ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๔๓๐ (พ.ศ. ๒๕๕๕)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

การหาการแตกสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนของพลาสติก

ภายใต้การควบคุมสภาวะการหมัก

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๑๕ แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การหาการแตกสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนของพลาสติกภายใต้การควบคุมสภาวะการหมัก มาตรฐานเลขที่ มอก. 2509 - 2554 ไว้ ดังมีรายการละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ ให้มีผลตั้งแต่วันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๒๓ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๕๕

หม่อมราชวงศ์พงษ์สวัสดิ์ สวัสดิวัตน์

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

การหาการแตกสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนของพลาสติกภายใต้การควบคุมสภาวะการหมัก

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดการทดสอบหาระดับและอัตราการแตกสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่เป็นฟิล์ม ชิ้นงานขึ้นรูป เม็ด ผง หรืออื่นๆ ภายใต้การควบคุมการหมักแบบใช้ออกซิเจนในภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ เพื่อให้การทดสอบนี้ทำซ้ำได้ (reproducible) และทวนซ้ำได้ (repeatable) ภายใต้สภาวะเดียวกับสภาวะการหมัก ทั้งนี้ให้ใช้จุลินทรีย์ที่ได้จากกองขยะชุมชน โดยมีการควบคุมและติดตามอุณหภูมิการหมุนเวียนของอากาศและความชื้นอย่างใกล้ชิด

1.2 การทดสอบนี้กำหนดขึ้นเพื่อหาปริมาณเป็นร้อยละของการเปลี่ยนคาร์บอนในตัวอย่างเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวชี้บ่งอัตราการแตกสลายทางชีวภาพ

1.3 การทดสอบนี้ใช้ได้กับพลาสติกทุกชนิดที่ไม่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกองหมักแบบใช้ออกซิเจน

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 การแตกสลายทางชีวภาพ (biodegradation) หมายถึง การแตกสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ การแตกสลายภายนอกเซลล์โดยการปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เนื่องจากโซ่พอลิเมอร์มีขนาดใหญ่และการย่อยสลายภายในเซลล์ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ได้ กระบวนการนี้ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (ultimate biodegradation) เป็นพลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่มีความเสถียรในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ

2.2 การหมัก (composting) หมายถึง กระบวนการใช้ออกซิเจนที่ได้รับการออกแบบเพื่อผลิตปุ๋ยหมัก

2.3 เชื้อปลูกปุ๋ยหมัก (compost inoculum) หมายถึง จุลินทรีย์ที่ได้จากเศษสารอินทรีย์ในกองขยะชุมชน

2.4 ของแข็งแห้งทั้งหมด (total dry solids) หมายถึง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ได้หลังจากอบวัสดุทดสอบหรือปุ๋ยหมักที่ทราบมวลแน่นอนที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส จนมวลคงที่

2.5 ของแข็งระเหยได้ (volatile solids) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ได้จากผลต่างระหว่างปริมาณของแข็งแห้งทั้งหมดของวัสดุทดสอบหรือปุ๋ยหมักกับสิ่งที่เหลือจากการเผาวัสดุทดสอบเดียวกันที่ทราบมวลแน่นอนที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ ปริมาณของแข็งระเหยได้ เป็นตัวชี้วัดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่

3. การทดสอบ

3.1 เครื่องมือ

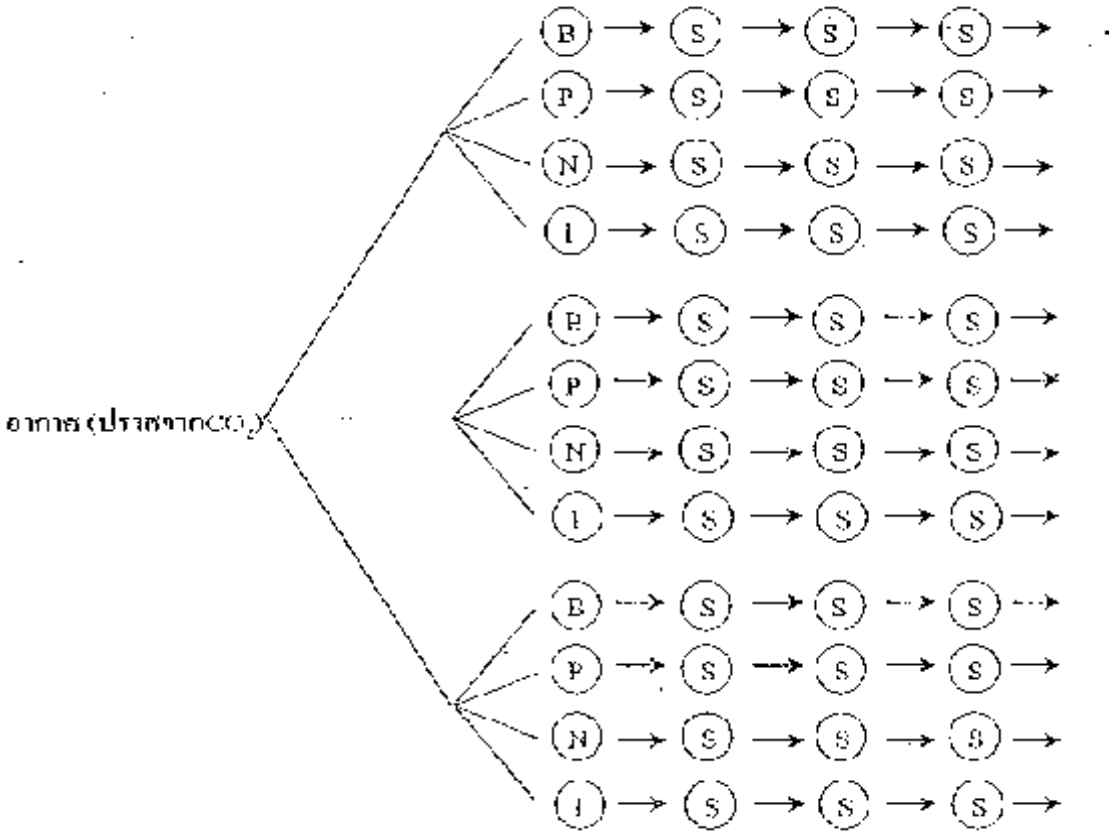
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการหมักทางชีวภาพ

3.1.1.1 ภาชนะทดสอบการหมักทางชีวภาพ ปริมาตร 2 ลิตร ถึง 5 ลิตร แบ่งเป็น ภาชนะใส่วัสดุทดสอบ 1 หน่วย ภาชนะไร้วัสดุทดสอบ (blank) 1 หน่วย ภาชนะใส่สิ่งควบคุมเชิงบวก (positive control) 1 หน่วย และภาชนะใส่สิ่งควบคุมเชิงลบ (negative control) 1 หน่วย แต่ละการทดสอบให้ทำ 3 ซ้ำ รวมเป็น ภาชนะทดสอบ 12 หน่วย ถ้ามีการทดสอบเพื่อคัดกรองตัวอย่างอาจใช้ภาชนะทดสอบปริมาตรเล็กลงได้การจัดเตรียมภาชนะทดสอบแบบใช้อุปกรณ์ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ดูรูปที่ 1)

3.1.1.2 เครื่องอังน้ำ (water bath) หรืออุปกรณ์อื่นที่ควบคุมอุณหภูมิภาชนะทดสอบการหมักที่ (58 ± 2) องศาเซลเซียส

3.1.1.3 ระบบอัดอากาศที่ป้อนอากาศปราศจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำให้กับภาชนะทดสอบการหมักแต่ละหน่วยด้วยอัตราคงที่ กรณีวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงอาจใช้อากาศปกติได้

3.1.1.4 อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับวัดความเข้มข้นของออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากภาชนะทดสอบการหมัก เช่น อุปกรณ์รับรู้เฉพาะ (specific sensor) หรือเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟที่เหมาะสม



B หมายถึง ภาชนะไร้วัสดุทดสอบ (blank)

P หมายถึง ภาชนะใส่สิ่งควบคุมเชิงบวก (positive control)

N หมายถึง ภาชนะใส่สิ่งควบคุมเชิงลบ (negative control)

I หมายถึง ภาชนะใส่วัสดุทดสอบ (test specimen)

S หมายถึง ขวดบรรจุสารละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์ (scrubbing solution $Ba(OH)_2$)

รูปที่ 1 การจัดเตรียมภาชนะทดสอบแบบใช้อุปกรณ์ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

(ข้อ 3.1.1.1)

3.1.2 อุปกรณ์ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากภาชนะทดสอบการหมักแต่ละหน่วย

3.1.2.1 ขวดปริมาตร 5 000 มิลลิลิตร อย่างน้อย 3 ใบ บรรจุสารละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์ สำหรับดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.1.2.2 ท่ออ่อน (flexible tubing) ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านไม่ได้

