

แบบรายงานความฉบับสมบูรณ์ (ร่าง) การดำเนินงานโครงการวิจัย (Project)

โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ.....2556.....

รายงานครั้งที่2..... (6 เดือนแรก 6 เดือนหลัง ของการวิจัยปีที่1.....)

รายงานในช่วงตั้งแต่ วัน / เดือน / ปี 31 มีนาคม 2556 ถึง วัน / เดือน / ปี 30 กันยายน 2556

วัน / เดือน / ปี ทำสัญญารับทุน 23 มกราคม 2556

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการวิจัย

1.1 รหัส พ-ท(ด).159.56 ชื่อโครงการ ศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายขยะพลาสติกในหลุมฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ

1.2 ลักษณะโครงการ เป็นโครงการวิจัยเดี่ยว (เชิงพื้นที่) เป็นโครงการย่อยในชุดโครงการวิจัย (ระบุชื่อชุดโครงการวิจัย)

1.3 ชื่อหัวหน้าโครงการ รศ.ดร.วิไล เจียมไชยศรี

1.4 หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

หน่วยงานหลัก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.5 ประเภทโครงการ โครงการวิจัย 3 สาขา; เกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สังคมศาสตร์ฯ โครงการวิจัยสถาบันเพื่อพัฒนาคุณภาพ โครงการวิจัยและถ่ายทอดงานวิจัยสู่ประชาชน โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านการวิจัย โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะ (SRU) โครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพเชิงบูรณาการเพื่อการแข่งขันฯ โครงการวิจัยพัฒนาร่วมภาครัฐและเอกชน

1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ 1 ปี ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2556 ถึงปีงบประมาณ

1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย/เก็บข้อมูล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มก.

1.8 งบประมาณได้รับ.....300,000.....บาท การเบิกเงิน งวดที่ 1 เบิกแล้ว 142,500 บาท งวดที่ 2 เบิกแล้ว.....142,500.....บาท งวดที่ 3 เบิกแล้ว

.....บาท

1.9 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายขยะพลาสติกชนิดต่างๆในหลุมฝังกลบชนิดกึ่งมีอากาศ

2. เพื่อศึกษาปัจจัยแวดล้อมในหลุมฝังกลบกึ่งมีอากาศที่กระตุ้นการย่อยสลายขยะพลาสติก

1.10 เป้าหมายผลงานวิจัยตลอดโครงการ

ปีที่ เดือนที่ ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้

1. 1-6 - ติดตั้งแบบจำลองหลุมฝังกลบมูลฝอยกึ่งมีอากาศและเก็บตัวอย่างจากพื้นที่ฝังกลบแบบกึ่ง

มีอากาศและทดสอบตัวอย่าง ผลทดสอบการย่อยสลายขยะพลาสติกกระยะสั้นแบบแบทช์
ได้แก่ ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณมีเทน ปริมาณออกซิเจน และแหล่งไนโตรเจน
และฟอสฟอรัส

7-12 - ผลทดสอบการย่อยสลายขยะพลาสติกในแบบจำลองหลุมฝังกลบระยะยาว
แบบต่อเนื่อง

1.11 ความก้าวหน้าการดำเนินงานวิจัยในรอบ 12 เดือน เทียบกับแผนการวิจัย

วัตถุประสงค์ (ตามแผน)	เป้าหมาย / ผลที่คาดหวัง (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน (ปฏิบัติได้จริง)
1. จัดสร้างและติดตั้งแบบจำลองหลุมฝังกลบ มูลฝอยกึ่งมีอากาศและเก็บตัวอย่างจาก พื้นที่ฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศและทดสอบ ตัวอย่าง	1. แบบจำลองหลุมฝังกลบมูลฝอยกึ่งมี อากาศและเก็บตัวอย่างจากพื้นที่ฝังกลบ แบบกึ่งมีอากาศและทดสอบตัวอย่าง พลาสติก	1. แบบจำลองหลุมฝังกลบมูลฝอยกึ่ง มีอากาศจำนวน 4 ชุดและผลการ วิเคราะห์ตัวอย่างทางชีวภาพจาก มูลฝอยพื้นที่ฝังกลบแบบกึ่งมี อากาศและทดสอบตัวอย่าง พลาสติก
2. การศึกษาการย่อยสลายขยะพลาสติกกระยะ สั้นแบบแบทช์ได้แก่ ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณมีเทน ปริมาณออกซิเจน และแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	2. ผลการศึกษาการย่อยสลายขยะ พลาสติกกระยะสั้นในการทดสอบแบทช์ ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณ มีเทน ปริมาณออกซิเจนและแหล่ง ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	2. การทดสอบการย่อยสลาย พลาสติกในแบบจำลองโดยใช้ สภาพใกล้เคียงกับธรรมชาติมาก ที่สุด ไม่ได้ศึกษาการย่อยสลาย แบบแบทช์ เนื่องจาก การ ทดสอบแบทช์ไม่เหมาะสมเพราะ อัตราการย่อยสลายพลาสติกช้า มากจึงมีข้อจำกัดในตรวจวัดโดย เครื่องมือ
3. การทดลองการย่อยสลายขยะพลาสติกใน แบบจำลองหลุมฝังกลบระยะยาว แบบต่อเนื่อง	3. ผลทดสอบการย่อยสลายขยะพลาสติก ในแบบจำลองหลุมฝังกลบระยะยาว แบบต่อเนื่อง	

1.12 ผลการดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแผนหรือไม่ อย่างไร โพรดระบุปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข
ผลการดำเนินการวิจัยเป็นไปตามแผนร้อยละ 80 ทั้งนี้ปรับแผนการวิจัยไม่ได้ทำการศึกษาสถานะต่างๆที่
เหมาะสมได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณมีเทน ปริมาณออกซิเจนและแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัส
ของการย่อยสลายพลาสติกในการทดสอบแบบแบทช์ เนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนเวลาที่ได้กำหนดไว้เป็นจาก
2 ปี เป็น 1 ปีตามข้อแนะนำของผู้ให้ทุน อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจึงได้ปรับทำการทดสอบในแบบจำลองหลุมฝัง
กลบกึ่งมีอากาศจำนวนหลายคอลัมน์และเพิ่มระยะเวลาศึกษาการย่อยสลายในระยะยาวเป็น 12 เดือน

1.13 ปัญหา อุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย และแนวทางแก้ไข
เมื่อทำการทดสอบแบบแบทช์เบื้องต้นแต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกในช่วงระยะเวลา 4 สัปดาห์
คาดว่ากรย่อยสลายเป็นไปได้ช้ามากทำให้มีข้อจำกัดในการตรวจวัด ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนแผนให้เริ่ม
ดำเนินการทดสอบระยะยาวเลย

1.14 งานที่ดำเนินงานวิจัยไปแล้ว คิดเป็นร้อยละ...80 ของงานวิจัยของปีงบประมาณและเป็นร้อยละของงานวิจัย
ตลอดโครงการ

1.15 ผลผลิต/ สิ่งที่ได้จากการวิจัย (Outputs) (โปรดระบุรายละเอียด)

⊗ องค์ความรู้/ข้อมูลพื้นฐาน ศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายพลาสติกและแนวทางใน
การดำเนินการและออกแบบหลุมฝังกลบที่กระตุ้นการย่อยสลายขยะพลาสติก

- สายพันธุ์พืช/สัตว์/จุลินทรีย์
- ผลิตภัณฑ์
- สิ่งประดิษฐ์
- เทคโนโลยี/นวัตกรรม
- ฐานข้อมูล/ซอฟต์แวร์
- คู่มือ
- วิทยุทัศน์
- การสร้างนักวิจัย/สนับสนุนนิสิตปริญญาตรี- คน ปริญญาโท - คน ปริญญาเอก 1 คน
- สนับสนุนการศึกษาปัญหาพิเศษ.....เรื่อง (ระบุ).....วิทยานิพนธ์.....เรื่อง (ระบุ).....
- อื่นๆ (ระบุ)

1.16 จุดเด่นของผลงานวิจัย / ผลผลิต / สิ่งที่ได้จากการวิจัย (Output)

ทราบอัตราการย่อยสลายขยะพลาสติกต่างๆที่สามารถนำไปใช้ประยุกต์ประเมินการคงอยู่ของพลาสติกต่างในหลุมฝังกลบที่มีมีเทนออกซิเดชันเกิดขึ้น ซึ่งยังไม่มีรายงานวิจัยใดทำมาก่อน

1.17 การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ (Outcomes)

- (1) เป้าหมายการนำไปใช้ประโยชน์ (ระบุกลุ่มเป้าหมายของงานวิจัยเชิงปริมาณ/คุณภาพ)

ด้านการศึกษา/เสริมการเรียนการสอน...01210517 วิศวกรรมการบำบัดแบบธรรมชาติและ 01210433 วิศวกรรมนิเวศวิทยา

- ด้านการเกษตร
- ด้านอุตสาหกรรม
- ด้านทรัพยากรธรรมชาติ/สิ่งแวดล้อม การลดการตกค้างขยะพลาสติกในพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย
- ด้านคุณภาพชีวิต สุขภาพอนามัย ลดก๊าซเรือนกระจกโดยการเปลี่ยนรูปมีเทนเป็น

คาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณต่ำกว่าการย่อยสลายขยะพลาสติกโดยกลุ่มจุลินทรีย์อื่นๆ

- ด้านเศรษฐกิจ
- ด้านสังคม
- ด้านการทำนุบำรุงศิลป ศาสนา วัฒนธรรม
- ด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยี/ฝึกอบรมแก่กลุ่มเป้าหมาย การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่หน่วยงานของรัฐ

เช่น กรมอนามัย กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

- เสนอภาครัฐ เพื่อใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ
- นำความรู้ไปวิจัย/พัฒนาขั้นต่อไป
- ก่อให้เกิดความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน/การสร้างเครือข่าย
- อื่นๆ (ระบุ)

- (2) การนำผลการวิจัยไปเผยแพร่/ถ่ายทอด (ระบุรายละเอียด อยู่ระหว่างดำเนินการส่งตีพิมพ์/ตีพิมพ์แล้วใน

รูปแบบเอกสารอ้างอิงและแนบสำเนาเป็นภาคผนวกของรายงาน)

- ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ...1...เรื่อง (กำลังดำเนินการ)
- ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ.....เรื่อง (ระบุ).....

- นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ต่างประเทศ 1 เรื่อง

(ระบุ) จะนำเสนอในรูปแบบโปสเตอร์ ที่ *International Conference on Challenges in Environmental Science & Engineering CESE-2014, The 7th CESE Conference 12 - 16 Oct. 2014, Johor Bahru, Malaysia* (เอกสารแนบใบตอบรับและบทคัดย่อ)

- นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ในประเทศ.....เรื่อง (ระบุ).....
- นำเสนอทางวิทยุ/โทรทัศน์/Website..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- นำเสนอทางนิตยสาร.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- บทความ/เอกสารสิ่งพิมพ์/วีดิทัศน์.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- ถ่ายทอด/ฝึกอบรมแก่เกษตรกร/ผู้สนใจ.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- ถ่ายทอดสู่ภาคเอกชน/อุตสาหกรรม/ผู้ประกอบการ (ประโยชน์เชิงพาณิชย์).....เรื่อง/ครั้ง(ระบุ).....
- ภาครัฐนำไปใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ (ระบุ).....
- มีผู้นำผลงานวิจัยไปอ้างอิง (ระบุ).....
- อื่นๆ.....

1.18 ผลกระทบ (Impact) ที่เกิดจากการนำผลการวิจัยไปใช้ (ระบุว่าจะก่อให้เกิดผลกระทบอย่างไร)

- ด้านความมั่นคง อาทิ การเมืองการปกครอง กฎหมาย การต่างประเทศ โครงสร้างพื้นฐาน และบริการโทรคมนาคม ฯลฯ (ระบุ).....
 - ด้านการเศรษฐกิจ อาทิ การพาณิชย์กรรม การเกษตรกรรม การอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พลังงาน ฯลฯ (ระบุ).....
 - ด้านคุณภาพชีวิตและสังคม ศักยภาพของคนและการศึกษา การแพทย์และสาธารณสุข หลักประกันความมั่นคง สวัสดิการสังคม วัฒนธรรม จริยธรรมและค่านิยม ฯลฯ (ระบุ).....ลดผลกระทบอันเกิดภาวะโลกร้อน.....
 - ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การบริการจัดการการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์ การป้องกันการทำลาย ลดการสูญเสีย การฟื้นฟูทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ฯลฯ ลดปริมาณขยะตกค้างเพื่อเพิ่มพื้นที่การฝังกลบในระยะยาวและผลกระทบที่เกิดจากขยะตกค้างเป็นเวลานาน
 - อื่นๆ (ระบุ).....
- ผลการดำเนินงานวิจัยสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ ในด้าน
- ยุทธศาสตร์การจัดความยากจน
 - ยุทธศาสตร์การพัฒนาคนและสังคมที่มีคุณภาพ
 - ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุล และแข่งขันได้
 - ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
 - ยุทธศาสตร์การต่างประเทศและเศรษฐกิจระหว่างประเทศ
 - ยุทธศาสตร์การพัฒนากฎหมายและส่งเสริมการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี
 - ยุทธศาสตร์การส่งเสริมประชาธิปไตยและกระบวนการประชาสังคม
 - ยุทธศาสตร์การรักษาความมั่นคงของรัฐ
 - ยุทธศาสตร์การรองรับการเปลี่ยนแปลงและพลวัตโลก
 - อื่นๆ โปรดระบุ.....

1.19 การยื่นจด สิทธิบัตร อนุสิทธิบัตร ลิขสิทธิ์ เครื่องหมายการค้า
 มีศักยภาพที่จะยื่นจด (ระบุ)..... ยื่นจดแล้ว เมื่อ

1.20 การได้รับรางวัล

- 1.21 งานตามแผนที่จะทำต่อไป.....ส่งบทความในวารสารที่มีฐานข้อมูล.SCI.....
1.22 คำชี้แจงเพิ่มเติม.....

ลงชื่อ.....หัวหน้าโครงการ
(นางวิไล เจียมไชยศรี)

.....10./กค./57.วัน/เดือน/ปี ที่รายงาน

ส่วนที่ 2 รายงานความก้าวหน้าการดำเนินงานโครงการวิจัย (Project)
โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2556

โครงการวิจัยรหัส พ-ท(ด) 159.56.

ศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายขยะพลาสติกในหลุมฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ
Potentability of Methanotrophs in Biodegradation of Plastic Waste in
Semi-Aerobic Landfill

วิไล เจียมไชยศรี และสุธารัตน์ หมั่นมี
Wilai Chiemchaisri and Sutharat Muenmee

บทคัดย่อ

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายขยะพลาสติกชนิดต่างๆ (HDPE, LDPE, PP และ PS) ในหลุมฝังกลบชนิดกึ่งมีอากาศ โดยการใช้แบบจำลองหลุมฝังกลบตามธรรมชาติขนาดห้องปฏิบัติการจำนวน 4 คอลัมน์ที่มีการระบายก๊าซชีวภาพต่างๆ ($60\%CH_4$: $40\%CO_2$) ต่อเนื่องเป็นเวลา 12 เดือน ทำการตรวจวัดอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชันและการย่อยสลายพลาสติกที่ระยะ 3, 7, 12 เดือน พบว่า พลาสติกทั้ง 4 ชนิดคือ (HDPE, LDPE, PP และ PS) สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่เจริญในหลุมฝังกลบจำลองแบบกึ่งมีอากาศ ตรวจพบปริมาณเชื้อเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่งและไทป์สองที่ความลึกต่างกัน ไทป์หนึ่งมีปริมาณสูงในส่วนบนของแบบจำลองในขณะที่ไทป์สองพบมากในด้านล่างของแบบจำลอง โดยไทป์หนึ่งมีปริมาณสอดคล้องกับปริมาณเชื้อไนโตรซิฟิเคชันแบคทีเรีย โดยอัตราการย่อยสลายพลาสติกทุกชนิดมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชันของเมทาโนโทรฟโดยเฉพาะไทป์ 1 ซึ่งพบอัตราการย่อยสลายพลาสติกสูงที่สุดในระดับชั้นมูลฝอยที่มีอัตรามีเทนออกซิเดชันสูงที่สุดคือที่ระดับ 15 เซนติเมตรเนื่องจากสัดส่วนความเข้มข้นของออกซิเจนต่อมีเทนที่เหมาะสมมีผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวซึ่งส่งผลต่อเนื่องต่ออัตราการย่อยสลายของพลาสติก โดยอัตราการย่อยสลายพลาสติกที่ระดับความลึกรองลงมาคือ 5, 35, 70, 105 และ 140 เซนติเมตรตามลำดับ โดยพบว่าการย่อยสลาย HDPE ในหลุมฝังกลบจำลองมีอัตราเร็วในสูงสุด ($K = 0.288 y^{-1}$) รองลงมาคือ PP ($K = 0.197 y^{-1}$) PS ($K = 0.157 y^{-1}$) และ LDPE ($K = 0.131 y^{-1}$) โดยสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเมทาโนโทรฟที่เกาะอยู่บนพลาสติก

คำสำคัญ หลุมฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ, มีเทนออกซิเดชัน, เมทาโนโทรฟ, ขยะมูลฝอย, พลาสติก, การย่อยสลายทางชีวภาพ

(1) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Abstract

The bench scales of a semi aerobic landfill were set-up to order to investigate biodegradation of commercial plastic wastes (HDPE, LDPE, PP and PS). A low flow rate of synthetic biogas was purged continuously. Methane oxidation in waste matrix was determined periodically. The wastes had been interval tested for chemicals and microbial consortium. The results appear that the maximum methane oxidation rate (MOR_{max}) was at 15 cm depth and tended to increase with time. Microbial consortium on waste plastics revealed by FISH techniques indicated that all methanotrophs tended to increase with time in an experimental period of 12 months. Growth of Type I and Type II showed highly at different zones of waste matrix: Type I at 5-15 cm depth whereas Type II at 75-140 cm depth. Besides, methanotrophs had attached highly on HDPE>LDPE>PS/PP. Biodegradation of waste plastics in terms of carbon loss, plastic-biodegraded products and micro-optical changes of plastic structure were found conspicuous at high dense methanotrophs on waste plastics. Almost kinetic decay rates, K of plastic degradation showed highest at 15 cm-depth. HDPE had the highest kinetic decay rate (K , 0.288 y^{-1}) followed by PP ($K = 0.197 \text{ y}^{-1}$) PS ($K = 0.157 \text{ y}^{-1}$) and LDPE ($K = 0.131 \text{ y}^{-1}$) at the MOR_{max} depth, respectively. In conclusion, this experimental study shows that both types of methanotrophs involved degradation of waste plastics in the simulation of open dump site of which the K values depended on plastic properties and amount of attached methanotrophs.

Keywords: Semi aerobic landfill, methane oxidation, methanotrophs, solid wastes, plastics, biodegradation

บทนำ

การสังเคราะห์พลาสติกเพื่อใช้งานในปัจจุบันทั่วโลกมีประมาณ 140 ล้านตันต่อปี หลังใช้งานแล้วพลาสติกดังกล่าวจะกลายเป็นขยะที่ยังคงอยู่ในระบบนิเวศเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากการย่อยสลายได้ยาก (Shimao, 2001) โดยปกติแล้วองค์ประกอบของมูลฝอยชุมชนมักมีขยะพลาสติกปะปนอยู่ในปริมาณร้อยละ 16 ถึง 20 ซึ่งจะถูกกำจัดโดยการฝังกลบมูลฝอยหรือการเทกองขึ้นอยู่กับการจัดการมูลฝอยในแต่ละชุมชน เช่น มูลฝอยในเขตกรุงเทพมหานคร ประกอบด้วย เศษอาหาร ร้อยละ 45.4 พลาสติกร้อยละ 25.1 กระดาษร้อยละ 13.9 เศษไม้และพีซีร้อยละ 4.5 เศษผ้าร้อยละ 3.6 เศษแก้วร้อยละ 2.5 โลหะต่างๆร้อยละ 1.7 ยางร้อยละ 1.6 และอื่นๆ ร้อยละ 1.7 (กรุงเทพมหานคร, 2010) จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ พลาสติกในขยะชุมชนเป็นพลาสติกชนิดพีพี (PP, Polypropylene) ร้อยละ 13.0 แอลดีพีอี (LDPE, low density polyethylene) ร้อยละ 7.4 และเอชดีพีอี (high density polyethylene) ร้อยละ 69 ซึ่งรวมพลาสติก ดังกล่าวทั้งหมดมีอยู่ถึงประมาณร้อยละ 89 ของพลาสติกทั้งหมดในขยะมูลฝอยชุมชน จะเห็นว่าพลาสติกชนิดพีอีหรือโพลีเอทิลีนในหลุมฝังกลบมูลฝอยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 72 พลาสติกชนิดนี้เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายโดยธรรมชาติได้ยากจึงยังพบได้ในหลุมฝังกลบที่มีอายุการใช้งานมากกว่าสิบปี

จากการศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชนิดพีอีโดย Albertsson and Karlsson (1990) พบว่าการย่อยสลายพลาสติกที่มีการสัมผัสรังสียูวีก่อนหน้าและฝังอยู่ในดินเป็นระยะเวลานาน 10 ปีมีการย่อยสลายน้อยกว่าร้อยละ 0.5 และในพลาสติกที่ไม่ได้รับแสงยูวีก่อนหน้ามีการย่อยสลายน้อยกว่าร้อยละ 0.2 นอกจากนี้มีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายระหว่างพลาสติกพีอีสองชนิดพบว่า เอชดีพีอีจะย่อยยากกว่าชนิดแอลดีพีอีที่ฝังในดิน 15 เดือน โดยมีการย่อยสลายเพียงร้อยละ 1.3 และ 2.1 ตามลำดับ (Orhan et al. 2004) ถึงแม้ว่าแบคทีเรียจะไม่สามารถย่อยสลายพลาสติกชนิดพีอีได้ อย่างไรก็ตาม มีผู้ศึกษาว่าเชื้อราบางชนิดเช่น *Aspergillus niger* สามารถย่อยพลาสติกชนิดนี้ได้ดีกว่าแบคทีเรีย (Alariqi et al. 2006, Gu, 2003, Cacciari et al. 1993) นอกจากนี้ยังมีการนำแบคทีเรียกลุ่มเทอร์โมฟิล *Brevibacillus borstelensis* strain 707 ซึ่งแยกได้จากดินสามารถย่อยสลายพลาสติกชนิดแอลดีพีอีได้ (Hadad et al. 2005) และแบคทีเรีย *Rhodococcus ruber* สามารถย่อยสลายพลาสติกชนิดเอชดีพีอีได้ (Gilan et al. 2004) เนื่องจากปัญหาการย่อยสลายยากของพลาสติกดังกล่าว จึงมีการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ง่ายขึ้นมาใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน เช่น พีแอลเอ (PLA, polylactic acids) (Kad, 2005) โดยมีรายงานว่าพลาสติกชนิดนี้ถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์หลายชนิด เช่น proteinase K, pronase, bromelain (Williams, 1981) อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพลาสติกดังกล่าวยังมีไม่มากนัก และกลไกการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินยังไม่คงกระจ่างในปัจจุบัน (Tokawa and Calabia, 2006; Runik and Briassoulis, 2010)

การกำจัดมูลฝอยที่มีองค์ประกอบของพลาสติกในปัจจุบันสามารถกำจัดมูลฝอยชุมชนได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การฝังกลบ การเผาในเตาเผาความร้อนสูง ซึ่งความนิยมของการกำจัดยังคงเป็นการนำไปฝังกลบเนื่องจากมีค่าดำเนินการต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ สำหรับการฝังกลบแบบถูกสุขลักษณะแบบดั้งเดิมที่ใช้การอยู่เป็นส่วนใหญ่ คือ การฝังกลบแบบไร้อากาศ โดยมูลฝอยชุมชนจะถูกทิ้งในบ่อฝังกลบและกลบทับด้วยดินบดอัดให้แน่นเป็นชั้นๆในแต่ละวัน ซึ่งทำให้หลุมฝังกลบชนิดนี้มีย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้น ทำให้มีผลของการย่อยสลายเป็นก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตก๊าซไม่สม่ำเสมอทำให้การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นไปได้ยากและการควบคุมการระบายก๊าซชีวภาพมักใช้วิธีเผาซึ่งมักมีความเสี่ยงสูงในการระเบิดในพื้นที่ ดังนั้นหลุมฝังกลบมูลฝอยส่วนใหญ่จึงมีกระบายก๊าซชีวภาพออกสู่บรรยากาศโดยตรง ทำให้หลุมฝังกลบมูลฝอยจัดเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญแหล่งหนึ่ง มีการคาดการณ์ว่าการปลดปล่อยมีเทนในประเทศไทยจะเพิ่มขึ้นเป็น 180% ในปี พ.ศ. 2563 หรือเท่ากับ 338,600 ตันต่อปี (ทิพย์สุริย์ และคณะ, 2549) นอกจากก๊าซเรือนกระจกแล้ว หลุมฝังกลบมูลฝอยแบบไร้อากาศยังปล่อยน้ำชะมูลฝอยเข้มข้น (leachate) ซึ่งเกิดจากกิจกรรมการย่อย

สลายมูลฝอยแบบไร้อากาศร่วมกับการชะของน้ำฝนที่ไหลผ่านหลุมฝังกลบ โดยปกติแล้วน้ำชะมูลฝอยมีปริมาณแปรผันตามปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ โดยมักมีความสกปรกของสารอินทรีย์สูงในระดับ 10,000-100,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรได้ รวมทั้งสารพิษที่ชะละลายออกมาจากมูลฝอยที่สำคัญ ได้แก่ โลหะหนัก สารอินทรีย์ในรูปต่างๆ และสารประกอบไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับอายุของหลุมฝังกลบมูลฝอย ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ผ่านทางโซ่อาหารเมื่อปนเปื้อนแหล่งน้ำผิวดิน น้ำบาดาลและดินในบริเวณใกล้เคียง ด้วยปัญหาที่เกิดขึ้นจากการฝังกลบแบบไร้อากาศดังกล่าวจึงมีการพัฒนาการฝังกลบมูลฝอยในรูปแบบกึ่งมีอากาศ (semi-aerobic landfill) โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นในระยะเวลาสี่ปีที่ผ่านมา ซึ่งเป็นระบบที่มีชื่อว่า Fukuoka โดยการกำจัดระบบนี้มีการฝังท่อระบายอากาศขนาดใหญ่เพื่อให้อากาศจากภายนอกสามารถหมุนเวียนเข้าสู่ชั้นขยะได้ ทำให้มีการย่อยสลายแบบกึ่งมีอากาศเกิดขึ้น ซึ่งพบว่าทำให้มีการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงและน้ำชะมูลฝอยมีความสกปรกต่ำลง (Aziz et al., 2010) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลายนักเนื่องจากยังขาดแคลนวิศวกรที่มีความรู้ความเข้าใจในการออกแบบและการดำเนินการอยู่

จากรายงานหลายเรื่องเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่สามารถใช้มีเทนในสภาพใช้ออกซิเจนได้หรือ เมทาโนโทรฟ (methanotrophs) จัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียที่เรียกว่า เมทิลโลโทรฟ (Methylootrophs) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเป็นแหล่งของคาร์บอนและพลังงาน (สารประกอบคาร์บอน 1 อะตอมเช่น มีเทน เมทานอล ฟอรั่มเมท เป็นต้น; Anthony, 1982) Witternburly et al. (1970) ได้จำแนกเชื้อเมทาโนโทรฟ ได้กว่า 100 ชนิด และแบ่งชนิดของเชื้อชนิดนี้ตามลักษณะของการเรียงตัวเมมเบรนชั้นใน ได้แก่ เมทาโนโทรฟ type I และ type II โดยการเรียงตัวของเมมเบรนเป็นแบบแผ่นซ้อนตามแนวขวางของเซลล์และแบบแผ่นคู่ขนานกับเยื่อเมมเบรนชั้นนอกของเซลล์ตามลำดับ ปัจจุบันมีการจำแนกชนิดของเมทาโนโทรฟด้วยยีน 16S rRNA โดยพบว่าเชื้อทั้งสองชนิดนั้นอยู่ใน phylum Proteobacteria เช่นเดียวกัน เนื่องจากในระหว่างการใช้ออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานของเชื้อเมทาโนโทรฟ มีการเปลี่ยนรูปของมีเทนเป็นเมทานอลก่อน โดยอาศัยเอนไซม์ที่เรียกว่ามีเทนโมโนออกซิจีเนส (methane monooxygenase: MMO) ดังแสดงสมการ (1)



มีผู้ศึกษาว่าเอนไซม์มีเทนโมโนออกซิจีเนสจากเมทาโนโทรฟสามารถออกซิไดส์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีผ่านกระบวนการโคเมตาบอลิซึม (co-metabolism) โดยมีการกระตุ้นให้มีการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดนี้ในดินที่มีการปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดเช่น อัลเคน อัลคีน อะโรมาติก คลอรีเนตเตดไฮโดรคาร์บอน (Wymore et al. 2007)

เนื่องจากสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยยังเอื้ออำนวยให้เชื้อชนิดนี้เจริญเติบโตได้ดีเพราะเชื้อเมทาโนโทรฟสามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิในช่วง 25-35 °C (Hanson and Hanson, 1996) โดยมีรายงานว่าเชื้อชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในหน้าดินหลุมฝังกลบในประเทศไทย โดยมีรายงานว่า *Methylomonas methanica* (type I) (Chiemchaisri et al, 2001) ดังนั้นเนื่องจากในหลุมฝังกลบชนิดกึ่งมีอากาศจะมีสภาพที่มีมีเทนและออกซิเจนอยู่พร้อมกันภายในหลุมฝังกลบ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะพบแบคทีเรียชนิดเมทาโนโทรฟในชั้นมูลฝอย ซึ่งในปัจจุบันยังขาดข้อมูลของเชื้อเมทาโนโทรฟและกิจกรรมของเชื้อที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายมีเทนและขยะพลาสติกอยู่ หากพบเมทาโนโทรฟเจริญได้ในชั้นมูลฝอยฝังกลบหรือบนขยะพลาสติก ทำให้มีโอกาสที่เอนไซม์มีเทนโมโนออกซิจีเนสสัมผัสกับพลาสติกและเกิดการย่อยสลายพลาสติกได้ดี ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในการย่อยสลายขยะพลาสติกในหลุมฝังกลบชนิดกึ่งมีอากาศ และศึกษาปัจจัยแวดล้อมในหลุมฝังกลบกึ่งมีอากาศที่กระตุ้นการย่อยสลายขยะพลาสติก ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ

และพัฒนาหลุมฝังกลบมูลฝอยแบบกึ่งมีอากาศที่ต้องการกระตุ้นการย่อยสลายขยะพลาสติกเพื่อลดปัญหาการ
ตกค้างพลาสติกในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลายาวนาน

