

บรรจุภัณฑ์พลาสติก ที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ

นายดำรงพล คำแห่งวงศ์

นับตั้งแต่มนุษย์สังเคราะห์พอลิเมอร์หรือพลาสติกจากกระบวนการผลิตทางปิโตรเคมีขึ้นใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติ ปัญหาขยะบรรจุภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้แล้วทิ้ง (package waste disposal problem) กลายเป็นปัญหาที่สำคัญในโลกปัจจุบัน จากสถิติปริมาณการทิ้งขยะบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทย พบว่าในแต่ละปีประเทศไทยมีขยะบรรจุภัณฑ์ถึงปีละ 2.6 ล้านตัน และโดยเฉลี่ยประชากร 1 คนจะทิ้งขยะบรรจุภัณฑ์ถึง 40 กิโลกรัมต่อปี ดังนั้นในแต่ละปีขยะบรรจุภัณฑ์ทั้งโลกจะมีปริมาณนับล้านล้านตัน ซึ่งหากปริมาณการทิ้งขยะพลาสติกยังเป็นเช่นนี้ต่อไป ในอนาคตอันใกล้ เราก็จะประสบปัญหาในการสรรหาวิธีกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีความคงทนต่อการสลายตัวตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้เวลาในการสลายตัวเป็นร้อยๆปี ประกอบกับพื้นที่ที่ใช้ในการฝังกลบนับวันยิ่งจะหายากขึ้นไปทุกที การนำขยะพลาสติกไปทิ้งในทะเลก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทะเล (Marine environmental) การนำขยะพลาสติกไปเผาทิ้งหรือเผาเพื่อเปลี่ยนให้เป็นพลังงานก็ต้องเผชิญปัญหาอากาศเป็นพิษเกิดเป็นก๊าซพิษ (Toxic gas) สารไดออกซิน (Dioxine) และเกิดการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ (Ozone depletion) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญของปัญหาสภาวะโลกร้อนและสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงที่ทั่วโลกกำลังประสบปัญหาอยู่ นอกจากนี้การนำขยะพลาสติกไปใช้ใหม่ก็มีข้อจำกัดมากทั้งในด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ คือต้นทุนต่อการนำขยะพลาสติกไปใช้ใหม่มีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พลาสติกใหม่ขณะที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจด้อยกว่า และในด้านเทคโนโลยีการนำกลับไปใช้ใหม่ จากปัญหาดังกล่าว หลายประเทศพยายามรณรงค์ให้ประชากรภายในประเทศตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยลดปริมาณการใช้ ลดปริมาณขยะโดยการนำขยะมาหมุนเวียนใช้ใหม่ (reuse / reduce / recycle) เก็บภาษี และ ออกกฎหมายซึ่งมีผลผูกพันต่อการค้าขายระหว่างประเทศในหลายประเทศ ดังเช่น ในกลุ่มสหภาพยุโรป (EU) มีการออกข้อกำหนดว่าด้วยเรื่องบรรจุภัณฑ์ และขยะบรรจุภัณฑ์ (Directive on Packaging and Packaging Waste) เป็นต้น นอกจากนี้กล่าวมาแล้วว่าการหาวัสดุที่มีสมบัติการใช้งานใกล้เคียงพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแต่สามารถย่อยสลายได้ (Degradation) เมื่อสัมผัสกับสิ่งที่มีอยู่ในธรรมชาติเช่น แสงอาทิตย์ หรือ จุลินทรีย์ เป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหามลภาวะขยะพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว



นิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Material) หมายถึง พลาสติกที่มีกระบวนการการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากมีกรรมวิธีเสียดคุณสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)
4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

ในปริมาณขยะทั้งหมดพบว่าขยะส่วนใหญ่จะเป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ถูกใช้แล้ว ถึงร้อยละ 20 -30 โดยกระบวนการตามธรรมชาติที่ควรคำนึงถึงต่อการสลายตัวของขยะพลาสติกเหล่านี้คือการสลายตัวโดยแสงอาทิตย์และการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ ซึ่งเราสามารถจำแนกพลาสติกที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยแสงอาทิตย์

