail) และมีการจัดเรียงตัวภายในสายโซ่ส่วนใหญ่เป็นแบบอะแทคติก (Atactic) คือ หมู่แทนที่จะกระจายตัวอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของระนาบแบบคละกัน

โดยข้อดีของ PVC คือ ราคาถูก น้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่ไหม้หรือลุกติดไฟ เนื่องจากมีอะตอมคลอรีนในโมเลกุล เมื่อติดไฟสามารถดับได้ด้วยตนเอง มีควันเล็กน้อย ไม่ดูดกลืนน้ำ ไส้ไม่มีสี ความหนาแน่น 1.4 g/cm³ อุณหภูมิเริ่มอ่อนตัวประมาณ 80°C และทนทานต่อสารเคมี (High chemical resistance) เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80°C ในขณะที่ข้อเสียคือ เพราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่ทนสภาวะอากาศ ความร้อน และแสง UV

2.2.1 ประเภทของพีวีซีและการสังเคราะห์

พีวีซี สามารถแบ่งประเภทตามปริมาณสารพลาสติกไซเซอร์ ได้ดังนี้

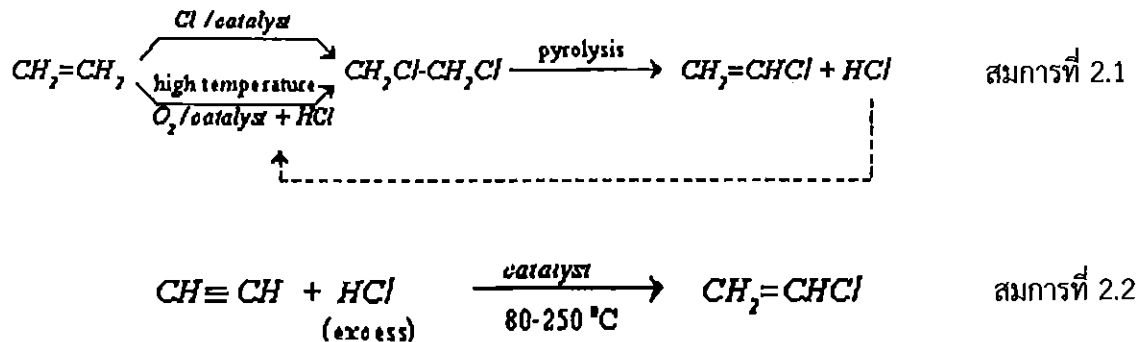
- พีวีซีชนิดอ่อน คือ พีวีซีที่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticised PVC)
- พีวีซีชนิดแข็ง คือ พีวีซีที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ (Unplasticised PVC, uPVC)

2.2.2 การผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ สามารถทำได้ 2 วิธี

2.2.2.1 กระบวนการผลิตโดยใช้เอทิลีนเป็นสารตั้งต้น (Ethylene route)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง เรียกกระบวนการนี้ว่า Balanced process จากสมการที่ 2.1 เอทิลีนจะเกิดปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (Chlorination reaction) และปฏิกิริยาออกซิคลอรีเนชัน (Oxychlorination reaction) ร่วมกันทำให้เกิดไดคลอโรอีเทน (Dichloroethane) หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการไพโรไลติกดีไฮโดรคลอรีชัน (Pyrolyticdehydrochlorination) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนเพื่อให้กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) กรดไฮโดรคลอริกที่ได้จะถูกกลั่นนำมาใช้ใหม่ในขั้นตอนออกซิคลอรีชัน เปลี่ยนเอทิลีนไปเป็นไดคลอโรอีเทน ต่อไป

2.2.2.2 กระบวนการผลิตโดยใช้อะเซททีลีนเป็นสารตั้งต้น (Acetylene route)



กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกทำให้อะเซททีลีน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรคลอรีเนชัน (Hydrochlorination reaction) ดังสมการที่ 2.2 (Titow, 1990) ได้ VC เป็นผลิตภัณฑ์

2.2.3 กระบวนการสังเคราะห์พีวีซี ประกอบด้วย 3 วิธี

2.2.3.1 การพอลิเมอไรเซชันแบบสารแขวนลอย (Suspension polymerization) เป็นผงสีขาวและมีขนาดอนุภาคประมาณ 125 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าการกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบ อิมัลชัน มีรูปทรงสูงทำให้ดูดซับพลาสติกไซเซออร์ได้ดีมีลักษณะเป็นก้อน พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้ มีสัดส่วน 80% ใช้สำหรับงานทำท่อ กรอบประตูหน้าต่าง และงานที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

2.2.3.2 การพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) เป็นผงเนื้อละเอียดและมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.2-1.5 ไมโครเมตร มีรูปทรงต่ำทำให้ดูดซับ พลาสติกไซเซออร์ได้น้อย พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้มีอยู่ ประมาณ 10-15% เหมาะสำหรับงานทำหนังเทียม กระเบื้อง ยางมือ

2.2.3.3 การพอลิเมอไรเซชันแบบบัลล์ (Bulk polymerization or mass polymerization) เป็นของเหลวใสบริสุทธิ์ น้ำหนักโมเลกุลสูง ผิวแข็งมีความหนาแน่นสูงทำให้สามารถดูดซับสารเติม แต่งไม่ตี พีวีซีที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้มีอยู่ประมาณ 10% เหมาะสำหรับงานที่ต้องสัมผัสกับอาหารเนื่องจากพีวีซีที่ได้มีความบริสุทธิ์ (Titow, 1990 และ Nicholas, 1989)

เนื่องจากในอุตสาหกรรมของการผลิตพีวีซีและผลิตภัณฑ์อื่นที่เกี่ยวข้องที่มีการใช้สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเป็นองค์ประกอบในการผลิต หากในขั้นตอนการผลิตหรือการจัดเก็บมีการควบคุมหรือมาตรการป้องกันที่ไม่ดีพอ จะทำให้สารเคมีเกิดการรั่วไหลของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางดินตามมา

2.3 สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (1, 2-Dichloroethane)

การจำแนกสารและคุณสมบัติ 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Halogenated hydrocarbons คือ สาร VOCs ที่มีธาตุฮาโลเจนในโมเลกุล โดยกลุ่มที่พบมากจะเป็นกลุ่มที่มีคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สารนี้มีความเป็นพิษและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อม เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและฮาตูกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทานมาก ยากต่อการสลายตัวทางธรรมชาติทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยทางวิธีเคมี(ประสงค์ คุณานุวัฒน์ชัยเดช, ไมตรี สุทธิจิตต์.มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิทยาสาร. ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 และปีที่ 12 ฉบับที่ 1) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties) ดังตารางที่ 1

สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ของเหลวข้น ไม่มีสี ที่อุณหภูมิห้องจะระเหยเป็นไอได้เร็ว มีกลิ่นหอม รสหวาน ไอรระเหยหนักกว่าอากาศ เมาใหม่ให้หมอกควัน สามารถติดไฟได้ ก่อให้เกิดประจุไฟฟ้า จะเปลี่ยนเป็นสีดำเมื่อโดนอากาศ แสง หรือความชื้นย่อยสลายโดยความร้อนให้ hydrogen chloride และ phosgene ทำปฏิกิริยารุนแรงกับ aluminium, alkali metals, alkali amides, ammonia, ด่าง และสาร oxidants กัดโลหะถ้าผสมน้ำ กัดพลาสติก

การผลิต

สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้น ไม่พบเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้มาจากการทำปฏิกิริยา chlorination โดยตรงของเหล็ก aluminum, copper, antimony chloride ในสถานะที่เป็นของเหลวหรือไอทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C หรือ oxychlorination ในภาวะ fixed หรือ fluidized bed reactor ที่อุณหภูมิ 220 °C โดยมีสารประกอบ chloride ที่เหมาะสมที่เป็นของแข็งเป็นตัวเร่ง

การนำไปใช้

ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต vinyl chloride เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ polyvinylchloride หรือ PVC เช่น ท่อประปา วัสดุก่อสร้าง ฉนวนและบรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ หุ้มเบาะรถยนต์ เครื่องใช้ภายในบ้าน และชิ้นส่วนรถยนต์ 1, 2-dichloroethane ใช้เป็นตัวทำละลายและเติมในน้ำมันที่มีสารตะกั่วเพื่อกำจัดสารตะกั่ว ในอดีตใช้ปริมาณน้อยๆ ในอุตสาหกรรม เช่น ทำความสะอาดเสื้อผ้า ขจัดคราบไขมันที่อยู่บนโลหะ ย่อยสลายน้ำมัน โซ เรซิน ยาง ใช้เป็นส่วนประกอบในน้ำยาทำความสะอาดในบ้าน ยาฆ่าแมลง กาวต่างๆ เช่น กาวติด wall paper พรหม สีบางชนิด น้ำยาเคลือบเงา (นพ.สุทธิพัฒน์ วงศ์วิทย์โชติ .มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. พ.ศ. 2554.)

2.3.1 ความเป็นพิษของ 1, 2-ไดคลอโรอีเทน

การเข้าสู่ร่างกาย โดยการดื่มน้ำที่ปนเปื้อน การหายใจสูดดมอากาศใกล้แหล่งกำเนิด และทางผิวหนัง

ผลกระทบฉับพลัน ไอรระเหยก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและระบบทางเดินหายใจ คลื่นไส้ ทำให้หัวใจเต้นผิดจังหวะ อาการที่เกิดขึ้นจะมากน้อยตามแต่ระยะเวลาที่สัมผัส การดื่มแอลกอฮอล์จะเพิ่มความเป็นพิษของ 1,2-dichloroethane สารนี้ดูดซึมทางผิวหนังได้ดี ถ้าได้รับปริมาณมากจะทำลายระบบประสาท ดับ และไต แต่ไม่ทราบระดับปริมาณที่เป็นพิษแน่นอน ผลจากการกินทำให้เกิด pulmonary edema และ bronchitis

ผลระยะยาวหรือการได้รับซ้ำๆ มีพิษต่อ ตับ ไต และจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ (fibroma ของผิวหนัง และ hemangiosarcoma ของตับและไตในสัตว์ทดลอง) อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งในคน

ระดับความเป็นพิษ

ระดับ 0.05-0.15 mg/l ถ้าสัมผัสระยะยาวซ้ำๆ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบประสาท
เพื่ออาหารระคายเคืองเยื่อ เป็นพิษต่อตับและไต

ระดับ 6 mg/L = เริ่มได้กลิ่น

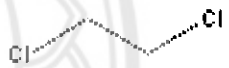
ระดับ 356 mg/m³ = Odor threshold in air

ระดับ 7 mg/L = Odor threshold in water

ระดับ 40 mg/L = ระบบประสาทส่วนกลางผิดปกติ หงุดหงิด ทำให้โรคตับและถุงน้ำดีแย่ลง

ระดับ 10 - 200 mg/L = เพื่ออาหาร เวียนศีรษะ นอนไม่หลับ อาเจียน น้ำตาไหล ท้องผูก
ปวดไตลึ้นปี ตับโตกดเจ็บ ความเข้มข้นของ urobilinogen สูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical properties)

สูตรโมเลกุล (molecular formula)	ClCH ₂ CH ₂ Cl
สูตรโครงสร้าง (structure formula)	
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	98.96
ชื่ออื่นๆ (synonyms)	Ethylene dichloride และ Ethylene chloride
จุดหลอมละลาย (melting point)	-35.3°C (-31.5°F)
จุดวาบไฟ (flash point)	13.0 °C
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)	1,256 g/mL ที่ 25 °C
จุดเดือด (boiling point)	83 °C
ความหนาแน่นไอ (vapor density)	~87 มม.ปรอท ที่ 25 °C
ความดันไอ (vapor pressure)	33,3 hPa ที่ 0 °C
การละลาย (solubility)	8.69 g/l ที่ 20 °C
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ	สารนี้สามารถทำละลายได้ในเอทานอล

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2544) ; Sigma-Aldrich Co. LLC (2014)

2.4 เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน

การจัดการของเสียของเสียอันตรายมีเทคโนโลยีที่หลากหลาย ทั้งการบำบัดฟื้นฟู ณ ที่เกิด (In situ) และการบำบัดนอกพื้นที่ (ex situ) โดยการฟื้นฟูในพื้นที่ (In situ remediation) หมายถึง สารปนเปื้อนของของเสียอันตรายที่ไม่สามารถถูกกำจัดจากการเก็บ หรือการฝังกลบทั่วไป การฟื้นฟูประเภทนี้จะมีการผสมสารเคมีลงสู่พื้นที่ที่ปนเปื้อนโดยตรง หรืออาศัยอุปกรณ์บางชนิดในการทำงาน เช่น ส่วน เป็นต้น ส่วนการฟื้นฟูนอกพื้นที่ (ex situ remediation) หมายถึง สารปนเปื้อน หรือสารอันตรายที่สามารถกำจัดได้โดยการกักเก็บ หรือนำไปฝังกลบได้ เช่น การขุดดินที่ปนเปื้อนไปบำบัดต่อจนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานและค่อยนำไปฝังกลบ เป็นต้น (Wang et al. . ., 2007)

โดยปัจจัยที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนประเภทใดนั้นสามารถพิจารณาจากปัจจัยเหล่านี้ 1) ชนิดของสารปนเปื้อน 2) ปัจจัยทางด้านกฎหมาย 3) ขนาดของพื้นที่ และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่ปนเปื้อน 4) ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟู 5) ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์และต้นทุน 6) ความเสี่ยงในการบำบัด

2.5 การบำบัดโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Attenuation)

การบำบัดสารมลพิษตามธรรมชาติ จัดเป็นการบำบัดในที่ โดยอาศัยความสามารถของธรรมชาติในการบำบัดสิ่งแปลกปลอมในธรรมชาติ ซึ่งหมายถึง สารมลพิษต่างๆที่ปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในธรรมชาติอย่างมากเกินสมดุล กระบวนการต่างๆในธรรมชาติที่เกี่ยวกับ Natural Attenuation ในการบำบัดสารมลพิษนี้ประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ

2.5.1 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

2.5.1.1 กระบวนการทางชีวภาพ (Biotic)

การย่อยสลายทางชีวภาพจะอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ขึ้นอยู่กับจำนวนของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในปริมาณที่เพียงพอ กลุ่มของจุลินทรีย์โดยธรรมชาติ (natural microbial communities) ประกอบด้วยชีวมวลที่แตกต่างกันมากและเมื่อมีสารใหม่ที่มีความเข้มข้นสูงเพียงพอเข้าไป ชีวมวลเหล่านี้ก็อาจจะปรับตัวเพื่อย่อยสลายสารนี้ บ่อยครั้งที่การปรับตัวของประชากรจุลินทรีย์ (microbial population) มีสาเหตุมาจากการเจริญเติบโตของตัวย่อยสลายเฉพาะที่โดยธรรมชาติสามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ได้ การปรับตัวเกิดขึ้นในระหว่าง ช่วงเวลาล่าช้า (lag phase) คือช่วงเวลาจากการเริ่มได้รับสัมผัสไปจนถึงการเริ่มต้นการย่อยสลาย จึงเป็นที่ชัดเจนว่าระยะเวลาในช่วงเวลาล่าช้าขึ้นอยู่กับปริมาณตัวย่อยสลายในชั้นต้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประวัติของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ (microbial community) เช่น ประชากรเหล่านี้เคยได้รับสัมผัสสารมาก่อนหรือไม่ ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการใช้สารชีวภาพแปลกปลอม (xenobiotic) และปล่อยกระจายไปทั่วเป็นเวลาหลายปี ความเป็นไปได้ที่จะพบตัวย่อยสลายก็จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสิ่งแวดล้อมที่ได้รับการปล่อยมลพิษ เช่น ในโรงบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นต้น

การย่อยสลายสาร 1, 2 DCA สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกระบวนการแบบใช้ออกซิเจน (aerobic) และกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic) กระบวนการใช้ออกซิเจนจะย่อยสลายสาร 1, 2 DCA ให้เป็น CO₂ โดยสาร 1, 2 DCA จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน กระบวนการที่พบการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนได้แก่ กระบวนการ Hydrolysis dehalogenation และกระบวนการ Oxidation reduction ซึ่งทั้งสองกระบวนการจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบคลอรีน กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสาร 1, 2 DCA ให้กลายเป็น C₂H₆ (Ethene) โดยที่สาร 1, 2 DCA จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสาร 1, 2 DCA ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ได้แก่ *Dehalococoides ethenogenes* เป็นต้น (Edwards และคณะ, 2006) แต่เนื่องจากดินที่นำมาทำการศึกษาเพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยวิธีธรรมชาติ บำบัดนั้นอยู่ลึกกลงไปจากระดับพื้นดิน จึงทำให้มีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน การเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่จึงเป็นแบบกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic)

2.5.1.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ชีวภาพ (Abiotic)

กระบวนการที่ไม่ใช้ชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมีและกายภาพ เป็นการอาศัยคุณลักษณะทางกายภาพของดินมาใช้ในการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA การย่อยสลายโดยกระบวนการไม่ใช้ทางชีวภาพประกอบด้วย การเปลี่ยนรูปทางเคมี (chemical transformation) และการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสง (photochemical transformation) โดยปกติการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการนี้จะได้สารประกอบอินทรีย์อื่น แต่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นแร่โดยสมบูรณ์ (Schwarzenbach et al., 1993) การเปลี่ยนรูปทางเคมีเป็นการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นโดยไม่ใช้แสงและไม่มีสิ่งมีชีวิตเป็นตัวกลางใน ขณะที่การเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสงจำเป็นต้องมีแสง ตัวอย่างของกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีในสิ่งแวดล้อมทางน้ำก็คือกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis), การแทนที่ (nucleophilic substitution), การกำจัด (elimination), ออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) (Schwarzenbach และคณะ, 1993) ในกระบวนการเหล่านี้กระบวนการไฮโดรไลซิสมีความสำคัญมากที่สุด แต่เนื่องจากดินที่นำมาทำการศึกษาเพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA โดยวิธีธรรมชาติ บำบัดนั้นอยู่ลึกกลงไปจากระดับพื้นดิน จึงทำให้มีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสง (photochemical transformation) การเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่จึงเป็นการเปลี่ยนรูปทางเคมี (chemical transformation) กระบวนการที่เกี่ยวข้องจึงเป็นกระบวนการไฮโดรไลซิส