3.1.2.3 จุกปิดพร้อมอุปกรณ์สุ่มตัวอย่างก๊าซ

3.1.3 เครื่องชั่งละเอียด มีความคลาดเคลื่อน ±0.1 มิลลิกรัม

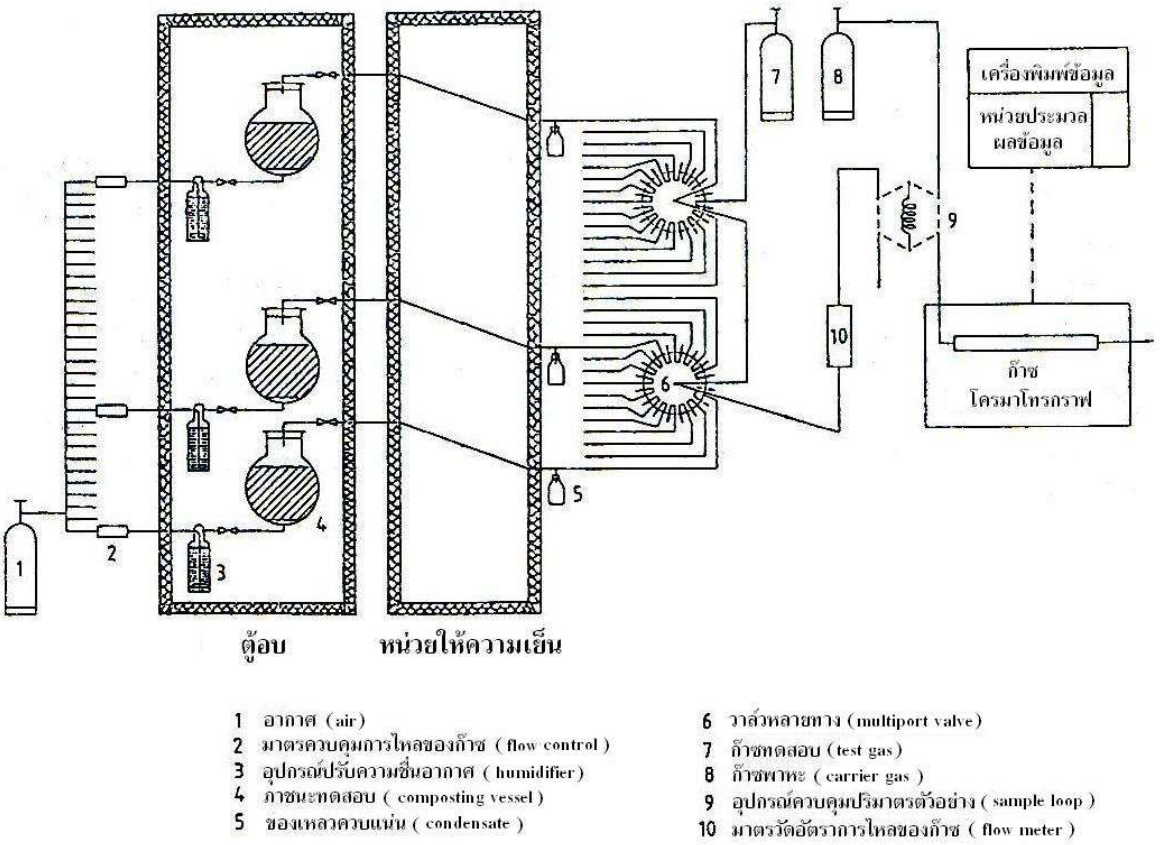
3.1.4 บิวเรตต์ ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.5 มาตรความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

3.1.6 เครื่องมือที่เหมาะสมและอุปกรณ์วิเคราะห์สำหรับวัดของแข็ง (ที่อุณหภูมิ (105 ± 5) องศาเซลเซียส) ของแข็งระเหยได้ (ที่อุณหภูมิ (550 ± 5) องศาเซลเซียส) กรดไขมันระเหยได้ (โดยการฉีดสารเข้าเครื่องโครมาโทกราฟ) ความเข้มข้นทั้งหมดของไนโตรเจน (โดยวิธีเชดาห์ล (Kjeldahl)) และความเข้มข้นคาร์บอน

3.1.7 เครื่องแก้วทั้งหมดต้องสะอาดและปราศจากสารอินทรีย์

หมายเหตุ อุปกรณ์ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุปกรณ์สำหรับการไทเทรตอาจใช้มาตรวัดอัตราการไหลของก๊าซ (gas flow meter) ร่วมกับเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (ดูรูปที่ 2) หรืออุปกรณ์ที่มีตัวตรวจหา (detector) แทนได้ และคอลัมน์สำหรับวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนในก๊าซที่ปล่อยจากภาชนะทดสอบการหมักต้องให้มั่นใจว่ามีความถี่ในการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากพอ เพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่น่าเชื่อถือ (เช่น ทุก 3 ชั่วโมง ถึง 6 ชั่วโมง) ควรฉีดก๊าซมาตรฐานเข้าไปในเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟแบบต่อเนื่องตลอดการทดสอบ เพื่อยืนยันความเป็นมาตรฐานของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ การใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟให้ปฏิบัติตามข้อกำหนดของ E 260 และ E 355



รูปที่ 2 เครื่องมือการทดสอบการหมักใช้ร่วมกับเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ

3.2 สารเคมีและวัสดุ

3.2.1 สารละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์ 0.012 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์ 4.0 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร กรองผ่านกระดาษกรอง เก็บอย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ

3.2.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

3.2.3 สิ่งควบคุมเชิงบวก

เซลลูโลสสำหรับทินเลเยอร์โครมาโทกราฟีที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร

3.2.4 สิ่งควบคุมเชิงลบ

พอลิเอทิลีนที่มีรูปทรงแบบเดียวกันกับตัวอย่าง เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีนสำหรับตัวอย่างที่เป็นฟิล์ม เม็ดพอลิเอทิลีนสำหรับตัวอย่างที่เป็นเม็ด

3.3 เชื้อปลูกปุ๋ยหมัก

เชื้อปลูกปุ๋ยหมักต้องมีสมบัติดังนี้

3.3.1 เป็นปุ๋ยหมักที่อากาศผ่านได้ดี มีอายุ 2 ถึง 4 เดือน ได้จากเศษสารอินทรีย์ในกองขยะชุมชน แร่งให้มีขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตร

3.3.2 ในกรณีที่หาปุ๋ยหมักดังกล่าวไม่ได้ ให้ใช้ปุ๋ยหมักที่ได้จากพืช เศษหญ้า หรือเศษพืชผสมกับเศษขยะชุมชน ซึ่งผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งระเหยได้ ถึง 150 มิลลิกรัมต่อกรัมของแข็งระเหยได้ ในช่วง 10 วันแรกของการทดสอบ มีปริมาณเถ้าน้อยกว่าร้อยละ 70 และมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7 ถึง 8.2