กระบวนการสลายตัวได้โดยแสงอาทิตย์เริ่มจากการที่ส่วนใดส่วนหนึ่งในโมเลกุลของพอลิเมอร์ดูดซับโฟตอนของแสงเข้าไป พลังงานที่ถูกดูดเข้าไปจะทำให้เกิดครอนในโมเลกุลนั้นยกเว้นพลังงานในตัวเองไปอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น (excited stated) และเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลหลายอย่าง โดยกระบวนการที่สำคัญอันหนึ่งคือ การที่ส่วนใดส่วนหนึ่งในโมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวเป็นเรดิคัล (radical) ซึ่งอาจมีผลทำให้โมเลกุลของ พอลิเมอร์สั้นลง (chain scission) หรืออาจเกิดการเชื่อมโยงข้ามกันบางส่วนภายในโมเลกุล (crosslinking) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์รวมถึงเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ เช่น การทนต่อแรงดึง การยืดตัว และความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยลงอย่างมาก จากกระบวนการที่กล่าวมาในข้างต้น งานวิจัยบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่สลายตัวได้โดยแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ เป็นการเติมสารที่มีความสามารถที่จะดูดซับพลังงานของแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นอย่างดี ซึ่งส่วนมากเป็นสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) อยู่ด้วย โดยสามารถเติมเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ 2 วิธีคือ

1.1 เติมโดยตรงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในรูปของโคโมโนเมอร์ (comonomer) ดังเช่น

- การเติมไวโนลคีโตน (vinyl ketone) เป็นโคโมโนเมอร์ในสัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 2-5 ในมาสเตอร์แบต (masterbatch) เพื่อใช้ในการผสมในสัดส่วน 1 ต่อ 9 ถึง 1 ต่อ 20 ในการผลิตพลาสติกบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene) หรือ พอลิสไตรีน (polystyrene) ซึ่งหมู่คาร์บอนิลของไวโนลคีโตนจะดูดซับช่วงคลื่นแสงมากที่สุด ในช่วงคลื่น 280-290 นาโนเมตร ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่มากเพียงพอต่อการกระตุ้นให้เกิดการขาดกันของโมเลกุลของพอลิเมอร์ ตัวอย่างของไวโนลคีโตนที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เมทิลไวโนลคีโตน (methyl vinyl ketone) เมทิลไอโซโพรเพนิลคีโตน (methyl isopropanyl ketone) และ เฟนิลไวโนลคีโตน (Phenyl vinyl ketone) เป็นต้น

- การเติมคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นโคโมโนเมอร์ในสัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 2 นิยมใช้กับการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีชื่อทางการค้าว่า อีโค (E/CO) สำหรับพลาสติกชนิดอื่น ๆ ยังไม่สามารถเติมคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นโคโมโนเมอร์ได้เนื่องจากข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปัจจุบัน (catalyst) พลาสติกประเภทนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมปริมาณของระดับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้เป็นโคโมโนเมอร์ ทำให้มีความหลากหลายในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มีอัตราการสลายตัวที่แตกต่างกันออกไปตามที่ต้องการ อีกทั้งยังมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาดแต่มีข้อเสียคือมีราคาสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทั่วไปถึงร้อยละ 15 - 20



1.2 เติมในรูปของสารเติมแต่ง (additives)

การเติมสารเติมแต่งประเภทเกลือของโลหะบางประเภทในพอลิเมอร์ในระดับความเข้มข้นต่ำ จะทำให้เกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาคที่มีประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของแสงอาทิตย์ พลาสติกประเภทนี้มีประโยชน์ในกระบวนการกำจัดขยะพลาสติกแบบฝังกลบ (land fill) ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังที่ผลิตภัณฑ์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ในช่วงระยะเวลาที่พอเพียงแล้วปฏิกิริยาการแตกตัวยังคงดำเนินต่อไปได้ในที่มืด โดยทั่วไปพลาสติกประเภทนี้ ไม่นำไปใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับอาหารโดยตรงเนื่องจากอาจเกิดการแพร่กระจาย(migration) ของโลหะจากวัสดุบรรจุภัณฑ์ลงสู่อาหาร

อย่างไรก็ดี พลาสติกที่ย่อยสลายตัวได้โดยแสงอาทิตย์นี้ ยังไม่ถือว่าเป็นการย่อยสลายที่สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นเพียงกระบวนการแยกพอลิเมอร์ให้มีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสม (Depolymerization) ต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ดังจะกล่าวต่อไป

2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ

สำหรับพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพมีความหมายและคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจาก จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (composting) โดยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าวเกิดจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Respiration) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Respiration) เราแบ่งกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาเพื่อตัดโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทั้งตัดอย่างสุ่มที่ภายในสายโซ่โมเลกุล (Endo) และตัดจากปลายสุดของสายโซ่โมเลกุล (Exo) อย่างมีลำดับ เพื่อให้ได้สารประกอบที่เล็กลง ซึ่งเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า กระบวนการแยกพอลิเมอร์ (Depolymerization) ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์นำสารประกอบที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเข้าสู่เซลล์และเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP (adenosine triphosphate) น้ำ ไบโอมอล (Biomol) เกลือแร่ชนิดต่างๆ และก๊าซต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (สำหรับกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน) สารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่นๆ (สำหรับกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน) และไนโตรเจน