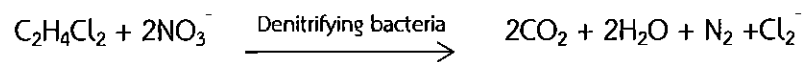
กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาระหว่างนิวเคลียสของ H₂O หรือกลุ่ม OH⁻ กับสารเคมีซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับกลุ่ม OH⁻ สารประกอบจำนวนมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอนุพันธ์ที่ได้จากกรดมักไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส กระบวนการนี้สามารถเป็นได้ทั้งกระบวนการทางชีวภาพและไม่ใช้ทางชีวภาพ แต่เมื่อเกี่ยวกับการทดสอบจะพิจารณาเฉพาะกระบวนการที่ไม่ใช้ทางชีวภาพ กระบวนการไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นโดยกลไกต่างๆที่ค่า pH ต่างกัน เป็นกลาง เป็นกรดหรือเป็นเบสและอัตราของกระบวนการอาจขึ้นอยู่กับค่า pH

นอกจากกระบวนการไฮโดรไลซิสแล้วนั้น ยังมีกระบวนการดูดซับของดินซึ่งเป็นการแสดงความสามารถในการดูดซับสารมลพิษของดิน ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (Soil distribution coefficient, K_d) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินนี้สามารถใช้ในการคาดคะเนเพื่อหาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดิน

2.5.2 กระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น (Enhanced Biodegradation)

2.5.2.1 การกระตุ้นกระบวนการทางชีวภาพด้วยสารไนเตรท (NO₃)

การกระตุ้นกระบวนการทางชีวภาพด้วยสารไนเตรทจะมีประสิทธิภาพเมื่อในดินหรือสิ่งแวดล้อมมีแบคทีเรียจำพวก Denitrifying bacteria อาศัยอยู่และจะต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เนื่องจาก Denitrifying bacteria จะทำงานได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (anoxic)



ในสภาวะที่มีไนเตรท, สาร 1, 2 DCA และ Denitrifying bacteria Denitrifying bacteria จะทำการย่อยสลายไนเตรท (NO₃) ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน (N₂) ซึ่งในขณะเดียวกันแบคทีเรียดังกล่าวจะทำการย่อยสลายสาร 1, 2 DCA ไปพร้อมๆกัน เป็นกระบวนการ Co-metabolism ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), น้ำ (H₂O), ก๊าซไนโตรเจน (N₂) และก๊าซคลอรีน (Cl₂) ดังสมการข้างต้น (Edwards และคณะ, 2006)

2.5.2.2 การกระตุ้นกระบวนการทางชีวภาพด้วย EHCTM

EHC เป็นวัสดุที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วยคาร์บอนแข็ง (solid carbon) และอนุภาคของเหล็กประจุศูนย์ (zero valent iron : ZVI) คาร์บอนเป็นแหล่งอาหาร ในขณะที่เหล็กประจุศูนย์จะให้ H₂ และลด ORP ของระบบ ดังนั้นการใส่ EHC จึงเสมือนการใส่อาหารและการให้ผู้ใช้อิเล็กทรอนิกส์ (H₂) ซึ่งแบคทีเรียสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และอาจจะทำให้สภาวะเหมาะสมกับการสลายสารอินทรีย์ระเหยที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ

มีการทดลองโดย EHC ไปใช้ในการบำบัด ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่งในการกำจัด chlorinated volatile organic compounds (CVOCs), chlorinated organic pesticides, heavy metals and other persistent compounds ซึ่งใช้ในการบำบัดแบบในที่ (ISCR) (Srirangam และคณะ, 2009)

2.5.3 ข้อดีของการบำบัดสารมลพิษโดยใช้จุลินทรีย์และกระบวนการต่างๆในธรรมชาติ

2.5.3.1 เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดของเสียจากการบำบัด (Remediation waste) ต่ำ

2.5.3.2 เนื่องจากเป็นกระบวนการปรับตัวของธรรมชาติและกระบวนการที่เกิดขึ้นในที่ (insitu) จึงเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงอื่นๆ (Low cross media contamination) อันเนื่องมาจากการขนย้ายและขนส่ง

2.5.3.3 เป็นกระบวนการที่ไม่ทำลายภาวะธรรมชาติของแหล่งที่จะบำบัด (Non-destructive method)

2.5.3.4 ต้นทุนโดยรวมต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

2.5.3.5 ลดอัตราเสี่ยงของมนุษย์ต่อการสัมผัส (Exposure) ต่อสารมลพิษ

2.5.4 ข้อเสียของการบำบัดสารมลพิษโดยใช้จุลินทรีย์และกระบวนการต่างๆในธรรมชาติ

2.5.4.1 เป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานกว่าวิธีอื่นๆ

2.5.4.2 ต้องมีการสำรวจ การศึกษาวิจัยอย่างสมบูรณ์ถึงลักษณะสมบัติของแหล่งที่จะทำการบำบัด (Site characterization) ซึ่งการสำรวจและศึกษาวิจัยอย่างสมบูรณ์นี้อาจมีค่าใช้จ่ายที่สูงและใช้เวลา

2.5.4.3 เพื่อให้การบำบัดตามธรรมชาติเกิดในระยะเวลาที่เหมาะสมจึงต้องมีการควบคุมสภาวะต่างๆ อย่างเหมาะสม

2.5.4.4 มีโอกาสที่สารมลพิษจะมีการย้ายที่ปนเปื้อนจากแหล่งเดิมสู่แหล่งใกล้เคียง เช่น การชะไหลตามน้ำฝน เป็นต้น

2.5.4.5 เนื่องจากเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติจึงไม่สามารถคาดเดาได้ว่าสารที่มีการเปลี่ยนรูปไปจะมีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่ และมีโอกาสที่สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนรูป (Transformation product) นั้นมีความเป็นพิษมากกว่ามลพิษเริ่มต้น (Parent compound)

2.5.4.6 เป็นกระบวนการที่ต้องมีการตรวจติดตาม (Monitoring) อย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งระดับของการปนเปื้อนของสารมลพิษอยู่ในระดับที่กำหนดของการบำบัด (Clean-up goal)

2.5.4.7 เนื่องจากเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ หากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิศาสตร์ต่างๆ เช่น สภาวะการไหลของน้ำ (Hydrology) หรือภาวะธรณีเคมี (Geochemical conditions) เป็นต้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดกลุ่มนี้อย่าง

2.5.4.8 เนื่องจากเป็นการบำบัดสารมลพิษในพื้นที่บริเวณที่มีการปนเปื้อนโดยตรง จึงต้องมีการให้ความรู้และความเข้าใจอย่างถูกต้องต่อประชาชนในพื้นที่ถึงการใช้กระบวนการนี้ในการบำบัดสารมลพิษ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการโครงการ

การดำเนินการศึกษาในครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ อุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือตอนล่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง ในดินที่มีการปนเปื้อน โดยจะทำแบบจำลองการทดลอง 2 ส่วน คือ การศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดและการศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยธรรมชาติบำบัดโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น โดยในการศึกษาศักยภาพในโดยวิธีธรรมชาติบำบัดนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทดลองแบบที่ 1 เป็นกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic Process) และการทดลองแบบที่ 2 เป็นกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic Process) โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 100 mg/L และ 2000 mg/L ในขณะที่การศึกษาศักยภาพในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยธรรมชาติบำบัดโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น (Enhanced Bioremediation) ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการกระตุ้นด้วย EHC 10 g/L และแบบที่ 2 เป็นการกระตุ้นด้วย KNO_3 505 mg/L โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 2000 mg/L การทดลองทั้งหมดอยู่ภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศ

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. ขวดทดลอง ขนาด 50 มิลลิลิตร.
2. ฝาจุกวาล์วเปิดปิด (Mininert valve) ของ VICI Precision Sampling, Inc.
3. เครื่อง Gas Chromatography-ECD ; GC ของ Agilent Technologies/USA. รุ่น 7802A สารที่วิเคราะห์ คือ 1,2-ไดคลอโรอีเทน
4. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน สำหรับใช้กับเครื่อง GC ชนิดเข็ม Gas Syringes ของ VICI Precision Sampling, Inc.
5. ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มล., 50 มล. และ 100 มล.
6. ไมโครปิเปตขนาด 1 มล. และ 5 มล.
7. เครื่องเขย่า (Shaker)
8. ตู้อบ 160 องศาเซลเซียส
9. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 3 ตำแหน่ง
10. ถ้วยกระเบื้อง
11. อลูมิเนียมฟอยล์ ของ Diamond
12. ครกบดดิน

13. ซ้อนตักสาร
14. ตะเกียงแอลกอฮอล์
15. ถังแก๊สไนโตรเจนพร้อมชุดปรับแรงดัน
16. พาราฟิล์ม ของ BEMIS

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สาร 1, 2-Dichlorethan ACS reagent 99% ของ SIGMA – ALDRICH

การเตรียมสารละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทน 8,700 mg/L เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงสุดในค่าของการละลายน้ำ ซึ่งค่าการละลายน้ำของสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน 8.7 g/L ณ อุณหภูมิของน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส โดยจะเตรียมสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ปริมาณ 0.87 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและทิ้งให้สารละลายอิมตัวก่อนนำมาทำการทดลอง โดยสารละลายจะเก็บไว้ในขวดแก้วปิดด้วยจุกยางและลือคด้วยฝากลือมอลูมิเนียม ซึ่งขวดแก้วจะถูกห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสง

2. EHCTM ของ Adventus Americas

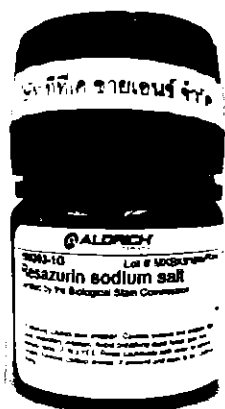
ในการทดลองโดยใช้ EHCTM จะใช้ในสัดส่วน 10 g/L ซึ่งปริมาณที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ คือ 0.15 กรัม ในปริมาตรน้ำใต้ดิน 15 มิลลิลิตร

3. โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium Nitrate; KNO₃)

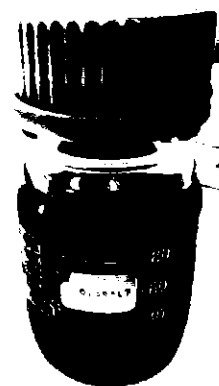
สารละลายโพแทสเซียมไนเตรตเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยที่ไนเตรต (Nitrate; NO₃⁻) จะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วยิ่งขึ้น ในการทดลองครั้งนี้จะเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ โดยได้จากการนำโพแทสเซียมไนเตรต 2.02 กรัม ละลายน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวดแก้วใสปิดฝาให้สนิท เมื่อนำมาทดลองจะปรับสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต ให้มีความเข้มข้นเป็น 5 มิลลิโมลาร์

4. รีซาซูริน (Resazurin sodium salt; C₁₂H₆NO₄•Na) ของ SIGMA – ALDRICH

รีซาซูริน (Resazurin sodium salt) เป็น Oxidation Reduction Indicator ในการใช้เป็นตัวชี้วัดก๊าซออกซิเจนในขวดทดลอง ซึ่งค่าการละลายน้ำของรีซาซูริน คือ 1 mg/L โดยในการทดลองในครั้งนี้จะใช้สารละลายรีซาซูรินที่มีความเข้มข้น 0.0056 % โดยชั่ง รีซาซูริน 0.014 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร และนำไปถ่ายในขวดแก้วใสปิดฝาให้สนิท



รูปที่ 3.1 Resazurin Sodium salt



รูปที่ 3.2 สารละลายรีซาซูริน 0.0056%

5. พอร์มาลีน

การเตรียมพอร์มาลีนให้มีความเข้มข้น 10% เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการดำเนินการสลายด้วยกระบวนการทางกายภาพ โดยเตรียมจากพอร์มาลีนเข้มข้น 35% ปริมาณ 29 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บใส่ขวดแก้วใสและปิดฝาให้สนิท

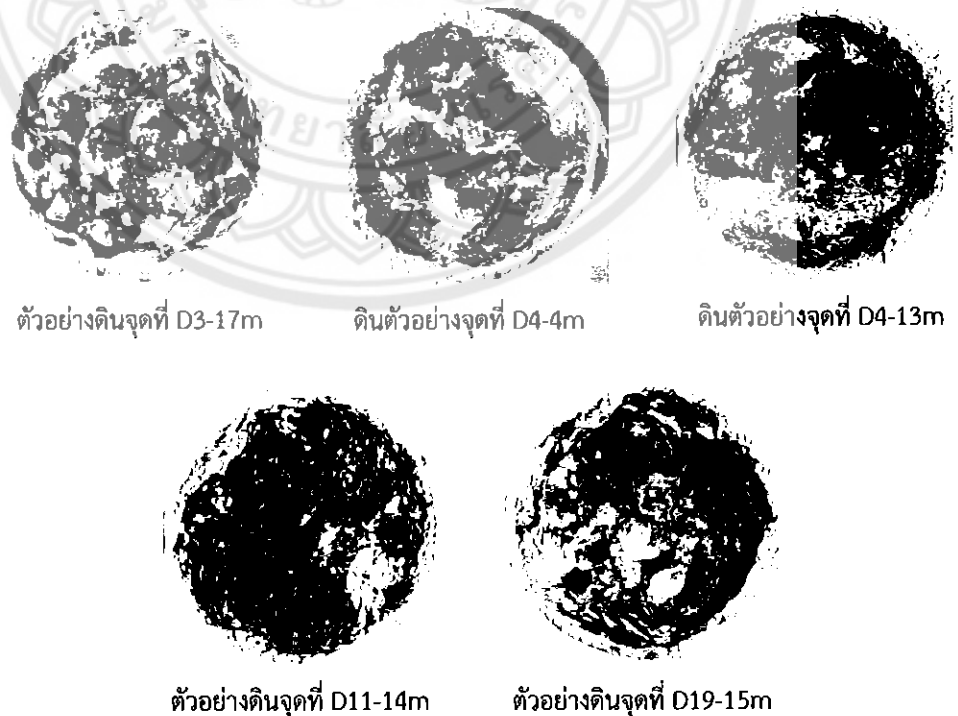
6. แอลกอฮอล์ 70 %

7. น้ำกลั่น

3.2 ลักษณะและองค์ประกอบของดินที่นำมาทำการวิจัย

3.2.1 ลักษณะของดินที่ใช้ในงานวิจัย

ดินที่นำมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้เป็นดินตัวอย่างจาก บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์จำกัด (มหาชน) ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง จากการเก็บตัวอย่าง 19 จุด เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางธรณีกายภาพ เคมี และชีวภาพของชั้นดิน ตัวอย่างที่นำมาใช้ ในการวิจัยในครั้งนี้มีทั้งหมด 5 จุด คือ จุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m ซึ่งตัวอย่างจากจุด D3 และ D4 เป็นดินที่มาจากแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) และตัวอย่างจาก D11 และ D19 เป็นดินที่มาจากบริเวณการปนเปื้อนแบบ Plume ดินตัวอย่างมีลักษณะ ดังรูปภาพที่ 3.3 และในชุดควบคุมจะทำการทดลองโดยใช้ วัสดุตัวกลางเป็นทรายหยาบ โดยนำทรายหยาบมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัด สิ่งสกปรกและนำไปตากแห้ง และใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่เพื่อจำลองเป็นชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำในการทำการทดลอง



รูปที่ 3.3 ลักษณะของดินที่นำมาทำการวิจัย

ดินที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังนี้

จุดที่ D3-17m, จุดที่ D4-13m และ จุดที่ D19-15m คือ Silty sand เป็นดินที่มีลักษณะเป็นทราย (0.063-2.00 มิลลิเมตร) ปนด้วยทรายแป้ง (ขนาด 0.004-0.063 มิลลิเมตร) พบได้ในดินชั้นล่างที่ความลึกประมาณ 12-18 เมตร เทจากตะวันตกไปตะวันออก โดยมีค่า FOC อยู่ที่ 0.200 ± 0.310 กรัมต่อกิโลกรัม และมีค่า SOD อยู่ที่ 3.88 ± 4.59 กรัมต่อกิโลกรัม

จุดที่ D4-4 และจุดที่ D11-14m คือ Silty sand-Clayey Sand : SM-SC (สัญลักษณ์สี่ส้มอ่อน) เป็นการรวมตัวของดิน 2 ชนิด อันประกอบด้วยทรายแป้งปนด้วยทราย (SM) กับทรายเป็นดินเหนียว (SC) ซึ่งจะพบได้ในดินชั้นบนและกลางที่ความลึกประมาณ 2-15 เมตร เทจากตะวันตกไปตะวันออก โดยมีค่า FOC อยู่ที่ 0.107 ± 0.006 กรัมต่อกิโลกรัม และมีค่า SOD อยู่ที่ 7.59 ± 3.42 กรัมต่อกิโลกรัม

