



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

A Study of Life Cycle Impact of Polylactic Acid/Starch, Polyethylene Terephthalate
and Polyvinylchloride Boxes

نامผู้วิจัย นางสาวเมทินี แสนมณีชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์อรรณรัตน์ มุ่งเจริญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ธนาดี สีสากย์, D.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา อีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้ง
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

A Study of Life Cycle Impact of Polylactic Acid/Starch, Polyethylene Terephthalate and
Polyvinylchloride Boxes

โดย

นางสาวเมทินี แสพนมณีชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมทินี แสนมณีชัย 2556: การศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแบ่ง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์อัครรัตน์ มุ่งเจริญ, Ph.D. 96 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่หนึ่งคือ การจัดเก็บข้อมูลและศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต ของบรรจุภัณฑ์ชนิดกล่องแบบสลายตัวได้ที่ทำจากพอลิแลกติกแอซิดผสมแบ่งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 เปรียบเทียบกับกล่องแบบสลายตัวยากที่ทำจาก พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต กำหนดหน่วยหน้าที่ คือ ถาดบรรจุขนาด 8 x 10 x 2.8 เซนติเมตร จำนวน 10,000 ชิ้น ซึ่งมีน้ำหนัก 549.65 397.20 804.00 582.77 และ 462.51 กิโลกรัม ตามลำดับ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมทำโดยใช้โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 7.2 และวิธี CML 2 Baseline 2000 เวอร์ชัน 2.03

การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาในช่วงการผลิต รวมถึงตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบ การขนส่ง และการผลิตกล่อง ผลการศึกษาสำหรับกล่องแบบสลายตัวได้ พบว่า กล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแบ่งที่อัตราส่วน 50/50 มีผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เนื่องจากการมีแบ่งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการยึดเกาะกับพอลิแลกติกแอซิด ทำให้ขึ้นรูปกล่องได้โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยขั้นตอนที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด ผลการศึกษาสำหรับกล่องแบบสลายตัวยาก พบว่า กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ มีผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ซึ่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมเกิดมากที่สุด ตั้งแต่ขั้นตอนการสกัดวัตถุดิบจนได้เม็ดพลาสติก ส่วนที่สองเป็นการศึกษาตลอดวัฏจักรชีวิตโดยรวมขั้นตอนการจัดการหลังการใช้งาน พบว่า การจัดการกล่องแบบสลายตัวได้ด้วยวิธีการคอมโพสท์ เป็นการจัดการที่ดีและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ร้อยละ 61 ถึง 75 ส่วนการจัดการกล่องแบบสลายตัวยากด้วยวิธีการเผาแบบได้พลังงานกลับคืนเป็นการจัดการที่เหมาะสมและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ร้อยละ 14 ถึง 40

วัตถุประสงค์ที่สองคือ การศึกษาหาค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องแบบสลายตัวได้และแบบสลายตัวยาก ผลการศึกษาพบว่า กล่องแบบสลายตัวได้จากพอลิแลกติกแอซิดที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 ที่มีการจัดการด้วยวิธีการคอมโพสท์ มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์น้อยที่สุด คือ 0.109 0.057 และ 0.046 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ สำหรับกล่องแบบสลายตัวยากจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการจัดการด้วยวิธีการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์น้อยที่สุด คือ 0.140 และ 0.117 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ

Maytinee Sanmaneechai 2013: A Study of Life Cycle Impact of Polylactic Acid/Starch, Polyethylene Terephthalate and Polyvinylchloride Boxes. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Thumrongrut Mungcharoen, Ph.D. 96 pages.

The first objective of this study is to collect inventory data and assess the life cycle impact of bio-based boxes that made from Polylactic acid and cassava starch blend (PLA/starch) at the ratio of 70/30, 50/50 and 30/70 compared to petroleum-based boxes that made from Polyethylene terephthalate (PET) and Polyvinylchloride (PVC) using the Life Cycle Assessment technique. The functional unit is specified as 10,000 boxes of 8 x 10 x 2.8 centimeters size from PLA/starch 70/30, 50/50, 30/70, PET and PVC boxes which weigh 549.65, 397.20, 804.00, 582.77 and 462.51 kilograms, respectively. The SimaPro 7.2 software with the CML 2 Baseline 2000 version 2.03 method is used in this study.

The study is divided into 2 parts. The first part is the production including the raw material production, transportation and boxes production. It is found that PLA/starch 50/50 box has the lowest total environmental impact. The result indicates that the 50/50 is the appropriate ratio for binding of cassava starch and PLA to produce the box with the lowest weight. For bio-based boxes, the highest environmental impact is from the use of electricity for PLA pellet production step. For petroleum-based boxes, PVC box has lower total environmental impact than PET box. The highest environmental impact is from the raw material extraction to the resin pellet production step. In the second part, the whole life cycle of box including the waste management of box after the end of life is studied. The results show that composting is the best waste management method for bio-based boxes and can reduce the environmental impact by 61–75%. For petroleum-based boxes, incineration with heat recovery is suitable and can reduce the environmental impact by 14–40%.

The second objective of this study is to evaluate the carbon footprint (CFP) throughout the life cycle of bio-based and petroleum-based boxes. It is found that the lowest carbon footprints of bio-based boxes from PLA/starch 70/30, 50/50 and 30/70 with composting are 0.109, 0.057 and 0.046 kg CO₂ equivalent, respectively. For petroleum-based boxes from PET and PVC with incineration with heat recovery, the carbon footprints are 0.140 and 0.117 kg CO₂ equivalent, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ธนาบดี ลีจากภัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม และ ดร. อัญชลี สุวรรณมณี สำหรับคำปรึกษาในการทำ
วิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและให้คำปรึกษาอันมีประโยชน์แก่งานวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการบริหารจัดการด้านการวิจัยและพัฒนาพลาสติกชีวภาพ ตามแผนที่
นำทางแห่งชาติด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ และโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา
และวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์
ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา
ผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และ
ให้ความเข้าใจที่ดีเสมอมา

ขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อน นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุก
ท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ
ลุล่วงด้วยดี

ประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่วงศ์ตระกูล ครูบาอาจารย์ และผู้
มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดมา
จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง

เมทินี แสนมณีชัย

กุมภาพันธ์ 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ภาคผนวก	90
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกตามพิธีสารเกียวโต	12
2	รายชื่อองค์กรที่ทำงานด้านมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	19
3	ปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ระบุไว้ในมาตรฐานคอมโพสท์ต่างๆ	22
4	ปริมาณการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์จากแป้งแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	25
5	พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ และการผลิตพอลิเอทิลีนเปรียบเทียบกับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ	26
6	เปรียบเทียบการประเมินผลกระทบจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ประเภทต่างๆ กับวัสดุทางเลือกอื่นๆ	27
7	การใช้พลังงาน ขยะมูลฝอย และภาวะเรือนกระจกของบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้และจากวัสดุดั้งเดิม	30
8	รายการการจัดการกล่องบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งาน	39
9	รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม ตัวประกอบการเทียบหน่วย และตัวประกอบการให้น้ำหนักความสำคัญที่ใช้ในการศึกษานี้	39
10	แหล่งข้อมูลบัญชีรายการของกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้ง	40
11	แหล่งข้อมูลบัญชีรายการ ของกล่องพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์	41
12	ค่า Proximate value และ Element analysis ของขยะพลาสติก	43
13	ข้อมูลบัญชีรายการการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้ง 10,000 ชิ้น	49
14	ค่าการปันส่วนโดยราคาของการเพาะปลูกมันสำปะหลัง และการผลิตแป้งมันสำปะหลังสำหรับกระบวนการผลิตกล่อง	51
15	ข้อมูลบัญชีรายการการผลิต กล่องพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ 10,000 ชิ้น	52
16	คุณสมบัติทางกายภาพของขยะพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการจัดการขยะ	52
17	การขนส่งกล่องที่ใช้แล้วไปยังแหล่งกำจัด	53
18	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลคติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10	53
19	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
20	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการเผา	54
21	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการเผา	55
22	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	55
23	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	56
24	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบตามธรรมชาติในประเทศไทย	56
25	อุณหภูมิและความเป็นกรดต่าง	57
26	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน	60
27	ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการคอมโพสท์	61
28	รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 70/30	69
29	รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 50/50	70
30	รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 30/70	71
31	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 เปรียบเทียบกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์	77
32	การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเม็ดพอลิแลกติกแอซิด (PLA) เม็ดพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง (PLA/starch) และแป้ง (Starch) กับงานวิจัยอื่น (หน่วย: kg CO ₂ eq./kg ของเม็ดพลาสติก)	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ข้อมูลบัญชีรายการการเพาะปลูกข้าวโพด (1,000 กิโลกรัม)	91
2	ข้อมูลบัญชีรายการการเพาะปลูกมันสำปะหลัง (1,000 กิโลกรัม)	92
3	ข้อมูลบัญชีรายการการผลิตแป้งมันสำปะหลัง (1,000 กิโลกรัม)	93
4	ระยะทางเฉลี่ยจากแหล่งเพาะปลูกข้าวโพดในประเทศไทย ไปยังการผลิตเม็ด พอลิแลกติกแอซิดที่จังหวัดระยอง	94
5	ระยะทางเฉลี่ยจากการผลิตแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย ไปยังการผลิต กล่องที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและนครปฐม	94
6	ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง	95
7	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่ อัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิธีการฝังกลบที่ระยะเวลา 10 เดือน	95