วิธีวิจัย

1. ลักษณะและองค์ประกอบของมูลฝอยพื้นที่ที่ทำการศึกษา

เมื่อเวลาผ่านไปองค์ประกอบต่างๆในมูลฝอยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการย่อยสลาย เช่น เศษอาหาร จะถูกย่อยสลายประมาณ 6 – 7 วัน กระดาษ 2 – 5 เดือน กระจังอะลูมิเนียม 80 – 100 ปี และ พลาสติก จะถูกย่อยสลายใน 450 ปี เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) ซึ่งในสถานที่กำจัดมูลฝอยแห่งนี้ จะมีการคัดแยกขยะมูลฝอยเบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กลับมา เช่น กระจัง ขวดแก้ว ขวดพลาสติก บางชนิด เช่น PET และโลหะชนิดต่างๆ เป็นต้น เพราะฉะนั้นมูลฝอยที่เหลือจากการคัดแยกอย่างพลาสติก เศษผ้า เศษอาหาร เศษไม้ เศษยางหรือกระดาษ เป็นต้น จะมีการทิ้งผสมรวมกัน ซึ่งมูลฝอยที่นำมาศึกษาเป็น มูลฝอยในช่วยอายุ 1-2 ปี โดยองค์ประกอบหลักอย่างเศษอาหารและกระดาษ จะถูกย่อยสลายจนกลายเป็น กลายเป็น คัลลายดิน และพวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พลาสติก เศษผ้า และอื่นๆ ที่อาจมีปะปนอยู่ในมูลฝอยที่นำมา ศึกษา ดังตารางที่ 1

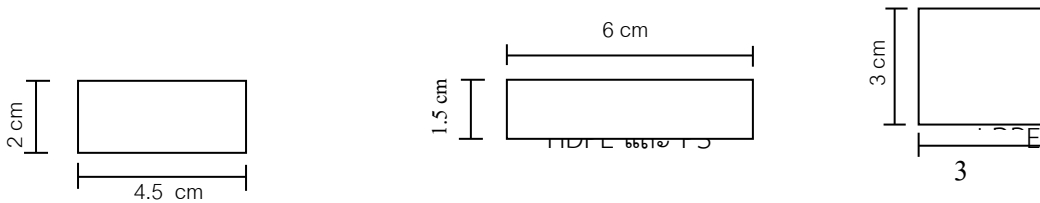
ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักของขยะที่หลุมฝังกลบแหลมฉะบัง

ชนิดของขยะ	ปริมาณ (ร้อยละ โดยมวล)
พลาสติก	31
เศษอาหาร	21
ยาง	4
เศษผ้า	11
กระดาษ	19
กระจังอะลูมิเนียม	4
แก้ว	9
เศษกิ่งไม้ ใบไม้	5

2. การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวอย่างพลาสติก

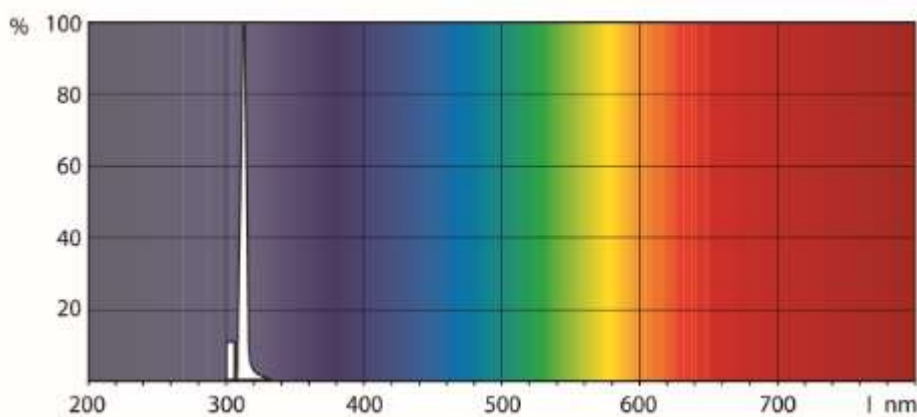
ตัดพลาสติกชนิด HDPE, LDPE, PP และ PS ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยพลาสติกแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวเท่ากันคือ 9 ตร.ซม. (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ลักษณะรูปทรงของพลาสติกแต่ละชนิดที่ใช้ในการทำการทดสอบ

2.2 การจำลองพลาสติกให้เหมือนกับการใช้งานจริง

UV-B เป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่พบในแสงแดดธรรมชาติและเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่อการลดอายุการใช้งานของพลาสติกมากที่สุด ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงของการทดลองนี้พลาสติกจะถูกนำมาฉายรังสี UV-B ที่มีความยาวคลื่น 280-340 นาโนเมตร (รูปที่ 2) ระยะทางวางพลาสติกห่างจากหลอดไฟ 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 200 ชั่วโมง ก่อนนำพลาสติกไปใช้ในการทดลองถัดไป



รูปที่ 2 ความยาวคลื่นที่ถูกปล่อยด้วยหลอด UV-B

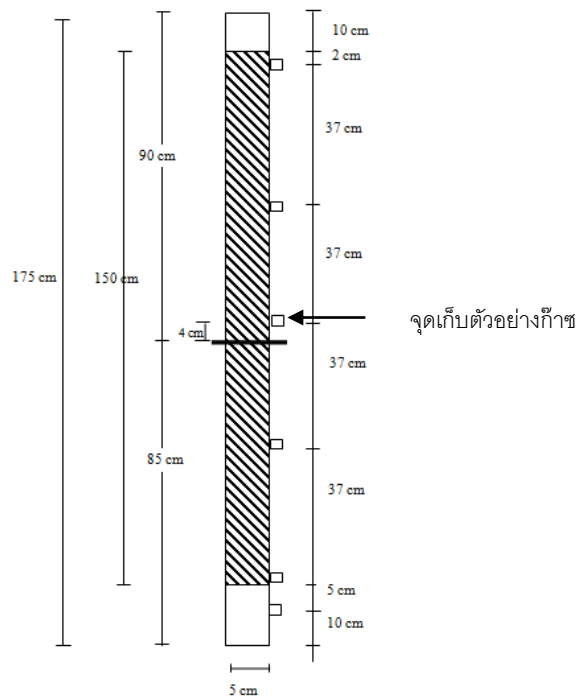
2.3 การเตรียมมูลฝอยที่ใช้ในการทดลอง

มูลฝอยที่ใช้ในการทดลองนำมาจากกองมูลฝอยที่มีอายุประมาณ 2-3 ปี ณ สถานที่กำจัดมูลฝอย เทศบาลนครแหลมฉบัง อำเภอแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรีซึ่งเมืองค์ประกอบทางกายภาพเป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายจนมีลักษณะคล้ายดิน นำพลาสติกที่ได้จากการทดลองข้างต้นมาผสมกันตามสัดส่วนของ HDPE: LDPE: PP: PS เท่ากับร้อยละ 56: 29: 12: 3 โดยน้ำหนัก ให้เหมือนกับสัดส่วนจริงในหลุมฝังกลบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) หลังจากนั้นนำพลาสติกที่ผสมกันแล้วมาผสมกับมูลฝอยอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายแล้วอีกครั้งตามสัดส่วนของกองมูลฝอยตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง คือ มูลฝอยอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลาย: พลาสติก เท่ากับร้อยละ 53: 47 โดยน้ำหนัก (บุญญา, 2550) นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์โดยเทคนิคฟิช (Fluorescent in Situ Hybridization) เพื่อตรวจวัดหาเชื้อ Methanotrophic bacteria และเชื้อจุลินทรีย์อื่นๆ โดยใช้โพรบ (probe) ชนิด M_γ 705 และ M_γ 84 สำหรับเมทาโนโทรฟไพบ์

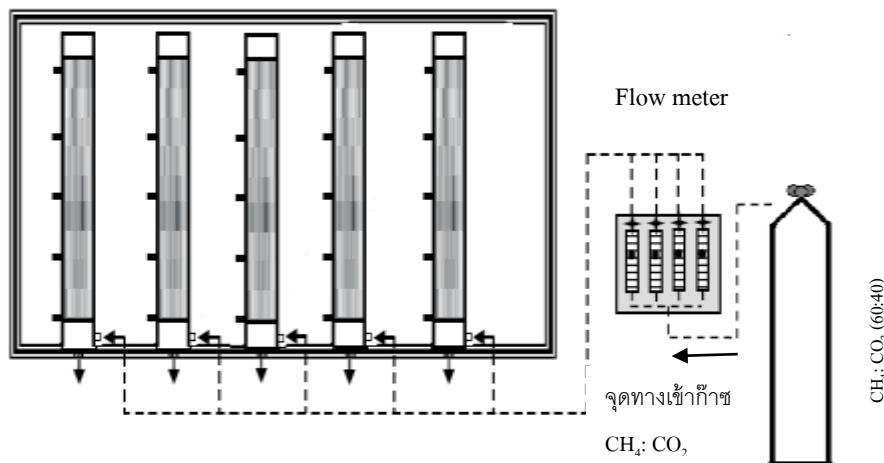
หนึ่ง $M_{\alpha}450$ สำหรับเมทาโนโทรฟไทป์สอง NSO1225 สำหรับแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย และ NIT3 สำหรับไนโตรแบคทีเรียโดยรายละเอียดวิธีการแสดงในหัวข้อที่ 7

3. ขั้นตอนการจำลองการย่อยสลายของพลาสติกในหลุมฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศระยะยาว

หลังจากผสมมูลฝอยอินทรีย์และพลาสติกตามอัตราส่วนข้างต้นแล้ว นำมูลฝอยที่ผสมเสร็จแล้วตามอัตราส่วนดังกล่าวมาผสมน้ำเพื่อให้ได้ความชื้นประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากความชื้นที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยามีเทนออกซิเดชัน เท่ากับร้อยละ 15 – 20 (Pokherl, 1998) และนำมูลฝอยผสมดังกล่าวมาบรรจุลงในคอลัมน์ที่มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้มีระดับความลึกของชั้นมูลฝอยเท่ากับ 150 เซนติเมตร จำนวน 4 คอลัมน์ ซึ่งความหนาแน่นของชั้นมูลฝอยเท่ากับ 270 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีความพรุน (Porosity) เท่ากับร้อยละ 45.0 ระบายก๊าซชีวภาพสังเคราะห์ (มีเทน:คาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 60: 40) ทางด้านล่างของคอลัมน์ โดยควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 0.56 มิลลิลิตร/นาที ด้วยอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Flow meter) คิดเป็นค่าการระบรทุกก๊าซมีเทนเท่ากับ 26.50 กรัมมีเทน/ลบ.ม.วัน โดยจะมีการควบคุมสภาวะการทดลองดังกล่าวเหมือนกันทั้ง 4 คอลัมน์ ดัชนีและวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของมูลฝอยในตารางที่ 2



รูปที่ 4 รายละเอียดคอลัมน์สำหรับการทดลอง



รูปที่ 5 ลักษณะการจัดวางคอลัมน์

ตารางที่ 2 ดัชนีและวิธีการวิเคราะห์ก๊าซและมูลฝอย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
มีเทน (CH ₄)	Gas Chromatograph, TCD
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	Gas Chromatograph, TCD
ออกซิเจน(O ₂)	Gas Chromatograph, TCD
ไนโตรเจน(N ₂)	Gas Chromatograph, TCD
เอเทอรีน (C ₂ H ₄)	Gas Chromatograph, FID
แอมโมเนีย	Colorimetric Method (Anderson and Ingram, 1993)
ไนโตรท	Colorimetric Method (Anderson and Ingram, 1993)
ไนเตรท	Colorimetric Method (Anderson and Ingram, 1993)
ทีเคเอ็น	Colorimetric Method (Anderson and Ingram, 1993)
ชนิดของเชื้อแบคทีเรีย (แกรมบวก แกรมลบ)	ย้อมแกรม
เชื้อแบคทีเรียและปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย	Fluorescent In Situ Hybridization
การตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixation process)	Acetylene reduction assay (Dilworth, 1966)
การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ	Scanning Electron Microscope (SEM)
การเปลี่ยนแปลงทางเคมี	Fourier Transform Infrared (FTIR)
อินทรีย์คาร์บอน	Spectroscopy
	Total organic carbon (TOC, shimadzu)

4. การวิเคราะห์และคำนวณอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชัน

การศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในคอลัมน์มูลฝอย โดยเมื่อผ่านก๊าซชีวภาพสังเคราะห์เข้ามาในคอลัมน์ การศึกษาปริมาณก๊าซที่เปลี่ยนแปลงทำโดยเก็บตัวอย่างก๊าซจากคอลัมน์ตลอดระยะเวลาการทดลอง จากจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 5 จุด (ที่ระดับความลึก 2, 39, 76, 113, 150 เซนติเมตร จากระดับผิวบนมูลฝอย) วิธีการเก็บตัวอย่างก๊าซคือดึงตัวอย่างก๊าซมาจากจุดเก็บตัวอย่างโดยใช้ Gas-tight syringe ดึงตัวอย่างก๊าซปริมาตร 300 ไมโครลิตร นำไปฉีดเข้าเครื่อง Gas Chromatograph (รุ่น Agilent 6890) เพื่อวิเคราะห์การ

เปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนและไนโตรเจน ทำการวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นดังกล่าวในแต่ละคอลัมน์ทุกสัปดาห์และคำนวณหาอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชันตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{MOR} = \frac{((\text{CH}_4)_{\text{in}} - (\text{CH}_4)_{\text{out}}) \times Q}{V}$$

MOR คือ อัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชัน (กรัมมีเทนต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

(CH₄)_{in} คือ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เข้าสู่คอลัมน์ (กรัมมีเทนต่อลิตร)

(CH₄)_{out} คือ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่ออกจากคอลัมน์ (กรัมมีเทนต่อลิตร)

Q คือ อัตราการไหลของก๊าซมีเทน (ลิตรต่อวัน)

V คือ ปริมาตรของมูลฝอยในคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

5. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพลาสติก

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างหรือองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างพลาสติกทุกชนิดจากการทดลองจะถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สาร อนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด ดังนั้นวิธีนี้จึงนิยมนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของพลาสติกเนื่องจากการย่อยสลาย (Sudhakar et al., 2008).

6. วิธีการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายของพลาสติก

ซึ่งพลาสติกชนิดละ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดแก้ว จากนั้นเทตัวทำละลาย dichloromethane ปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงไปในช่วง เขย่าให้ผสมกันแล้วนำไปใส่ไว้ในเครื่อง ultrasonic ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นแยกเอาแต่ส่วนของเหลว ตั้งทิ้งไว้ให้ตัวทำละลายระเหยออกจนเหลือปริมาณ 2 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมโครเมตร การหาชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายจะทำโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GCMS-QP2010, Shimadzu คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ RTX-35MS เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร โดยตั้งค่าอุณหภูมิส่วนช่องนำสารเข้า (injector) ที่ 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของคอลัมน์จะให้เพิ่ม 5 องศาเซลเซียสในทุก 1 นาทีจนถึง 280 องศาเซลเซียส ตัวพา (carrier gas) เป็นก๊าซฮีเลียมเข้มข้นร้อยละ 99.999

7. การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธี Fluorescent in situ hybridization (FISH)

นำตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษา มา fixed cells เพื่อช่วยให้เซลล์คงสภาพด้วยสาร 4% paraformaldehyde (ศิริลักษณ์และคณะ, 2551) จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวมาเกลี่ยบนสไลด์หลุม จากนั้นทำการตรึงเซลล์ (immobilization) ด้วยเอทานอล 3 ระดับความเข้มข้นคือร้อยละ 50, 80, และ 98 ตามลำดับ เพื่อดึงน้ำออกจากเซลล์และเป็นการตรึงเซลล์ให้อยู่บนสไลด์ จากนั้นเป็นขั้นตอนของการเชื่อมต่อ (hybridization) โพรบ (probes) ไปจับกับสายดีเอ็นเอของเชื้อที่ต้องการวิเคราะห์ โดยทำในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับชนิดของโพรบที่ใช้ด้วย จากนั้นทำการล้างส่วนเกินออกไป (หมายเหตุ โพรบ คือสายดีเอ็นเอสั้นสั้นๆ มีความยาวประมาณ 20 เบส ที่การติดสารเรืองแสงที่ปลายโพรบ ใช้สารเรืองแสงที่ช่วยให้มองเห็นภายใต้กล้องฟลูออเรสเซนส์ในช่วงความยาวคลื่นสีเขียว)

เมื่อผ่านขั้นตอนการติดโพรบชนิดแรกแล้ว สามารถทำการติดสารเรืองแสงอีกชนิดที่จำเพาะกับจุลินทรีย์ทุกประเภทในตัวอย่างเดียวกันเพื่อใช้เปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณเชื้อ ในที่นี้ใช้สีย้อมชนิด 4',6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) และโพรบ EUB 332 (Eller et al, 2001) ซึ่งมองเห็นเซลล์ติดสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน เมื่อติดสารเรืองแสงครบ 2 สี ทำการหยุดสารกันเลือนหาย (antifade reagent)

ในแต่ละหลุม เพื่อป้องกันการเลือนหายของสารเรืองแสงจากนั้นปิดทับด้วยกระจกปิดสไลด์ นำไปเก็บไว้ที่ - 20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสไลด์ที่เตรียมเสร็จมาส่องภายใต้กล้องฟลูออเรสเซนซ์เพื่อดูการเรืองแสงของเชื้อ

ผลการทดลอง

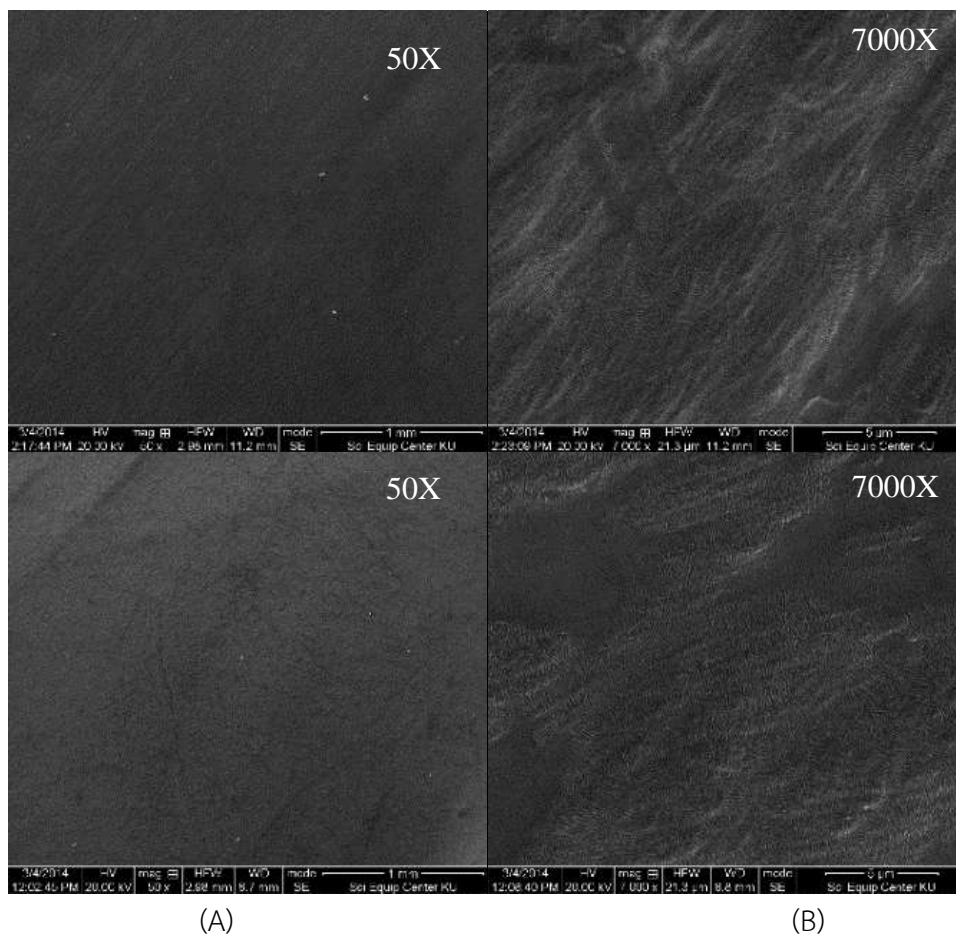
1. การจำลองการย่อยสลายพลาสติกด้วยแสง UV

หลังจากนำพลาสติกมาฉายรังสี UV-B เป็นเวลา 200 ชั่วโมงพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพคือสีของพลาสติกแต่ละชนิดแตกต่างกันไปจากเดิมคือ สีของพลาสติกจะมีสีเหลืองอ่อน ดังรูปที่ 6 เมื่อนำไปวิเคราะห์พื้นผิวที่เปลี่ยนไปของพลาสติกแต่ละชนิดด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ที่บริเวณพื้นที่ผิวของพลาสติกแต่ละชนิดก่อนและหลังจากการฉายด้วยรังสี UV-B เป็นเวลา 200 ชั่วโมง ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เช่น พลาสติก HDPE (รูปที่ 7) พลาสติกที่ได้หลังจากการย่อยสลายด้วยแสง UV-B จะนำมาใช้ในการทดลองการย่อยสลายของพลาสติกในหลุมฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ



รูปที่ 6 สีของพลาสติกที่เปลี่ยนไปหลังจากการฉายด้วยรังสี UV-B เป็นเวลา 200 ชั่วโมง

เมื่อนำไปวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี FTIR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่ากลุ่ม carbonyl (C=O) ซึ่งประกอบด้วย กลุ่ม aldehyde (1740 cm^{-1}), ester (1739 cm^{-1}), carboxylic acid ($1703\text{-}1698\text{ cm}^{-1}$), ketone ($1727\text{-}1716\text{ cm}^{-1}$) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยแสง UV-B จะเป็นตัวกระตุ้นให้ออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับพลาสติกหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่ม aldehyde, ketone และ hydroperoxide โดยกลุ่มของ carbonyl, carboxyl, hydroxyl หรือ peroxide เป็นกลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติกจะย่อยสลายได้ง่ายขึ้นหลังจากการฉายรังสี UV (Feldman, 2002) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบที่พบด้วยการตรวจสอบด้วยเครื่อง GC-MS ของก่อนและหลังจากทำการฉายด้วยรังสี UV-B จะเห็นได้ว่าหลังจากฉายรังสี UV จะมีสารประกอบบางชนิดหลุดออกมามากกว่าพลาสติกเริ่มต้น ซึ่งจะถูกนำมาอธิบายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 7 พื้นผิวของพลาสติกชนิด HDPE ก่อน (A) และหลัง (B) จากการฉายด้วยรังสี UV-B 200 ชั่วโมง

2. ชนิดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในมูลฝอยเริ่มต้น

ชนิดและปริมาณเชื้อในมูลฝอยเริ่มต้นแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า จุลินทรีย์ที่พบส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรีย ทั้งนี้ปริมาณแบคทีเรียเมทาโนโทรบที่สามารถใช้มีเทนเป็นแหล่งพลังงานมีทั้งสองไทป์ในขั้วร้อยละ 18-26 และแบคทีเรียชนิดไนโตรไฟอิงมีอยู่ในประมาณร้อยละ 16-17 ดังนั้นคาดว่าเมื่อนำมูลฝอยนี้ไปในการทดสอบการย่อยสลายพลาสติก จะมีแบคทีเรียดังกล่าวสามารถมีกิจกรรมอาศัยอยู่ในระบบทดสอบจำลองการฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ

ตารางที่ 2 ชนิดและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในมูลฝอยก่อนทดลอง

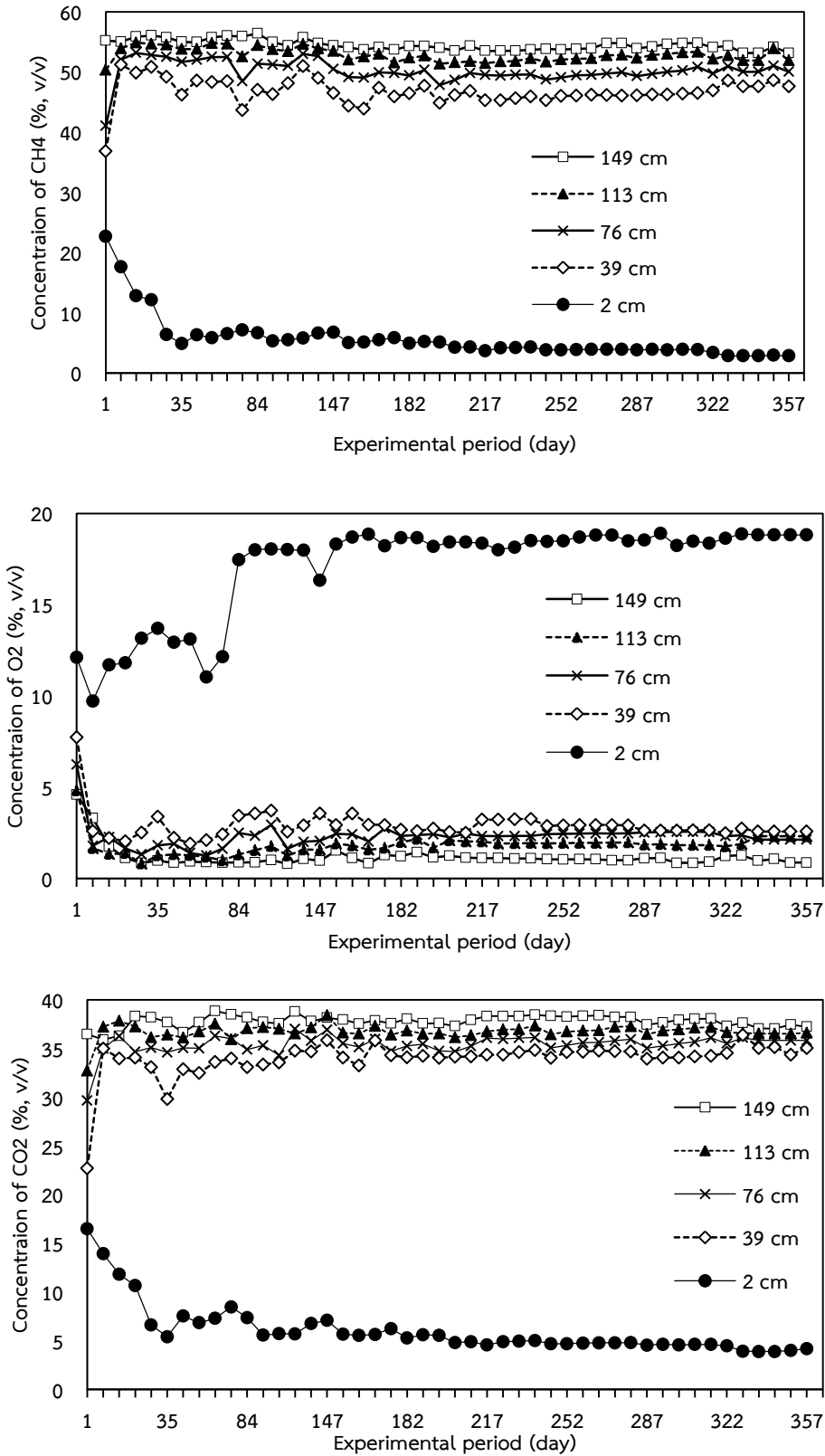
ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์	ร้อยละจำนวนแบคทีเรียแต่ละชนิดเทียบกับแบคทีเรียทั้งหมด ^a	ร้อยละจำนวนแบคทีเรียแต่ละชนิดเทียบกับจุลินทรีย์ทั้งหมด ^b
Methanotroph (Type I)	25.86	21.7
Methanotroph (Type II)	18.12	15.2
Nitrobactor	16.81	14.1
Nitrosomonas	15.78	13.24