3.3.3 ปราศจากเศษวัสดุเฉื่อยขนาดใหญ่ เช่น แก้ว หิน โลหะ และต้องคัดแยกวัสดุดังกล่าวออกให้มากที่สุด เพื่อให้เชื้อปลูกปุ๋ยหมักเป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.4 มีความร่วนซุยพอให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก อาจเพิ่มวัสดุอื่นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของปุ๋ยหมัก เช่น เศษไม้ขนาดเล็ก วัสดุเฉื่อยที่ทนการแตกสลายทางชีวภาพ

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างก่อนผสมเชื้อปลูกปุ๋ยหมัก

เตรียมวัสดุตัวอย่างตาม ASTM D 618 ให้มีลักษณะเป็นฟิล์ม ชิ้นงานขึ้นรูป เม็ด หรือผง โดยขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสมากไม่เกิน 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร และมีภาวะดังนี้

3.4.1.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของทั้งเชื้อปลูกและสารทดสอบรวมกันอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 40

3.4.1.2 ระดับก๊าซออกซิเจนในภาชนะหมักปุ๋ยต้องไม่น้อยกว่า ร้อยละ 6 ตลอดการทดสอบ

3.4.1.3 วัสดุทดสอบปราศจากน้ำและการจับตัวเป็นก้อน

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างผสมเชื้อปลูกปุ๋ยหมัก

3.4.2.1 นำเชื้อปลูกปุ๋ยหมักจากข้อ 3.3 มาหาค่าของแข็งระเหยได้ ของแข็งแห้งทั้งหมด และปริมาณไนโตรเจน ตามวิธีทดสอบ ASTM D 3590 และ APHA Test Methods 2540 D และ 2540 E ตามลำดับ

3.4.2.2 หาค่าของแข็งระเหยได้ ของแข็งแห้งทั้งหมด และปริมาณคาร์บอนของตัวอย่างทั้งหมด ตามวิธีทดสอบ APHA Test Methods 2540 D และ 2540 E และ ASTM D 4129 ตามลำดับ

3.4.2.3 ชั่งเชื้อปลูกปุ๋ยหมักประมาณ 600 กรัมของน้ำหนักแห้ง ผสมกับตัวอย่าง 100 กรัมของน้ำหนักแห้ง ปรับความชื้นของส่วนผสมทั้งหมดด้วยน้ำกลั่นให้ได้ประมาณร้อยละ 50 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากกว่า 40 ให้เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ชั่งภาชนะและสิ่งที่บรรจุในภาชนะทันทีก่อนเริ่มกระบวนการหมัก

3.4.3 การเตรียมแบลงก์ (blank)

ให้เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างแต่ใส่เชื้อปลูกปุ๋ยหมักเพียงอย่างเดียวประมาณ 600 กรัมของน้ำหนักแห้ง

3.4.4 การเตรียมสารอ้างอิง

ใช้เซลลูโลสทินเลเยอร์โครมาโทกราฟีเป็นสิ่งควบคุมเชิงบวกและพอลิเอทิลีนเป็นสิ่งควบคุมเชิงลบ

3.4.5 ควรเติมของผสมทดสอบทั้งหมดไม่เกิน 3 ใน 4 ของปริมาณภาชนะทดสอบเพื่อให้มีพื้นที่ส่วนบนว่างมากพอสำหรับการเขย่าส่วนผสมให้เข้ากัน

3.5 วิธีทดสอบ

3.5.1 ให้ปฏิบัติดังนี้

3.5.1.1 ขั้นตอนเริ่มต้น

ป้อนอากาศเข้าภาชนะทดสอบด้วยอัตราการไหลพอที่จะควบคุมระดับออกซิเจนในอากาศที่ปล่อยออกจากภาชนะให้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 6 วัดระดับออกซิเจนอย่างน้อยวันละ 2 ครั้งในสัปดาห์แรก และปรับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนถ้าจำเป็น

3.5.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

(1) เก็บภาชนะทดสอบไว้ในที่มืดและปิดได้มิดชิดเพื่อป้องกันไอระเหยที่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ (58 ± 2) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน

ในกรณีอื่น เช่น ตัวอย่างมีจุดหลอมเหลวต่ำ อาจเลือกใช้อุณหภูมิอื่นแทน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ใช้บ่มนี้ให้คงที่และอยู่ในช่วง ± 2 องศาเซลเซียส โดยต้องบันทึกอุณหภูมิที่ใช้บ่มและรายงานอย่างชัดเจนในรายงานการทดสอบ

(2) หาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ปล่อยออกมาอย่างน้อยวันละ 1 ครั้ง และทุก 6 ชั่วโมง หลังจากสัปดาห์แรก โดยการหาปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ปฏิบัติดังนี้

(2.1) วิธีไทเทรต

(2.1.1) ไทเทรตตัวอย่างและสารละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก คำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่างและสารละลายแบเรียมไฮดรอกไซด์

หมายเหตุ - *เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในขวดดูดซับ เกิดปฏิกิริยาดังนี้*

$$Ba(OH)_2 + CO_2 \rightarrow BaCO_3 + H_2O$$

- *แบเรียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไม่สามารถละลายและตกตะกอน การหาปริมาณแบเรียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลืออยู่ในสารละลายสามารถหาได้จากการไทเทรตที่จุดยุติด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ตามสมการดังนี้*

$$Ba(OH)_2 + 2HCl \rightarrow BaCl_2 + 2\ H_2O$$

(2.1.2) คำนวณหาปริมาณสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละภาชนะทดสอบ

(2.1.3) คำนวณหาค่าเฉลี่ยสุทธิ (จากการทดสอบสามซ้ำ) ของคาร์บอนในสภาวะก๊าซที่เกิดขึ้นจากการควบคุมการแตกสลายของสารทดสอบโดยการหักลบด้วยค่าเฉลี่ยสุทธิ (จากการทดสอบสามซ้ำ) ของคาร์บอนในสภาวะก๊าซที่ได้จากแบลงก์ซึ่งมีเพียงเชื้อปลูกเท่านั้น

(2.2) วิธีก๊าซโครมาโทกราฟฟี

วัดปริมาณสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรัมโดยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟฟี ให้หาจากการวัดอัตราการไหลและส่วนประกอบของก๊าซ และคำนวณย้อนกลับสู่สภาวะที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (standard temperature and pressure, STP)

(3) ตรวจสอบอัตราการไหลของอากาศที่จุดเข้าและจุดออกจากภาชนะหมักปุ๋ยเป็นประจำเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีการรั่วไหลของอากาศในระบบ ปรับอัตราการไหลของอากาศเพื่อรักษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้อย่างน้อยร้อยละ 2 โดยปริมาตร เพื่อให้การวัดระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศที่ปล่อยออกมามีความแม่นยำ

(4) เขย่าภาชนะหมักปุ๋ยทุกสัปดาห์ เพื่อให้แน่ใจว่าสภาวะการหมักนั้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ผิวสัมผัสและความชื้นเป็นไปอย่างทั่วถึง ในกรณีที่ระดับความชื้นสูงเกินไป เช่น มีหยดน้ำเกาะในภาชนะ หรือการจับตัวเป็นก้อนของเชื้อปลูกเนื่องจากปริมาณความชื้นสูง ให้กำจัดน้ำออกโดยการเติมอากาศแห้ง หรือปล่อยน้ำทิ้งทางท่อเติมอากาศ ถ้าสังเกตเห็นว่าสภาวะทดสอบ แห้งเกินไปซึ่งจะทำให้กระบวนการแตกสลายเกิดช้ามาก ให้เติมน้ำเพื่อปรับสภาวะให้เหมาะสม ในระหว่างทดสอบให้ปรับสภาวะให้เหมาะสม และหากมีการปรับ

ให้ติดตาม และหาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนอย่างน้อยวันละ 2 ครั้ง ที่ระยะเวลาห่างกันมากกว่า 6 ชั่วโมง ภายในเวลา 72 ชั่วโมง

(5) ในทุกสัปดาห์ที่เขย่าภาชนะและในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ ให้บันทึกการสังเกตโดยคำนึงถึงโครงสร้างของปุ๋ยหมัก ปริมาณความชื้นและสี การเจริญเติบโตของเชื้อรา กลิ่นของอากาศที่ถูกปล่อยออกมา และการแตกเป็นส่วนของตัวอย่าง

(6) เวลาที่ใช้บ่มอาจมากกว่า 45 วัน ถ้ายังสังเกตเห็นการแตกสลายทางชีวภาพของวัสดุยังสามารถได้อย่างชัดเจน

3.5.1.3 ขั้นตอนสุดท้าย

(1) ชั่งน้ำหนักภาชนะที่มีตัวอย่างที่ผ่านการหมักและหาค่าของแข็งแห้งที่เหลืออยู่ในวัสดุหมัก โดยปริมาณของแข็งระเหยได้อาจคำนวณได้จากน้ำหนักที่หายไป

(2) ผสมตัวอย่างในอัตราส่วนน้ำกลั่นต่อเชื้อปลูกปุ๋ยหมัก หรือกากที่มีเชื้อเป็น 5 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก โดยเขย่าให้เข้ากัน วัดความเป็นกรด-ด่างทันที โดยปฏิบัติตาม ASTM D 1293 กรณีความเป็นกรด-ด่าง น้อยกว่า 7 หาปริมาณกรดตาม ASTM D 2908

(3) ถ้ามีกรดไขมันระเหยได้มากกว่า 2 กรัมต่อกิโลกรัมของตัวอย่างแห้งในภาชนะหมักปุ๋ยให้ถือว่าตัวอย่างไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

3.5.2 ทำแบลงก์ โดยให้ปฏิบัติตามข้อ 3.5.1.1 และข้อ 3.5.1.2 และใช้สิ่งควบคุมเชิงบวกและสิ่งควบคุมเชิงลบจากข้อ 3.4.4 แล้วแต่กรณี แทนตัวอย่าง

3.5.3 กรณีการแตกสลายทางชีวภาพของสิ่งควบคุมเชิงบวก ใน 45 วัน ของเซลลูโลส ไม่ถึงร้อยละ 70 ให้ถือว่าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด และให้ปฏิบัติซ้ำ โดยใช้เชื้อปลูกปุ๋ยหมักใหม่ ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการแตกสลายทางชีวภาพของสิ่งควบคุมเชิงบวก มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 20 ที่ขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ ให้ถือว่าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

3.5.4 กรณีการแตกสลายทางชีวภาพของสิ่งควบคุมเชิงลบ ไม่ถึงร้อยละ 10 ภายใน 45 วัน ให้ถือว่าไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

3.6 วิธีคำนวณ

3.6.1 คำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของตัวอย่าง จากสูตร

$$C_i = \frac{44 \times Y}{12}$$

เมื่อ C_i คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของตัวอย่าง เป็นกรัม