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียในตัวอย่างดิน

นอกจากการศึกษาทางธรณีกายภาพและธรณีเคมีแล้วบทยังศึกษาคุณลักษณะทางธรณีจุลชีว (Geo microbiology) ของพื้นที่ศึกษา โดยการวิเคราะห์ชนิดของจุลชีพในดินด้วยเทคนิค PCR-DGGE และ Bulk Cell Extract ที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่โดยเลือก 3 ตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์คือ ตัวอย่างจากจุด D4 (แหล่งกำเนิดการปนเปื้อน) ที่ความลึก 12 เมตร ตัวอย่างจากจุด D6 (บริเวณแนวดินเหนียวที่กั้น DNAPL) ที่ความลึก 11 เมตร และตัวอย่างจาก D11 (บริเวณการปนเปื้อนแบบ Plume) ที่ความลึก 11 เมตร ซึ่งการปนเปื้อน 1,2-DCA ของตัวอย่างดินจาก D4, D6, และ D11 ที่ชั้นความลึกดังกล่าวเป็น 383, 168 และ 9.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลชีพและบทบาทในการสลายสารปนเปื้อนหรือเร่งการแพร่กระจายของ VOCs ได้แสดงใน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียในตัวอย่างดิน

ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (CFU/กรัม)	ชนิดของแบคทีเรีย	ศักยภาพในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน	เอกสารอ้างอิง
D4 ที่ความลึก 12 เมตร	2.46x10 ⁶	Brevibacillus agri	ทนตัวทำละลายอินทรีย์ (ในรูป NAPL) ได้ แต่ไม่สามารถใช้ตัวทำละลายอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนได้ แบคทีเรียชนิดนี้สามารถปรับเสถียร Solvent-in-Water Emulsion ได้ ซึ่งน่าจะเพิ่มการละลายได้ให้แก่อสารปนเปื้อนประเภท NAPL	Kongpol et al (2009). Characterization of an organic-solvent-tolerant Brevibacillus agri strain 13 able to stabilize solvent/water emulsion. FEMS Microbiology Letters, Vol.297, Issue 2, 225-233.
		Paenibacillus lactis	Paenibacillus เป็น genus ที่พบเดิมโตในที่ที่มีการปนเปื้อนสารประกอบ Hydrocarbon และ PAHs สามารถใช้ PAHs เป็นแหล่งคาร์บอนได้ มีศักยภาพในการฟื้นฟูการปนเปื้อน	Daane et al (2002). PAH-degradation by Paenibacillus spp. And description of Paenibacillus naphthalenovorans sp. nov., a naphthalene-degrading bacterium from the rhizosphere of salt marsh plants. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 52, 131-139
		Bacillus cereus	มีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน สามารถใช้น้ำมัน Hydrocarbon และ Chlorinated Organics เช่น TCE เป็นแหล่งคาร์บอนได้	Plant and Plant et al (2010). A review: Advances in microbial remediation of trichloroethylene (TCE). Journal of Environmental Sciences 2010, 22(1) 116-126
		Ralstonia pickettii	มีศักยภาพในการสลายสารปนเปื้อนประเภท หลายประเภท รวมถึง Chlorinated Organics เช่น TCE	Ryan, Pembroke, Adley (2007). Ralstonia pickettii in environmental biotechnology: potential and applications. J Appl Microbiol.;103(4):754-64
		Pandoraea thiooxydans	Pandoraea Genus สามารถสลาย Chlorinated Organics เช่น Chlorobenzene ได้	Jiang et al (2009). Genetic and biochemical analyses of chlorobenzene degradation gene clusters in Pandoraea sp. strain MCB032. Arch Microbiol, 191:485-492
		Microbacterium Xylanilyticum	มีสามารถในการสลาย VOCs เช่น toluene, ethylbenzene และ p-xylene ได้	Prenafeta-Boldu et al (2012). Fungal/bacterial interactions during the biodegradation of TEX hydrocarbons (toluene, ethylbenzene and p-xylene) in gas biofilters operated under xerophilic conditions. FEMS Microbiol Ecol 80, 722-734

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียในตัวอย่างดิน (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (CFU/กรัม)	ชนิดของแบคทีเรีย	ศักยภาพในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน	เอกสารอ้างอิง
D6 ที่ความลึก 11 เมตร	1.9x10 ⁵	Bacillus subtilis	มีความสามารถในการผลิต Biosurfactant ซึ่งอาจจะทำให้ 1,2-DCA หรือ VC แพร่กระจายได้มากขึ้น	Albino and Nambi (2009). Effect of biosurfactants on the aqueous solubility of PCE and TCE. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering Volume 44, Issue 14
		Bacillus licheniformis	มีความสามารถในการสร้าง Biofilm ซึ่งลด Hydraulic Conductivity ของดินได้ทำให้ NAPL แพร่ผ่านได้น้อยลง	Harish et al. (2009). Selective Plugging Strategy Based Microbial Enhanced Oil Recovery Using Bacillus licheniformis TT33. J. Microbiol. Biotechnol., 19(10), 1230–1237
		Enhydrobacter aerosaccus	ไม่ปรากฏว่าสามารถสลายสารปนเปื้อนได้	
		Acinetobacter sp.	Acinetobacter genus สามารถย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Diesel ได้	Lee, Woo, and Ten. (2011). Characterization of novel diesel-degrading strains Acinetobacter haemolyticus MJ01 and Acinetobacter johnsonii MJ4 isolated from oil-contaminated soil. World J Microbiol Biotechnol, 28:2057–2067

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียในตัวอย่างดิน (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (CFU/กรัม)	ชนิดของแบคทีเรีย	ศักยภาพในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน	เอกสารอ้างอิง
D11 ที่ความลึก 11 เมตร	8.8x10 ⁶	Ralstonia	เป็น genus ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้	Ryan, Pembroke, Adley (2007). Ralstonia pickettii in environmental biotechnology: potential and applications. J Appl Microbiol.;103(4):754-64
		Burkholderia	Burkholderia genus สามารถย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและ Chlorinated Organics เช่น Toluene และ TCE ได้	Mars et al (1996). Degradation of Toluene and Trichloroethylene by Burkholderia cepacia G4 in Growth-Limited Fed-Batch Culture. APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, Mar. 1996, p. 886-891
		Bacillus tequilensis	สามารถย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น PAHs ได้	จิราพร พวงแก้ว : การคัดกรองแบคทีเรียดีโนทริไฟอิงจากตะกอนดินใต้ทะเลเพื่อการย่อยสลายพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน.
		Ralstonia pickettii	มีศักยภาพในการสลายสารปนเปื้อนประเภท หลายประเภท รวมถึง Chlorinated Organics เช่น TCE	Ryan, Pembroke, Adley (2007). Ralstonia pickettii in environmental biotechnology: potential and applications. J Appl Microbiol.;103(4):754-64
		Burkholderia kururiensis	สลาย Chlorinated Organics เช่น TCE ได้ พบในบริเวณ Plume	Zhang et al (2000). Burkholderia kururiensis sp. nov., a trichloroethylene (TCE)-degrading bacterium isolated from an aquifer polluted with TCE. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology (2000), 50, 743-749

ข้อมูลจาก : โครงการสำรวจและประเมินแนวทางการจัดการทรัพยากรดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่อุตสาหกรรมปิโตรเคมีระยะที่ 1

3.3 กระบวนการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

Calibration Curve คือ การเปรียบเทียบหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างจากสารมาตรฐาน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน และพื้นที่ใต้กราฟที่วัดได้ สามารถใช้เทียบหาค่าความเข้มข้นสารตัวอย่างสารที่ไม่ทราบค่า

3.3.1 การหาสมการเปรียบเทียบค่ามาตรฐาน (calibration Curve)

- 1 จัดเตรียมขวดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่น้ำกลั่นตามสัดส่วนตามที่ได้คำนวณไว้
- 2 ทำการปิดฝาด้วยฝาจุกวาล์วเปิดปิด หมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง)แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น
- 3 จากนั้นใช้เข็มฉีดยาตึงสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้จากขวดสารละลายความเข้มข้น 8,700 mg/L จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นเป็น 0.25 mg/L, 0.5 mg/L, 1 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L และ 100 mg/L
- 4 ท่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง
- 5 นำไปแช่ด้วยเครื่องเขย่านาน 2 วัน เพื่อให้สารมีความอิมมัตวอิมมัตว
- 6 เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะทำการเก็บแก๊สในขวด (Head space) ฉีดเข้าเครื่องโครมาโตกราฟฟี และอ่านค่าพื้นที่ใต้กราฟและนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟและหาสมการ Calibration Curve

3.4 ขั้นตอนการเตรียมดินที่นำมาทำการวิจัย

ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m โดยในขั้นตอนการเตรียมดินตัวอย่างในครั้งนี้จะเริ่มจาก การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ไปอบ ด้วยตู้อบ 110 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัสดุและอุปกรณ์ปลอดเชื้อ จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่าง ใส่ในขวดทดลอง ปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำใต้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงในขวดทดลองที่มีดินอยู่ซึ่งปริมาตรน้ำที่ใส่นั้นจะมีปริมาตรรวม 15 มิลลิลิตร โดยจะมีอัตราส่วนระหว่างดิน : น้ำโดยเป็นสัดส่วนเป็น 60 : 40 และ $\text{ปริมาตรของน้ำ} + \text{ดิน} = 50\%$ ของปริมาตรขวดและในสัดส่วน 50 %

จากนั้นใส่สารละลายรีซาชูริน 0.0056% ปริมาณ 1 มิลลิลิตรแล้วนำไปใส่อากาศออกด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และทำการปิดฝาด้วยฝาจุกวาล์วเปิดปิด หมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง) แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น ตามขั้นตอนการเตรียมดินดัง รูปที่ 3.4



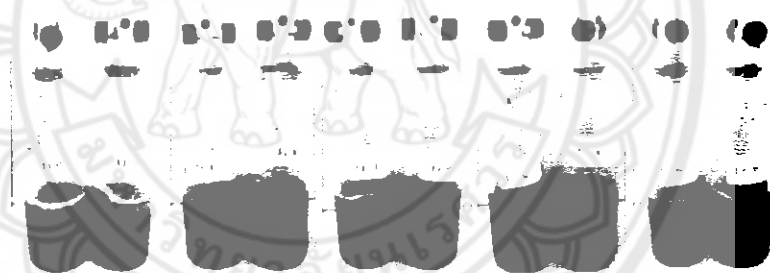
1. ชุดขวดทดลองและฝาปิด



2. การเตรียมดินใส่ขวด 20 กรัม



3. การเตรียมดินตัวอย่างแต่ละชนิดบรรจุลงขวด



4. ขวดทดลองที่ใส่น้ำได้ดินและริชาซูริน



4. การไล่อากาศด้วยก๊าซออกซิเจน



5. ขวดทดลองที่ถูกไล่อากาศแล้ว

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมดินที่นำมาทำการวิจัย

3.5 การศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน

3.5.1 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน

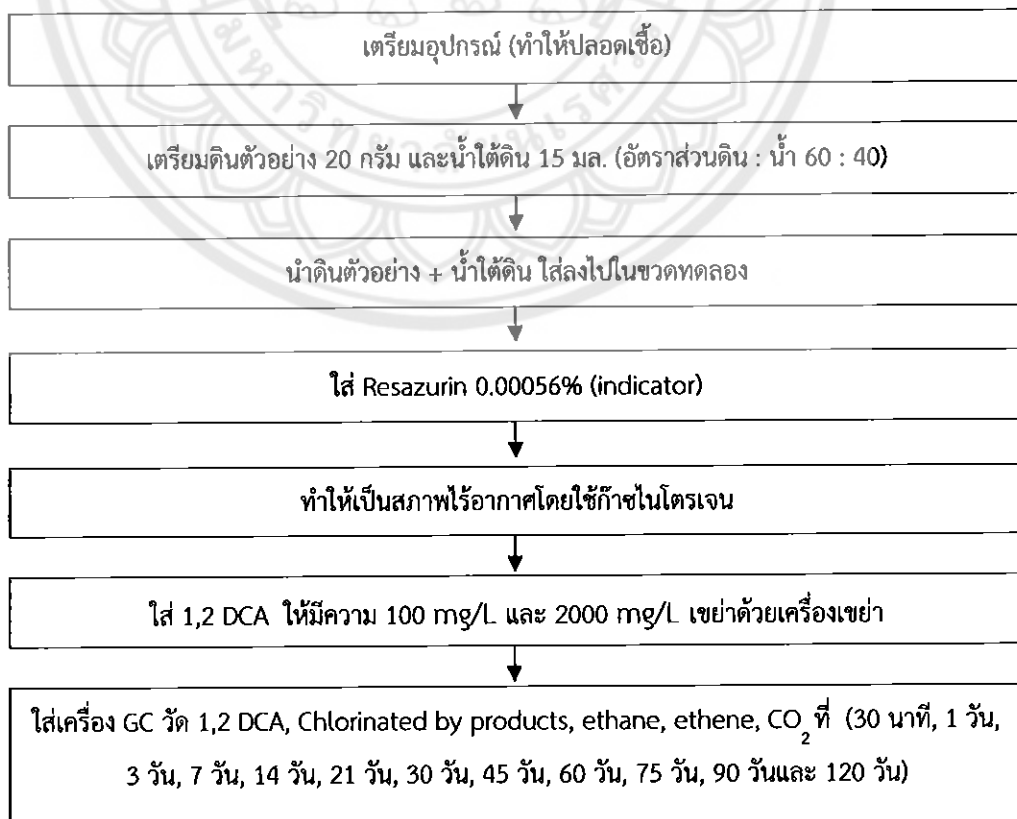
3.5.1.1 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดทดลองปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำใต้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงในขวดทดลองที่มีดิน แล้วใส่สารละลายริซาซูริน 0.0056% ปริมาณ 1 มิลลิลิตรแล้วนำไปใส่ภาชนะออกด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และทำการปิดฝาด้วยชุดฝา Mininert valve หมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง) แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น

ใส่สารละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทน ตามที่ได้คำนวณไว้ ให้ความเข้มข้นในขวดเป็น 100 mg/L และ 2000 mg/L ตามลำดับ จากนั้นห่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยใช้แสง และนำขวดทดลองที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ทำการเก็บแก๊สในขวดเพื่อวัดหาสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีอยู่ในขวดทดลองด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ตามแต่ละช่วงระยะเวลา คือ 30 นาที, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วัน และ 120 วัน ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการปรับเทียบกับ Calibration Curve



รูปที่ 3.5 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

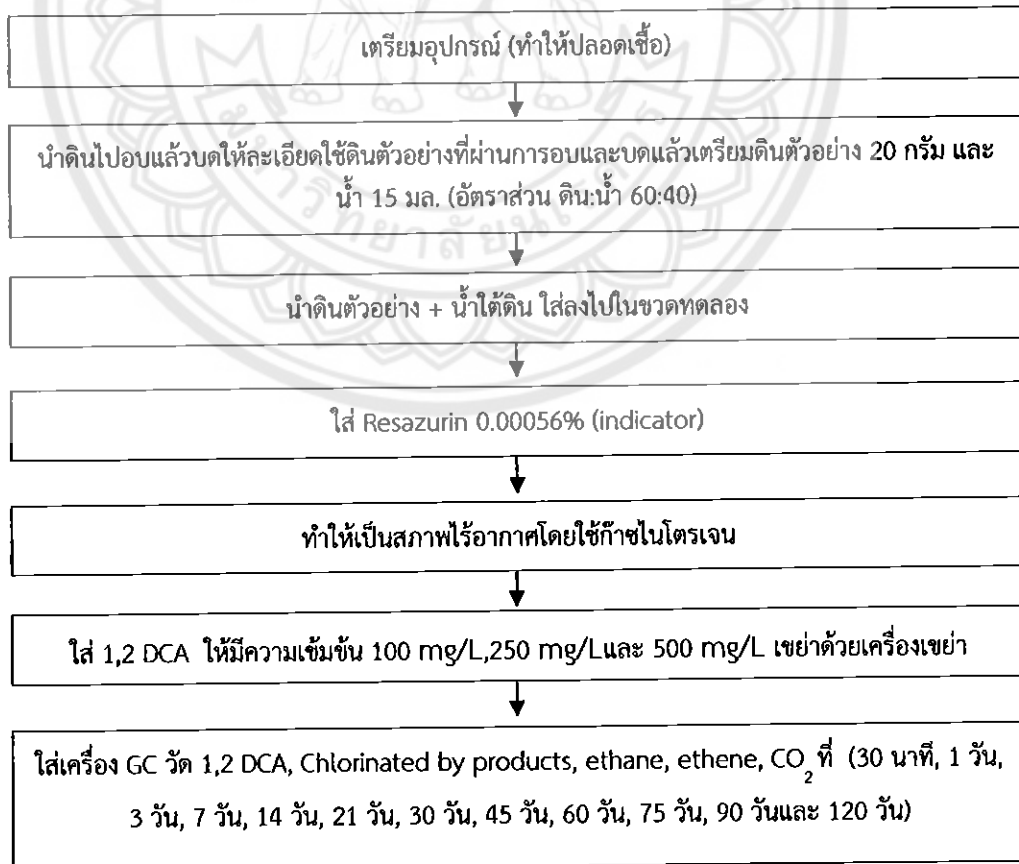
3.5.1.2 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศ 1. ๑๑๙๕๘๔๙ 11 ต.ค. 2561

3.5.1.2.1 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (Soil distribution coefficient, K_d) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (Soil distribution coefficient, K_d) คำนี้อจะบ่งชี้ถึงแนวโน้มของสารเคมีปนเปื้อนถูกดูดซับด้วยดินได้มากหรือน้อย

นำดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m ไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำดินตัวอย่างที่อบแล้วไปบดให้ละเอียด จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดทดลองปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำได้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงไป ในขวดทดลองที่มีดิน ทำการปิดฝาด้วยฝาจุกวาล์วเปิดปิด หมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง) แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น