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ขั้นตอนของการประเมินวัฏจักรชีวิต	10
2 ส่วนการวิเคราะห์และจำแนกผลกระทบสิ่งแวดล้อม และส่วนเลือกให้ศึกษาเพิ่มเติมในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	11
3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพ	13
4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด	14
5 กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชที่ได้นำและออกซิเจนเป็นผลผลิต	15
6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง	15
7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	17
8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์	18
9 เปรียบเทียบการประเมินผลกระทบที่เกิดจากการผลิตถุงโดยพอลิแลกติกแอซิด พอลิเอทิลีน และกระดาษ	25
10 ขอบเขตการศึกษาของ บรรจุภัณฑ์ประเภทถาดที่ทำจาก พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์	38
11 สารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผา	42
12 สารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	42
13 การทดสอบการฝังกลบ	43
14 การทดสอบคอมโพสท์ตามมาตรฐาน ISO 14855-1	45
15 กระบวนการผลิตพอลิแลกติกแอซิด	47
16 ลำดับและขั้นตอนการเพาะปลูกมันสำปะหลัง	48
17 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ลดลงของพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ตลอดระยะเวลา 10 เดือน	58
18 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30	58
19 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 50/50	59
20 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 30/70	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแลคติกพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง โดยวิธีการคอมโพสท์ที่ระยะเวลา 180 วัน	61
22 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30	63
23 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50	64
24 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 30/70	65
25 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละรายการในขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70	66
26 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวในแต่ละขั้นตอนการผลิตตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70	67
27 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามรายการผลกระทบ	67
28 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวของกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามรายการผลกระทบ	73
29 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวของกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามขั้นตอน	74
30 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวของกล่องสลายตัวได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กับกล่องสลายตัวจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CH ₄	=	มีเทน
CO ₂	=	คาร์บอนไดออกไซด์
eq.	=	เทียบเท่า
GWP	=	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน
kg	=	กิโลกรัม
PLA	=	พอลิแลกติกแอซิด
PLA/starch	=	พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง
PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
PVC	=	พอลิไวนิลคลอไรด์

การศึกษาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

A Study of Life Cycle Impact of Polylactic Acid/Starch, Polyethylene Terephthalate and Polyvinylchloride Boxes

คำนำ

พลาสติกเป็นวัสดุยุคใหม่ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน และถูกนำมาแปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ ถึงร้อยละ 46 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555) เนื่องจากผลิตได้ง่าย ใช้งานสะดวก ถูก และทนทาน แต่มีข้อเสียคือ อายุการใช้งานสั้น ถูกใช้งานเพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง ทำให้กลายเป็นขยะมูลฝอยทันทีหลังการใช้ ใช้งาน ก่อให้เกิดภาระในการจัดการขยะมูลฝอย เนื่องจากพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกสลายตัวยาก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene: PP) และพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับ สถานการณ์ขยะของประเทศไทยที่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกในอนาคต (กรมควบคุมมลพิษ, 2555)

จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษระบุว่า การจัดการขยะในประเทศไทย มีการจัดการขยะด้วยวิธีการฝังกลบประมาณร้อยละ 90 ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติ และยังสร้างปัญหาต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยของประชาชน ส่วนการเผาทำลายขยะพลาสติกมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง และยังก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ

ปัจจุบันทั่วโลกมีการตระหนักถึงเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาจากขยะพลาสติก ประเทศไทยจึงได้ริเริ่มหาแนวทางและมาตรการที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการลดปริมาณการใช้ขยะพลาสติกในอนาคต (กรมควบคุมมลพิษ , 2547) ระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้จากวัตถุดิบทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งมันสำปะหลังซึ่งมีปริมาณผลผลิตประมาณ 21.9 ล้านตันต่อปี ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นผู้ผลิต มันสำปะหลังรายใหญ่อันดับ 3 ของโลก (สมาคมแป้งมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย , 2554) และสามารถแปรรูปจาก สินค้าเกษตรเป็นแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีศักยภาพสูงในการผลิตและส่งออก โดยกว่าร้อยละ 90 เป็นการผลิตเพื่อส่งออก ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่อันดับ 1 ของโลก (ชลเจริญ กรู๊ป, 2553)

จากปัญหาสิ่งแวดล้อมในการจัดการขยะมูลฝอยพลาสติก และปัจจัยด้านวัตถุดิบดังกล่าวข้างต้น ก่อให้เกิดความตื่นตัวและความสนใจในการจัดหาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นวัตถุดิบที่ยั่งยืน เพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุปิโตรเลียม และด้วยคุณลักษณะและคุณสมบัติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงการกำจัดทิ้งเอง ที่ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้กลายเป็นวัสดุแห่งอนาคต

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเริ่มจากชีวมวลถูกผลิตขึ้นผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งชีวมวลในจำนวนที่เท่ากันจะถูกย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติ กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ รวมทั้งมวลชีวภาพและแร่ธาตุโดยจุลินทรีย์ วัฏจักรนี้เกิดขึ้นและย่อยสลายไปอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายการจัด การกำจัดพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการย่อยเป็นปุ๋ย จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์

โครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ ประเมินค่าและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากบรรจุภัณฑ์ประเภทภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ตลอดไปจนถึงการจัดการหลังสิ้นสุดการใช้งาน โดยจำแนกวิธีการกำจัดขยะออกเป็น 5 แบบ คือ การฝังกลบตามธรรมชาติ (Natural Landfill) การฝังกลบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน (Landfill with Methane Recovery) การเผา (Incineration) การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน (Incineration and Heat Recovery) และการคอมโพสท์ (Composting) โดยอาศัยเครื่องมือด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม คือ การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศ ว่าด้วยการจัดการสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์และบริการ และเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณ ที่ใช้ในการจำแนกและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ และพิจารณาครอบคลุมตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (ISO, 2006a) เข้ามาช่วยในการดำเนินการ เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมที่ถูกต้องและครบถ้วน และนำเสนอผลสรุปที่ได้จากการศึกษานี้ มาเพิ่มทางเลือกในการผลิตของภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้เป็นข้อมูลทางเลือกที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปสู่การกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาและการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อมอย่างถูกต้องและตรงประเด็น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มแรงผลักดันด้านสังคมให้นำไปสู่ความยั่งยืนในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการ ตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Inventory: LCI) ของการใช้วัตถุดิบและพลังงาน รวมทั้งของเสียหรือมลสารที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จากกระบวนการผลิตและการกำจัด ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง

2. เพื่อประเมินผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงการกำจัด และ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของ กล่อง พอลิแลกติกแอซิด ผสมแป้ง โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต เปรียบเทียบกับกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการใช้วัตถุดิบ ทรัพยากรธรรมชาติ และพลังงาน รวมถึงของเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ตลอดจนการ จัดการหลังการใช้งาน ของกล่องพอลิแลกติกแอซิด ผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

2. ศึกษาผลกระทบ ทางสิ่งแวดล้อม และคำนวณหา ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการผลิต การขนส่ง ตลอดจนการ จัดการหลัง การใช้งานของ กล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง มันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

3. กำหนดหน่วยหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ คือ บรรจุภัณฑ์ประเภทกล่อง แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ขนาด $8 \times 10 \times 2.8$ เซนติเมตร จำนวน 10,000 ชิ้น และสามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 100 กรัม

4. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการศึกษานี้ ใช้โปรแกรมการประเมินวัฏจักรชีวิตสำเร็จรูป SimaPro เวอร์ชัน 7.2 โดยใช้รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามวิธี CML 2 Baseline 2000 เวอร์ชัน 2.03

5. วิเคราะห์ข้อมูลการย่อยสลายทางชีวภาพ และความเป็นพิษจากการวัดค่าโลหะหนักของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 14855-1

6. ศึกษาการกำจัดกล่องหลังการใช้งาน โดยวิธีการเผาแบบธรรมดา การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน การฝังกลบตามธรรมชาติ การฝังกลบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน และการคอมโพสท์ตามมาตรฐาน ISO 14855-1

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลบัญชีรายการ ทางสิ่งแวดล้อม ของ กลุ่มพอลิแล กติกแอ ซิตผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70
2. ทราบถึง ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต และ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้น ต์ของ กลุ่มบรรจุอาหารแบบ สลายตัวได้ เปรียบเทียบกับกลุ่มแบบสลายตัวยากชนิด PET และ PVC เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัตถุดิบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
3. ได้ข้อเสนอแนะปรับปรุง กระบวนการผลิตและการกำจัดหลังการใช้งานสำหรับ บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การตรวจเอกสาร

1. เครื่องมือการจัดการและประเมินด้านสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อม ความรู้ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญ เครื่องมือและเทคนิคในการจัดการและประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อม จึงถูกพัฒนาขึ้นจากหลายๆ ประเทศ ปัจจุบัน มีเครื่องมือในการจัดการและประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมีอยู่หลายวิธี เช่น การประเมินวัฏจักรชีวิต การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment: RA) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA) การประเมินค่าสมรรถนะเชิงสิ่งแวดล้อม (Environmental Performance Evaluation: EPE) เป็นต้น

การประเมินวัฏจักรชีวิต คือ กระบวนการวิเคราะห์ และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ ที่มีตั้งแต่สิ่งแวดล้อม สอดตลอดชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ การสกัดหรือการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง และการแจกจ่าย การใช้ ส่วนการผลิตผลิตภัณฑ์ การนำไปใช้ ใหม่ การแปรรูป และการจัดการเศษซากของผลิตภัณฑ์ หลังจากการใช้ ส่วน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพิจารณาผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ เกิดจนตาย (Cradle-to-Grave) โดยมีการระบุถึงปริมาณพลังงานและวัตถุดิบที่ใช้ รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะหาวิธีการในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ให้เกิดผลกระทบ สิ่งแวดล้อม สอดน้อยที่สุด การพิจารณาถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ในทุกประเด็นที่เกิดขึ้น รวมถึงการใช้ทรัพยากรและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นการมองถึงผลกระทบในภาพรวมที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่อโลก เช่น การก่อให้ ภาวะโลกร้อน จากมลสารที่ปล่อยออกมาจำนวนมาก ที่มองเฉพาะผลกระทบของมลสารนั้น ดังนั้นการประเมินวัฏจักรชีวิต จึงเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางด้าน

สิ่งแวดล้อม หรือการกำหนดแนวทางดำเนินการด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต เช่น การพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การปรับปรุงนโยบายของภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบทั้งต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค และ การกระตุ้นให้เกิดจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น จุดเด่นที่สำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิต คือ ความสามารถในการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นระหว่างผลิตภัณฑ์หรือบริการมากกว่าหนึ่งชนิดได้ (ISO, 2006a)