หมายเหตุ a เทียบกับ EUB 332 และ b เทียบกับ DAPI

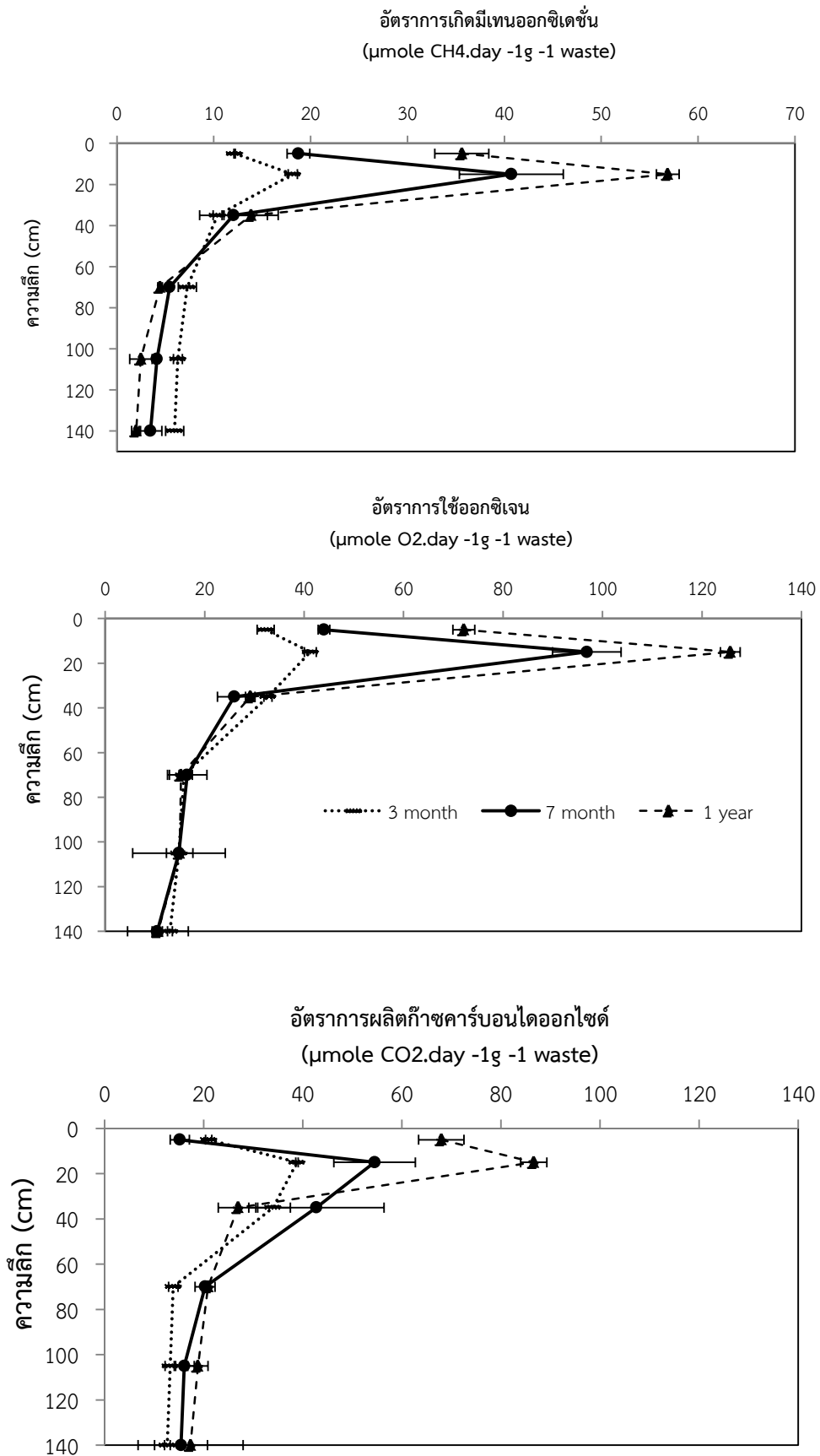
3. ระบบจำลองการฝังกลบแบบกึ่งมีอากาศ

3.1 การย่อยสลายก๊าซมีเทนของเชื้อจุลินทรีย์เมทาโนโทรฟในคอลัมน์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซในระบบตลอดระยะเวลาการทดลองดังรูปที่ 8 พบว่าก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มของความเข้มข้นของเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกของชั้นขยะ ตรงกันข้ามกับก๊าซออกซิเจนที่ความเข้มข้นลดลง โดยที่ความลึก 140 ซม. เป็นชั้นที่ลึกที่สุดจะมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 56% และ 36% ของปริมาตรก๊าซทั้งหมดตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของออกซิเจนที่พบสูงสุดที่ระดับความลึก 2 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าประมาณ 19% ของก๊าซทั้งหมดและรองลงมาคือที่ระดับความลึก 39, 76, 113 และ 149 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าประมาณ 3, 2.5, 2 และ 1% ตามลำดับ (รูปที่ 8) การเกิดปฏิกิริยามีเทนออกซิเดชันต้องการปริมาณมีเทนและออกซิเจนที่พอเหมาะ โดยทุกๆ 1 โมลของมีเทนที่จุลินทรีย์ใช้ต้องการออกซิเจน 0.5 โมลในการออกซิไดส์มีเทนเป็น เมทานอล (Anthony, 1986) จากรูปที่ 9 พบว่า อัตราการเกิดมีเทนปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงที่สุดอยู่ที่ระดับความลึก 15 ซม. และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาทดลองมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kong และคณะ (2013) ที่รายงานไว้ในหลุมฝังกลบที่ความลึกระหว่าง 10 ถึง 20 ซม. เป็นช่วงชั้นที่เกิดมีเทนออกซิเดชันมากที่สุด เนื่องจากสัดส่วนของก๊าซมีเทนและออกซิเจนมีความเหมาะสมมากที่สุด (Le Mer and Roger, 2001; Handson and Handson, 1996) ส่วนที่ความลึกมากที่สุดที่ 140 ซม. มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำที่สุดและมีแนวโน้มต่ำลงเรื่อยๆ มีเพิ่มระยะเวลาในการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอต่อความเข้มข้นของมีเทนที่สูงมาก โดย He et al (2011) ได้รายงานไว้ว่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่เหมาะสมกับการทำงานของเชื้อเมทาโนโทรฟไม่ควรต่ำกว่า 3% ของก๊าซทั้งหมด กล่าวโดยสรุปได้ว่า ระดับความลึก 15 เซนติเมตรเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของมีเทนและออกซิเจนเหมาะสมในชั้นมูลฝอยจำลองนี้จึงทำให้เชื้อเมทาโนโทรฟทำงานได้ดีจึงมีอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชันสูงที่สุด



รูปที่ 8 องค์ประกอบของก๊าซในคอลัมน์ตลอดระยะเวลา 12 เดือน

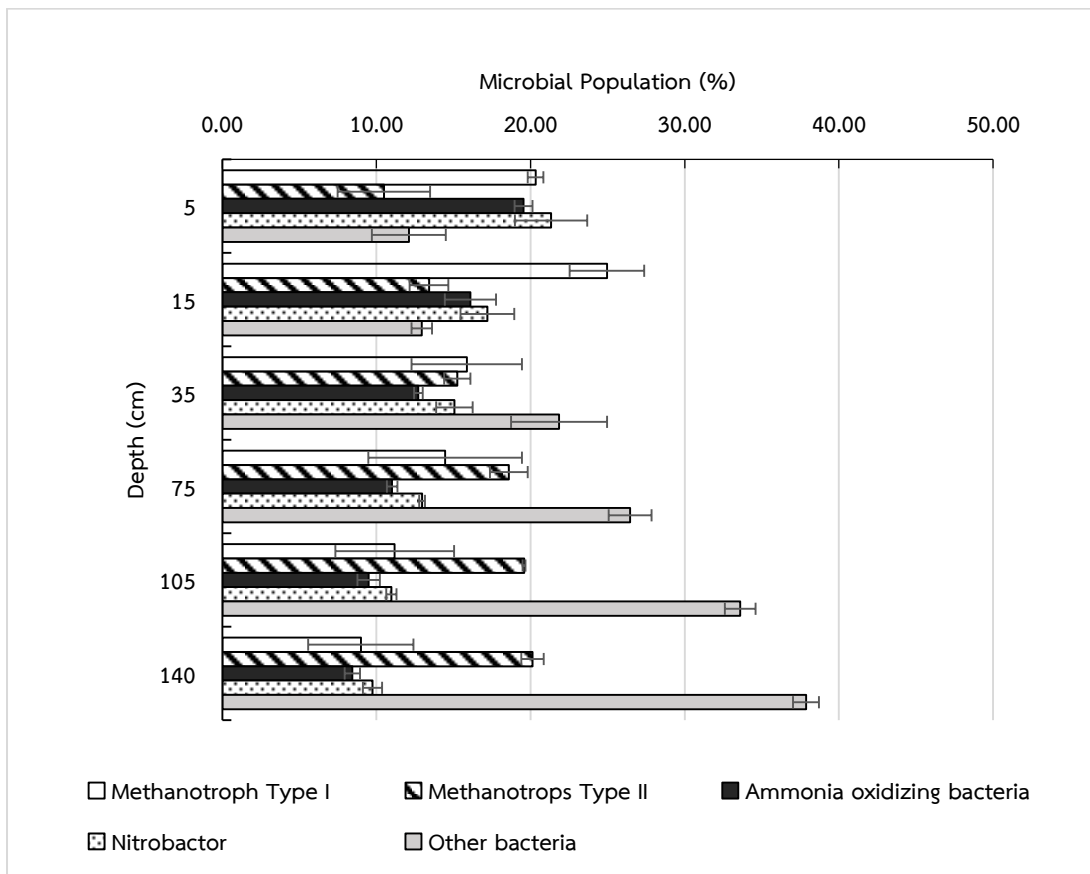


รูปที่ 12 อัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชัน, อัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

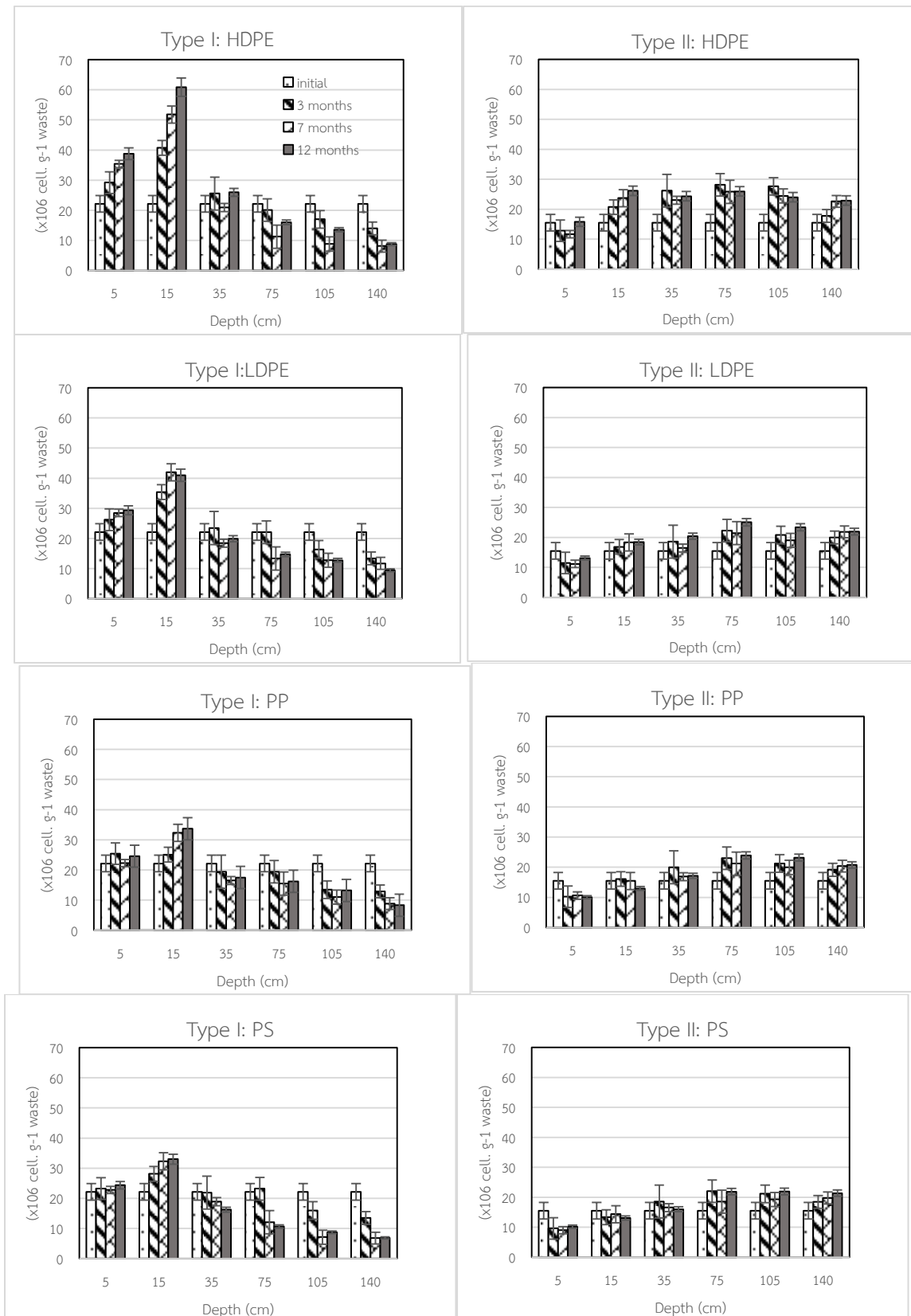
3.2 ชนิดและปริมาณของกลุ่มของจุลินทรีย์บนผิวขยะพลาสติก

หลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์อินสทิทิวชัน (FISH) พบว่ามีจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถอาศัยอยู่บนผิวพลาสติกได้ทุกชนิดและทุกระดับความลึก (รูปที่ 13) เมื่อพิจารณาสัดส่วนของเชื้อแบคทีเรียบนผิวของพลาสติกหลังจากการทดลองพบว่า สัดส่วนของแบคทีเรียอื่นๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความลึกของชั้นขยะเช่นเดียวกับเมทาโนโทรฟไทป์สอง ในขณะที่เมทาโนโทรฟไทป์หนึ่ง แบคทีเรียแอมโมเนียออกซิไดซิง ไนโตรแบคทีเรีย มีทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือมีปริมาณลดลงเมื่อความลึกของชั้นขยะมากขึ้น Hanson and Hanson (1996) รายงานว่าเชื้อเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าไทป์สองในสภาวะที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงและมีเทนต่ำในขณะที่ไทป์สองจะเจริญเติบโตได้ดีที่สภาวะที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำและมีเทนสูง อย่างไรก็ตามสำหรับเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่ง มีสัดส่วนสูงสุดที่ความลึก 15 ซม. แสดงว่าแบคทีเรียชนิดนี้ ทำหน้าที่ย่อยสลายมีเทนเป็นหลักและมีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าเมทาโนโทรฟไทป์สอง สอดคล้องกับค่ามีเทนออกซิเดชันที่พบสูงสุดในระดับความลึกนี้ (รูปที่ 12) ทั้งนี้แนวโน้มปริมาณเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่งสอดคล้องกับแบคทีเรียไนโตรไฟอิง ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้ผลิตไนเตรทเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เป็นรูปอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เมทาโนโทรฟใช้ในการออกซิไดซ์มีเทน โดยความเข้มข้นของออกซิเจนยังมีผลต่อการทำงานของเชื้อไนโตรแบคทีเรีย เชื้อแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย ที่ต้องใช้ออกซิเจนในการผลิต ไนเตรท และ ไนเตรทตามลำดับ ดังนั้นแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงพบได้มากที่สุดที่ชั้นขยะที่อากาศสามารถแพร่ได้ถึงคือช่วง 5 เซนติเมตร รองลงมาคือช่วง 15, 35, 70, 105 และ 140 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าเมทาโนโทรฟไทป์สองเจริญได้ดีในส่วนลึกของชั้นขยะซึ่งมีปริมาณไนเตรทต่ำ อาจเนื่องจากเมทาโนโทรฟไทป์สองบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศได้ เช่น *Methylocyctis sp.* และ *Methylosinus sp.* (Takeda, 1988; Hanson and Hanson, 1996) จึงเป็นไปได้สูงที่ยังพบเมทาโนโทรฟไทป์สองในชั้นขยะที่บริเวณดังกล่าว

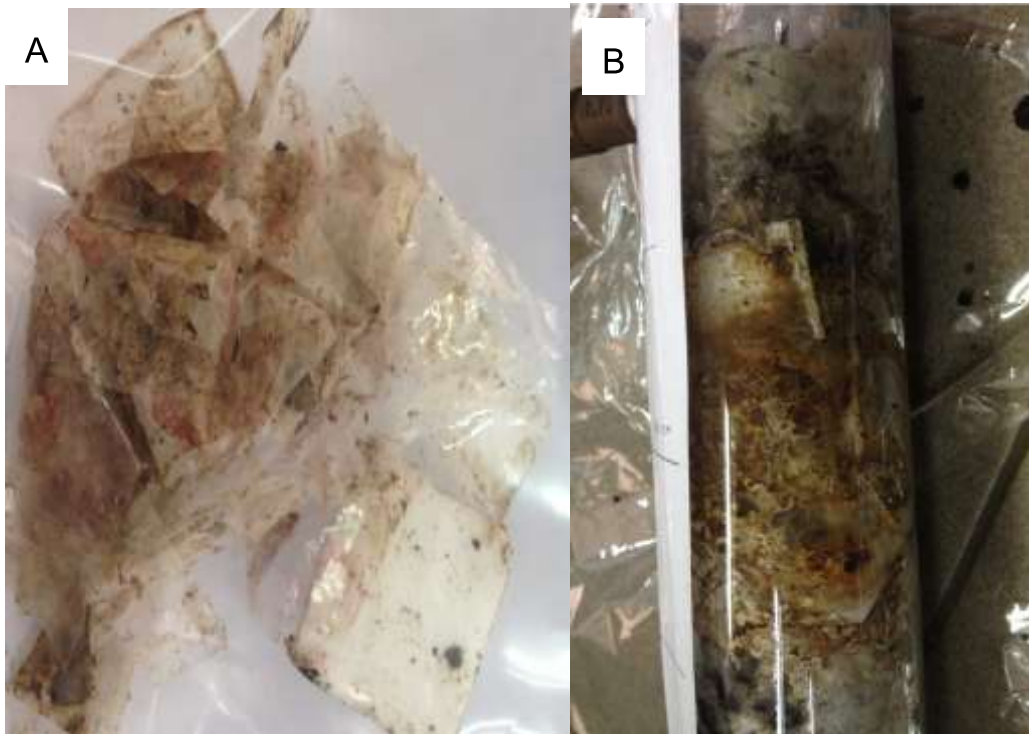
เมื่อนับจำนวนปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆที่เกาะบนผิวของมูลฝอยพลาสติกชนิดต่างๆกันตามระดับความลึก เช่น บนผิวมูลฝอยพลาสติกชนิด HDPE ที่ระดับความลึก 15 ซม. สามารถพบเชื้อเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่งสูงสุดเท่ากับ 41 ล้านเซลล์ต่อกรัมมูลฝอย โดยมีแนวโน้มสอดคล้องกับเชื้อเมทาโนโทรฟไทป์หนึ่งดังกล่าวข้างต้น บริเวณช่วงบนและช่วงล่างของชั้นขยะที่ระดับ 5, 35, 70 และ 105-145 ซม. มีค่าเท่ากับ 26-และ 14-17 ล้านเซลล์ต่อกรัมมูลฝอย ตามลำดับในขณะที่เมทาโนโทรฟไทป์สองพบมากที่ช่วงกลางๆของชั้นขยะคือที่ระดับ 35-105 ซม. เท่ากับ 26-28 ล้านเซลล์ต่อกรัมมูลฝอย ส่วนอื่นๆตรวจพบอยู่ในช่วง 13-21 ล้านเซลล์ต่อกรัมมูลฝอย อย่างไรก็ตามปริมาณของเชื้อแบคทีเรียที่เกาะบนผิวพลาสติกแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยปริมาณของเชื้อแบคทีเรียที่เกาะบนผิวพลาสติกชนิด HDPE > LDPE > PP ≈ PS ถึงแม้ว่าผลของการทดลองนี้จะขัดแย้งกับผลการทดลองอื่นที่ระบุว่า ความหนาแน่นต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักมวลโมเลกุล จึงมีการรายงานพลาสติกชนิด HDPE ที่มีความหนาแน่นสูง จะย่อยสลายยากที่สุด แต่พลาสติกมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างของพลาสติก เช่น การเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้ที่ผิวพลาสติกมีลักษณะไม่เป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปสัมผัสกับผิวของพลาสติกน้อยลง จึงเป็นการยากที่จะทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ มีการรายงานว่าการใส่สารเติมแต่งประเภท Cobalt จะมีที่มากกว่า 150 ppm จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของ *R. rhodochrous*, ในขณะที่การใส่สารเติมแต่งที่มีส่วนประกอบของ Mn และ Mn/Fe มีส่วนทำให้เชื้อจุลินทรีย์มีการทำงานได้ดีขึ้น (Fontanella et al., 2013). รูปที่ 15-16 แสดงการเกาะติดของเชื้อบนผิวพลาสติก