ใส่สารละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนตามที่ได้คำนวณไว้ ให้ความเข้มข้นในขวดเป็น 100 mg/L และ 2000 mg/L ตามลำดับ จากนั้นต่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง แล้วนำขวดทดลองที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ทำการเก็บแก๊สในขวดเพื่อวัดหาสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนที่มีอยู่ในขวดทดลองด้วยเครื่องโคม่าโทกราฟีตามแต่ละช่วงระยะเวลา คือ 30 นาที ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6 แล้วทำการเปรียบเทียบกับ Calibration Curve



รูปที่ 3.6 การทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน

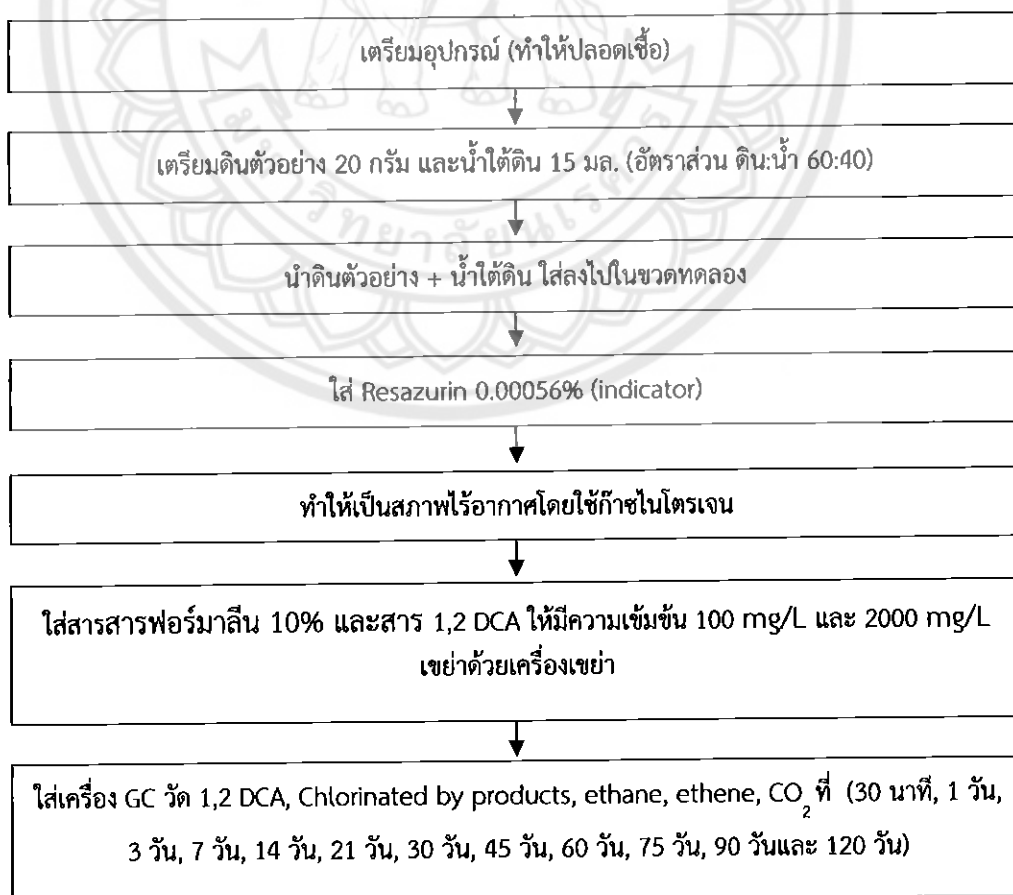
3.5.1.2.2 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน โดยใช้กระบวนการทางเคมีและกายภาพแบบไร้อากาศ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดทดลองปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำใต้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงในขวดทดลองที่มีดิน แล้วใส่สารละลายริซาซูริน 0.0056% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่อากาศออกด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และทำการปิดฝาด้วยฝาจุกวาล์วเปิดปิด หมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก(สีแดง) แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น

ใส่สารฟอร์มาลีน 10% ปริมาตร 3 มิลลิลิตรและสารละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนตามที่ได้คำนวณไว้ ให้ความเข้มข้นในขวดเป็น 100 mg/L และ 2000 mg/L ตามลำดับ จากนั้นห่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสง และนำขวดทดลองที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ทำการเก็บแก๊สในขวด(Headspace)เพื่อวัดหาสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีอยู่ในขวดทดลองด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ตามแต่ละช่วงระยะเวลา คือ 30 นาที, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วันและ 120 วัน ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.7 แล้วทำการปรับเทียบกับ Calibration Curve



รูปที่ 3.7 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

3.5.2 การศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้น

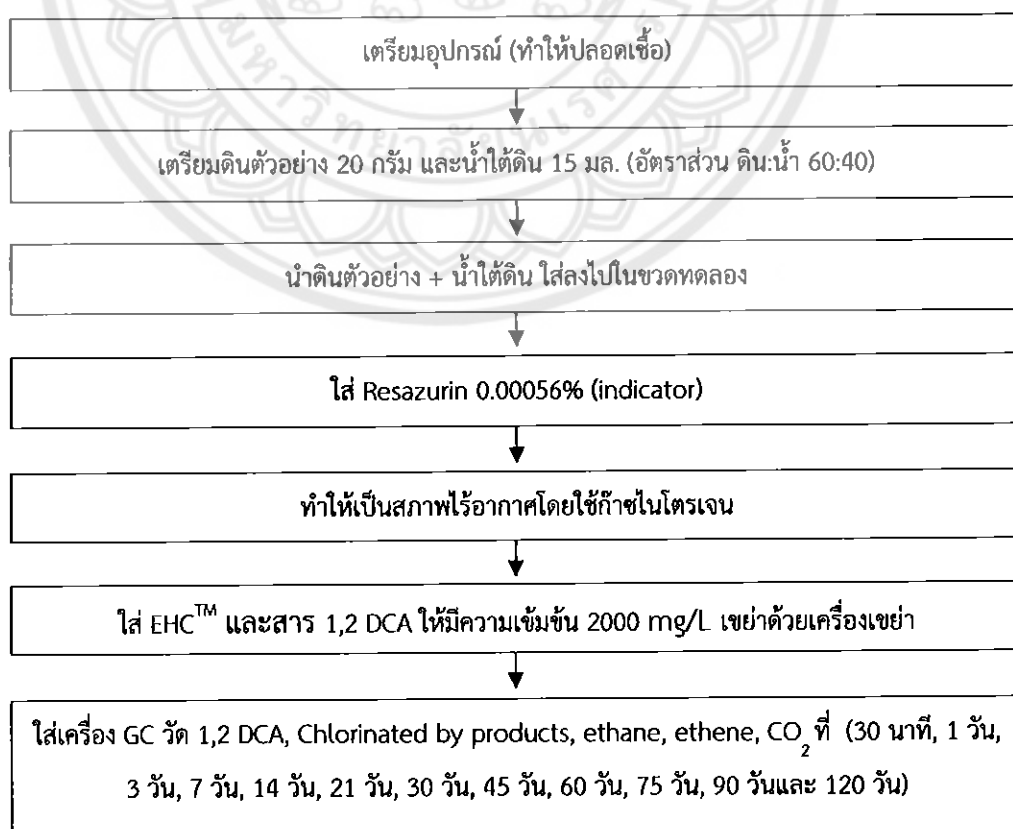
เพื่อประเมินการย่อยสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพแบบ กระตุ้น

3.5.2.1 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHCTM

ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดทดลองปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำใต้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงไปขวดทดลองที่มีดิน แล้วใส่สารละลายริซาซูริน 0.0056% ปริมาณ 1 มิลลิลิตรแล้วนำไปใส่ภาชนะออกด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และทำการปิดฝาด้วยฝาจุกแล้วเปิดปิด หมุนเกลียวเพื่อเปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง) แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น

ใส่ EHCTM ในปริมาณ 10 กรัม/ลิตร และสารละลาย 1, 2-ไดคลอโรอีเทนตามที่ได้คำนวณไว้ ให้ความเข้มข้นในขวดเป็น 2000 mg/L จากนั้นห่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสงและนำขวดทดลองที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แล้วไปแช่ด้วยเครื่องเขย่า

ทำการเก็บแก๊สในขวดเพื่อวัดหาสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีอยู่ในขวดทดลองด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ตามแต่ละช่วงระยะเวลา คือ 30 นาที, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วัน และ 120 วัน ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.8 แล้วทำการเปรียบเทียบกับ Calibration Curve



รูปที่ 3.8 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHCTM

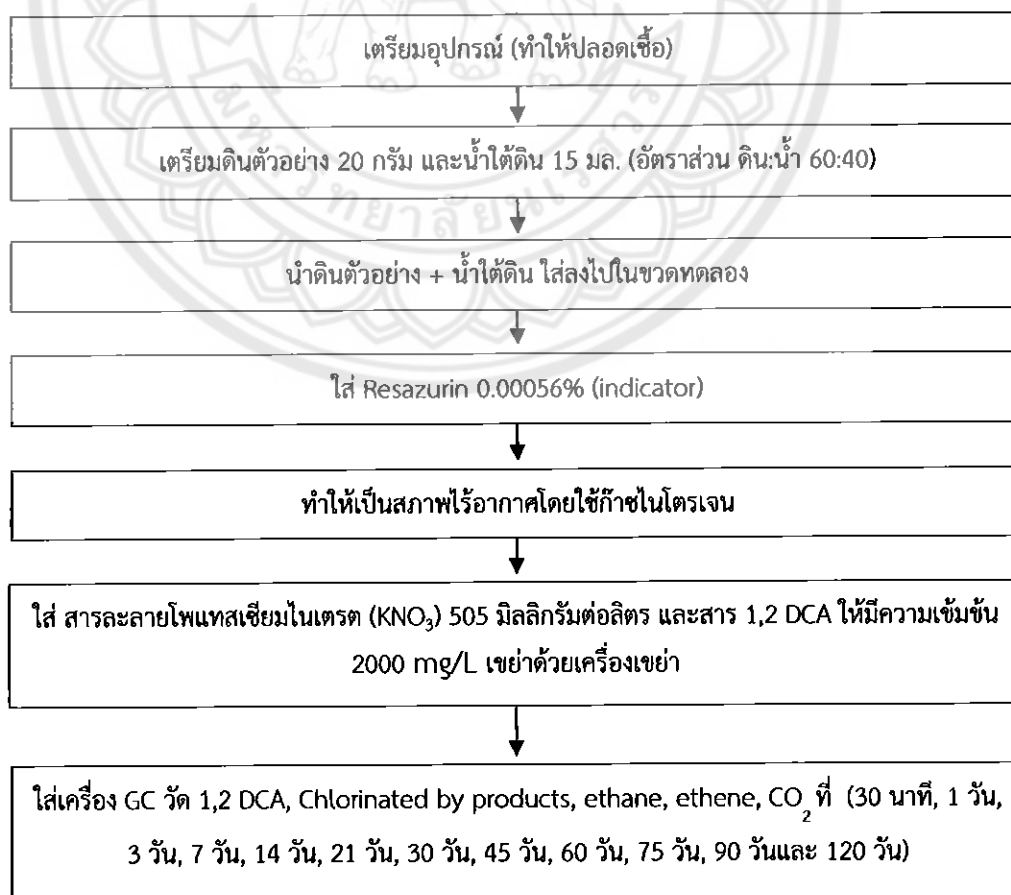
3.5.2.2 ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ โดยการใช้สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) 505 mg/L

ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยคือจุดที่ D3-17m จุดที่ D4-4m จุดที่ D4-13m จุดที่ D11-14m และจุดที่ D19-15m จากนั้นนำดินแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดทดลองปริมาณ 20 กรัม จากนั้นใส่น้ำใต้ดินในพื้นที่ ตามที่คำนวณไว้ลงไปลงในขวดทดลองที่มีดิน แล้วใส่สารละลายริซาซูริน 0.0056%

ปริมาณ 1 มิลลิลิตรแล้วนำไปใส่ภาชนะออกด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที และทำการปิดฝาด้วยฝาจุกวาล์วเปิดปิดหมุนเกลียวเพื่อปิดและเลื่อนฝาให้อยู่ในตำแหน่งล็อก (สีแดง)แล้วใช้พาราฟิล์มพันระหว่างขวดและฝาให้แน่น

ใส่ สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต(KNO_3) 505 mg/L และสารละลาย 1,2-ไดคลอโรอีเทนตามที่ได้คำนวณไว้ ให้ความเข้มข้นในขวดเป็น 2000 mg/L จากนั้นห่อขวดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปทางเคมีโดยใช้แสงและนำขวดทดลองที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ทำการเก็บแก๊สในขวดเพื่อวัดหาสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทนที่มีอยู่ในขวดทดลองด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ตามแต่ละช่วงระยะเวลา คือ 30 นาที, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วันและ 120 วัน ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.9 แล้วทำการเปรียบเทียบกับ Calibration Curve

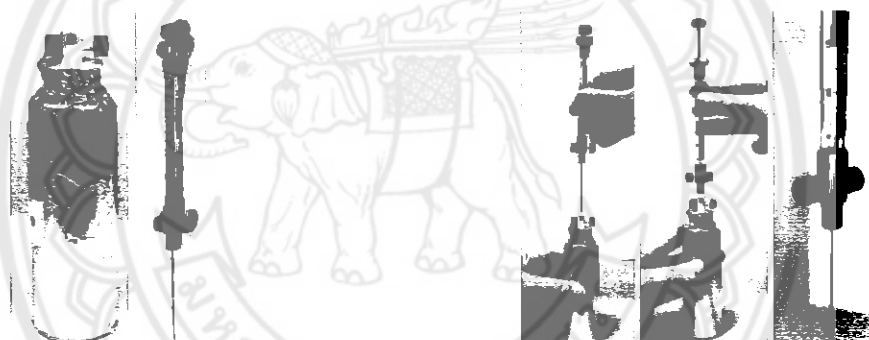


รูปที่ 3.9 การทดลองการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการฟื้นฟูด้วยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ KNO_3

3.6 วิธีการวัดค่าเพื่อหาปริมาณสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทน

การเก็บสารจากขวดทดลองด้วยเข็มเก็บแก๊สเพื่อนำไปตรวจวัดหาปริมาณของสาร 1,2 ไดคลอโรอีเทนที่เหลืออยู่ในขวดทดลอง ตามขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.10 ซึ่งการเก็บแก๊สสามารถทำได้ดังนี้

1. ใช้เข็มเก็บแก๊สดึงจากขวดทางด้านบนฝาวาล์วเปิดปิด โดยวาล์วของเข็มเก็บแก๊สจะอยู่ในตำแหน่งเปิด(สีเขียว)
2. เปิด ฝาวาล์วเปิดปิด ให้อยู่ในตำแหน่ง(สีเขียว) แล้วทำการเจาะเข็มเก็บแก๊สลงไปภายในขวด บริเวณที่ว่างของขวด
3. ทำการตรวจสอบเข็มก่อนทำการเก็บแก๊สตัวอย่างเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งอุดตันบริเวณปลายเข็มเก็บแก๊ส
4. ทำการเก็บแก๊สตัวอย่างในขวดปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วทำการปิดเข็ม(สีแดง)และดึงเข็มเก็บแก๊สออก และปิดฝาวาล์วเปิดปิด ให้อยู่ในตำแหน่ง(สีแดง)
5. นำเข็มเก็บแก๊สที่มีแก๊สอยู่ ไปวัดหาค่าด้วยเครื่องโคมาโทกราฟี
6. อ่านค่าจากกราฟและบันทึกผล



1. การเตรียมพร้อมขวดทดลองและเข็มเก็บแก๊สอยู่ในตำแหน่งเปิด (สีเขียว)

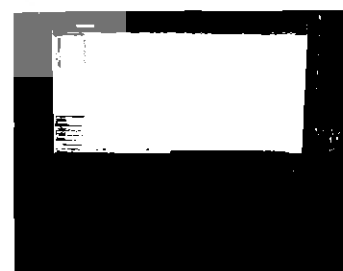
2. ทำการเก็บแก๊สภายในขวดปริมาตร 10 มล. และปิดวาล์วของเข็มเก็บแก๊ส



3. การปิดวาล์วของขวดทดลอง



4. การนำแก๊สไปวัดค่าด้วยเครื่องโคมาโทกราฟี



5. ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์

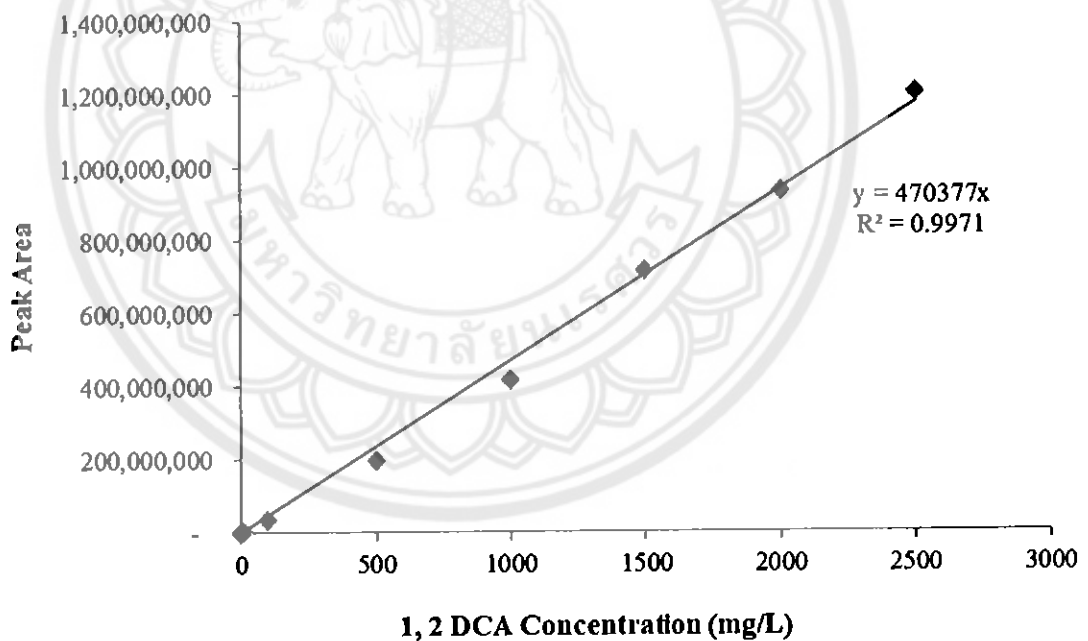
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเก็บแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยเครื่องโทมาโทกราฟี