1.1 หลักการและการประยุกต์ใช้ การประเมินวัฏจักรชีวิต

เทคนิคของการประเมินวัฏจักรชีวิตมีความแตกต่าง จากเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อม อื่นๆ ที่มีอยู่ กล่าวคือ การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็ นกระบวนการประเมิน ผลกระทบที่มีด ัง สิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (Product) หรือหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ (Function) ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยเนื้ ผลเชิงปริมาณอย่างชัดเจน จึงทำให้ การประเมินวัฏจักรชีวิตมีความซับซ้อนมากกว่าเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อม อื่นๆ เพราะต้องทำการวิเคราะห์ ตั้งแต่ขั้นต้นของทรัพยากรที่นำมาใช้ ถึงกระทั่งถึงขั้นตอนการกำจัดผลิตภัณฑ์หลังสิ้นสุดการใช้งาน

1.2 อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เป็ นอีกหนึ่งเครื่องมือ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม ที่ถูกบรรจุอยู่ ในอนุกรมมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม มาตรฐาน ISO 14000 โดยมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง กับ LCA แต่เดิมมีทั้งหมด 7 ฉบับ ได้แก่

- ISO 14040–Life cycle assessment–Principles and framework เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงหลักการ นิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO 14041–Life cycle assessment–Goal and scope definition and Life Cycle Inventory analysis เป็ นมาตรฐานที่กล่าวถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด ัง สิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)
- ISO 14042–Life cycle assessment–Life Cycle Impact Assessment (LCIA) เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการประเมินผลกระทบด ัง สิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO 14043–Life Cycle Assessment–Life Cycle Interpretation เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการแปลผล ข้อมูลที่ได้ จากการทำ LCI และ LCIA
- ISO/TR 14047–Life Cycle Assessment–Illustrative examples on how to apply ISO 14042–Life cycle impact assessment เป็ นรายงานวิชาการแสดงด้วย ัง ของการประยุกต์ใช้ อนุกรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO/TR 14048–Life Cycle Assessment–LCA Data Documentation Format เป็ นรายงานวิชาการแสดงด้วย ัง รูปแบบเอกสารของ ข้อมูล ด ัง LCA
- ISO/TR 14049–Life Cycle Assessment–Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis เป็ นรายงานวิชาการแสดง

ด้วย ำรงของการประกยุด ำใช้ ำนุกรรมมาตรฐาน ISO 14041 ำหรับจัดทำบัญชีรายการ ำนั่งสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

ในปัจจุบัน องค์การระหว่างประเทศ ได้ ำการมาตรฐาน ได้ทำการปรับปรุงและ รวบรวมขั้นตอนและวิธีการในการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์เข้าไว้ด้วยกัน ดังนี้

- ISO 14040:2006-Environmental management-Life cycle assessment- Principles and framework กล่าวถึงภาพรวมของวิธีดำเนินการ การประกยุดใช้งาน และ ข้อจำกัดของการ ประเมินวัฏจักรชีวิต ที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานที่หลากหลาย และผู้ถือ ผลประโยชน์ร่วม (stakeholder) ซึ่งอาจมีความรู้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตที่จำกัด
- ISO 14044:2006-Environmental management-Life cycle assessment- Requirements and guidelines เป็นการเตรียมตัวสำหรับการวิเคราะห์และเกณฑ์ในการทบทวน LCI โดยกำหนดแนวทางในการประเมินผลกระทบและการแปลงผลข้อมูลของรายงานผลที่ได้

อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040:2006 และ ISO 14044:2006 นำมาใช้แทน อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040:1997, ISO 14041:1999, ISO 14042:2000 และ ISO 14043:2000 โดยอนุกรมมาตรฐานใหม่ ได้ทำการปรับปรุงให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ตัดส่วนที่ไม่ จำเป็น ข้อผิดพลาด และความไม่สอดคล้องกันออก

1.3 ขั้นตอนในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตจะดำเนินงานตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งมี 4 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition)

การกำหนดเป้าหมายและวัตถุประสงค์ในการประเมินวัฏจักรชีวิต ผลิตภัณฑ์และระบุขอบเขตของการศึกษารวมถึงกำหนดหน่วยหน้าที่ เพื่อเป็นหน่วยพื้นฐานในการศึกษา โดยในขั้นตอนนี้มีความสำคัญในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ การศึกษามีความชัดเจน และการวิเคราะห์ ำสอดคล้อง ำกับวัตถุประสงค์ ำที่กำหนดไว้

1.3.2 การจัดทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory: LCI)

การทำบัญชีรายการโดยการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เช่น พลังงานที่ใช้ แหล่งทรัพยากรที่ใช้ และปริมาณการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยการจัดหาข้อมูลนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญของการทำ LCA เนื่องจากการทำ LCA นั้น จะจำเป็นที่ต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งมีความยุ่งยากในการจัดหาและรวบรวมข้อมูลและใช้เวลานานในการศึกษา

1.3.3 การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากข้อมูลบัญชีรายการที่รวบรวมได้ แล้ว ทำการแปลผลบัญชีรายการหรือข้อมูลไปสู่ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในประเภทต่างๆ สำหรับการประเมินผลกระทบประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยแบ่งเป็นส่วนการวิเคราะห์และจำแนกผลกระทบสิ่งแวดล้อม และส่วนเลือก ให้ศึกษาเพิ่มเติม ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. การจำแนกประเภท (Classification)

ขั้นตอนนี้ทำโดยรวบรวมมลพิษที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่รวบรวมได้ จัดเป็นหมวดหมู่ของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น เช่น ภาวะโลกร้อน (Global warming) การลดลงของชั้นโอโซน (Ozone layer depletion) เป็นต้น การจำแนกกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสารเข้าและสารออก จะเห็นได้ว่า สารบางตัวสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า 1 ประเภท ตัวอย่างเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน หรือก๊าซมีเทนอาจก่อให้เกิดผลกระทบสภาวะโลกร้อน และการเกิดมลสารชั้นทุติยภูมิจากปฏิกิริยาแสงเคมี (Photochemical oxidation) เป็นต้น

ข. การกำหนดบทบาท (Characterization)

ขั้นตอนนี้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมลสารที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในแต่ละประเภทให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน สารต่างๆ ที่จัดว่าเป็นสาเหตุของปัญหานี้จะถูกประเมินเป็นหน่วยกิโลกรัมเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ (kg CO₂ eq.) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$EP_j = \sum (Q_i \times EF_{ij}) \quad (1)$$

- เมื่อ EP_j คือ ค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบ j
(กิโลกรัม, เทียบเท่าสารอ้างอิงของผลกระทบ j)
- Q_i คือ ปริมาณมลสาร i ที่ปล่อยออกมา (กิโลกรัมของสาร i)
- EF_{ij} คือ ค่าเทียบเท่าของมลสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j
(กิโลกรัม, เทียบเท่าสารอ้างอิงของผลกระทบ j ต่อกิโลกรัมของสาร i)

ค. การเทียบหน่วย (Normalization)

ขั้นตอนนี้ทำโดยการหาความสำคัญของแต่ละผลกระทบ โดยทำการเปรียบเทียบค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ต่ออายุการใช้งาน และต่อค่าการให้ขนาดของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมนั้นๆ โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$NP_{j(\text{Product})} = \frac{EP_j}{(T \times ER_j)} \quad (2)$$

- เมื่อ NP_j คือ ค่าเทียบขนาดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ของผลิตภัณฑ์ (คน)
- T คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (ปี)
- ER_j คือ ค่าการให้ขนาดของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (กิโลกรัมเทียบเท่าสารอ้างอิงของผลกระทบ j ต่อคน ต่อปี)

ง. การให้น้ำหนัก (Weighting)

ขั้นตอนนี้ทำการให้น้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น โดยนำค่า NP_j ที่ได้ที่ได้มาคูณด้วยค่าการให้น้ำหนักที่มีค่าระดับความสำคัญของแต่ละผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น สภาวะโลกร้อนอาจพิจารณาว่ามีค่าสำคัญมากกว่าสภาวะฝนกรด โดยให้ค่าน้ำหนักที่อัตราส่วน 1:2 โดยค่าน้ำหนักที่คำนวณได้นี้เป็นค่าสุดท้ายที่ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่วิเคราะห์ หรือคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$WP_j = WF_j \times NP_j \quad (3)$$

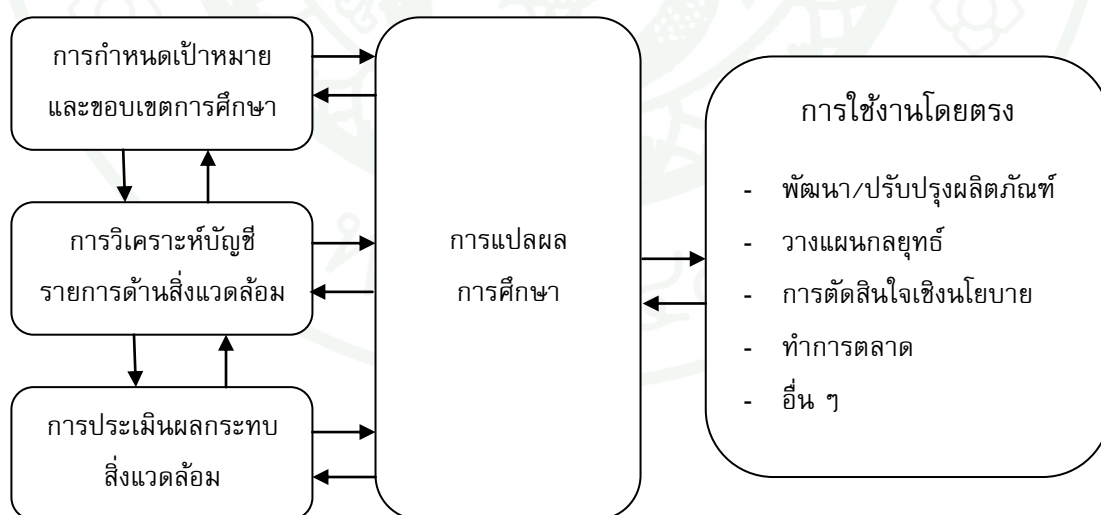
- เมื่อ WP_j คือ ค่าศักยภาพผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว (Person for target year: Pt.)