Y คือ มวลคาร์บอนป้อนเข้าในภาชนะทดสอบ (carbon charged to compost vessel, C_i) เป็นกรัม

โดย Y คำนวณได้จากสูตร $\frac{w}{100} \times$ มวลวัสดุทดสอบที่ป้อนเข้าไป

เมื่อ w คือ ร้อยละของคาร์บอนในวัสดุทดสอบ

หมายเหตุ *ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ* $C+O_2 \rightarrow CO_2$

3.6.2 คำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดจากตัวอย่างในแต่ละภาชนะ จากสูตร

$$B = X - \frac{Z}{2}$$

เมื่อ B คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม เป็นมิลลิโมล

X คือ ปริมาณแบเรียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้น เป็นมิลลิโมล

Z คือ ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก เป็นมิลลิโมล

3.6.3 คำนวณหาค่าเฉลี่ยสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวอย่าง จากสูตร

$$C_g\ (test) = \frac{44 \times B}{1\ \ 000}$$

เมื่อ $C_g\ (test)$ คือ ค่าเฉลี่ยสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวอย่าง เป็นกรัม

B คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม จากข้อ 3.6.2 เป็นมิลลิโมล

3.6.4 คำนวณหาการแตกสลายทางชีวภาพ จากสูตร

$$D = \frac{C_g(test) - C_g(blank)}{C_i} \times 100$$

เมื่อ D คือ การแตกสลายทางชีวภาพ เป็นร้อยละ

$C_g\ (test)$ คือ ค่าเฉลี่ยสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง จากข้อ 3.6.3 เป็นกรัม

$C_g\ (blank)$ คือ ค่าเฉลี่ยสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแบลงก์ เป็นกรัม

C_i คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของตัวอย่าง จากข้อ 3.6.1 เป็นกรัม

3.6.5 คำนวณหาค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (standard error, S_e) ของร้อยละการแตกสลายทางชีวภาพ จากสูตร

$$S_e = \frac{\sqrt{(S_{test}^2/n1) + (S_{blank}^2/n2)}}{C_i} \times 100$$

เมื่อ S_e คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของร้อยละการแตกสลายทางชีวภาพ เป็นร้อยละ

$n1$ คือ จำนวนครั้งที่ทดสอบ

$n2$ คือ จำนวนการวิเคราะห์

S_{test} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากสารทดสอบ

S_{blank} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากแบลงก์

3.6.6 คำนวณหาร้อยละ 95 ของขีดจำกัดความเชื่อมั่น จากสูตร

$$E = D \pm (t \times S_e)$$

เมื่อ E คือ ร้อยละ 95 ของขีดจำกัดความเชื่อมั่น

t คือ t-distribution สำหรับความน่าจะเป็นที่ร้อยละ 95 กับ $(n1+ n2-2)$ ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ดังนั้น n = 3 + 3 - 2= 4

S_e คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน

3.7 การรายงาน

ให้รายงานผลการทดสอบและข้อมูลดังนี้

3.7.1 ข้อมูลของเชื้อปลูกปุ๋ยหมักและแหล่งที่มา ร้อยละของของแข็งแห้ง ร้อยละของของแข็งระเหยได้ ปริมาณไนโตรเจนเชดาห์ลทั้งหมด (total Kjeldahl nitrogen) กิจกรรม (activity) ของจุลินทรีย์ในเชื้อปลูก (ปริมาณก๊าซคาร์บอนด์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นใน 10 วันแรก) วันที่เก็บข้อมูล วันที่เก็บรักษา และวันที่ดำเนินการทดสอบ

3.7.2 ปริมาณคาร์บอนของวัสดุพลาสติก สิ่งควบคุมเชิงบวกและสิ่งควบคุมเชิงลบ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากสุดทางทฤษฎี ข้อมูลเฉพาะขนาด รูปร่าง ปริมาตร และความหนาของวัสดุพลาสติกที่ทดสอบ รวมถึงลักษณะของตัวอย่าง เช่น แผ่น ผง เม็ด หรืออื่น ๆ

3.7.3 น้ำหนักภาชนะทดสอบที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ก่อนการทดสอบและในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ

3.7.4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดขึ้นและก๊าซออกซิเจนที่ใช้ที่เวลาต่าง ๆ โดยแสดงในรูปกราฟ และอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

3.7.5 ร้อยละของการแตกสลายทางชีวภาพในสภาวะมีอากาศ สำหรับพลาสติกแต่ละชนิดที่ทดสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ร้อยละ 95 ของขีดจำกัดความเชื่อมั่นของแต่ละสารตัวอย่างหรือสารควบคุมที่ทดสอบ และร้อยละของการแตกสลายทางชีวภาพ

3.7.6 ร้อยละของการแตกสลายทางชีวภาพที่สัมพันธ์กับสิ่งควบคุมเชิงบวก (การแตกสลายทางชีวภาพของเซลลูโลสคิดเทียบเท่ากับร้อยละ 100 ของการแตกสลายทางชีวภาพของตัวอย่างทดสอบ)

3.7.7 ช่วงอุณหภูมิของการทดสอบ

3.7.8 ความเป็นกรด-ด่างของเชื้อปลูกปุ๋ยหมักและความเป็นกรด-ด่างของกากที่เหลือสุดท้าย ความเข้มข้นของกรดไขมันที่ระเหยได้สำหรับภาชนะทดสอบมีความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายน้อยกว่า 7