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์จะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากสามารถเกิดการสลายตัวได้ด้วยน้ำ(Hydrolysis) เช่น พอลิเมอร์พวกพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ได้แก่ แป้ง(Starch) เซลลูโลส (Cellulose) ไคติน/ไคโตซาน (Chitin/chitosan) เป็นต้น พอลิเมอร์พวกโปรตีน(Protein) ได้แก่ คอลลาเจน (collagen) เจลลาติน (gelatin) และ เคซีน (casein) เป็นต้น พอลิเอไมด์ (polyamide) พอลิเอสเตอร์ (polyester) และ พอลิยูรีเทน (polyurethane) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่า พอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ด้วยน้ำจะสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ทั้งหมดเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต้องอาศัยการทำงานของเอนไซม์เป็นสำคัญ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจึงต้องมีสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์ด้วย ดังเช่น ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสม และมีการจัดตัวของโครงสร้างที่ง่ายต่อการแทรกซึมของเอนไซม์ และโมเลกุลมีความอ่อนตัว (Flexibility) มากพอจะเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์จากจุลินทรีย์ได้ เป็นต้น

ในบรรดาพลาสติกที่โฆษณาว่าย่อยสลายได้นั้น ส่วนใหญ่ยังสลายไปได้อย่างไม่สมบูรณ์เนื่องจากการผลิตพลาสติกแบบนี้ยังใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ย่อยสลาย เป็นองค์ประกอบหลัก โดยพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์โดยสมบูรณ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

2.1 กลุ่มของพลาสติกจากธรรมชาติ

กลุ่มของพลาสติกจากธรรมชาติเป็นกลุ่มพลาสติกที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ (100% Biodegradable) ในระยะเวลาอันสั้น โดยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในทางการค้า



ส่วนใหญ่ ได้แก่ แป้ง (Starch) เซลลูโลส (Cellulose) และเจลาติน (gelatin) โดยเฉพาะแป้งเป็นวัตถุดิบยอดนิยมในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ เนื่องจากย่อยสลายได้ง่าย มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวขึ้นเป็นฟิล์มได้ สามารถขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก มีความปลอดภัย และความบริสุทธิ์สูง แต่อย่างไรก็ดีการนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงทำได้ยากเนื่องจากต้องมีกรรมวิธีในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การผลิตแผ่นฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate) จากเซลลูโลส เป็นต้น เราพบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพอลิเมอร์ธรรมชาติในผลิตภัณฑ์หลายชนิดดังเช่น สก็อตเทปใส กระดาษแก้ว กระดาษห่อเครื่องสำอางภัณฑ์ และกระดาษห่อขนม ลูกกวาด เป็นต้น

2.2 กลุ่มของพลาสติกจากการสังเคราะห์

กลุ่มของพลาสติกสังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ที่ได้รับความสนใจส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรงซึ่งผลิตมาจากกระบวนการเลี้ยงแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำตาลกลูโคสมากเกินไปจนความจำเป็น ส่วนใหญ่อาหารเลี้ยงเชื้อผลิตจากน้ำตาลที่ได้จากข้าวสาลี ข้าวโพดและหัวผักกาดหวาน (sugar beet) ซึ่งเป็นสภาวะที่แบคทีเรียพวกนี้จะผลิตสารพอลิเมอร์พวก พอลิ-เบต้า-ไฮดรอกซีอัลเคน (Poly-beta-hydroxyalkane) ซึ่งเป็นอาหารสะสมที่แบคทีเรียผลิตไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานยามขาดสารอาหารจากภายนอก การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อต่างๆกัน จะทำให้แบคทีเรียผลิตพอลิเมอร์ของสารดังกล่าวที่มีลักษณะแตกต่างกันตามความเหมาะสม ตัวอย่างของพอลิเมอร์พวกนี้ได้แก่ พอลิไกลโคลิกแอซิด (Poly(glycolic acid), PGA) พอลิแลคติกแอซิด (Poly(L-lactic acids), PLLA) ซึ่งนำไปใช้ในการผลิตแผ่นรองผ้าอ้อมและกระป๋องโยเกิร์ต พอลิเอปซิลอนคาโพรแลกโตน (Poly(ε-caprolactone), PLA) พอลิไฮดรอกซีบิวไทเรต (Poly(3-hydroxybutyrate), PHB) และโคพอลิเมอร์ Poly(3-hydroxybutyrate)-co-Poly(3-hydroxy-valerate), PHBV) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนเป็นอย่างมากอีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม พลาสติกเหล่านี้ยังมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ยังสูงอยู่ โดยทั่วไปวิธีการตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก ทำได้ 2 วิธีคือ

1. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มี municipal sewer sludge (D5209-91) โดยวัดร้อยละของการเปลี่ยนคาร์บอนในพลาสติกไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2. วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในขณะที่มี municipal sewer sludge (D5210-91) โดยวัดร้อยละของการเปลี่ยนคาร์บอนในพลาสติกไปเป็นก๊าซมีเทนในสภาวะที่ปราศจากก๊าซออกซิเจน

โดยวิธีการทดสอบทั้งสองวิธีนี้พลาสติกที่ใช้ทดสอบจะต้องเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียวสำหรับจุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพจะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน

ปัจจุบันองค์กรที่วางมาตรฐานวิธีการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ASTM ซึ่งอ้างถึงใน ASTM D6400-04 และ ASTM D6868-03 DIN (German Institute for Standardisation) European (CEN) และ ISO (International Standards Organization) โดยเฉพาะอย่างยิ่งมาตรฐาน ISO มีการกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไว้ด้วย เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่น Compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมันนี้,



PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น, Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ OK compost ของประเทศเบลเยียม เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. พิชญ์ ศุภผล, วิศวกรรมสาร-ว.ส.ท. เทคโนโลยี,49(9),55-61(กันยายน พ.ศ. 2539).
2. P.E. Cassidy and T.M. Aminabhavi, J. Macromol. Sci., C21(1),89-133 (1981).
P.J. Hocking, J. Macromol. Sci., C32(1),35-54 (1992).
3. N. Grassie and G. Scott, in "Polymer Degradation & Stabilisation," Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
4. G.S. Kumar, V. Kalpagam, and U.S. Nandi, J. Macromol. Sci., C22(2), 225-260 (1982-83).
5. D.Satyanarayana and P.R. Chatterji, J. Macromol. Sci., C33(3), 349-368 (1993).
R.V. Wilder, Modern Plastics, 67, 29-32 (June 1990).
6. X.Zhang, M.F.A. Goosen, U.P. Wyss, and D. Pichora J. Macromol. Sci., C33(1), 81-102 (1993).
7. Jarerat, A., K. Kittinapakul, K. Siroth, and y. Tokiwa. 1998. Distribution and biodegradability of polyester degrading isolated from soils in Thailand. In FoSTAT/Propak Asia'98 Food Conference. June 3-4, 1998. Bangkok International Trade and Exhibition Center, Thailand.
8. Jarerat, A. and K. Siroth. 1997 Distribution of Polycaprolactone (PCL) degrading microorganisms and degradation at high temperature. Abstract in the 9th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology. November 18-19,1997. Nakhonratchasima, Thailand.
9. Kaplan, D.L.,J.M. Mayer, D. Ball, J. McCassie, A.L. Allen, and P. Stenhouse. 1993. Fundamentals of biodegradable polymers. In C. Ching, D. Kaplan, and E.
10. Thomas (eds.) Biodegradable Polymers and Packaging. Technomic Publishing Co.,Ltd. Lancaster, PA. pp. 1-42:
11. Michigan Biotechnology Institute. 1994. Biomaterials Group R&D Program. 19 P.Narayan, R. 1994. Impact of government policies, regulations, and standards activities on an emerging biodegradable plastics industry.
12. In y. Doi and K. Fukuda (eds.). Proceedings of the Third International Scientific Workshop on Biodegradable Plastics and Polymers. November 9-11, 1993. Osaka, Japan. Pp. 261-272.
13. Pranamuda, H., Y. Tokiwa, and H. Tanako. 1996. Physical properties and biodegradability of blends containing poly (ε-caprolactone) and tropical starches. Journal of Environmental Polymer Degradation. 4(1) : 1-7.
14. Raghavan, D. 1995. Characterization of biodegradable plastics. Polym.-Plast. Technol. Eng. 34(1) : 41-63
15. Wurzburg, O.B. 1986. Modified Starches : Properties and Uses. CRC Press, Inc.,BocaRoton, Florida. 277 P.