WF_j คือ ค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบสิ่งแวดล้อม j ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

1.3.4 การแปลผลการศึกษา (Interpretation)

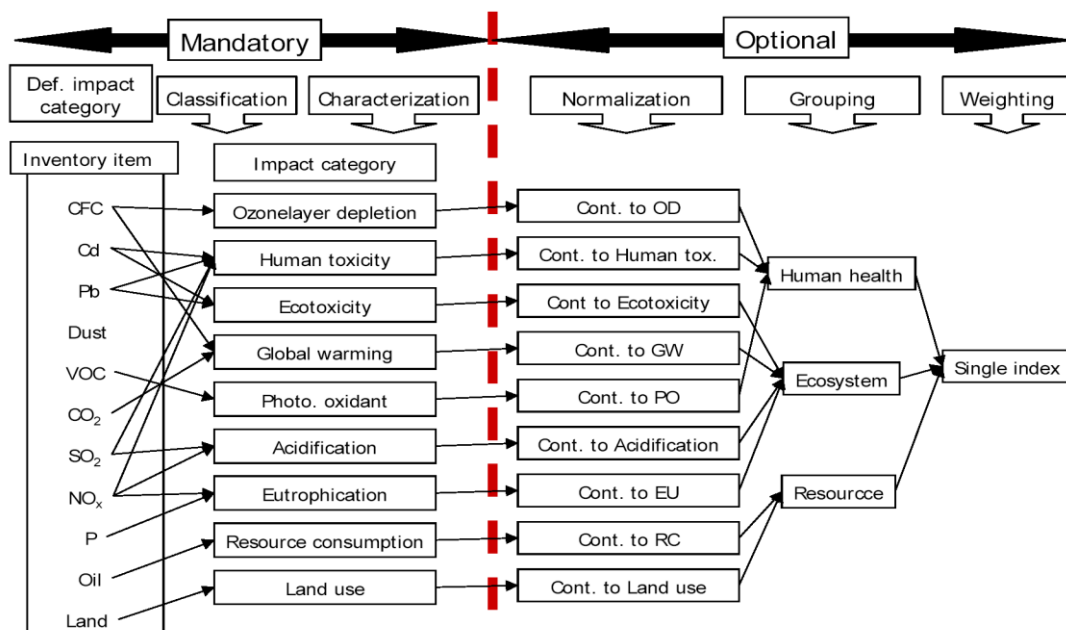
การแปลผล หรือการตีความ คือ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ร่วมกับการทำบัญชีรายการ เพื่อให้ได้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะตามวัตถุประสงค์และเป้าหมาย สมบูรณ์ครบถ้วน และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการศึกษาและวัตถุประสงค์การศึกษา การแปลผลการศึกษาประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

- การจำแนกประเด็นที่สำคัญที่มาจากผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่ได้จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตหรือบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม
- เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ ความอ่อนไหวของผลการศึกษา และความสอดคล้องของข้อมูล
- การจัดทำบทสรุป ข้อเสนอแนะ และรายงานผล



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

ที่มา: International Organization for Standardization (2006a)



ภาพที่ 2 ส่วนการวิเคราะห์และจำแนกผลกระทบสิ่งแวดล้อม และส่วนเลือกให้ศึกษาเพิ่มเติม ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ที่มา: International Organization for Standardization (2006a)

2. คาร์บอนฟุตพริ้นต์

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งหมายถึง ปริมาณ ก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน และการจัดการซากหลังการใช้งาน โดยคำนวณออกมา ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญชนิด หนึ่งที่ทำให้โลกร้อนขึ้นหากมีมากเกินไปที่ระบบของธรรมชาติจะรักษาสมดุลไว้

ก๊าซเรือนกระจกที่ทำการประเมินประกอบด้วยก๊าซ 6 ชนิด ตามที่ควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ซึ่งในการคำนวณจะใช้ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในรอบ 100 ปีของ IPCC (Global warming potential: GWP₁₀₀) ที่เป็นค่าล่าสุดเป็นเกณฑ์ แสดงดังตารางที่ 1 (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์, 2554)

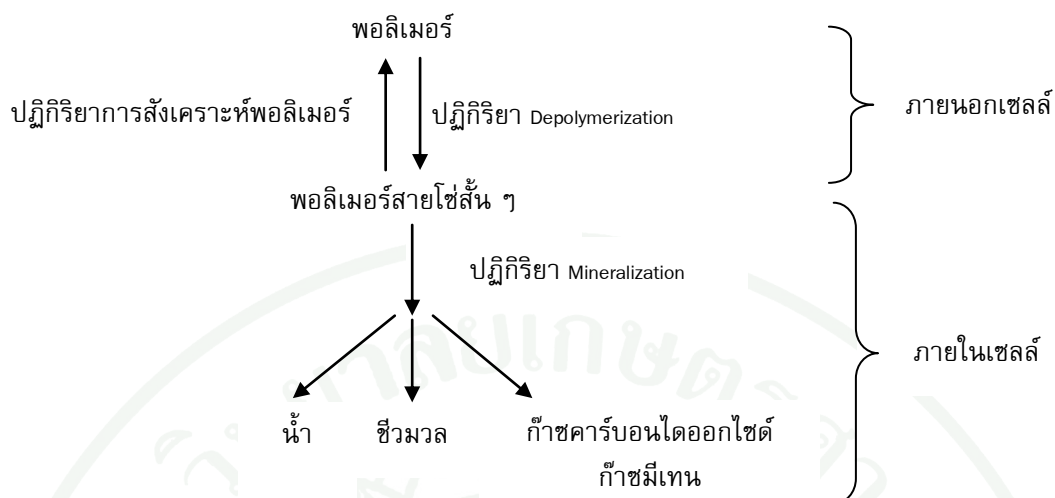
ตารางที่ 1 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกตามพิธีสารเกียวโต

ก๊าซเรือนกระจก	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (kg CO ₂ equivalent/kg)
คาร์บอนไดออกไซด์	1
มีเทน	25
ไนตรัส ออกไซด์	298
ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน	124 – 14,800
เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน	7,390 – 12,200
ซัลเฟอร์ เฮกซะฟลูออไรด์	22,800

ที่มา: IPCC (2007)

3. พลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์และแบคทีเรียในธรรมชาติ ทั้งในสภาวะที่มีอากาศหรือไร้อากาศ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช โดยมีวัตถุประสงค์ทางการเกษตร เป็นวัตถุประสงค์สำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้นี้จะต้องมีโครงสร้างทางโมเลกุลที่เอื้ออำนวยให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ ขั้นตอนในการย่อยสลายแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายสายโมเลกุลให้แตกออก (Depolymerization) ซึ่งจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์หรือร่างกายของสิ่งมีชีวิต (ปกติมักเป็นแบคทีเรียหรือรา) จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยในขั้นตอนแรกจะเข้าสู่เซลล์ของสิ่งมีชีวิต แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP ก๊าซชนิดต่างๆ (เช่น CO₂, CH₄, N₂) เกลือชนิดต่างๆ และชีวมวล แผนภาพขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย ชนิดของจุลินทรีย์ และสภาวะแวดล้อมในการย่อยสลาย ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-เบส (ธนาวัต, 2549)



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพ

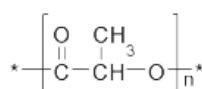
ที่มา: ธนาวดี (2549)

3.1 พอลิแลกติกแอซิด

PLA เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากกรดแลคติก การสังเคราะห์กรดแลคติกเกิดขึ้นจากกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1988 ได้มีการพัฒนากระบวนการผลิต PLA ซึ่งต่อมาสามารถผลิตและจำหน่ายได้ในเชิงการค้าเป็นทั้งฟิล์ม และเม็ด หรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ และในปี ค.ศ. 1997 บริษัท Cargill Dow ร่วมกับบริษัท Dow Chemical ผลิต PLA โดยมีชื่อทางการค้าว่า NatureWork™ จากนั้นในปี ค.ศ. 2002 เหลือเพียงบริษัท Cargill Dow มีสาขาการผลิตขนาดใหญ่ที่เมือง Blair มลรัฐ Nebraska ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา มีกำลังการผลิตเต็มกำลังที่ 140,000 เมตริกตันต่อปี (Vink et al., 2003)

PLA มีลักษณะใส มีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับสารแต่งเติมด้วย PLA สามารถกักเก็บกลิ่นและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซ O_2 CO_2 และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทกต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก และความแข็งแรง ความคงทนต่อการกระแทก ความยืดหยุ่น ใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ PE หรือ PP อีกด้วย ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งทางด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกพื้นฐานที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี (สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ, 2553)

ด้านคุณสมบัติที่สำคัญของ PLA คือ สามารถจะย่อยสลายได้ภายใน 4 - 5 อาทิตย์ โดยความร้อน ความชื้น และเชื้อจุลินทรีย์ PLA สามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass-transition temperature: T_g) ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส มีสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 4 แต่อย่างไรก็ตามราคาต้นทุนของ PLA ยังมีราคาสูงอยู่ประมาณ 120 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่พลาสติกทั่วไป มีราคาประมาณ 50 บาทต่อกิโลกรัม แต่มีแนวทางหนึ่งที่ได้พัฒนาจนประสบความสำเร็จ และได้ PLA ในปริมาณที่เหมาะสมแก่การลงทุน จากการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด หรือเศษวัสดุเหลือทิ้งของพืช ร่วมกับเทคโนโลยีการผลิต ได้แก่ การนำพลังงานกลับคืนจากก๊าซชีวภาพ และการนำเทคโนโลยีพลังงานลมมาใช้ร่วมกัน



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด

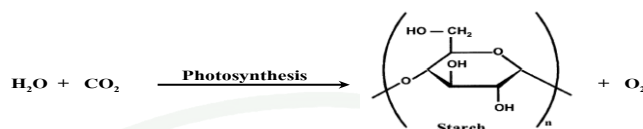
ที่มา: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (2553)