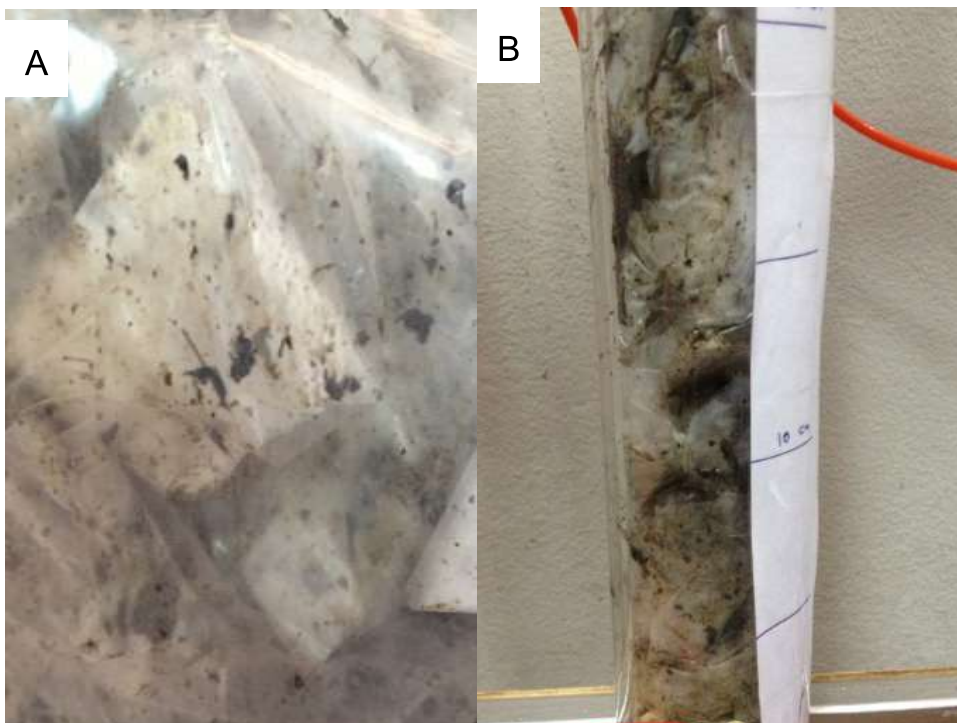
รูปที่ 13 สัดส่วนของเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉลี่ยในระยะเวลา 1 ปี



รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของจุลินทรีย์แต่ละชนิดบนผิวพลาสติกชนิดต่างๆช่วงระยะเวลาต่างๆตลอดระยะเวลา 12 เดือนของการทดลอง



รูปที่ 15 กลุ่มจุลินทรีย์ที่เจริญบนผิวพลาสติก (A) และ กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ (B) หลังจากทำการทดลอง 1 ปี ในระดับความลึก 10-15 เซนติเมตร



รูปที่ 16 กลุ่มจุลินทรีย์ที่บนผิวพลาสติก (A) และ กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ (B) หลังจากทำการทดลอง 1 ปี ในระดับความลึก 130-140 เซนติเมตร

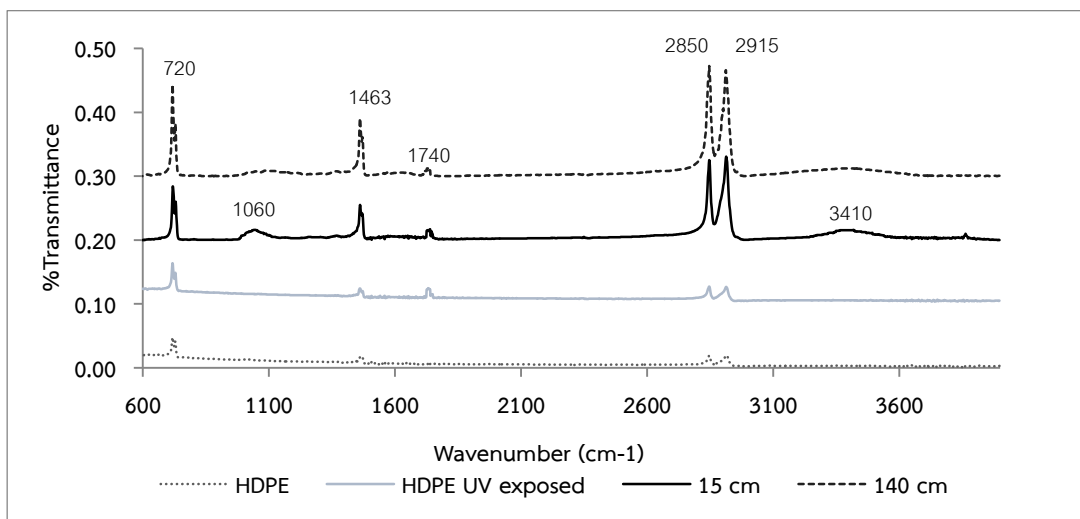
3.3 การประเมินการย่อยสลายของพลาสติก

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีของพลาสติก

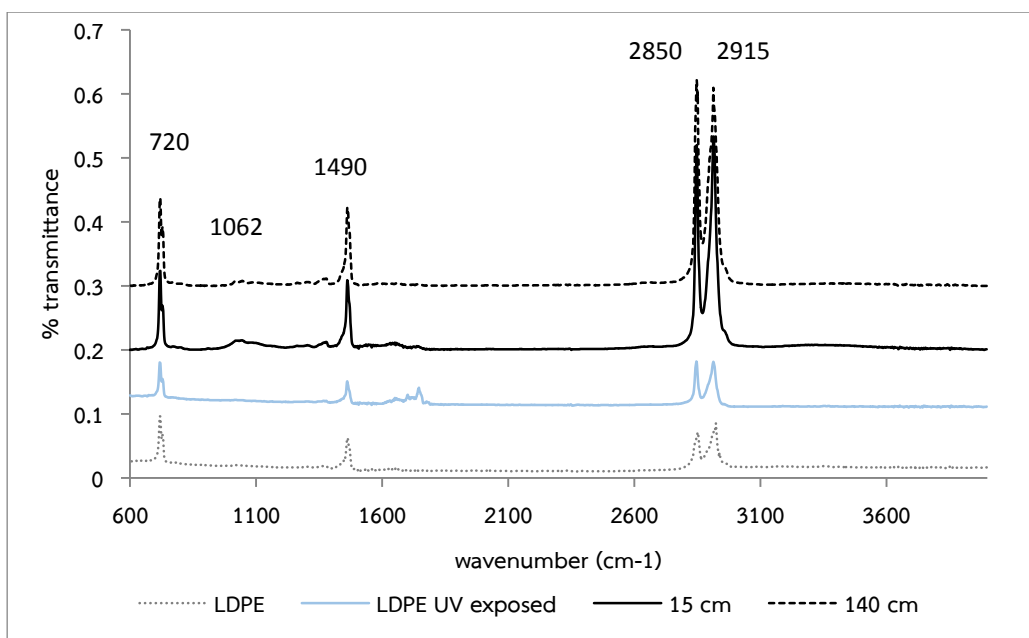
1) HDPE

ผลของการวิเคราะห์กราฟ FT-IR spectra ของพลาสติกชนิด HDPE ก่อนและหลังฉายรังสี UV-B และหลังจากทำการทดลองการย่อยสลายด้วยสภาวะกึ่งมีอากาศนาน 7 เดือนดังแสดงในภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าแต่ละช่วงของเลขความยาวคลื่น (Wavenumber) สามารถบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของพลาสติกที่เป็นองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2850-3000 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นช่วงที่แสดงว่ามีหมู่ฟังก์ชัน C-H บ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการย่อยสลายพันธะไฮโดรคาร์บอนสายยาว (polymer) เป็นพันธะสายสั้น (Esmaeili et al., 2013) ผลการทดลองพบว่าเมื่อพลาสติก HDPE หลังจากการฉายด้วยรังสี UV-B จะมีพีคไม่แตกต่างมากนักจากพลาสติกเริ่มต้นแสดงว่าการสลายพันธะอะลิฟาติกแอลเคนสายยาว C-H เป็นพันธะ C-H สายสั้น เนื่องจากพลังงานแสง (photodegradation) เป็นไปได้ต่ำในช่วงระยะเวลาที่ทดสอบ (200 ชั่วโมง) อย่างไรก็ตาม ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1665-1760 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน Carbonyls (C=O) ที่ประกอบด้วย carboxylic acid, ester, aldehydes และ ketone เป็นองค์ประกอบ และพีคที่ 720 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน Alkene (=CH) เมื่อเปรียบเทียบพีคของช่วงนี้ในช่วงก่อนและหลังฉายรังสี UV-B 200 ชั่วโมง พบว่าความสูงของพีคสูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากฉายด้วยรังสี UV-B แสดงถึงว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยพลังงานแสง

หลังจากนำพลาสติกไปทดสอบฝึกลงเป็นเวลา 7 เดือนด้วยสภาวะกึ่งมีอากาศ พบว่าปริมาณสารประกอบพันธะสายสั้นของ C-H (2850/2915 เซนติเมตร⁻¹) และ =CH (720 เซนติเมตร⁻¹) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับพลาสติกก่อนทดสอบ แสดงว่ามีผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจากการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในชั้นขยะทั้งสองระดับความลึก (15 ซม และ 140 ซม) ทั้งนี้พบว่าที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจะมีปริมาณสารที่มีหมู่ฟังก์ชัน C-H และ =CH ต่ำกว่าที่ระดับ 140 เซนติเมตร อาจเนื่องจากมีเปลี่ยนแปลงรูปของพันธะ C-H และ =CH ไปเป็นรูปอื่นๆ โดยปกติการย่อยสลายโดยปฏิกิริยาที่ใช้อากาศหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีการเปลี่ยนแปลงพันธะ C-H จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน -OH (3000-3500 เซนติเมตร⁻¹) หรือ -CO (1000-1320 เซนติเมตร⁻¹) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารจำพวก alcohol หรือ carboxylic เกิดขึ้นตามลำดับ จะเห็นได้พีคของช่วงเลขคลื่นประมาณ 3000-3500 เซนติเมตร⁻¹ ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร จะมีความสูงพีคสูงกว่า 140 เซนติเมตรซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของหมู่ C-H และ =CH ในทำนองเดียวกันกับช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1463 เซนติเมตร⁻¹ ที่หมายถึงสารที่มีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชัน -CH₃ (methyl) ซึ่งพบว่าที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตรมีการสะสมอยู่ในพลาสติกมากกว่าที่ระดับ 15 เซนติเมตร บอกเป็นนัยถึงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน -CH₃ ในความลึกที่ 15 เซนติเมตรไปเป็นสารประกอบอื่นๆจำพวก alcohol หรือ carboxylic ได้ ซึ่งพบว่า พีคของ carbonyls ยังคงปรากฏอยู่และมีปริมาณสูงขึ้น ในบางกรณีมีการรายงานว่าหลังจากทำการย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ พีคของกลุ่มคาร์บอนิลจะลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถแตกโครงสร้างของคาร์บอนิล ต่อไปเป็นสารประกอบอื่นๆ (Arkatkar et al., 2010; Esmaeili et al., 2013; Gilan et al., 2004; Hadad et al., 2005)



รูปที่ 17 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ผิวพลาสติกชนิด HDPE ด้วยเครื่อง FT-IR หลังเจ็ดเดือนของการฝังกลบ



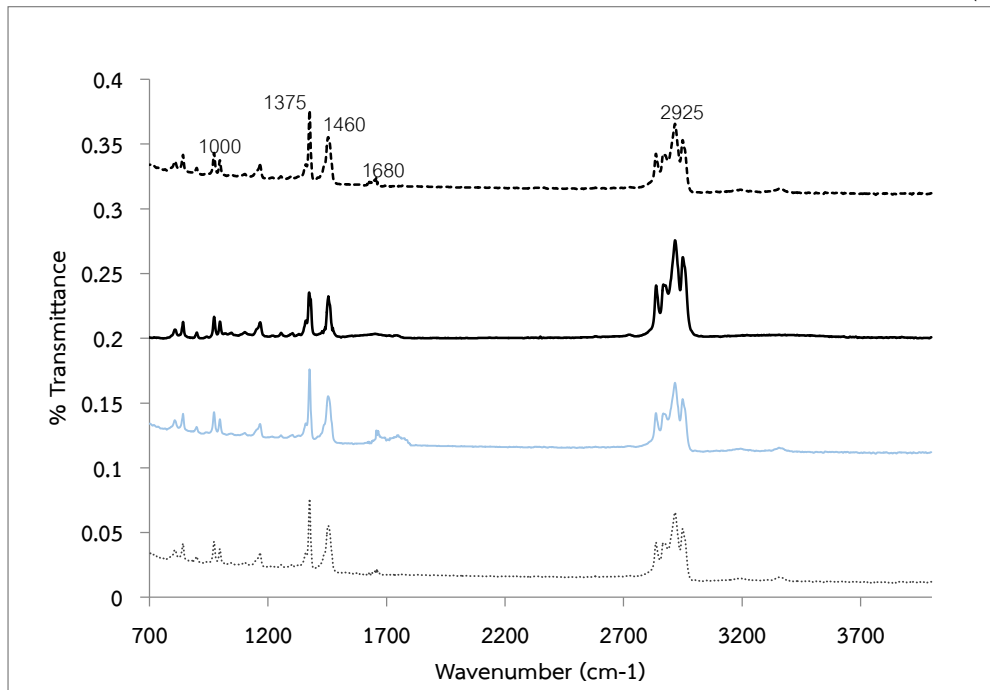
รูปที่ 18 กราฟผลการวิเคราะห์ผิวพลาสติกชนิด LDPE ด้วยเครื่อง FT-IR