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

บทนี้อธิบายผลการทดลองการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีการทางธรรมชาติ โดยเริ่มที่ผลการทำ Calibration Curve ของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (k_d) ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศ การศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นและการเปรียบเทียบข้อมูลจากสมการ Exponential Decay ตามลำดับ

4.1 Calibration Curve ของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน



รูปที่ 4.1 Calibration Curve

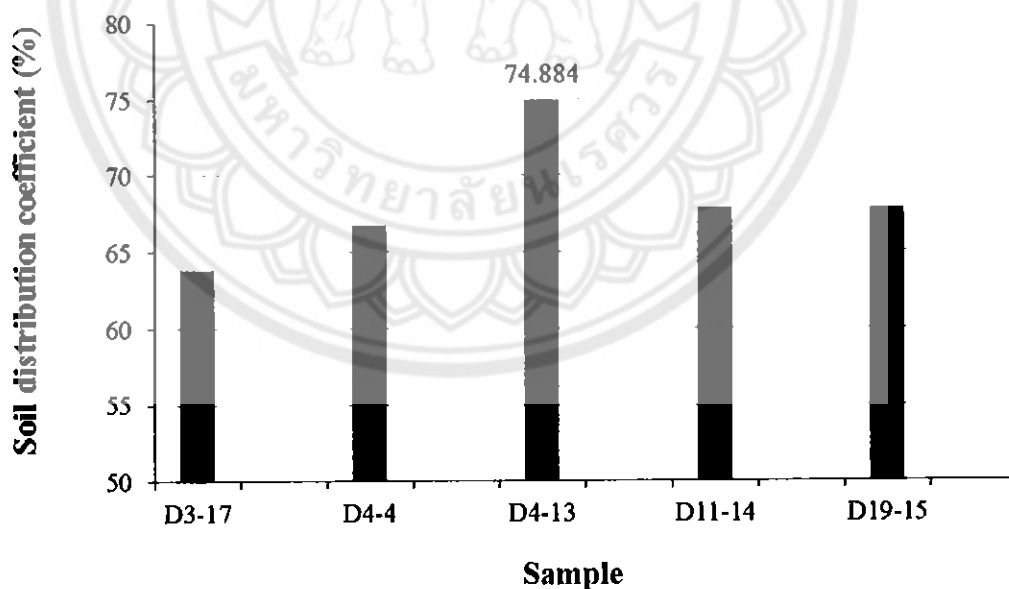
รูปที่ 4.1 แสดง Calibration Curve ของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (แกน X) และพื้นที่ของ Peak Area (แกน Y) ซึ่งได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ด้วยค่า $R^2 > 0.99$ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้ Calibration Curve ดังกล่าวเพื่อประมาณความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้

4.2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (Soil distribution coefficient, K_d)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินบอกถึงความสามารถของดินในการดูดซับสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (K_d)

Sample	1, 2 DCA in soil	Initial Concentration (mg/L)			Average (%)
		102.350	255.880	511.760	
D3-17	mg/kg	57.885	158.658	372.894	-
	%	56.555	62.004	72.864	63.808
D4-4	mg/kg	65.923	167.060	361.489	-
	%	64.409	65.288	70.636	66.778
D4-13	mg/kg	80.921	184.973	375.123	-
	%	79.062	72.289	73.300	74.884
D11-14	mg/kg	73.735	159.596	353.404	-
	%	72.042	62.371	69.056	67.823
D19-15	mg/kg	71.913	159.690	363.018	-
	%	70.261	62.408	70.935	67.868

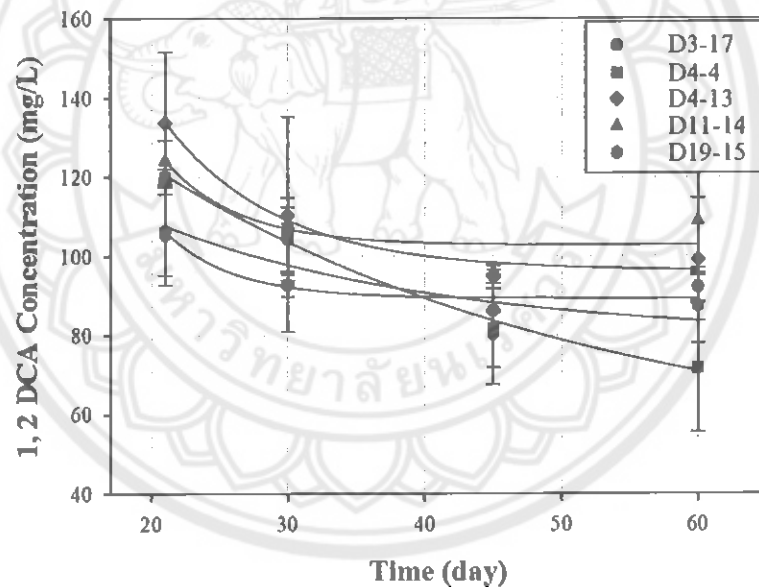


รูปที่ 4.2 แผนภูมิแท่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินของแต่ละตัวอย่าง (%)

จากแผนภูมิแท่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของ 1, 2 DCA ในดิน และน้ำ (soil Partitioning Coefficient (K_d)) ของแต่ละตัวอย่าง (รูปที่ 4.2) พบว่าตัวอย่างดิน D4-13m มีความสามารถในการดูดซับสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากที่สุดคิดเป็น 75% ซึ่งเป็นดินที่อยู่บริเวณแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (source zone) ทำให้มีการดูดซับสาร 1, 2 DCA โดยปกติอยู่แล้ว ทำให้นเมื่อนำดินดังกล่าวมาใช้ในการทดลองพบว่าสามารถดูดซับเพิ่มได้ง่ายขึ้นตามปรากฏการณ์ (Co-solvency Effect) จึงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนในที่นี้ รองลงมาเป็น D19-15m, D11-14m, D4-4m และ D3-17m ตามลำดับ

4.3 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

4.3.1 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L

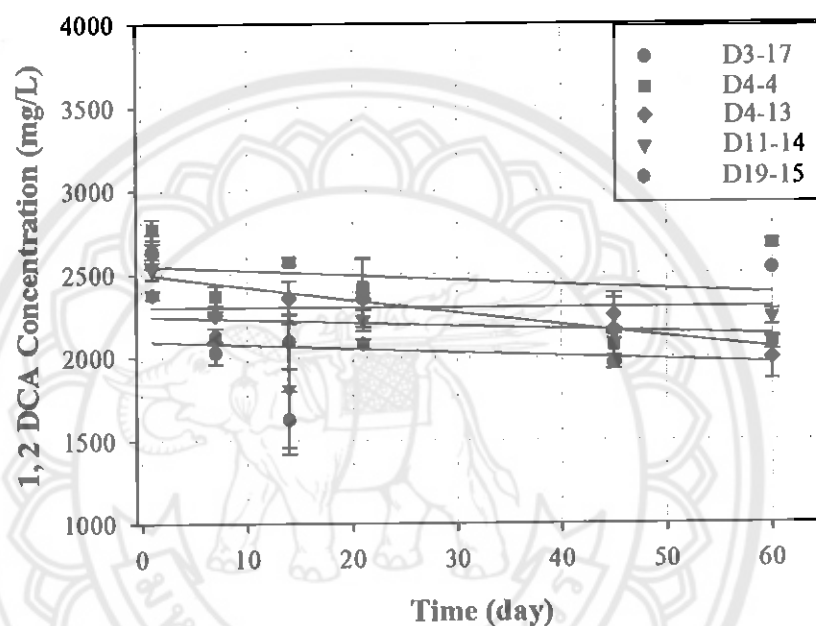


รูปที่ 4.3 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L

รูปที่ 4.3 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 100 mg/L ที่ปนเปื้อนในดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน และ 60 วัน โดยพบว่าหลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตามเวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-

13m, D11-14m, D19-15m) ตัวอย่าง D3-17m, D4-13m และ D11-14m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA อย่างรวดเร็วและจะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 7 วัน ซึ่งตัวอย่าง D4-13m, D11-14m และ D3-17m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง D4-4m และ D19-15m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ตัวอย่าง D4-4m และ D19-15m มีอัตราการสลาย 1,2-DCA เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.3.2 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

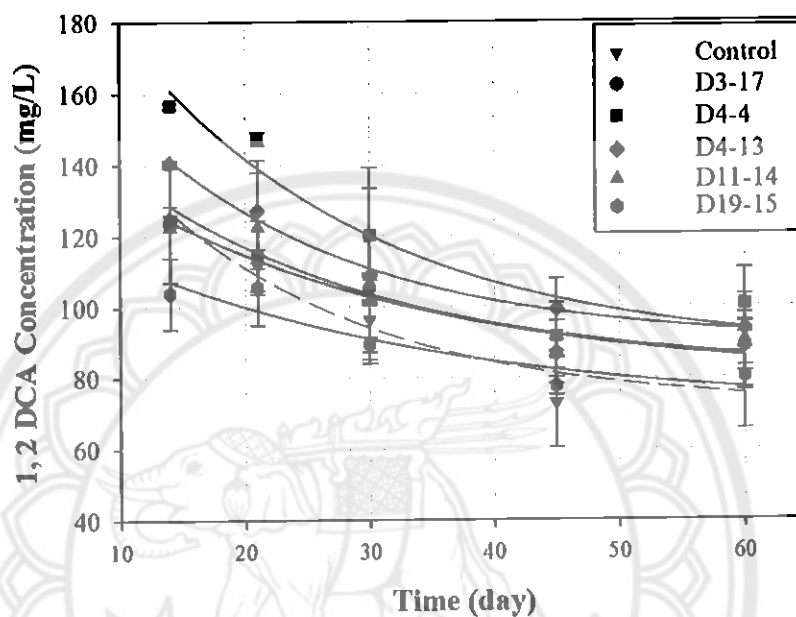


รูปที่ 4.4 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

รูปที่ 4.4 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 2000 mg/L ที่ปนเปื้อนในดินตัวอย่าง ทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน และ 60 วัน โดยพบว่า หลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตามเวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) มีอัตราการสลาย 1, 2-DCA น้อยมาก โดยตัวอย่าง D3-17m, D11-14m, D4-4m, D19-15m และ D4-13m มีอัตราการสลาย 1, 2 - DCA เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.4 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศ

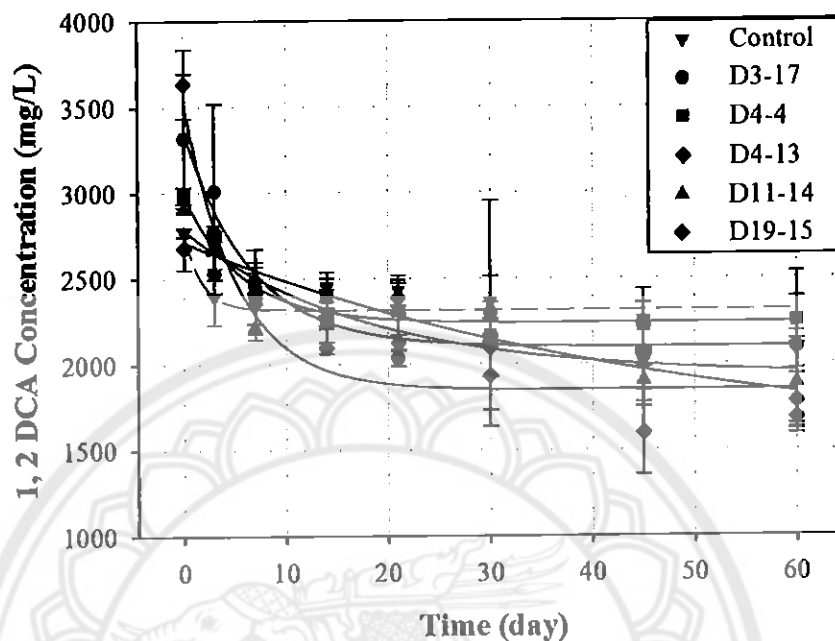
4.4.1 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L



รูปที่ 4.5 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L

รูปที่ 4.5 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 100 mg/L ที่ปนเปื้อนในดิน ตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน และ 60 วัน โดยพบว่าหลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตามเวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) มีอัตราการลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยตัวอย่าง D19-15m, D3-17m, D11-14m, D4-4m และ D4-13m มีอัตราการสลาย 1, 2-DCA เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.4.2 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย กระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

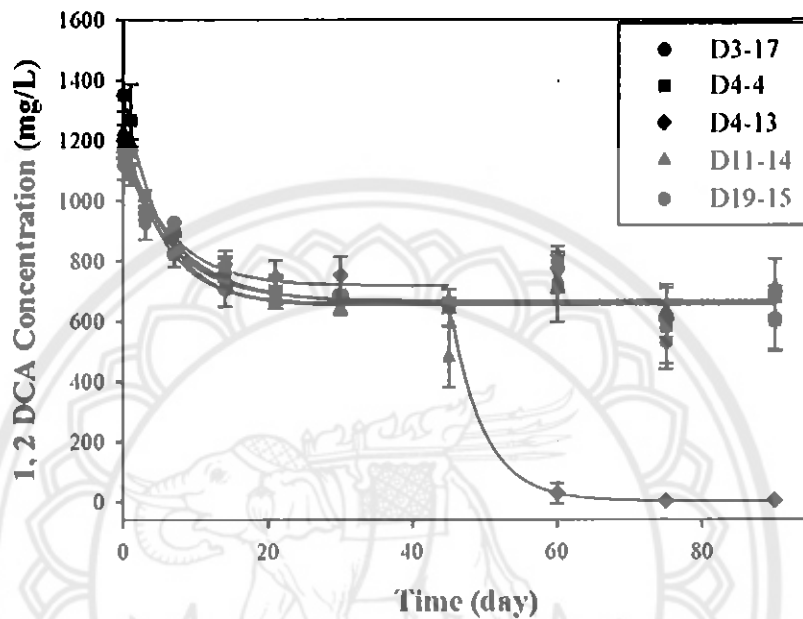


รูปที่ 4.6 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย กระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

รูปที่ 4.6 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย กระบวนการทางกายภาพเคมีแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 2000 mg/L ที่ปนเปื้อนในดิน ตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของ สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 30 นาที 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วัน และ 120 วัน โดยพบว่าหลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตาม เวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่าง 4 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m และ D11-14m) มีอัตราการ สลาย 1,2-DCA ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 14 วัน โดยตัวอย่าง D11-14m D3-17m D4-4m และ D4-13m มีอัตราการสลาย 1, 2-DCA เพิ่มขึ้นตามส่า ดับ และตัวอย่าง D19-15m มีอัตราการสลาย 1, 2-DCA ลดลงอย่างต่อเนื่อง

4.5 การศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นแบบไร้อากาศ

4.5.1 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHC™ ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

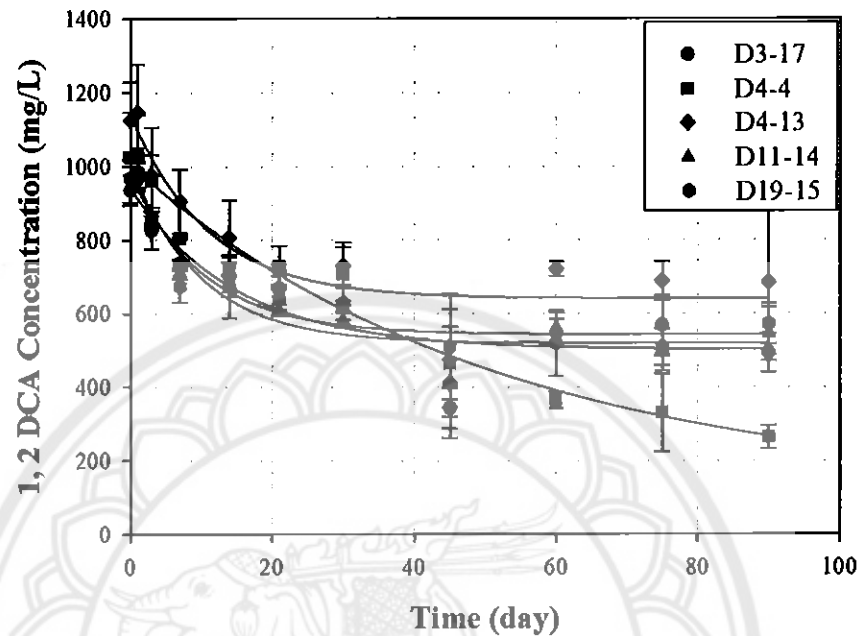


รูปที่ 4.7 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ EHC™ ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