PLA เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการรับรองความปลอดภัย (Generally Recognized As Safe, GRAS) โดยสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา และเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติทางความร้อนและทางกลสูงกว่าพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดอื่นๆ เช่น พอลิไฮดรอกซีลิวทิกเลต (Polyhydroxybutyrate: PHB) และพอลิคาโปรแลคโตน (Polycaprolactone: PCL) และเป็นเทอร์โมพลาสติกขึ้นรูปได้ง่าย เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดเป็นแผ่น การเป่าเป็นฟิล์ม การเทอร์โมฟอร์ม และการปั้นหลอมเส้นใย และเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและขวดบรรจุน้ำดื่ม เช่น บริษัท BIOTA Brands of America นำ PLA Naturework™ ผลิตขวดสำหรับบรรจุน้ำดื่มเจ้าแรก (ธนาบดี, 2549) นอกจากนี้นำไปผลิตเป็นฟิล์ม 3 ชั้น โดยบริษัท Treofan จากประเทศเยอรมัน มีชื่อทางการค้าว่า Biophan PLA (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2550)

3.2 แป้ง (Starch) และการใช้งานร่วมกับวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่นๆ

แป้งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เกิดจากกลูโคสจำนวน 500-2,000 โมเลกุลมาต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkages) มีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาวและกิ่งก้านสาขา พบมากในพืชประเภทเมล็ดและหัว เช่น มัน

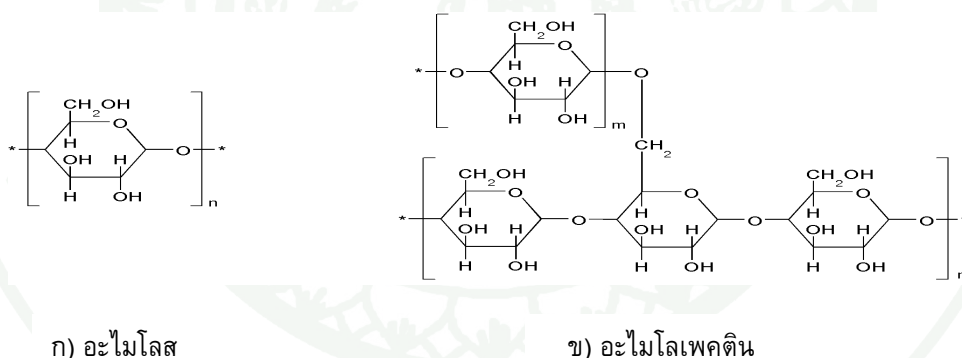
ข้าวโพด ข้าว เป็นต้น โดยแป้งเป็นผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ของพืช ซึ่งมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นสารตั้งต้น แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชได้แป้งและออกซิเจนเป็นผลผลิต

ที่มา: Crop and Food Research (2004)

สูตรโมเลกุลโดยทั่วไปของแป้ง คือ $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง มีโครงสร้างดังภาพที่ 6 พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ประกอบอยู่ในแป้งจะมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ของพืช



ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง

ที่มา: Crop and Food Research (2004)

แป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสประมาณร้อยละ 25 แต่แป้งบางชนิดอาจมีอะไมโลสสูงถึงร้อยละ 80 ในธรรมชาติจะพบแป้งในลักษณะที่เป็นเม็ดแป้งขนาดเล็กที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยมีส่วนที่เป็นผลึกค่อนข้างสูงกว่าส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) อยู่มาก โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ค่อนข้างสูง จึงมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำหรือความชื้นได้ดี แป้งมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 160–200 องศาเซลเซียส

แป้งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ย่อยสลาย เนื่องจากราคาถูก หาได้ง่ายจากการเกษตรกรรม เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ และมีความสามารถในการทนความร้อนสูงจากเครื่องมือและเครื่องจักร การผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง จะมีเนื้อแป้งเป็นส่วนประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงมากกว่าร้อยละ 90 และสามารถใช้ได้กับแป้งเกือบทุกชนิด เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี หรือแป้งมันสำปะหลัง (ธนาวดี, 2549)

3.3 การใช้แป้งในการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในปัจจุบันพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการผลิตและศึกษาอยู่ 2 วิธี คือ การเติมหรือผสมสารเติมแต่งที่ย่อยสลายได้ลงในพอลิเมอร์ที่จะผลิตเป็นพลาสติก และการสังเคราะห์พลาสติกที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ (หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง, 2540) พอลิเมอร์ในธรรมชาติที่นำมาใช้ในการเติมแต่ง ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน คอลลาเจน เจลาติน ลิกนิน เป็นต้น การผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง สามารถทำได้ 4 รูปแบบ ดังนี้

3.3.1 การใช้แป้งทั้งหมด คือ การใช้แป้งทั้งหมด หรือมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยทำให้แป้งเกิดการพองตัวด้วยการอัดด้วยเครื่องอัดแรงสูง แป้งที่มีลักษณะเป็นแป้งเปียก (Dough) จะถูกอัดผ่านแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิสูง เกิดการพองตัวของแป้งเนื่องจากสูญเสียความชื้นและแรงดัน จากนั้นทำให้เย็นตัวลง จะเกิดโครงสร้างแข็งและมีรูพรุน

3.3.2 การใช้แป้งเป็นสารตัวเติมหรือผสมกับพลาสติกทั่วไป โดยนำมาผสมกับพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีนตั้งแต่ร้อยละ 10-15 ไปจนถึงร้อยละ 85-95 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความคงทนต่อความชื้นให้กับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากแป้ง พลาสติกที่ได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ของอนุพันธ์จากปิโตรเคมี

3.3.3 การใช้ในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จะมีปริมาณของเนื้อแป้งมากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป โดยในการเตรียมพลาสติกจะต้องทำให้แป้งมีน้ำเพียงพอที่จะหลอมละลายภายใต้ความดัน แป้งจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง จนทำให้โครงสร้างในโมเลกุลของแป้งเกิดการแตกแยกออกเสียโครงสร้างไป โดยเรียกแป้งที่อยู่ในรูปนี้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หรือแป้งที่สูญเสียโครงสร้าง (Deconstructed starch) แป้งที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เช่น การฉีด การอัดรีด

3.3.4 การทำกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน กราฟท์โคพอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยกิ่งของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งเตรียมได้จากการทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนแข็ง โดยใช้การฉายรังสีหรือวิธีทางเคมี อนุมูลอิสระเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกับไวนิลแอลกอฮอล์ หรืออะคริลิกมอนอเมอร์

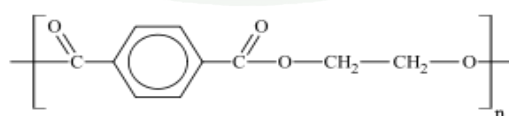
4. พลาสติกย่อยสลายยาก

4.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือที่เรียกกันโดยย่อว่า “เพท” เป็นเทอร์โมพลาสติก (หลอมที่อุณหภูมิสูง และแข็งตัวเมื่อเย็น) ที่ผลิตขึ้นได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเอทิลีนไกลคอล และไดเมทิลเทอพาทาเลต หรือระหว่างสารเอทิลีนไกลคอล และกรดเทอพาทาลิก แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ไดเมทิลเทอพาทาเลต ในการทดลองกับสัตว์พบว่า เป็นสารก่อมะเร็ง ก่อการกลายพันธุ์ และเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้ ยังมีการใช้ สารเร่งปฏิกิริยาเคมี เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ หรือแอนติโมนีไตรอะซิเตท (วลัยพร, 2551)

PET แข็งแรงทนทาน ทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย มีความโปร่งใส สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี มีจุดหลอมเหลว 250-260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.38-1.39 จึงใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำอัดลม น้ำดื่ม น้ำมันพืช น้ำปลา และถาดอาหารสำหรับเตาอบ นอกจากนี้ขวด PET ยังมีน้ำหนักเบาและมีราคาที่ถูกกว่าแก้ว พลาสติกชนิดนี้จึงได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (สุภาวดี, 2547) PET สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน เป็นต้น

ชื่อเรียกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในระบบ IUPAC คือ Poly(ethylene terephthalate) และสูตรโครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ที่มา: wikipedia (2007a)

4.2 พอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์หรือที่เรียกกันว่า พีวีซี เป็นพลาสติกที่ได้จากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ได้มาจากเอทิลีนและคลอรีน PVC ได้รับการคิดค้นขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1912 แต่ผลิตรออกจำหน่ายครั้งแรกในปี ค.ศ. 1931 เนื่องจากเป็นช่วงสงคราม กองทัพนาซีของเยอรมนีมีการผลิตผ้าเรยอนจำนวนมาก ทำให้มีคลอรีนซึ่งเป็นผลพลอยได้เกิดขึ้นจำนวนมากด้วย (วลัยพร, 2551)

PVC มีความแข็งแรงทนทานต่อการเสียดสี เหนียว ทนต่อสารเคมี น้ำมัน และกันกลิ่นได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและน้ำได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความโปร่งใสมาก สามารถทนต่ออุณหภูมิร้อนเย็นได้ไม่เกิน -20 ถึง 80 องศาเซลเซียส

PVC เป็นพลาสติกแข็ง ใช้ทำท่อ เช่น ท่อน้ำประปา แต่สามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ จึงนำมาผลิตเป็นฟิล์มที่ใช้ห่อหุ้มอาหาร ถาดหรือกล่องบรรจุอาหาร ขวดบรรจุน้ำ ฯลฯ ในอดีตพลาสติกชนิดนี้มีสารบางชนิดก่อให้เกิดมะเร็งในตับแก่ผู้บริโภค แต่ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนามันใจได้ว่าปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากขึ้น (สุภาวดี, 2547) PVC สามารถนำกลับมารีไซเคิล เพื่อผลิตท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ หรือม้วนพลาสติก

ชื่อเรียกของพอลิไวนิลคลอไรด์ในระบบ IUPAC คือ Poly(chloroethenediyl) และสูตรโครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคลอไรด์

ที่มา: wikipedia (2007b)