2) LDPE

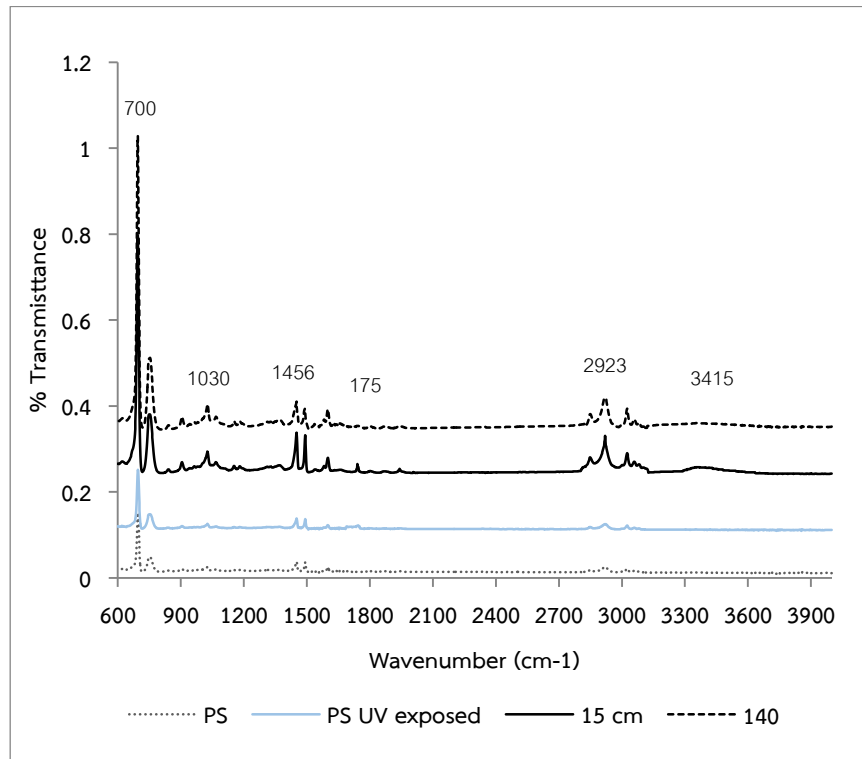
รูปที่ 18 แสดงผลของการวิเคราะห์กราฟ FT-IR spectra ของพลาสติกชนิด LDPE ในการทดลอง พบว่า หลังฉายรังสี UV-B โดยพลังงานแสงสามารถก่อให้เกิดการออกซิชั่นของพลาสติก LDPE ทำให้มีสารประกอบคาร์บอนิล ($1740 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$) ขึ้น เมื่อนำพลาสติกไปทดสอบในแบบจำลองหลุมฝังกลบในสภาวะกึ่งมีอากาศนาน 7 เดือน จะเห็นได้ว่ารูปแบบของกราฟคล้ายคลึงกับพลาสติก HDPE คือ ในช่วงเลขคลื่น $2850\text{--}3000 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ที่แสดงหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติกแอลเคน (C-H) ในช่วงระดับความลึก 15 และ 140 เซนติเมตร มีพีคที่สูงกว่าพลาสติกหลังจากฉายด้วยรังสี UV-B แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ ในขณะที่ในช่วงความยาวคลื่นที่ $1,710\text{--}1,750 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ (C=O) มีการลดลงเมื่อทำการย่อยสลายในสภาวะกึ่งมีอากาศเป็นเวลา 7 เดือนทั้งสองระดับความลึก และพบพีคความยาวคลื่น $1000\text{--}1320 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ (C-O) ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าที่ระดับ 140 เซนติเมตร แสดงถึงการแตกพันธะสองเป็นพันธะเดี่ยว เช่น การเปลี่ยนจาก alkane เป็น alcohol หรือสารประกอบ carboxylic โดยเชื้อจุลินทรีย์มีมากกว่าหรือมีการย่อยสลายได้ดีกว่า สรุปได้ว่า มีการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก LDPE กล่าวคือเชื้อจุลินทรีย์สามารถทำลายพันธะตรงตำแหน่งให้เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ ที่มีมวลโมเลกุลเล็กลงได้

3) PP

ผลของการวิเคราะห์กราฟ FT-IR spectra ของพลาสติกชนิด PP ก่อนและหลังฉายรังสี UV-B และหลังจากทำการทดลองการย่อยสลายด้วยสภาวะกึ่งมีอากาศนาน 7 เดือนดังแสดงในรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของการเปลี่ยนแปลงจะคล้ายกับ HDPE และ LDPE เนื่องจากเป็นพลาสติกที่จัดอยู่ในกลุ่มของพลาสติกชนิด Polyolefin โดยช่วงความยาวคลื่นที่ $1665\text{--}1,770 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ (carbonyl, C=O) มีการลดลงเมื่อทำการย่อยสลายในสภาวะกึ่งมีอากาศ แสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายทางชีวภาพ กล่าวคือเชื้อจุลินทรีย์สามารถทำลายพันธะตรงตำแหน่งให้เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ ที่มีมวลโมเลกุลเล็กลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1375 และ $1460 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงที่บ่งบอกของสารที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเมทิล (-CH_3) มีความสูงน้อยกว่าที่ 140 เซนติเมตร เป็นผลมาจากตำแหน่งที่มีหมู่ฟังก์ชันเมทิลถูกออกซิไดซ์หรือถูกเชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายให้เปลี่ยนเป็นรูปอื่น (Ambika et al., 2009; Jeyakumar et al., 2013) มีผลทำให้ในช่วงเลขคลื่น $2850\text{--}3000 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ที่แสดงหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติกแอลเคน (C-H) ในช่วงระดับความลึก 15 และ 140 เซนติเมตร มีพีคที่สูงกว่าเริ่มต้นและหลังจากฉายด้วยรังสี UV-B และ ความสูงของพีคที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร สูงมากกว่าที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตร แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายพลาสติกหรือการทำงานของจุลินทรีย์ที่ดีกว่า



รูปที่ 19 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หีวพลาสติกชนิด LDPE ด้วยเครื่อง FT-IR



รูปที่ 20 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หีวพลาสติกชนิด LDPE ด้วยเครื่อง FT-IR

4) PS

จากรูปที่ 20 แสดงกราฟ FT-IR ของพลาสติกชนิด PS จะเห็นได้ว่าหลังจากฉายด้วยรังสี UV-B แล้วพบว่าช่วงเลขคลื่นที่ 1665–1,770 เซนติเมตร⁻¹ (C=O) มีการปรากฏของพีคเล็กน้อยเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกชนิด PS ประกอบด้วยจะเป็นวงเบนซินต่อกันเป็นสายยาว จึงยากต่อการย่อยสลาย อย่างไรก็ตามหลังจากทำการทดลองในแบบจำลองหลุมฝังกลบด้วยสภาวะกึ่งมีอากาศเป็นระยะเวลา 7 เดือนนั้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน carbonyl เล็กน้อยที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร และมีการสลายของวงเบนซินเป็นวงย่อยมากขึ้น สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของพีคในช่วงความยาวคลื่นที่ 1600 เซนติเมตร⁻¹ ของทั้งระดับความลึก 15 และ 140 เซนติเมตรซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารกลุ่ม aromatic (C=C) นอกจากนี้มีการปรากฏพีคของเลขคลื่นที่ 3000-3100 เซนติเมตร⁻¹ แสดงให้เห็นว่าที่ชั้นนี้มีการย่อยสลายจนมีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน (C-H) ของสารกลุ่ม aromatic อีกด้วย

2.3.3 ผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากการย่อยสลายของพลาสติก

ผลกระทบที่เกิดจากการย่อยสลายของ HDPE, LDPE และ PP ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทเดียวกัน และที่พบมากจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะเดี่ยว (alkane) รองลงมาคือ alcohol, alkene, acid ester, carboxylic acid และ ketone ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพลาสติกแต่ละชนิดพบว่า พลาสติกชนิด HDPE เมื่อนำมาฉายด้วยรังสี UV-B พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสารกลุ่ม alkane, alcohol และ acid ester เมื่อเทียบกับพลาสติกเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยา oxidation เกิดขึ้นทำให้มีการแตกพันธะบางตำแหน่ง มีผลทำให้มีการหลุดออกมาของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า หรือมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่ที่สั้นขึ้น ซึ่งทำให้มีลดคุณสมบัติของพลาสติกที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เป็นการส่งเสริมให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเกาะและย่อยสลายพลาสติกได้ง่ายขึ้น หลังจากทดลองการย่อยสลายด้วยสภาวะกึ่งมีอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนก็พบว่า ปริมาณของสารประกอบในกลุ่มของ alkane, alcohol, alkene และ acid ester มากขึ้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ถูกฉายด้วยรังสี UV-B เพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรพบประกอบ alkane ที่พบจะอยู่ในช่วงของ C7 ถึง C44 สารประกอบ alkene จะพบในช่วงของ C19 ถึง C23 สารประกอบ alcohol จะพบในช่วงของ C9 ถึง C31 และสารประกอบ acid ester จะพบในช่วงของ C17 ถึง C36 เมื่อระยะเวลาในการทดลองจาก 3 เดือนเป็น 7 เดือนและ 12 เดือน พบว่ายิ่งเพิ่มระยะเวลาในการทดลองมากขึ้น จะพบสารประกอบ alkane ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงเช่น ที่ระยะเวลา 3 เดือนจะพบ Heptane (C7) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 100 แต่หลังจาก 7 เดือน และ 12 เดือนจะพบ Hexane (C5) และ Butane (C4) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาทำให้เชื้อจุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยพลาสติกที่เกาะกันเป็นโซ่ยาว ให้สายโซ่สั้นลงได้เรื่อยๆ นอกจากนี้ปริมาณของสารประกอบ alkane ที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ (C9-C4) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า (C10-C44) จะถูกทำให้สั้นลง ปริมาณของสารประกอบเหล่านี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เชื้อจุลินทรีย์บางชนิดสามารถปล่อยเอนไซม์บางชนิด เช่น monooxygenase มาย่อยสลายหรือ เปลี่ยนสารประกอบ alkane เป็นสารประกอบ alcohol จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็น ketone และ fatty acid ตามลำดับ ดังนั้นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบ alcohol จึงคล้ายกับสารประกอบ alkane โดยจะพบสารประกอบ alcohol ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงที่ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกถูกย่อยสลายได้ดีขึ้นทำให้ปริมาณของสารเติมแต่งบางชนิดเช่น 1,2-Benzenedicarboxylic acid, dibutyl ester หรือ phthalic acid, dibutyl ester หลุดออกมาจากพลาสติกมากขึ้น ตารางที่ 5 แสดงผลกระทบที่พบหลังจากการย่อยสลายของพลาสติกชนิด HDPE โดยการวิเคราะห์ด้วยจีซีเอ็มเอส ทั้งนี้สรุปจำนวนชนิดของสารประกอบต่างๆที่พบในสภาวะต่างๆของการทดสอบของพลาสติกชนิดต่างๆในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ร้อยละของผลกระทบที่พบเมื่อเทียบกับพลาสติกเริ่มต้น

ตารางที่ 5 สารประกอบ Alkane ที่ตรวจพบในพลาสติกชนิด HDPE ในสภาวะต่างๆ

สภาวะ	HDPE
เริ่มต้น	Alkane : 9 ชนิด C ₈ H ₁₈ , C ₈ H ₂₂ , C ₁₁ H ₂₂ , C ₁₉ H ₄₀ , C ₂₀ H ₄₂ , C ₂₁ H ₄₄ , C ₂₃ H ₄₈ , C ₃₆ H ₇₄ , C ₄₄ H ₉₀
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านแสงยูวีเทียบ กับเริ่มต้น	Alkane: 9 ชนิด C ₉ H ₂₀ , C ₁₄ H ₃₀ , C ₁₅ H ₃₂ , C ₁₆ H ₃₂ , C ₁₇ H ₃₆ , C ₁₈ H ₃₆ , C ₂₂ H ₄₆ , C ₂₇ H ₅₆ , C ₃₆ H ₇₄
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 3 เดือน เทียบกับยูวี (15 cm)	Alkane: 9 ชนิด (รวมทั้งหมด 18 ชนิด) C ₇ H ₁₆ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₂₄ H ₅₀ , C ₂₅ H ₅₂ , C ₂₆ H ₅₄ , C ₁₈ H ₃₆ , C ₂₂ H ₄₆ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 7 เดือน เทียบกับยูวี (15 cm)	Alkane: 12 ชนิด (รวมทั้งหมด 21 ชนิด) C ₆ H ₁₄ , C ₇ H ₁₆ , C ₈ H ₁₈ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₃ H ₂₈ , C ₂₄ H ₅₀ , C ₂₅ H ₅₂ , C ₂₆ H ₅₄ , C ₁₈ H ₃₆ , C ₂₂ H ₄₆ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 12 เดือน เทียบกับยูวี (15 cm)	Alkane: 13 ชนิด (รวมทั้งหมด 22 ชนิด) C ₄ H ₁₀ , C ₆ H ₁₄ , C ₇ H ₁₆ , C ₈ H ₁₈ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₃ H ₂₈ , C ₂₄ H ₅₀ , C ₂₅ H ₅₂ , C ₂₆ H ₅₄ , C ₁₈ H ₃₆ , C ₂₂ H ₄₆ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 3 เดือน เทียบกับยูวี (140 cm)	Alkane: 10 ชนิด (รวมทั้งหมด 19 ชนิด) C ₇ H ₁₆ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₃ H ₂₈ , C ₂₄ H ₅₀ , C ₁₈ H ₃₆ , C ₂₂ H ₄₆ , C ₃₁ H ₆₄ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 7 เดือน เทียบกับยูวี (140 cm)	Alkane: 10 ชนิด (รวมทั้งหมด 19 ชนิด) C ₅ H ₁₂ , C ₆ H ₁₄ , C ₇ H ₁₆ , C ₈ H ₁₈ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₃ H ₂₈ , C ₂₄ H ₅₀ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂ , C ₄₀ H ₈₂
สารที่พบเพิ่มเติมหลังจากผ่านฝึงบกลบ 12 เดือน เทียบกับยูวี (140 cm)	Alkane: 6 ชนิด (รวมทั้งหมด 15 ชนิด) C ₂₆ H ₅₄ , C ₃₁ H ₆₄ , C ₃₂ H ₆₆ , C ₃₅ H ₇₂ , C ₄₀ H ₈₂

เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตรพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบจะคล้ายคลึงกับที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรในช่วงของ 7 เดือนแรก หลังจากนั้นที่ 12 เดือน สารประกอบ alkane ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (C5-C15) จะมีแนวโน้มที่ลด ซึ่งอาจจะเป็นการบ่งบอกว่าการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถย่อยสลายสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลสูงลดลง ไม่ทันต่อการย่อยสลายของสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ทำให้สารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำถูกใช้หมดไป ซึ่งก็สอดคล้องปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่ลดต่ำลง ส่วนสารประกอบอื่นๆ ก็มีแนวโน้มเดียวกันกับสารประกอบ alkane เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่พบที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร กับ ระดับความลึก 140 เซนติเมตรพบว่า ที่ 15 เซนติเมตรจะพบสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า นั้นก็แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความลึกที่ 15 เซนติเมตรจะมีการย่อยสลายของพลาสติกได้ดีกว่า