3.7.9 ข้อสังเกตต่าง ๆ ของเชื้อปลูกปุ๋ยหมัก และวัสดุทดสอบในระหว่างการทดสอบและในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ เช่น ปริมาณความชื้น การเติบโตของเชื้อรา โครงสร้าง สี และกลิ่น

3.7.10 บรรยายลักษณะการแตกเป็นส่วนของวัสดุทดสอบ ในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็กให้มีข้อมูลอื่นประกอบ เช่น รูปถ่าย หรือค่าต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ เท่าที่มี

3.7.11 รายงานน้ำหนักของภาชนะที่ใช้ในการหมักปุ๋ย เมื่อเริ่มต้นและในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบ และน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่หายไป (ถ้ามี)

3.8 ตัวอย่างผลการทดสอบ

ผลเบื้องต้นจากการทำซ้ำของการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน โดยใช้ชุดหมักทางชีวภาพภายใต้สภาวะควบคุมร่วมกับเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ ดังแสดงในตารางที่ 1 สรุปได้ดังนี้

3.8.1 ซึ่งเป็นสิ่งควบคุมเชิงบวกภายใต้สภาวะการหมักทางชีวภาพแบบควบคุม ที่แตกต่างกัน 3 ค่า

3.8.2 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยเฉลี่ยของเซลลูโลสภายหลังเวลา 45 วันของการหมักทางชีวภาพที่อุณหภูมิคงที่ (50 ± 2) องศาเซลเซียส คือร้อยละ 75.3 มีค่าเฉลี่ย ความเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 2.5 และมีค่าเฉลี่ยของช่วงขีดจำกัดความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (95% confidence limit interval) เท่ากับ ± ร้อยละ 5

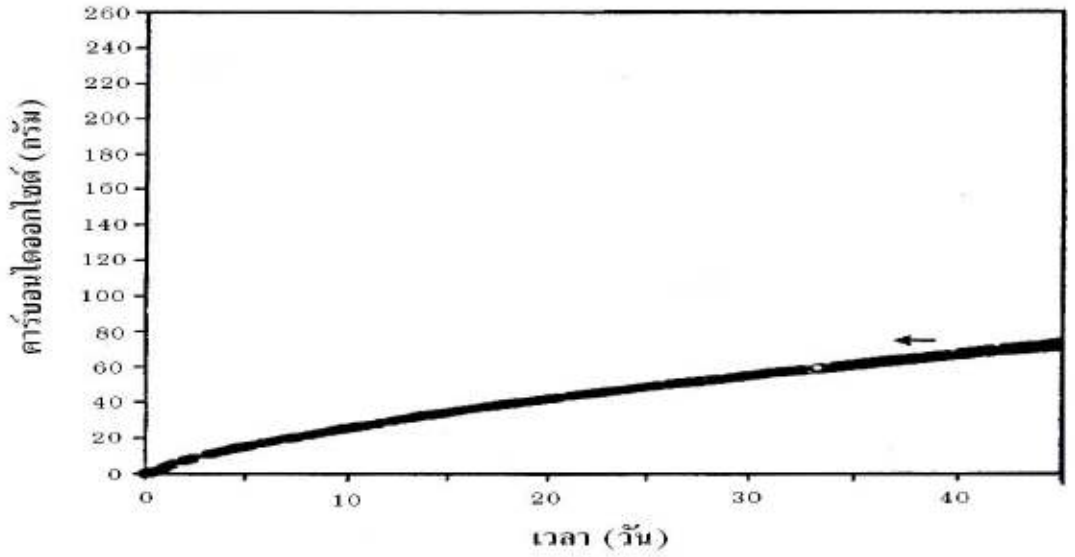
3.8.3 การปฏิบัติทั้ง 3 ครั้ง ได้ดำเนินการภายในช่วงระยะเวลา 7 เดือน โดยผู้ทดสอบกลุ่มเดียวกัน รูปที่ 3 รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงกราฟที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 3 ซึ่งค่าการแตกสลายได้ทางชีวภาพร้อยละ 78.9 ได้มาจากค่าเฉลี่ยของการทดลอง 3 ซ้ำ โดยมีเซลลูโลสเป็นสิ่งควบคุมเชิงบวก มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 0.3 และค่าของช่วงขีดจำกัดความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ± 2 (95% confidence limit interval of 2%)

3.8.4 กราฟแสดงผลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับแบลงก์หรือเชื้อปลูกปุ๋ยหมักที่ปราศจากวัสดุทดสอบ (ดูรูปที่ 3) สำหรับเชื้อปลูกปุ๋ยหมักรวมกับเซลลูโลส (ดูรูปที่ 4) และสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิต่อกรัมของเซลลูโลส (ดูรูปที่ 5)