5. เทคนิคและวิธีการทดสอบการย่อยสลายตามมาตรฐาน

การทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่า ผลิตภัณฑ์พลาสติกชิ้นใดเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไม่สามารถกระทำได้ง่าย วิธีการทดสอบการย่อยสลายด้วยการคอมโพสท์และความเป็นพิษภายหลังการย่อยสลายต่อระบบนิเวศน์ การกำหนดเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการใช้งานด้านต่างๆ รวมถึงการจัดให้มีระบบการจัดการขยะที่เหมาะสมสำหรับการจัดการขยะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ให้ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางขึ้น (ธนาวดี , 2549) และตารางที่ 2 แสดงรายชื่อองค์กรที่ทำงานด้านมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

ตารางที่ 2 รายชื่อองค์กรที่ทำงานด้านมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ชื่อองค์กร/สถาบัน	ประเทศที่ใช้
1. ASTM (American Society for Testing and Material)	สหรัฐอเมริกาและแคนาดา
2. CEN (Comite European de Normalization หรือ European Committee for Standardization)	ยุโรป ไชล์แลนด์ นอร์เวย์ สวีเดน เซอร์แลนด์ สาธารณรัฐเช็ก
3. DIN (Deutsches Institute Fur Normung eV)	เยอรมนี
4. ISO (International for Standardization)	นานาชาติ
5. JIS (Japanese Institute for Standardization)	ญี่ปุ่น
6. OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)	30 ประเทศ

ที่มา: ธนาวดี (2549)

5.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่บอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยการคอมโพสท์ที่มีมาตรฐาน DIN V 54900 และ EN 13432 รวมถึง ASTM D6400 เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมเป็นที่ยอมรับในระดับชาติ แสดงดังตารางที่ 2 รายละเอียดที่ระบุไว้ใน 3 มาตรฐานนี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่มีพื้นฐานการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องมีเพื่อให้ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนดคือ

5.1.1 การประเมินการย่อยสลายเบื้องต้น และปริมาณโลหะหนัก เพื่อยืนยันว่า คอมโพสที่ได้จากการหมักพลาสติกกรวมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ จะไม่มีโลหะหนักในปริมาณที่มากเกินไปที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 3 มาตรฐาน DIN V 54900-1 กำหนดให้พลาสติกต้องมีสารอินทรีย์อย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และประมาณโลหะหนัก 7 ชนิดต้องไม่เกินที่กำหนด ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำและมีความเข้มงวดมาก และกำหนดให้ต้องวิเคราะห์ปริมาณสาร PCB (Polychlorinated Biphenyl) ไดออกซิน (Dioxin) และฟิวเรน (Furan) ส่วนมาตรฐาน EN 13432 ระบุว่าบรรจุภัณฑ์ต้องผ่านการประเมินการย่อยสลายได้ทางชีวภาพเบื้องต้นโดยศึกษาจากองค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักและสารอันตรายรวม 11 ชนิด และมีปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid) อย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมาตรฐาน ASTM ระบุปริมาณสารอันตรายที่ยอมรับให้มีในบรรจุภัณฑ์ได้ไว้ที่ความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐานอื่น

5.1.2 การวัดความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกณฑ์ ในการพิจารณาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติกภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน EN 13432 มาตรฐาน DIN V 54900-2 มาตรฐาน ASTM D6400 มีความใกล้เคียงกัน โดยระบุให้ทำการวัดค่าความต้องการกาซออกซิเจน (Oxygen Demand) หรือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ รวมถึงบันทึกระยะเวลาที่ขึ้นวัสดุเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ มาตรฐาน ASTM D6400 และ DIN V 54900 กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียว ต้องมีการย่อยสลายไม่น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคาร์บอนอินทรีย์ในขึ้นวัสดุ และผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์มากกว่า 1 ชนิด ต้องมีการย่อยสลายไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักภายในระยะเวลา 6 เดือน และต้องพิสูจน์ว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดต้องสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพไม่น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักภายในระยะเวลา 6 เดือนด้วย เพื่อป้องกันการนำพอลิเมอร์ที่ไม่ย่อยสลายมาผสมกัน มาตรฐาน EN 13432 กำหนดให้บรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้องมีสมบัติผ่านตามข้อกำหนด คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ของการย่อยสลายสูงสุดของวัสดุมาตรฐานทั่วไปคือเซลลูโลส ภายในระยะเวลาไม่เกิน 6 เดือน (ธนาวัต, 2549)

5.1.3 การวัดความสามารถในการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ของวัสดุทดสอบในภาวะคอมโพส เพื่อศึกษาว่าขึ้นพลาสติกสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ จนไม่เหลือเศษวัสดุที่มีขนาดใหญ่เกินไป ภายใต้สภาวะและช่วงเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขยะอินทรีย์ทั้งไปในโรงคอมโพส และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

ก. การทดสอบขนาดสาธิต (Pilot Scale Testing) ทดสอบในถังคอมโพสท์ขนาด 140 ลิตรหรือขนาดใหญ่กว่า โดยการใส่พลาสติกผสมกับขยะอินทรีย์ในความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเติมออกซิเจน ควบคุมอุณหภูมิ ความเป็นกรด -ด่าง และความชื้น เป็นระยะเวลานาน 12 สัปดาห์ แล้วนำคอมโพสท์ที่หมักได้มาทำการทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 และ 2 มิลลิเมตร และให้เหลือเศษวัสดุทดสอบที่ไม่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงมากกว่า 2 มิลลิเมตรได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น

ข. การทดสอบขนาดใหญ่ (Full Scale Testing) ให้ทำการทดสอบในโรงคอมโพสท์ขนาดใหญ่ประมาณ 1-10 ตันภายใต้สภาวะจริง

5.1.4 การวิเคราะห์คุณภาพ และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของคอมโพสท์ที่ได้จากการหมัก เพื่อศึกษาคอมโพสท์ที่มีพลาสติกย่อยสลายได้รวมอยู่ด้วย โดยผลการทดสอบต้องสามารถระบุได้ว่าคอมโพสท์ที่ได้มีคุณภาพไม่ด้อยกว่าคอมโพสท์ที่ไม่มีการใส่พลาสติกย่อยสลายได้ มาตรฐาน DIN V54900 ระบุให้มีการทดสอบเพื่อประเมินปริมาณของสารตกค้างที่ไม่พึงประสงค์ และทำการทดสอบคุณภาพคอมโพสท์ที่หมักได้ต้องไม่ด้อยกว่าคอมโพสท์ที่ไม่มีวัสดุทดสอบ โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การเพาะของเมล็ดพืช และศึกษาการเจริญเติบโตของพืช 2 ชนิด มาตรฐาน EN 13432 ระบุให้วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี เช่น น้ำหนักแห้ง ปริมาณเกลือ ค่าความเป็นกรดต่าง และปริมาณสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ในคอมโพสท์ที่หมักได้ ศึกษาเปอร์เซ็นต์การเพาะของเมล็ดพืชและการเจริญเติบโตของพืช มาตรฐาน ASTM D6400 ได้รวมการวิเคราะห์เชิงคุณภาพไว้ในส่วนของการวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุ และให้นำคอมโพสท์ที่หมักได้มาทดสอบ โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การเพาะของเมล็ด และการเจริญเติบโตของพืช 2 ชนิดเช่นกัน

กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ก็ต่อเมื่อผ่านการทดสอบและมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้รับตราสัญลักษณ์ที่แสดงว่า เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้เพื่อความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการติดตราสัญลักษณ์ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกย่อยสลายได้โดยคอมโพสท์ (Compostable Plastic) ที่ได้รับความเชื่อถือ เช่นสัญลักษณ์ OK Compost ของประเทศเบลเยียม สัญลักษณ์ Compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี สัญลักษณ์ Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และสัญลักษณ์ PBS ของประเทศญี่ปุ่น

ตารางที่ 3 ปริมาณสูงสุดของสารอันตรายที่ระบุไว้ในมาตรฐานคอมโพสท์ต่างๆ

สารอันตราย	DIN V 54900-1 (มก./กก.)	EN 13432 (มก./กก.)	ASTM D6400 (มก./กก.)
สังกะสี (Zn)	100	150	1,400
ทองแดง (Cu)	23	50	750
นิกเกิล (Ni)	15	25	210
แคดเมียม (Cd)	0.3	0.5	17
ตะกั่ว (Pb)	30	50	150
ปรอท (Hg)	0.3	0.5	8.5
โครเมียม (Cr)	30	50	–
โมลิบดีนัม (Mo)	–	1	–
เซเลเนียม (Se)	–	0.75	50
สารหนู (As)	–	5	20.5
ฟลูออรีน (F)	–	100	–
พอลิคลอริเนต ไบฟีนิล (PDBs)	ทำการวิเคราะห์	–	–
ไดออกซิน (PCDD/F)	ทำการวิเคราะห์	–	–

ที่มา: ธนาวดี (2549)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 การศึกษาเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปนัดดา (2540) ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และ แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ พบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมจะนำไปใช้ประโยชน์ เตรียมจากน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 5 แล้วเติมสารซอร์บิทอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะใส ผิวเรียบ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และ ให้สมบัติเด่น คือ สามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ 120 วัน และย่อยสลายได้โดย จุลินทรีย์ในธรรมชาติ

วรภัทร (2545) ศึกษาการขึ้นรูปภาชนะบรรจุที่มีลักษณะคล้ายถาดโฟมจากแป้ง มันสำปะหลังผสมแป้งชนิดอื่น เพื่อใช้ในการบรรจุผักผลไม้สดที่ตกแต่งพร้อมบริโภค การ ทดสอบคุณสมบัติ พบว่า ถาดบรรจุที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งข้าวเหนียวที่ อัตราส่วน 80 ต่อ 20 สามารถทนทานต่อน้ำเย็นและน้ำร้อนได้นาน 3.51 และ 3.22 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนถาดบรรจุที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 สามารถทนทานต่อน้ำเย็นและน้ำร้อนได้นาน 3.21 และ 4.13 ชั่วโมง ตามลำดับ และถาด บรรจุที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งท้าวยายม่อมที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 สามารถ ทนทานต่อน้ำเย็นและน้ำร้อนได้นาน 4.21 และ 4.24 ชั่วโมง ตามลำดับ