การย่อยสลายของพลาสติกชนิด LDPE แนวโน้มของการสารประกอบต่างๆ จะคล้ายกับ HDPE ในช่วงของ 7 เดือนแรกจะมีการตรวจพบสารประกอบ alkane alcohol หรือ acid ester ที่มีมวลโมเลกุลต่ำมากกว่าช่วง 3 เดือนแรก ซึ่งที่ 15 เซนติเมตรจะมีประสารประกอบเหล่านั้นที่มีมวลโมเลกุลต่ำมากกว่าที่ 140 เซนติเมตร ในช่วง 12 เดือนที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรพบว่าสารประกอบ alcohol ในช่วง C8-C13 ลดต่ำลงส่งผลให้ alkane ในช่วง C7-C8 หายไป แต่มีการเพิ่มขึ้นของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำที่อยู่ในรูปของ fatty acid เช่น acetic acid (MW= 60) และ Octanoic acid (MW= 144) มีปริมาณมากขึ้น บ่งบอกว่ายังมีการย่อยสลายพลาสติกอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม 1,2-Benzenedicarboxylic, dibutyl ester ซึ่งเป็นสารเติมแต่งยังคงมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามเวลา และที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรมีปริมาณที่มากกว่า 140 เซนติเมตร

การย่อยสลายของพลาสติกชนิด PP แนวโน้มของย่อยสลายสารประกอบคล้ายกับ HDPE ในช่วงของ 7 เดือนแรก โดยสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำหรือโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะถูกย่อยสลายไปก่อน หลังจากนั้นเมื่อเวลา 12 เดือนสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าจะลดต่ำลง (C6-C8) เหลือแต่สารประกอบที่มีย่อยสลายยาก ดังนั้นในช่วงนี้จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารได้ช้าลง อย่างไรก็ตามแนวโน้มของสารเติมแต่ง เช่น 1,2-

Benzenedicarboxylic, bis (2-methoxyethyl) ester หรือ di(2-ethylhexyl) phthalate และ 1,2-Benzenedicarboxylic, dioctyl ester หรือ Phthalic acid, dioctyl ester มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าพลาสติกมีการย่อยสลายได้มากขึ้นตามเวลา โดยที่ระดับความลึกที่ 15 เซนติเมตรจะมีปริมาณของสารเติมแต่งมากกว่าที่ 140 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกชนิด PS พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic) เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังจากฉายด้วยรังสี UV-B จะพบว่าจำนวนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเท่ากัน แต่ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของหลังจากการฉาย UV-B มากกว่าพลาสติกเริ่มแรก ที่เวลาเดียวกันที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจะพบสารประกอบอะโรมาติกที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตร ถึงแม้ว่าโครงสร้างของ PS ประกอบด้วยวงเบนซีนซึ่งยากต่อการย่อยสลายของพลาสติก แต่ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรที่เวลา 12 เดือน จะพบสารที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ เช่น Tetracosane ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายวงเบนซีนโดยเชื้อจุลินทรีย์ในดิน นอกจากนี้ก็ยังพบสาร Cyclohexasiloxane, dodecamethyl ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในพลาสติก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา

Wavenumber	Functional group	HDPE	LDPE	PP	PS
------------	------------------	------	------	----	----

ตารางที่ 6 สรุปจำนวนชนิดของสารประกอบที่ตรวจพบในสภาวะต่างของการทดสอบ

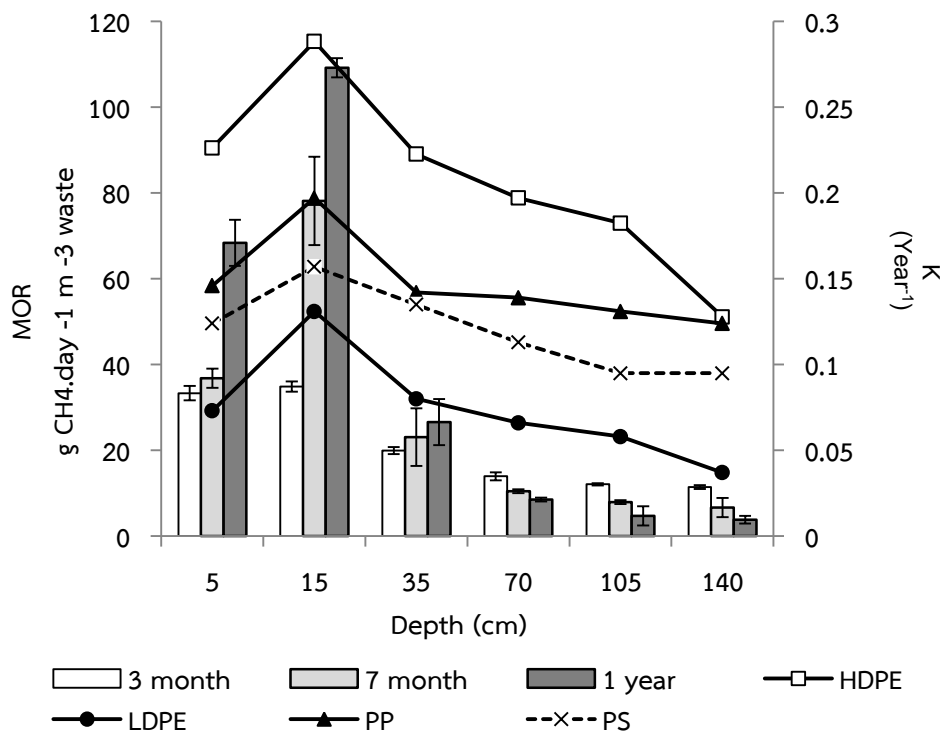
Compounds	Type of Plastics											
	HDPE			LDPE			PP			PS		
	Initial	UV exposure	1-12 months biogas exposure	Initial	UV exposure	1-12 months biogas exposure	Initial	UV exposure	1-12 months biogas exposure	Initial	UV exposure	1-12 months biogas exposure
Alkane	9	17	24	3	5	23	9	17	27	ND	ND	2
Alkene	ND	ND	4	2	2	4	ND	0	1	ND	ND	ND
Alcohol	1	4	7	6	6	11	ND	1	7	1	1	3
Ketone	ND	ND	2	2	2	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acid esters	ND	ND	12	ND	ND	2	ND	4	6	ND	ND	2
Aldehyde	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1	ND	ND	ND
Aromatic	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2	2	7

		initial	UV	15 cm	140 cm	initial	UV	15 cm	140 cm	initial	UV	15 cm	140 cm	initial	UV	15 cm	140 cm
650-1000	Alkene (=C-H)	100	147	276	524	100	153	449	496	ND	ND	ND	ND	100	126	406	499
1000-1320	Alcohols, Carboxylic acid, ester, ethers (C-O)	100	110	5820	2510	100	84	405	147	100	100	105	101	100	103	473	464
1335-1395, 1430-1470	Methyl group (- CH ₃)	100	117	490	774	100	126	965	1060	100	100	80	124	100	100	380	195
1585-1600	Aromatic (C-C)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100	110	320	356
1665-1760	Carbonyls (C=O)	100	217	239	212	100	1781	299	69	100	136	81	90	100	550	650	425
2850-3000	Alkane (C-H)	100	448	817	1037	100	111	507	484	100	108	201	126	100	102	685	659
3000-3100	Aromatic (C-H)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100	101	450	374
3410	Alcohol, Carboxylic acid (O-H)	100	120	5700	2900	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100	119	2887	1902

ตารางที่ 7 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่พบเมื่อเทียบกับพลาสติกเริ่มต้น

3.4 ความสัมพันธ์ของอัตราการย่อยสลายของพลาสติกกับเชื้อเมทาโนโทรฟ

การจากทดลองพบว่า ปริมาณคาร์บอนของขยะพลาสติกแต่ละชนิดจะลดลงตามเวลา เมื่อนำปริมาณคาร์บอนมา plot กับเวลาจะถึงความสัมพันธ์ของการลดลงของพลาสติกจะพบว่า อัตราการย่อยสลายของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรจะมีการย่อยสลายของพลาสติกทั้ง 4 ชนิดมากที่สุด และที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตรมีอัตราการย่อยสลายของพลาสติกทั้ง 4 ชนิดต่ำที่สุด โดยพลาสติกที่มีการย่อยสลายเร็วที่สุดคือพลาสติกชนิด HDPE รองลงมาคือ PP, PS และ LDPE ตามลำดับ ซึ่งความเร็วในการย่อยสลายของพลาสติกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่นมวลโมเลกุล โครงสร้างของพลาสติก หรือวัตถุเติมเต็มเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้พลาสติกมีความคงทนมากขึ้น พลาสติกชนิด HDPE มีการย่อยสลายเร็วที่สุดที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรคือ 0.289 ต่อปี รองลงมาคือที่ระดับ 5, 35, 70, 105 และ 145 เซนติเมตรที่มีอัตราการย่อยสลายคือ 0.226, 0.223, 0.197, 0.182 และ 0.128 ต่อปี ตามลำดับ พลาสติกชนิด LDPE มีการย่อยสลายเร็วที่สุดที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตรคือ 0.131 ต่อปี รองลงมาคือที่ระดับ 35, 5, 70, 105 และ 145 เซนติเมตรที่มีอัตราการย่อยสลายคือ 0.080, 0.073, 0.066, 0.058 และ 0.037 ต่อปี ตามลำดับ



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของอัตราการย่อยสลายพลาสติกและมีเทนออกซิเดชัน

มีรายงานว่าเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถย่อยสลายพลาสติกในกลุ่มนี้ได้ เช่น เชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มของ *Brevibacillus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Rhodococcus spp.*, *Stenotrophomonas spp.*, *Acinetobacter spp.*, *Delftia spp.*, *Flavobacterium spp.*, *Alcaligenes spp.*, *Amylolytic spp.*, and *Vibrio spp.* (Cacciari et al., 1993; Hadad et al., 2005; Koutny et al., 2009; Nanda et al., 2010) ในธรรมชาติเชื้อจุลินทรีย์อาศัยอยู่ร่วมกัน และทำงานร่วมกัน โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพลาสติกได้จะปล่อยเอนไซม์ในกลุ่มของ Alkane hydroxylase, Oxygenase หรือ Laccase ออกมาย่อยสลายพลาสติกโดยจะตัดให้โครงสร้างของพลาสติกสั้นลง หรือมีโมเลกุลต่ำลง (Yoon et al., 2012; Sato et al., 2013) จากรูป 21 จะเห็นว่าอัตราการย่อยสลายของพลาสติกสูงสุดจะสอดคล้องกับอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชัน คือ ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร เชื้อเมทาโนโทรฟจะมีการทำงานได้ดีที่สุด และเชื้อเมทาโนโทรฟเองยังเป็นจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่อาศัยอยู่ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร เนื่องจากเชื้อเมทาโนโทรฟมีเอนไซม์ methane monooxygenase ที่มีความสามารถย่อยสลายสารประกอบต่างๆ เช่น สารประกอบ alkane, alkene หรือ คลอรีน (Chlorinated compound) ผ่านกระบวนการโคเมตาบอลิซึม (Co-metabolism) (Wymore et al. 2007) ดังนั้นเป็นไปได้ว่าเมทาโนโทรฟมีส่วนร่วมที่ช่วยในการย่อยสลายพลาสติกที่มีมวลโมเลกุลต่ำหรือเป็นสายโซ่สั้นๆ โดยจะช่วยย่อยสลายต่อจากเชื้อจุลินทรีย์ตัวอื่น

สรุปผลการทดลอง

1. พลาสติกทั้ง 4 ชนิดคือ (HDPE, LDPE, PP และ PS) สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่เจริญในหลุมฝังกลบจำลองแบบกึ่งมีอากาศ โดยอัตราการย่อยสลายพลาสติกทุกชนิดมีความสัมพันธ์กับปริมาณเชื้อเมทาโนโทรฟและอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชัน อัตราการย่อยสลายพลาสติกสูงสุดจะถูกพบในระดับชั้นมูลฝอยที่มีอัตรามีเทนออกซิเดชันสูงที่สุดเช่นกัน
2. ความเหมาะสมของเข้มข้นของออกซิเจนและมีเทนมีผลต่อการกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์และอัตราการย่อยสลายของพลาสติก โดยการย่อยสลายในสภาวะที่มีออกซิเจนสูงจะมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำและความลึกที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดอัตราการย่อยสลายเร็วที่สุดคือที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร รองลงมาคือ 5, 35, 70, 105 และ 140 เซนติเมตร ตามลำดับ
3. ปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวพลาสติกขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกและระดับความลึกของชั้นมูลฝอย เชื้อเมทาโนโทรฟสามารถอาศัยอยู่บนพลาสติกทุกระดับความลึก แต่ที่ 15 เซนติเมตรจะมีอัตราการเกิดมีเทนออกซิเดชันมากที่สุดรองลงมาคือ 5, 35, 70 และ 140 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของมีเทนและออกซิเจน โดยพบว่า โดยพบว่า HDPE จะมีอัตราเร็วในการย่อยสลายสูงสุด, $K = 0.288 \text{ y}^{-1}$ รองลงมาคือ PP ($K = 0.197 \text{ y}^{-1}$), PS ($K = 0.157 \text{ y}^{-1}$) และ LDPE ($K = 0.131 \text{ y}^{-1}$) ตามปริมาณเชื้อเมทาโนโทรฟที่เกาะอยู่บนพลาสติก

เอกสารอ้างอิง

บุญญา ขาญนอก. 2550. การนำพลาสติกจากกองมูลฝอยกลางแจ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบเชื้อเพลิง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศิริลักษณ์ ตั้งขบวนบุตร วิไล เจียมไชยศรี และชาติ เจียมไชยศรี 2551. อัตราเมเทนออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบดินในชั้นหน้าดินกลบทับที่มีไนโตรเจนสูงของหลุมฝังกลบมูลฝอย. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 หน้า 121-131. ISBN: 1686-2961.
- Cacciari, I., P. Quatrains, G. Zirletta, E. Mincione, V. Vinciguerra, P. Lupattelli, et al. 1993. Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: physicochemical characterization of metabolites produced. *Applied and Environmental Microbiology*. 59 (11): 3695-3700.
- Esmaeili, A., Pourbabae, A.A., Alkhani, H.A., Shabani, F., Esmaeili, E. 2013. Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by Mixed Culture of *Lysinibacillus xylanilyticus*, *Aspergillus niger* in Soil. *PLoS ONE*, 8(9), e71720.
- Feldman, D. 2002. Polymer weathering: photo-oxidation. *Journal of Polymer and the Environmental*. 10 (4): 163-173.
- Fontanella, S., S. Bonhomme, J.-M. Brusson, S. Pitteri, G. Samuel, and G. Pichon. 2013. Comparison of biodegradability of various polypropylene films containing pro-oxidant additives based on Mn, Mn/Fe or Co. *Polymer Degradation and Stability*. 98: 875-884.
- Hadad, D., Geresh, S., Sivan, A. 2005. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *Journal of Applied Microbiology*. 98(5): 1093-1100.
- HE, P., Yang, N., Fang, W., Lu, F. and Shao, L. 2011. Interaction and independence on methane oxidation of landfill cover soil among three impact factors: water, oxygen and ammonium. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*. 5 (2): 175-185.
- Koutny, M., Amato, P., Muchova, M., Ruzicka, J., Delort, A.-M. 2009. Soil bacterial strains able to grow on the surface of oxidized polyethylene film containing prooxidant additives. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63: 354-357.
- Nanda, S., Sahu, S.S., Abraham, J. 2010. Studies on the biodegradation of natural and synthetic polyethylene by *Pseudomonas* spp *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 14(2): 57-60.
- Pokhrel, D. 1998. Microbial Methane Oxidation Studies in Laboratory Scale Experiments. Master Thesis, Asian Institute of Technology.
- Santo, M., Weitsman, R., Sivan, A. 2013. The role of the copper-binding enzyme – laccase – in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 84: 204-210.
- Yoon, M.G., Jeon, H.J., Kim, M.N. 2012. Biodegradation of polyethylene by a soil bacterium and AlkB cloned recombinant cell. *Bioremediation & Biodegradation*, 3(4): 1-8.