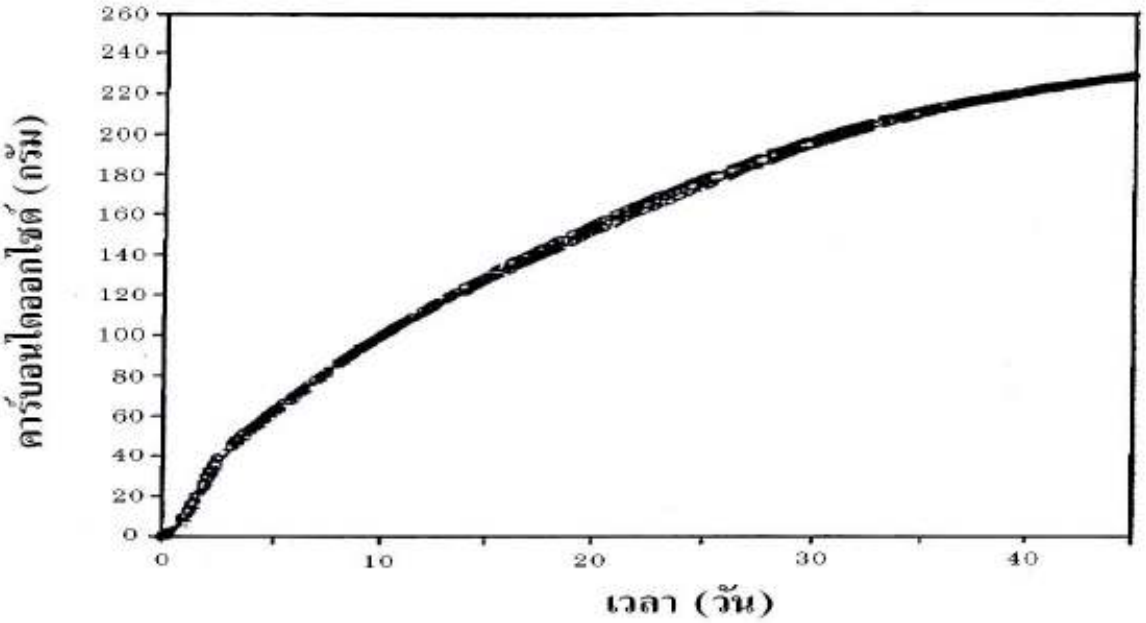
ตารางที่ 1 ผลเบื้องต้นจากการทำซ้ำของการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการเดียวกัน โดยใช้ชุดหมักทางชีวภาพภายใต้สภาวะควบคุมร่วมกับเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ

(ข้อ 3.8)

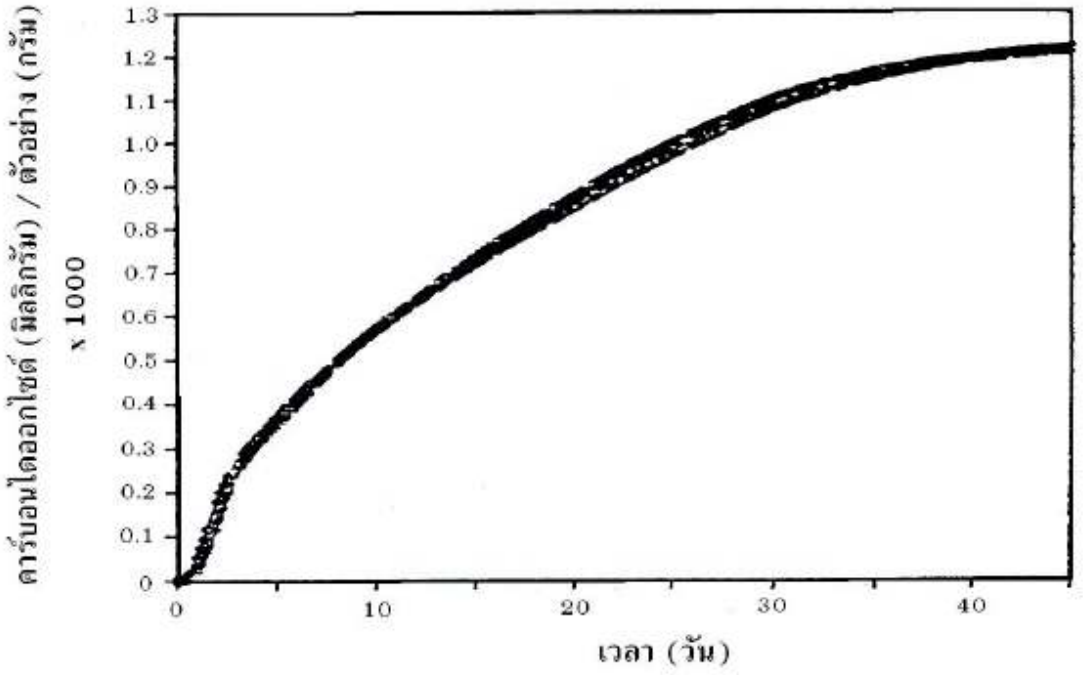
ปฏิบัติการ	ย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใน 45 วัน ร้อยละ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ร้อยละ	ร้อยละ 95 ของขีดความเชื่อมั่น ร้อยละ
ปฏิบัติการครั้งที่ 1	76.7	4.9	8.2
ปฏิบัติการครั้งที่ 2	70.3	2.4	4.8
ปฏิบัติการครั้งที่ 3	78.9	0.3	2.0
ค่าเฉลี่ยของการปฏิบัติการทั้ง 3 ครั้ง	75.3	2.5	5.0



รูปที่ 3 กราฟแสดงผลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับแบลงก์หรือเชื้อปลูกปุ๋ยหมักที่ปราศจากวัสดุทดสอบ
(ข้อ 3.8.4)



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเชื้อปลูกปุ๋ยหมักรวมกับเซลลูโลส
(ข้อ 3.8.4)



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิต่อกรัมของเซลลูโลส
(ข้อ 3.8.4)