วรภัทร (2546) รายงานว่าสามารถขึ้นรูปภาชนะถาดบรรจุจากแป้ง โดยใช้แป้ง มันสำปะหลังเป็นหลัก ผสมกับแป้งท้าวยายม่อมที่อัตราส่วน 80:20 แป้งข้าวเหนียวที่ อัตราส่วน 80:20 และแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วน 90:10 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ภาชนะ ถาดบรรจุที่ได้ มีความสามารถต้านแรงกดทับ (ASTM 642-00) มากกว่าถาดโฟมที่ทำมาจาก พอลิสไตรีนที่ขยายตัว ประมาณ 3 เท่า และเมื่อทดสอบการใช้งานในการบรรจุผักและผลไม้สด ตกแต่งพร้อมบริโภค พบว่า อายุการใช้งานสั้น ยังต้องมีการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติทนทานต่อ การซึมผ่านของน้ำและความชื้น

เก่งพงศ์ และ วรวิทย์ (2547) ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิ เอสเทอร์ผสมแป้งในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยเตรียมพอลิเอสเทอร์ที่มีชื่อว่า พอลิเอทิลีน อะดิเปต (Polyethylene adipate) ด้วยวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) จากนั้นทำการเติมแป้งมันสำปะหลังตามอัตราส่วนต่างๆ 0 , 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิเอสเทอร์ ลงไปผสมขณะร้อน และทำการขึ้นรูป เป็นแผ่นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของพลาสติกที่ได้ และทดสอบ

ความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า แป้งแห้งผสมกับพอลิเอสเทอร์ในปริมาณตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะทำให้เนื้อของพลาสติกยึดเกาะกันเป็นแผ่นได้ดียิ่งขึ้น ไม่แตกหักง่าย เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งผสมลงในพอลิเอสเทอร์มากขึ้นถึง 60 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้จุดหลอมเหลวของพลาสติกสูงขึ้น และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในด้าน ความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกที่ได้จากการผสมพอลิเอสเทอร์กับแป้งโดยการฝังดินเป็นเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าแป้งที่ผสมอยู่ในเนื้อพลาสติกมีการย่อยสลายไปโดยสังเกตจากน้ำหนักที่หายไปประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

Ganjyal *et al.* (2007) ศึกษาการย่อยสลายจากการเพิ่มอัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิด 10-30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับโพลีอะซิเตต (Starch Acetate) และทำการทดสอบการย่อยสลายภายใต้มาตรฐาน ASTM D 5338 พบว่า แป้งอะมิโลสสามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ภายใน 15 วัน ในขณะที่โพลีอะซิเตตย่อยสลายได้สมบูรณ์ที่ 115 วัน แต่เมื่อเติมพอลิแล็กติกแอซิด ผสมกับโพลีอะซิเตต ทำให้อัตราการย่อยสลายเร็วขึ้น

Liao and Wu (2009) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิคาโพรแลคโตน ที่อัตราส่วนของ PLA/PCL ได้แก่ 100/0 , 90/10, 80/20 , 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 และ 0/100 พบว่าที่อัตราส่วนของ PLA/PCL เท่ากับ 70/30 เพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้ดีขึ้น ต่อมาได้ปรับปรุงด้วยการเติมแป้งเพียงอย่างเดียว และการเติมแป้งกับกรดอะคริลิก (Acrylic acid, AA) พบว่า การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิคาโพรแลคโตน ที่อัตราส่วน 70/30 และการเติมแป้งกับกรดอะคริลิก (PLA_{70}/PCL_{30} -g-AA-starch) มีค่าความต้านทานน้ำดีกว่าการปรับปรุงด้วยการเติมแป้งเพียงอย่างเดียว

6.2 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

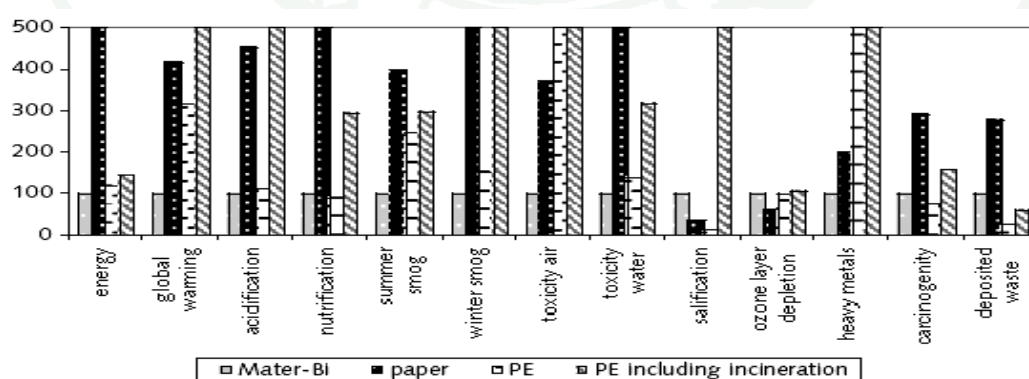
Patel *et al.* (1999) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการผลิตเม็ดพอลิเมอร์จากแป้ง พอลิเอทิลีน และแป้งผสมกับพลาสติกจากปิโตรเคมี และ ศึกษา การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิต จากการผลิตและการกำจัดด้วยวิธีการเผา ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า พอลิเมอร์จากแป้งมีการใช้พลังงานในการผลิต น้อยกว่าพอลิเอทิลีนประมาณ 28-55 จิกกะจูลต่อตันพอลิเมอร์ และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวัฏจักรชีวิตต่ำกว่าประมาณ 1.4-3.9 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตันพอลิเมอร์ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติกจากปิโตรเคมีที่ผสมเข้าไป

ตารางที่ 4 ปริมาณการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์จาก
แป้งแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ชนิดของพลาสติก	องค์ประกอบ ปิโตรเคมี (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	การใช้พลังงาน ในการผลิต (จิกกะจูลต่อตัน พอลิเมอร์)	ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO ₂ ตลอดวัฏจักรชีวิต (กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อตันพอลิเมอร์)
พลาสติกจากแป้ง	0	25.4	1,140
พลาสติกจากแป้ง/PVOH	15	24.9	1,730
พลาสติกจากแป้ง/PCL	52.5	48.3	3,360
พลาสติกจากแป้ง/PCL	60	52.3	3,600
LDPE	100	80.6	4,840

ที่มา: Patel (1999)

Schwarzwalder (2000) ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์จากพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า “Mater-Bi” ผลิตจากข้าวโพดโดยบริษัท Cargill Down Polymer พอลิเอทิลีน และกระดาษ (Paper) โดยใช้โปรแกรม EMIS 2.2 วิเคราะห์ผลกระทบ 13 ด้าน พบว่า การใช้พอลิแลกติกแอซิด ก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม น้อยกว่าพอลิเอทิลีน 10 ด้าน ยกเว้นผลกระทบด้านการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ ภาวะความเค็ม สารก่อมะเร็ง ปริมาณขยะที่สะสม แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบการประเมินผลกระทบที่เกิดจากการผลิตของพอลิแลกติกแอซิด
พอลิเอทิลีน และกระดาษ

ที่มา: Schwarzwalder (2000)

Patel (2001) ศึกษาผลกระทบจากการใช้พลังงานในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความต้องการพลังงาน น้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียม ปริมาณการใช้พลังงานในการสังเคราะห์และการผลิต HDPE และ LDPE เปรียบเทียบกับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแสดงดังตารางที่ 5 พบว่า พลังงานที่ใช้ในการผลิต PHA มีค่าเท่ากับการผลิต PE ในขณะที่พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่นใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า เนื่องจากผลกระทบจากการปลดปล่อย GHG สู่สิ่งแวดล้อม ในขณะที่เกิดย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกย่อยสลายได้ คาร์บอนในรูปของ CO_2 จะถูกตรึงไปใช้ เพื่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกขึ้นมาใหม่ เกิดเป็นวัฏจักรของคาร์บอน ทำให้เกิดการหมุนเวียนและสมดุลของปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศ แต่สำหรับการผลิต พลาสติกจากปิโตรเคมี ซึ่งประกอบไปด้วยสาร HC เป็นส่วนใหญ่ คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนจากคาร์บอนในปิโตรเลียมไปเป็นคาร์บอนในพลาสติกทั้งหมด นอกจากคาร์บอนที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว คาร์บอนในพลาสติกจะถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศอีกครั้งเมื่อพลาสติกถูกกำจัด นั่นคือ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพลาสติกจากปิโตรเลียมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตจนถึงการกำจัดในขั้นสุดท้ายของ HDPE และ LDPE จะมีมากกว่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ 5 พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ และการผลิตพอลิเอทิลีนเปรียบเทียบกับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่างๆ

ชนิดของพอลิเมอร์	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (kg CO_2 eq/kg polymer)	พลังงานที่ต้องการ (MJ/kg)
Low density polyethylene (LDPE)	530	81
Polyhydroxyalkanoates (PHA)	500	81
High density polyethylene (HDPE)	490	80
Polycaprolactone (PCL)	420	77
Starch-Polyvinyl alcohol (PVOH)	360	58
Poly lactide (PLA)	330	57
Thermoplastic starch + 60 % PCL	170	52
Thermoplastic starch + 52.5 % PCL	110	48
Thermoplastic starch	n/a	25
Thermoplastic starch + 15 % PVOH	n/a	25

ที่มา: Patel (2001)