รูปที่ 4.7 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC เป็นตัวกระตุ้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 2000 mg/L ที่ปนเปื้อนในดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 30 นาที 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วัน และ 120 วัน โดยพบว่าหลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตามเวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่าง 4 จุด (D3-17m, D4-4m, D11-14m และ D19-15m) มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 21 วัน โดยที่ตัวอย่าง D3-17m, D19-15m, D11-14m และ D4-4m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ในขณะที่ตัวอย่าง D4-13m นั้นแบ่งอัตราการสลาย 1, 2 DCA ออกเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกนั้น มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 21 - 45 วัน และช่วงที่สองเมื่อเวลาผ่านไป 45 วัน ค่าที่วัดได้นั้นมีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างมากและเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 60 วัน

4.5.2 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L



รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน โดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

รูปที่ 4.8 แสดงถึงศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3^- เป็นตัวกระตุ้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 2000 mg/L ที่ปนเปื้อนในดินตัวอย่างทั้ง 5 จุด (D3-17m, D4-4m, D4-13m, D11-14m, D19-15m) โดยศึกษาความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ตั้งแต่เวลา 30 นาที 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 21 วัน, 30 วัน, 45 วัน, 60 วัน, 75 วัน, 90 วัน และ 120 วัน โดยพบว่าหลังจากใส่สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน และเก็บวัดค่าตามเวลาที่กำหนดไว้พบว่า ดินตัวอย่าง 4 จุด (D3-17m, D4-13m, D11-14 และ D19-15m) มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 21 วัน โดยตัวอย่าง D3-17m, D4-13m, D19-15m และ D11-14m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA เพิ่มขึ้นตามลำดับ และตัวอย่าง D4-4m มีอัตราการสลาย 1, 2 DCA ลดลงอย่างต่อเนื่อง

4.6 การเปรียบเทียบข้อมูลจากสมการ Exponential Decay

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2 ไคคลอโรอีเทน (ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.8) มีลักษณะเป็นปฏิกิริยาแบบอันดับ 1 ซึ่งสามารถนำสมการ Exponential Decay มาใช้ในการอธิบายโดยสมการ Exponential Decay เป็นแบบสมการ 3 ตัวแปร ดังสมการ

$$C = C_L + C_0 e^{-(kt)} \quad \text{สมการที่ 4-1}$$

โดยค่า C หมายถึง ความเข้มข้นของสาร 1, 2-DCA ที่เวลาใดๆ หน่วย mg/L

C_L หมายถึง ค่าความเข้มข้นสาร 1, 2-DCA ที่สลายได้ต่ำสุด หน่วย mg/L

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร 1, 2-DCA หน่วย mg/L

k หมายถึง ค่าคงที่ของปฏิกิริยา หน่วย day^{-1}

t หมายถึง เวลาใดๆ หน่วย day

จะสังเกตได้ว่าจลนพลศาสตร์ของการสลาย 1,2-DCA ด้วยธรรมชาติบำบัดในงานวิจัยนี้ จะสลาย 1,2-DCA ที่อัตราการสลาย k ได้ถึงที่ค่าความเข้มข้นหนึ่งและปฏิกิริยาดูเหมือนจะหยุดที่ระดับ C_L ซึ่งมากกว่า 0 อย่างมีนัยสำคัญเป็นส่วนใหญ่ ลักษณะการสลายนี้แสดงว่าธรรมชาติบำบัดมีศักยภาพในการสลาย 1,2-DCA ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้นอาจเนื่องจากความไม่เอื้ออำนวยของปัจจัยตามธรรมชาติ ทำให้การประเมินศักยภาพการสลายตามธรรมชาติของ 1,2-DCA นั้นต้องพิจารณาทั้ง 1,2-DCA สลายได้ไวเท่าใด (พิจารณา ค่า k ยิ่งค่าสูงยิ่งดี) และ 1,2-DCA สลายได้มากที่สุดถึงระดับใด (พิจารณาค่า C_L ยิ่งค่าต่ำยิ่งดี)

ซึ่งรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 ได้แสดงการจำลองผลจลนพลศาสตร์ของการสลาย 1,2-DCA ในแต่ละกรณีด้วยสมการ 4-1 เป็นเส้นทึบสีต่างๆ ซึ่งค่า Goodness of the Fit (R) และ ค่าตัวแปรต่างๆตามสมการที่ 4-1 ได้ถูกสกัดออกมาและสรุปในตารางที่ 4.2 ถึง 4.5

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า R

Sample	Biotic 100 mg/L	Biotic 2000 mg/L	Abiotic 100 mg/L	Abiotic 2000 mg/L	EHC TM 2000 mg/L	NO ₃ 2000 mg/L
D3-17	0.9539	0	0.9767	0.9775	0.9583	0.9234
D4-4	0.9971	0.2498	0.9609	0.9768	0.9853	0.9831
D4-13	0.9882	0.8218	0.9964	0.9523	0.9821	0.9139
D11-14	0.8830	0.1790	0.9557	0.8802	0.9516	0.9692
D19-15	0.8557	0.2012	0.9335	0.9568	0.9431	0.9653

หมายเหตุ ผลการศึกษาคุณภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรเอเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใส่ EHCTM ตัวอย่างที่ D4-13m มีการเกิด Exponential Decay 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ที่เวลา 30 นาที - 45 วัน และช่วงที่ 2 ที่เวลา 45 วัน - 90 วัน

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_L

Sample	Biotic 100 mg/L	Biotic 2000 mg/L	Abiotic 100 mg/L	Abiotic 2000 mg/L	EHC TM 2000 mg/L	NO ₃ 2000 mg/L
D3-17	89.3209 ± 3.3733	-	78.7662± 14.1953	2099.3396± 65.3600	661.2764± 28.9332	501.7757± 46.9300
D4-4	48.6754± 20.9873	-	86.0580± 23.0761	2241.4654± 37.0580	658.5426± 20.8594	109.4586± 150.8047
D4-13	96.2066± 4.3753	-	89.2896± 4.0782	1849.5523± 118.0941	717.9243± 28.4954	641.0104± 49.3373
D11-14	102.7667± 7.2757	-	81.1192± 16.8020	1926.5519± 219.0914	651.5330± 32.8161	519.3019± 26.3443
D19-15	79.2657± 34.3020	-	70.0691± 23.3447	1450.1303± 654.1817	668.0954± 31.9059	542.2581± 25.7497

หมายเหตุ - ผลการศึกษาดัชนีคุณภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้อีเอชซีTM ตัวอย่างที่ D4-13m มีการเกิด Exponential Decay 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ที่เวลา 30 นาที - 45 วัน และช่วงที่ 2 ที่เวลา 45 วัน - 90 วัน

- การทดลอง Biotic 2000 mg/L เกิดสมการ Exponential Decay 2 ตัวแปร จึงไม่ปรากฏค่าที่สลายได้ต่ำสุด (C_L)

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า C_0

Sample	Biotic 100 mg/L	Biotic 2000 mg/L	Abiotic 100 mg/L	Abiotic 2000 mg/L	EHC TM 2000 mg/L	NO ₃ 2000 mg/L
D3-17	1065.7289± 4645.3772	2300.4867 ± 174.2610	79.6890± 79.6890	1263.8423± 123.2557	498.6760±53.6720	439.8137± 64.7369
D4-4	135.1405± 12.2279	2550.1841 ± 172.5661	148.5525± 55.0121	750.0422± 74.5400	698.7678±44.7709	895.2347± 140.0270
D4-13	467.2839± 512.7471	2501.2554 ± 86.5631	113.0081± 113.0081	1686.1115± 245.1984	484.3660 ±41.5000	500.7630± 78.8970
D11-14	988.1813± 6398.7554	2244.7371 ± 162.2148	90.5661± 33.1841	857.5530± 228.7124	575.1914±68.3147	485.4853± 78.8970
D19-15	77.5209± 140.9216	2096.4321 ± 170.8013	61.5949± 18.6773	1265.0634± 616.7138	481.7834±61.7018	433.7885± 41.6749

หมายเหตุ ผลการศึกษาคุณภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรเอทีเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ่นโดยการใช้อีเอชซีTM

ตัวอย่างที่ D4-13m มีการเกิด Exponential Decay 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ที่เวลา 30 นาที - 45 วัน และช่วงที่ 2 ที่เวลา 45 วัน - 90 วัน

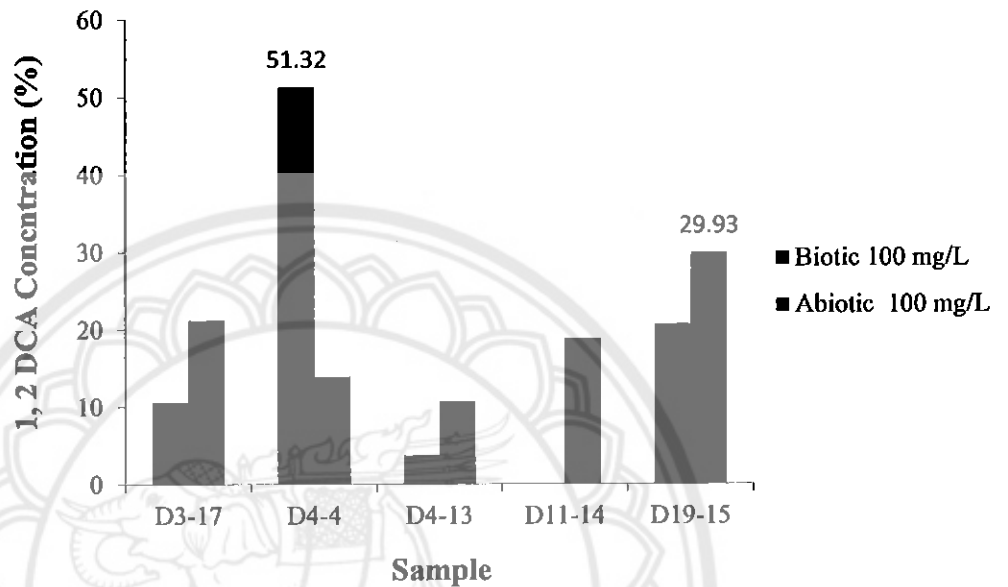
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า k

Sample	Biotic 100 mg/L	Biotic 2000 mg/L	Abiotic 100 mg/L	Abiotic 2000 mg/L	EHC TM 2000 mg/L	NO ₃ 2000 mg/L
D3-17	0.1968±0.2108	0.0000±0.0023	0.0399±0.0270	0.1526±0.0374	0.1298±0.0397	0.0664±0.0522
D4-4	0.0300±0.0150	0.0011±0.0021	0.0491±0.0373	0.1765±0.0434	0.1889±0.0336	0.0193±0.0065
D4-13	0.1197±0.0540	0.0033±0.0012	0.0553±0.0114	0.1913±0.0684	0.1578±0.0398	0.0909±0.0408
D11-14	0.1823±0.3136	0.0008±0.0023	0.0464±0.0393	0.0555±0.0415	0.1740±0.0578	0.1001±0.0258
D19-15	0.0477±0.1281	0.0011±0.0026	0.0360±0.0464	0.0199±0.0173	0.1440±0.0522	0.0935±0.0258

หมายเหตุ ผลการศึกษาคุณภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรเอเทนโดยวิธีชีวภาพแบบกระตุ้นโดยการใช้อีเอชซีTM ตัวอย่างที่ D4-13m มีการเกิด Exponential Decay 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ที่เวลา 30 นาที - 45 วัน และช่วงที่ 2 ที่เวลา 45 วัน - 90 วัน

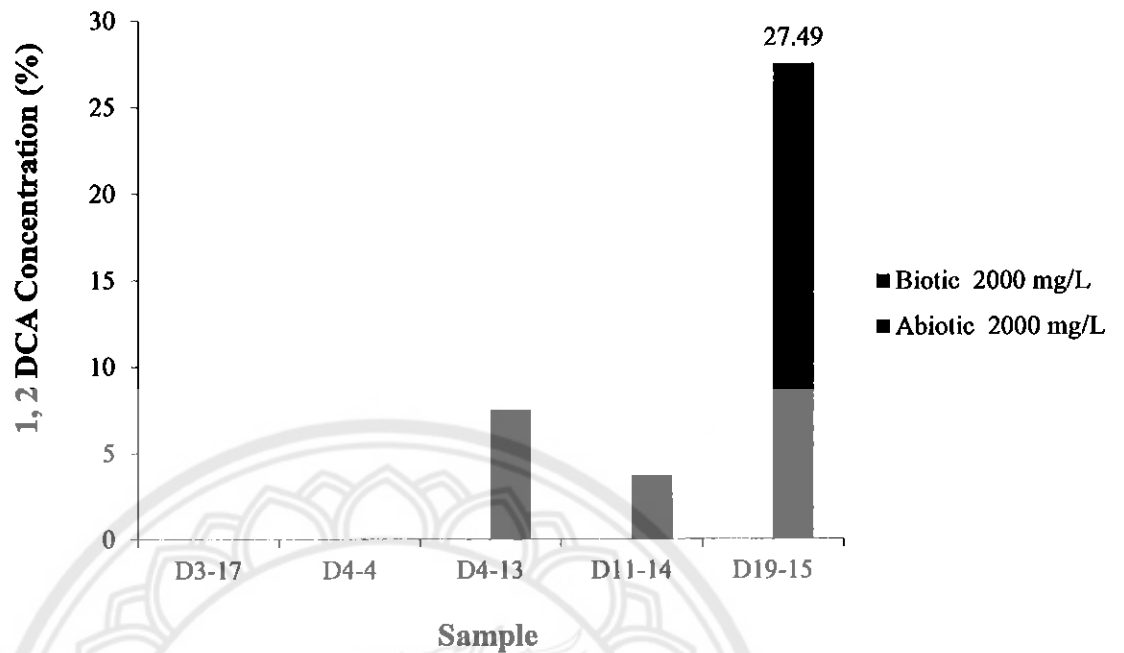
4.6.1 ผลการเปรียบเทียบการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (C_L)

จากตัวแปรที่ได้จากสมการ Exponential Decay แบบ 3 ตัวแปร สามารถนำมาใช้ในการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยจะทำการเปรียบเทียบจากค่าความเข้มข้นสารที่ถูกปรับให้เข้าสู่ระดับปกติ (C_L) ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนที่ยังไม่ถูกย่อยสลาย



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2 DCA ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L

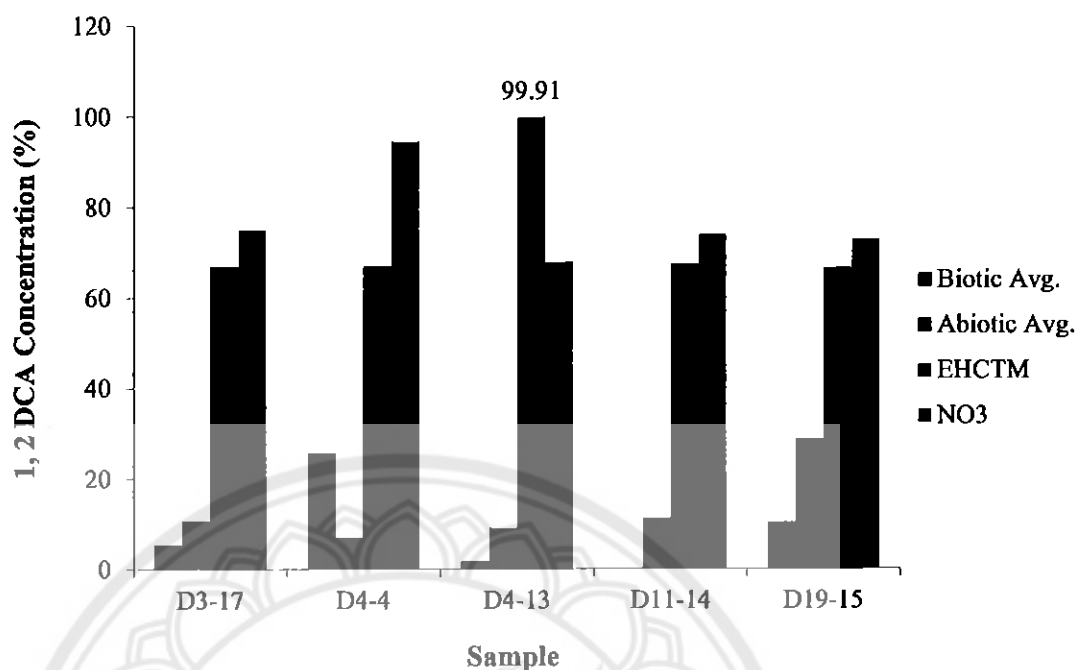
จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (แกน Y) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยวิธีทางธรรมชาติ พบว่ากระบวนการทางกายภาพเคมีสามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากกว่ากระบวนการทางชีวภาพเป็นส่วนใหญ่โดยตัวอย่างที่สามารถสลายสารได้มากที่สุดโดยกระบวนการกายภาพเคมีคือ D19-15m ซึ่งสามารถสลายสารได้ 29.93% เว้นแต่ตัวอย่างที่ D4-4m ที่กระบวนการทางธรรมชาติสามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากกว่ากระบวนการทางกายภาพเคมีที่สามารถสลายสารได้ 51.32%



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2-DCA ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2000 mg/L

จากรูป 4.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (แกน Y) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2000 mg/L โดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) พบว่ากระบวนการทางกายภาพเคมีสามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากกว่ากระบวนการทางชีวภาพที่ตัวอย่าง D4-13m, D11-14m และ D19-15m ซึ่งตัวอย่าง D19-15m สามารถสลายสารโดยกระบวนการกายภาพเคมีได้ดีกว่าตัวอย่างอื่น ๆ คิดเป็น 27.49% ในขณะที่กระบวนการทางชีวภาพไม่สามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้เลย และตัวอย่าง D3-17m และ D4-4m ไม่มีวิธีทางชีวภาพใดสามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้เลยที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

จากผลการทดลองความสามารถในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีทางชีวภาพที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และ 2000 mg/L พบว่าที่ความเข้มข้น 100 mg/L กระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางกายภาพเคมีสามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 2000 mg/L นอกจากนั้นแล้วกระบวนการทางกายภาพเคมีสามารถสลายสารได้ดีกว่ากระบวนการทางชีวภาพซึ่งแทบจะไม่ทำให้สารสลายตัวเลย



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสลายสาร 1, 2 DCA

รูปที่ 4.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และความเข้มข้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน (แกน Y) โดยที่แผนภูมิแต่ละสีจะบ่งบอกถึงการทดลองของแต่ละวิธี จะเห็นได้ว่าที่ตัวอย่าง D3-17m การทดลองโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น (Enhanced Biodegradation) โดยการกระตุ้นด้วย NO_3 สามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนสูงที่สุด 74.91% รองมาเป็นการกระตุ้นด้วย EHC^{TM} 66.94% ตามด้วยการทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) 10.62% และการทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) 5.34% ตามลำดับ เป็นไปในลักษณะเดียวกับผลการทดลองของตัวอย่างที่ D11-14m (คิดเป็น 74.03%, 67.43%, 11.27% และวิธีทางชีวภาพไม่สามารถทำให้สาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนสลายได้ตามลำดับ) และ D19-15m (คิดเป็น 72.89%, 66.60%, 28.71% และ 8.19% ตามลำดับ) ในขณะที่ตัวอย่างจากจุด D4 แตกต่างออกไป โดยที่ความลึกเป็น 4 เมตร (ตัวอย่าง D4-4m) ผลการทดลองปรากฏว่า การทดลองโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น (Enhanced Biodegradation) การกระตุ้นด้วยสาร NO_3 สามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนสูงที่สุด คิดเป็น 94.53% รองมาเป็นการกระตุ้นด้วย EHC^{TM} 67.07% ตามด้วยการทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) 25.66% และสุดท้ายการทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) 6.97% ตามลำดับ และที่ความลึก 13 เมตร (ตัวอย่าง D4-13m) ปรากฏว่า วิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของตัวอย่างนี้เป็นการทดลองโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น (Enhanced Biodegradation) การกระตุ้นด้วย EHC^{TM} 99.91% สามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนสูงที่สุดรองมาเป็นการกระตุ้นด้วยสาร NO_3 67.95% การทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) 9.12% และการ

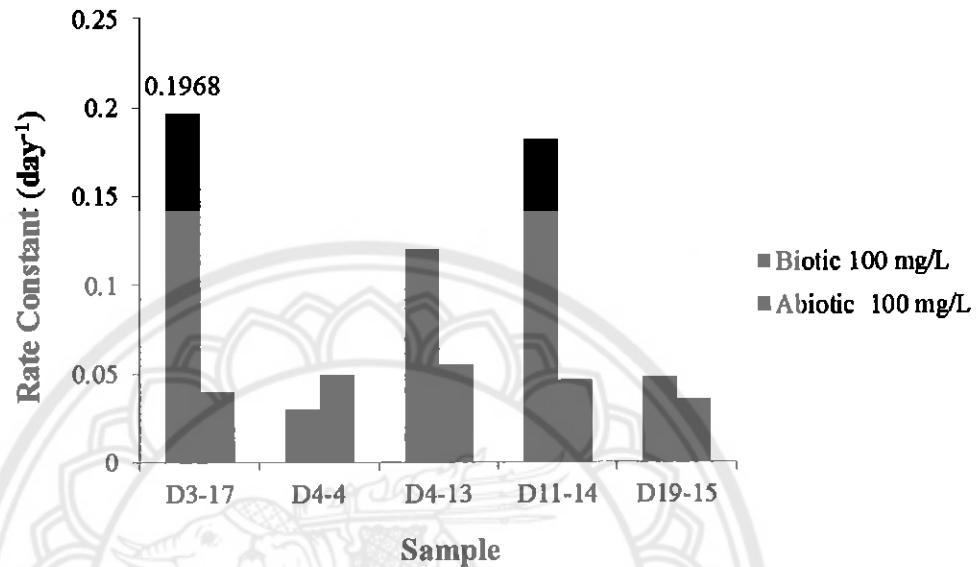
ทดลองโดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) 1.90% ตามลำดับ

ที่ความลึก 4 เมตร ผลการศึกษาศึกษภาพโดยวิธีทางชีวภาพ กระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) สามารถสลายสารได้มากกว่าดินที่ความลึกอื่นๆอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งจากผลการทดลองดินที่ความลึก 13 (D4-13m), 14 (D11-14m), 15 (D19-15m) และ 17 (D3-17m) เมตร การศึกษาศึกษภาพโดยวิธีทางชีวภาพ โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) สามารถสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากกว่า

ผลการศึกษาศึกษภาพโดยวิธีการทางชีวภาพแบบกระตุ้นที่ความลึก 4 (D4-4m), 14 (D11-14m), 15 (D19-15m) และ 17 (D3-17m) เมตร การกระตุ้นด้วย NO_3 ทำให้เกิดการสลายตัวของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนมากกว่าการกระตุ้นด้วย EHC^{TM} เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นที่ความลึก 13 เมตร ของจุด D-4 (รูปที่ 4.6 และ 4.11) การกระตุ้นด้วย EHC^{TM} ทำให้เกิดการสลายตัวของสารมากกว่าการกระตุ้นด้วย NO_3 อย่างมีนัยสำคัญและเป็นการทดลองที่สลาย 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้มากที่สุดด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าในบริเวณดังกล่าวที่ระดับความลึกนั้นเป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อนสูงสุดด้วยเป็นระดับที่มีแหล่งกำเนิดประเภท Dense-nonaqueous Phase Liquid (DNAPL) ของ 1, 2-ไดคลอโรอีเทนอยู่ ทำให้จุลชีพอาจปรับตัวได้ดีกว่าและอาจจะมีจุลชีพที่สามารถสลาย 1, 2-ไดคลอโรอีเทนอยู่มากกว่า การเติมสาร EHC เพื่อปรับสภาวะให้เหมาะสมต่อการสลาย 1, 2-ไดคลอโรอีเทนจึงช่วยสลาย 1, 2-ไดคลอโรอีเทนในกรณีนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญ

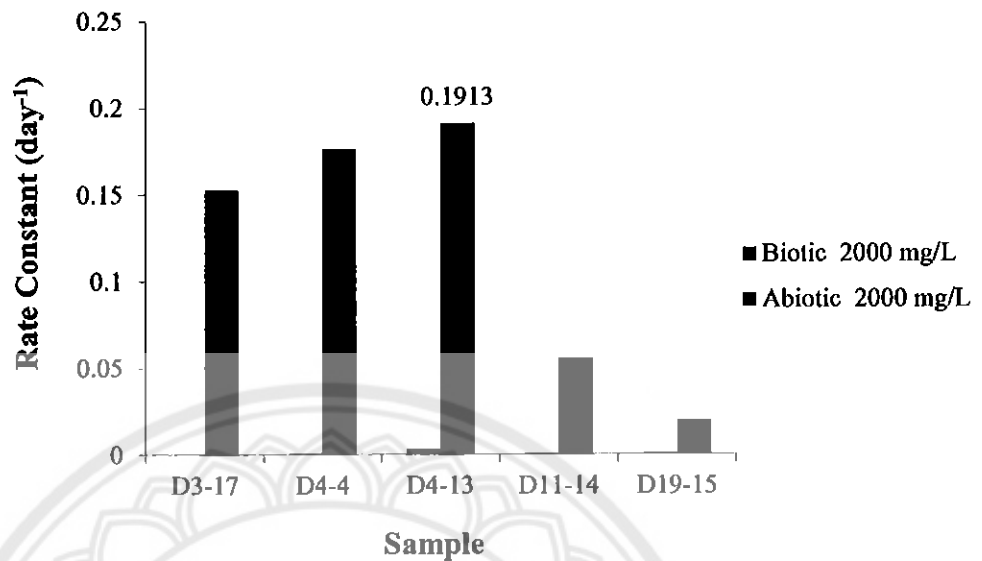
4.6.2 ผลการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k)

จากตัวแปรที่ได้จากสมการ Exponential Decay แบบ 2 และ 3 ตัวแปร สามารถนำมาใช้ในการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยจะทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k) ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกถึงอัตราเร็วการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น 100 mg/L

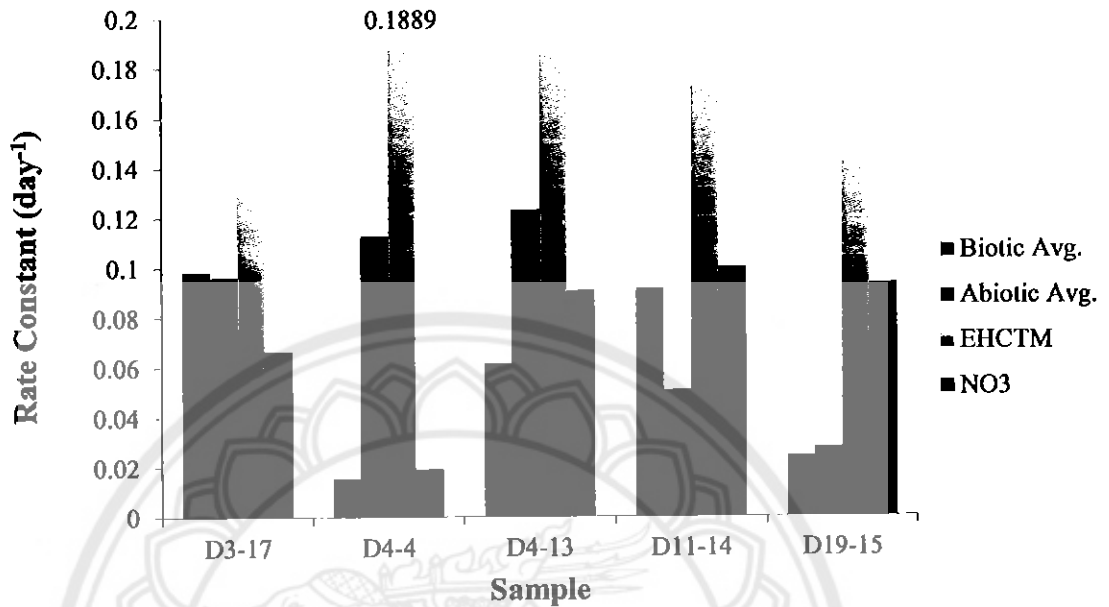
จากรูป 4.12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (แกน Y) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) พบว่ากระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) มีอัตราการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเร็วกว่ากระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นตัวอย่าง D4-4m ที่ผลปรากฏว่ากระบวนการทางกายภาพเคมี อัตราการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเร็วกว่ากระบวนการทางชีวภาพ โดยตัวอย่าง D3-17m เกิดการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยกระบวนการชีวภาพได้เร็วที่สุด (เมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น) โดยที่ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.1968 day⁻¹



รูปที่ 4.13 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L

จากรูป 4.13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (แกน Y) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2000 mg/L โดยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradation) พบว่ากระบวนการทางกายภาพเคมีมีอัตราการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเร็วกว่ากระบวนการทางชีวภาพ อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยตัวอย่าง D4-13m มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าตัวอย่างจากจุดอื่น ซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1913 day^{-1}

จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองโดยวิธีทางชีวภาพ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเป็น 100 mg/L และที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ให้ผลที่แตกต่างกัน โดยผลการทดลองที่ความเข้มข้น 100 mg/L ให้ผลว่ากระบวนการทางชีวภาพมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่ากระบวนการทางกายภาพเคมี ในขณะที่ผลการทดลองที่ความเข้มข้น 2000mg/L กระบวนการทางกายภาพเคมีมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่ากระบวนการทางชีวภาพ ด้วยเหตุนี้ จึงคาดว่าแบคทีเรียมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนที่ความเข้มข้นต่ำ (100 mg/L) ซึ่งความสามารถของแบคทีเรียเหล่านี้จะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่ความเข้มข้นสูง (2000 mg/L)



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

จากรูป 4.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง (แกน X) และ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (แกน Y) โดยที่แผนภูมิแต่ละสีจะบ่งบอกถึงการทดลองของแต่ละวิธี จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง D3-17m การกระตุ้นด้วย EHCTM มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด รองมาเป็นกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพเคมี และการกระตุ้นด้วย NO₃ ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่าง D4-4m และ D4-13m การทดลองที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด คือ การกระตุ้นด้วย EHCTM โดยที่ตัวอย่าง D4-4m มีอัตราการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้เร็วที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.1889 day⁻¹ รองลงมาเป็น กระบวนการทางกายภาพเคมี การกระตุ้นด้วย NO₃ และกระบวนการทางชีวภาพตามลำดับ ในขณะที่ ตัวอย่าง D11-14m และ D19-15m การกระตุ้นด้วย EHCTM มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด รองมา ได้แก่การกระตุ้นด้วย NO₃ ซึ่งตัวอย่างที่ D11-14m จะตามมาด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และการทดลองที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดของตัวอย่างดินนี้ได้แก่กระบวนการทางกายภาพเคมี สำหรับตัวอย่าง D19-15m การทดลองที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยารองลงมาจากการกระตุ้นด้วย NO₃ คือกระบวนการทางกายภาพเคมี และการทดลองที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุดคือกระบวนการทางชีวภาพ

จะเห็นได้ในทุกชุดการทดลองว่าการทดลองโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น โดยการกระตุ้นด้วย EHCTM มีอัตราสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนเร็วที่สุด จึงคาดว่าสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอาจมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัด (Biodegradation) โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ แบบกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้เพียง 8.65% แบบกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 13.34% การประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น (Enhance Biodegradation) ด้วย EHCTM สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 74% และแบบการกระตุ้นด้วย NO₃ สามารถย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนได้ 77% หากทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัด (Biodegradation) และการประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น (Enhance Biodegradation) การสลายโดยวิธีธรรมชาติบำบัดทั้งแบบกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) และแบบกระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) มีค่าเฉลี่ยการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนอยู่ที่ 11% การประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น (Enhance Biodegradation) ทั้งแบบการกระตุ้นด้วย EHCTM และการกระตุ้นด้วย NO₃ มีค่าเฉลี่ยการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนอยู่ที่ 75%

ดังนั้นการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น (Enhance Biodegradation) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีทางธรรมชาติบำบัดที่อาศัยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) ถึง 5.84 เท่า โดยการกระตุ้นด้วย NO₃ มีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามด้วยการกระตุ้นด้วย EHCTM กระบวนการทางกายภาพเคมี (Abiotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) และกระบวนการทางชีวภาพ แบบกระบวนการทางชีวภาพ (Biotic) แบบไร้อากาศ (Anaerobic) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน 1, 2-ไดคลอโรอีเทน การกระตุ้นด้วย EHCTM จะมียุทธศาสตร์ประสิทธิภาพว่าการกระตุ้นด้วย NO₃ อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาศักยภาพการบำบัดสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดเพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น หากต้องการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงควรยืดระยะเวลาการศึกษาให้เพิ่มขึ้น
2. ควรมีการต่อยอดศึกษาเพิ่มเติมเรื่องการกระจายตัวของสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนและระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนแต่ละวิธีการทดลอง (การประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดและกาประเมินการย่อยสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทนโดยวิธีธรรมชาติบำบัดแบบกระตุ้น)
3. ในการนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริง จะมีความแตกต่างของสภาวะต่างๆ อาจต้องมีการนำดินจากพื้นที่จริงมาใช้ในการทดลอง



เอกสารอ้างอิง

G.M. Klec̃ka), C.L. Carpenter, S.J. Gonsior. *Biolo* (1998). Biological transformations of 1,2- dichloroethane in subsurface soils and groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* 34 139–154.



ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐานและตัวอย่างการคำนวณ

1. กราฟมาตรฐานไดคลอโรอีเทน

เตรียมไดคลอโรอีเทนที่ความเข้มข้นต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง
gastrochromatography (GC) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ(peak area) ที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก1

ตารางที่ ก1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area) ที่ความเข้มข้นไดคลอโรอีเทนต่างๆ

Conc. mg/L	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)		เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
0.0005	11,449	14,026	12,738
0.005	49,928	43,428	46,678
0.1	179,548	250,598	215,073
10	5,861,170	4,490,069	5,175,620
100	35,280,535	35,144,748	35,212,642
500	181,265,612	213,679,381	197,472,497
1000	392,359,273	442,595,892	417,477,583
1500	693,734,880	742,534,627	718,134,754
2000	928,749,760	938,240,968	933,495,364
2500	1,300,778,040	1,105,982,694	1,203,380,367

นำค่าที่ได้มาลงจุดในกราฟระหว่างความเข้มข้นไดคลอโรอีเทน (mg/L) กับค่าพื้นที่ใต้กราฟ
เพื่อหาความสัมพันธ์ และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณไดคลอโรอีเทนในตัวอย่างอื่นๆต่อไป

จาก รูปที่ 4.1 Calibration Curve ได้สมการ

$$y = 320126x$$

โดย $y =$ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)

$X =$ ค่าความเข้มข้นไดคลอโรอีเทน

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

ตารางที่ ข1 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	139.224	98.547	118.885	28.763
1	53.447	42.081	47.764	8.037
3	107.511	125.614	116.562	12.801
7	119.275	106.695	112.985	8.895
21	98.511	114.213	106.362	11.103
30	94.665	90.641	92.653	2.846
45	85.953	86.380	86.167	0.301
60	94.830	89.677	92.254	3.643

ตารางที่ ข2 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	59.697	46.399	53.048	9.404
1	20.741	32.466	26.604	8.291
3	95.441	132.163	113.802	25.967
7	129.507	117.899	123.703	8.208
21	118.416	121.385	119.901	2.099
30	112.145	98.889	105.517	9.373
45	74.742	88.831	81.786	9.962
60	60.281	83.318	71.799	16.289

ตารางที่ ข3 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

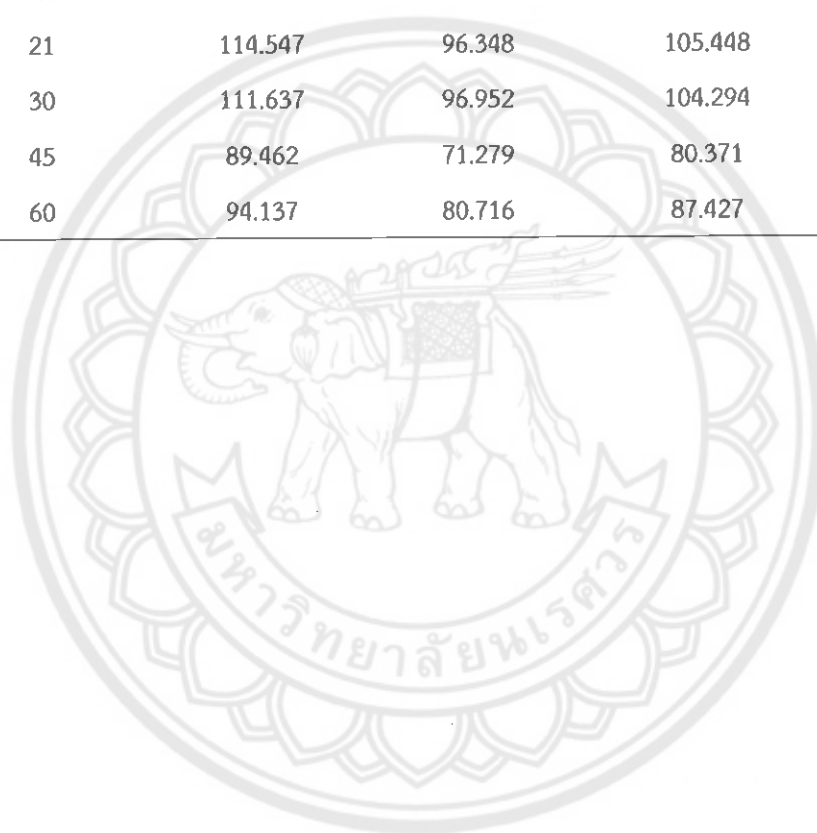
Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	55.213	48.942	52.078	4.434
1	29.300	32.441	30.871	2.221
3	68.457	93.688	81.072	17.842
7	115.012	104.234	109.623	7.621
21	121.092	146.443	133.768	17.925
30	111.833	108.914	110.374	2.064
45	96.867	92.598	94.732	3.019
60	88.111	110.173	99.142	15.600

ตารางที่ ข4 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	45.423	51.419	48.421	4.239
1	29.163	26.352	27.757	1.988
3	103.617	110.285	106.951	4.715
7	97.645	105.691	101.668	5.689
21	127.770	120.487	124.129	5.149
30	88.847	127.241	108.044	27.149
45	96.415	95.550	95.982	0.612
60	99.206	118.514	108.860	13.653

ตารางที่ ข5 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	43.642	40.498	42.070	2.223
1	23.058	30.425	26.742	5.209
3	69.883	79.795	74.839	7.009
7	85.181	106.518	95.850	15.088
21	114.547	96.348	105.448	12.869
30	111.637	96.952	104.294	10.384
45	89.462	71.279	80.371	12.857
60	94.137	80.716	87.427	9.490



ตารางที่ ข6 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	3829.363	4271.842	4050.603	312.880
1	2565.696	2712.188	2638.942	103.585
3	148.376	218.904	183.640	49.871
7	1980.128	2076.415	2028.271	68.085
14	1981.797	2208.634	2095.216	160.398
21	2348.300	2356.927	2352.613	6.100
30	2021.302	2520.546	2270.924	353.019
45	1993.921	2319.780	2156.851	230.417
60	2531.027	2531.027	2531.027	0.000
75	2565.330	2250.348	2407.839	222.726

ตารางที่ ข7 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	4233.782	4589.598	4411.690	251.600
1	2727.699	2815.022	2771.361	61.747
3	243.998	283.647	263.822	28.036
7	2326.813	2411.953	2369.383	60.203
14	2559.022	2591.574	2575.298	23.018
21	2540.419	2298.988	2419.703	170.717
30	2982.872	2941.110	2961.991	29.530
45	2119.507	2027.810	2073.658	64.839
60	2694.084	2659.159	2676.621	24.696
75	2361.862	1943.004	2152.433	296.178

ตารางที่ ข8 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	3317.060	4005.680	3661.370	486.928
1	2589.401	2668.656	2629.029	56.042
3	139.314	1384.604	761.959	880.553
7	2238.467	2270.643	2254.555	22.752
14	2428.623	2290.668	2359.646	97.549
21	2240.222	2537.055	2388.638	209.893
30	2762.532	2593.778	2678.155	119.327
45	2321.592	2179.157	2250.374	100.717
60	2085.189	1900.511	1992.850	130.587
75	1959.550	1685.636	1822.593	193.687

ตารางที่ ข9 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	3633.752	3113.498	3373.625	367.875
1	2576.304	2488.716	2532.510	61.934
3	83.790	95.586	89.688	8.341
7	2164.997	2163.478	2164.237	1.074
14	1534.425	2088.124	1811.274	391.524
21	2175.440	2263.647	2219.543	62.372
30	2878.802	3620.534	3249.668	524.484
45	2117.953	2160.238	2139.096	29.900
60	2203.295	2270.218	2236.757	47.322
75	1859.875	2586.141	2223.008	513.548

ตารางที่ ข10 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	4108.868	3309.762	3709.315	565.053
1	2394.207	2360.525	2377.366	23.817
3	119.469	34.009	76.739	60.430
7	2092.964	2161.620	2127.292	48.547
14	1507.493	1747.541	1627.517	169.740
21	2101.718	2058.675	2080.197	30.436
30	2628.542	2670.128	2649.335	29.406
45	1967.895	1957.147	1962.521	7.600
60	2102.499	2050.644	2076.572	36.667
75	2018.940	1735.400	1877.170	200.494

2. ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศ

ตารางที่ ข11 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ชุดควบคุม

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	125.047	136.845	130.946	8.343
1	125.047	136.845	130.946	8.343
3	95.953	93.150	94.552	1.982
14	127.437	122.650	125.044	3.385
21	111.271	112.305	111.788	0.732
30	88.453	104.228	96.340	11.155
45	63.898	81.636	72.767	12.543
60	70.040	91.063	80.551	14.866

ตารางที่ ข12 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	136.213	140.106	138.159	2.753
1	117.109	114.028	115.569	2.179
3	109.909	107.352	108.631	1.808
14	134.541	111.727	123.134	16.132
21	107.539	121.513	114.526	9.881
30	102.457	108.301	105.379	4.132
45	86.009	87.120	86.564	0.786
60	93.761	83.830	88.795	7.022

ตารางที่ ข13 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	139.54	132.121	139.544	5.249
1	110.58	102.124	110.575	5.976
3	109.482	108.697	109.089	0.555
14	157.188	156.055	156.621	0.801
21	148.579	146.043	147.311	1.793
30	133.504	106.540	120.022	19.067
45	85.099	98.194	91.647	9.260
60	98.695	102.568	100.632	2.739

ตารางที่ ข14 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	130.268	128.051	129.160	1.567
1	119.482	118.483	118.982	0.706
3	105.969	101.192	103.581	3.378
14	141.151	140.052	140.601	0.777
21	134.674	119.416	127.045	10.789
30	126.119	91.188	108.653	24.700
45	105.191	93.028	99.110	8.600
60	105.675	81.437	93.556	17.139

ตารางที่ ข15 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	131.214	116.144	123.679	10.656
1	119.267	107.557	113.412	8.280
3	108.640	99.421	104.030	6.518
14	124.641	125.602	125.121	0.680
21	135.845	109.137	122.491	18.885
30	101.766	100.808	101.287	0.677
45	80.813	93.359	87.086	8.871
60	88.926	91.812	90.369	2.041

ตารางที่ ข16 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 100 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	115.971	120.555	118.263	3.241
1	107.679	109.343	108.511	1.177
3	95.951	93.070	94.511	2.037
14	111.047	96.872	103.959	10.023
21	113.143	98.071	105.607	10.658
30	87.872	90.873	89.373	2.122
45	79.373	75.738	77.555	2.570
60	82.220	77.922	80.071	3.040

ตารางที่ ข17 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ชุดควบคุม

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	2789.839	2752.270	2771.054	26.565
1	688.831	359.631	524.231	232.780
3	2512.110	2276.905	2394.508	166.315
7	2477.191	2200.678	2338.934	195.524
14	2511.606	2389.603	2450.604	86.269
21	2492.284	2369.908	2431.096	86.533
30	2362.066	2358.971	2360.519	2.189
45	2383.374	2130.365	2256.870	178.905
60	2155.621	2001.492	2078.556	108.985
75	2863.610	1912.659	2388.135	672.424

ตารางที่ ข18 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	3048.709	3586.095	3317.402	379.989
1	534.555	504.279	519.417	21.408
3	2646.340	3371.232	3008.786	512.576
7	2304.020	2610.467	2457.244	216.691
14	2222.547	2300.357	2261.452	55.020
21	2000.065	2071.302	2035.684	50.372
30	1829.752	2761.815	2295.784	659.068
45	1997.574	2073.615	2035.594	53.770
60	1779.497	2404.477	2091.987	441.928
75	1774.452	3499.891	2637.171	1220.070

ตารางที่ ข19 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	2,987.18	3052.908	2987.180	46.476
1	237.94	326.405	237.937	62.556
3	2,714.15	2650.484	2714.149	45.018
7	2,373.61	2397.644	2373.614	16.992
14	2470.857	2315.150	2393.004	110.101
21	2330.074	2296.453	2313.264	23.774
30	2161.347	2174.095	2167.721	9.014
45	2215.460	2234.558	2225.009	13.504
60	2347.275	2154.052	2250.664	136.629
75	2518.011	2176.884	2347.448	241.214

ตารางที่ ข20 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	3776.001	3493.161	3634.581	199.997
1	175.281	218.256	196.769	30.388
3	2450.357	2611.671	2531.014	114.066
7	2545.038	2287.924	2416.481	181.808
14	2117.510	2072.448	2094.979	31.863
21	2090.750	2156.419	2123.585	46.435
30	2074.594	1792.657	1933.625	199.360
45	1772.352	1426.042	1599.197	244.879
60	1752.060	1620.745	1686.403	92.854
75	1852.020	1454.003	1653.012	281.440

ตารางที่ ข21 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	2894.393	2912.760	2903.576	12.988
1	1797.809	1396.002	1596.906	284.120
3	2666.067	2714.048	2690.058	33.927
7	2235.039	2190.875	2212.957	31.229
14	2382.361	2140.763	2261.562	170.835
21	2443.607	2213.789	2328.698	162.506
30	2457.615	2184.448	2321.032	193.158
45	1795.161	2007.311	1901.236	150.012
60	2066.123	1699.453	1882.788	259.274
75	2648.650	1784.181	2216.415	611.272

ตารางที่ ข22 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วย
กระบวนการทางกายภาพแบบไร้อากาศที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	2762.145	2591.575	2676.860	120.612
1	205.967	149.265	177.616	40.095
3	2750.017	2802.474	2776.246	37.093
7	2545.368	2435.892	2490.630	77.411
14	2313.289	2242.280	2277.784	50.211
21	2447.592	2321.938	2384.765	88.850
30	2212.402	1974.403	2093.403	168.290
45	2270.128	1861.652	2065.890	288.836
60	1890.926	1667.238	1779.082	158.172
75	2382.984	1753.965	2068.474	444.784

3. ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้นแบบไร้อากาศโดยใช้ EHC

ตารางที่ ข23 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1150.321	1192.317	1171.319	29.696
1	1065.261	1116.037	1090.649	35.904
3	963.141	962.217	962.679	0.653
7	927.817	929.708	928.763	1.337
14	665.391	746.966	706.179	57.682
21	669.098	668.753	668.925	0.244
30	684.587	688.913	686.750	3.058
45	603.393	689.442	646.418	60.846
60	781.504	813.743	797.624	22.797
75	603.906	611.490	607.698	5.363
90	530.286	683.238	606.762	108.153

ตารางที่ ข24 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1350.151	1351.785	1350.968	1.155
1	1181.106	1352.577	1266.841	121.248
3	1031.340	1006.535	1018.937	17.539
7	826.104	821.652	823.878	3.148
14	797.230	742.098	769.664	38.984
21	741.297	661.092	701.195	56.713
30	695.030	682.741	688.885	8.690
45	663.649	633.803	648.726	21.104
60	631.703	796.943	714.323	116.843
75	671.765	494.095	582.930	125.632
90	667.426	533.148	600.287	94.949

ตารางที่ ข25 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1162.162	1238.292	1200.227	53.832
1	1159.027	1176.981	1168.004	12.696
3	971.760	941.337	956.548	21.513
7	886.747	906.077	896.412	13.668
14	810.442	771.957	791.200	27.213
21	786.117	706.659	746.388	56.185
30	707.911	797.557	752.734	63.389
45	657.974	674.446	666.210	11.648
60	52.867	3.824	28.345	34.678
75	2.336	0.966	1.651	0.969
90	4.463	1.724	3.093	1.937

ตารางที่ ข26 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1181.620	1277.261	1229.441	67.628
1	1096.120	1231.507	1163.813	95.733
3	938.174	923.051	930.613	10.693
7	837.132	830.308	833.720	4.826
14	776.000	717.108	746.554	41.643
21	710.524	664.790	687.657	32.339
30	653.100	631.776	642.438	15.078
45	551.408	409.764	480.586	100.157
60	714.382	767.318	740.850	37.431
75	696.997	573.434	635.215	87.372
90	778.879	646.190	712.534	93.825

ตารางที่ ข27 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ EHC ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1181.620	1277.261	1229.441	67.628
1	1096.120	1231.507	1163.813	95.733
3	938.174	923.051	930.613	10.693
7	837.132	830.308	833.720	4.826
14	776.000	717.108	746.554	41.643
21	710.524	664.790	687.657	32.339
30	653.100	631.776	642.438	15.078
45	551.408	409.764	480.586	100.157
60	714.382	767.318	740.850	37.431
75	696.997	573.434	635.215	87.372
90	778.879	646.190	712.534	93.825

4. ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1,2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้นแบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3

ตารางที่ ข28 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3 ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D3-17m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	963.947	905.326	934.636	41.451
1	948.764	979.456	964.110	21.702
3	862.046	789.930	825.988	50.994
7	727.617	744.303	735.960	11.799
14	734.266	613.943	674.104	85.081
21	661.443	650.361	655.902	7.836
30	658.184	595.271	626.727	44.486
45	596.716	496.880	546.798	70.595
60	574.289	523.132	548.710	36.173
75	625.881	510.176	568.029	81.815
90	530.572	456.273	493.423	52.538

ตารางที่ ข29 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-4m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	939.229	1110.797	1025.013	121.317
1	963.019	1109.378	1036.199	103.491
3	910.402	1010.834	960.618	71.016
7	804.262	808.543	806.403	3.027
14	707.662	733.965	720.813	18.599
21	692.987	768.049	730.518	53.077
30	646.955	767.999	707.477	85.591
45	695.755	715.631	705.693	14.054
60	349.261	380.698	364.980	22.229
75	255.337	405.428	330.382	106.131
90	242.443	287.026	264.735	31.525

ตารางที่ ข30 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D4-13m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1198.775	1052.397	1125.586	103.505
1	1238.661	1053.079	1145.870	131.226
3	1067.830	884.178	976.004	129.862
7	965.532	842.794	904.163	86.789
14	877.479	737.319	807.399	99.108
21	707.497	729.341	718.419	15.446
30	766.470	694.434	730.452	50.938
45	572.274	604.543	588.409	22.817
60	708.493	735.904	722.199	19.383
75	725.545	651.483	688.514	52.370
90	822.238	545.656	683.947	195.573

ตารางที่ ข31 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D11-14m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1019.244	1029.113	1024.178	6.978
1	968.279	977.947	973.113	6.836
3	833.411	860.562	846.987	19.199
7	699.555	720.960	710.258	15.136
14	666.272	696.711	681.491	21.524
21	598.052	619.502	608.777	15.167
30	595.943	566.459	581.201	20.849
45	849.504	701.518	775.511	104.642
60	531.668	590.814	561.241	41.823
75	541.221	460.891	501.056	56.801
90	596.554	492.286	544.420	73.728

ตารางที่ ข32 ผลการศึกษาศักยภาพของธรรมชาติบำบัดในการสลายสาร 1, 2-ไดคลอโรอีเทน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบกระตุ้น แบบไร้อากาศโดยใช้ NO_3^- ที่ความเข้มข้น 2000 mg/L ตัวอย่างที่ D19-15m

Time(Day)	พื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)			SD
	n=1	n=2	Average	
0.02	1019.378	917.769	968.573	71.849
1	1003.327	970.795	987.061	23.004
3	843.732	873.704	858.718	21.193
7	643.369	705.156	674.262	43.690
14	661.499	738.255	699.877	54.275
21	619.337	659.174	639.256	28.168
30	630.562	610.223	620.392	14.382
45	584.791	458.459	521.625	89.330
60	456.179	583.664	519.921	90.145
75	474.182	543.597	508.889	49.084
90	533.701	611.025	572.363	54.677