Karli and Grant (2003) ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับถุงที่ผลิตจากวัสดุปิโตรเลียม โดยประเมินผลกระทบด้านการใช้วัตถุดิบ (MC) ภาวะเรือนกระจก (GHG) การลดลงของทรัพยากร (AD) การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (EH) การทิ้งอย่างไม่เหมาะสมลงในแหล่งน้ำทะเล (LM) และในดิน (LA) แสดงตารางที่ 6 พบว่า ถุงจากกระดาษคราฟท์ก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะเรือนกระจกมากที่สุด โดยให้มีการใช้ 2 ครั้งต่อถุงในเวลาหนึ่งปี ด้านการลดลงของทรัพยากร พบว่า ถุงจากกระดาษคราฟท์ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุด เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในการผลิต ส่วนถุง PP และ HDPE มีการนำกลับไปใช้ใหม่ จึงก่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุด ด้านการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ พบว่า ถุงจากกระดาษคราฟท์ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุด ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สู่อากาศ ส่วนพลาสติกที่ทำจากวัสดุธรรมชาติเกิดผลกระทบจากกิจกรรม การเกษตร ด้านการทิ้งอย่างไม่เหมาะสมลงในแหล่งน้ำทะเล พบว่า ถุงที่มีการใช้เพียงครั้งเดียวเกิดผลกระทบสูงกว่าถุงที่นำกลับมาใช้ซ้ำ และเมื่อนำขยะพลาสติกไปลอยน้ำ จะใช้เวลาในการย่อยสลาย 6 เดือน แต่ถ้ามีแสงเข้าช่วยในกระบวนการ จะทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น 3 เดือน ด้านการทิ้งลงในดิน พบว่า การย่อยสลายในการฝังกลบก่อให้เกิดก๊าซมีเทน และเมื่อเปรียบเทียบการกำจัดด้วยการฝังกลบกับการคอมโพสท์ พบว่า การคอมโพสท์ก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะเรือนกระจกน้อยกว่าการฝังกลบ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการประเมินผลกระทบถุงจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ประเภทต่างๆ กับวัสดุทางเลือกอื่นๆ

ประเภทถุง	MC kg	GHG kg CO ₂ eq	AD kg Sb eq	EH kg PO ₄ eq	LM kg/yr	LA m ² /yr
Starch-PBS/A	3.12	2.50	0.00487	0.00273	4.26 x10 ⁻⁵	0.078
Starch-PBAT	3.12	2.88	0.0230	0.00406	4.26 x10 ⁻⁵	0.078
Starch-Polyester	4.21	4.96	0.0409	0.00494	5.75 x10 ⁻⁵	0.078
Starch-PE	3.12	4.74	0.0694	0.00258	0.0078	0.078
Oxo-Biodegradable	3.12	6.31	0.101	0.00236	0.0039	0.078
PLA	4.21	16.7	0.0776	0.00911	5.75 x10 ⁻⁵	0.078
HDPE Singlet	3.12	6.13	0.102	0.00246	0.0078	0.312
Kraft Paper	22.15	30.2	0.285	0.0266	0.000302	0.078
PP Fibre	0.209	1.95	0.023	0.00126	0.000241	0.00187
Woven HDPE	0.216	0.631	0.00934	0.000231	0.000107	0.00148
Calico	1.14	6.42	0.0177	0.00795	3.09 x10 ⁻⁶	0.00164
LDPE Bag	1.04	2.76	0.0422	0.00114	0.00257	0.00746

ที่มา: Karli and Grant (2003)

Vink *et al.* (2003) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากข้าวโพด เพื่อศึกษาปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลทั้งหมด (Gross Fossil Energy Use, GFEU) ในการผลิต และเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมกับพอลิเมอร์จากปิโตรเคมี 11 ชนิด โดยผลกระทบที่เลือกทำการศึกษา คือ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ภาวะโลกร้อน และการใช้น้ำ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลทั้งหมด ในการผลิต PLA เท่ากับ 54.1 MJ/kg PLA และขั้นตอนที่ต้องการใช้พลังงานฟอสซิลมากที่สุด คือ ขั้นตอนการผลิตกรดแลคติกซึ่งใช้พลังงานถึง 26.3 MJ/kg PLA คิดเป็นร้อยละ 49 ของปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลทั้งหมด ส่วนผล การเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์จากปิโตรเคมีพบว่า การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของการผลิต PLA ต่ำกว่าการผลิตพอลิเมอร์จากปิโตรเคมี และการใช้น้ำในการผลิต PLA ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการผลิตพอลิเมอร์จากปิโตรเลียม การประเมินความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงาน โดยเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และปรับปรุงเทคโนโลยีการสังเคราะห์กรดแลคติกพบว่า สามารถลดปริมาณ การใช้พลังงานฟอสซิลทั้งหมดเหลือเพียง 7.4 MJ/kg PLA และยังช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกทางหนึ่งด้วย

Bohlmann (2004) ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานในการผลิต และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตและการกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ของถ้วยขนาด 8 ออนซ์ สำหรับบรรจุโยเกิร์ตน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม ที่ผลิตจาก PLA ซึ่งใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ กับ PP ซึ่งได้จากก๊าซธรรมชาติ โดยถ้วย PLAหนัก 8.91 กรัม และถ้วย PPหนัก 7.90 กรัม ผลการศึกษาพบว่า ถ้วย PLA ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าถ้วย PP โดยถ้วย PLA ใช้พลังงานเท่ากับ 56.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัมพอลิเมอร์ หรือ 2,225 เมกะจูลต่อดันโยเกิร์ต และถ้วย PP ใช้พลังงานเท่ากับ 93.7 เมกะจูลพอลิเมอร์ หรือ 3,261 เมกะจูลต่อดันโยเกิร์ต แต่ถ้านำในการผลิตกรดแลคติก ใช้วิธีการต้มระเหยแบบ 2 ชั้น (Double-effect evaporation) ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการต้มระเหยแบบ 3 ชั้น (Triple-effect evaporation) จะทำให้การใช้พลังงานในการผลิตถ้วยจากพอลิแลคไทด์เพิ่มขึ้นเป็น 75.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัมพอลิเมอร์ ส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิต และการกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ หากตั้งสมมติฐานว่า PLA ไม่เกิดการย่อยสลายในหลุมฝังกลบเหมือนกับ PP จะพบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของถ้วย PLA และ PP มีค่าเท่ากับ 0.029 และ 0.026 ดันคาร์บอนต่อดันโยเกิร์ต ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่หากตั้งสมมติฐานว่า PLA ในหลุมฝังกลบเกิดการย่อยสลายได้ก๊าซมีเทน ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของถ้วย PLA จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.091 ดันคาร์บอนต่อดันโยเกิร์ต

Johansson (2005) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกล่องบรรจุอาหารที่ผลิตจาก PET และ PLA โดยใช้โปรแกรม SimaPro และวิธี

CML 2 Baseline 2000 การกำจัดหลังสิ้นสุดการใช้งานใช้วิธีการฝังกลบ ส่วนกล่องบรรจุอาหารที่ผลิตจาก PLA ใช้วิธีการคอมโพสท์ เพิ่มขึ้นด้วย และใช้ข้อมูลการฝังกลบและการคอมโพสท์ของกระดาษเป็นตัวแทนของวัสดุย่อยสลายได้ ผลการศึกษาพบว่า กล่องบรรจุอาหารที่ผลิตจาก PET มีผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำทะเล ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก และภาวะความเป็นกรดมากกว่า ส่วนกล่องบรรจุอาหารที่ผลิตจาก PLA มีผลกระทบด้านการลดลงของทรัพยากรที่ไม่สามารถทดแทนได้ ภาวะโลกร้อน การลดลงของชั้นโอโซน ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำทะเล การเกิดมลสารชั้นทุติยภูมิ และภาวะขาดอาหารในน้ำเกินสมดุลมากกว่า เมื่อกำจัดหลังการใช้งานพบว่า การกำจัด PLA ด้วยวิธีการฝังกลบ มีผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการคอมโพสท์

Horikoshi *et al.* (2005) ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณ ก๊าซ CO_2 ที่ปล่อยสู่บรรยากาศตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของหีบห่อสำหรับบรรจุมันเทศ ซึ่งผลิตจากวัสดุ 2 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์ชีวภาพจากข้าวโพด และพอลิสไตรีน ผลการศึกษาปริมาณ CO_2 ที่ถูกปล่อยออกมาจากขั้นตอนการผลิตพบว่า พอลิเมอร์ชีวภาพปล่อย CO_2 ออกมาสูงกว่าพอลิสไตรีน แต่เมื่อหักลบด้วยปริมาณ CO_2 ที่ข้าวโพดดึงไปใช้ในปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง ในช่วงการเจริญเติบโต จะทำให้ปริมาณ CO_2 ที่ปล่อยออกมาในระหว่างขั้นตอนดังกล่าวของพอลิเมอร์ชีวภาพจากข้าวโพด และพอลิสไตรีนใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาตลอดทั้งวัฏจักรชีวิต โดยรวมขั้นตอนการผลิตหีบห่อสำหรับบรรจุมันเทศ การขนส่ง และการกำจัดหลังการใช้งานด้วยวิธีการเผา พบว่า ช่วงการผลิตหีบห่อสำหรับบรรจุมันเทศของพอลิเมอร์ชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซ CO_2 ออกมามากกว่าพอลิสไตรีนเล็กน้อย แต่ในช่วงการเผาทำลายพอลิสไตรีนจะ มีการปล่อย CO_2 มามากกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพ และเมื่อพิจารณาผลรวมการปล่อย CO_2 ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่า การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพจากข้าวโพดแทนพอลิสไตรีนในการผลิตหีบห่อสำหรับบรรจุมันเทศ สามารถลดปริมาณการปล่อย CO_2 สู่อากาศได้ถึงร้อยละ 11

Franklin Associates (2006) ศึกษาปริมาณการใช้ให้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง และการทำบัญชีรายการตลอดวงจรชีวิต ของแก้วน้ำดื่มน้ำหนัก 16 ออนซ์ ซึ่งผลิตจากพอลิเมอร์ประเภท HIPS PET PP และ PLA ที่ผลิตจากข้าวโพด กล่องบรรจุอาหารสำเร็จรูปน้ำหนัก 16 ออนซ์ แบบน้ำหนักเบา ระหว่าง GPPS กับ PLA กล่องบรรจุอาหารแบบน้ำหนักสูง ระหว่าง PET กับ PLA ฟิล์มห่อขนาด 1,000,000 ตารางนิ้ว ระหว่าง GPPS กับ PET ถาดโฟมจำนวน 10,000 ถาด ระหว่าง GPPS กับ PET ขวดน้ำจำนวน 10,000 ขวด ระหว่าง PET กับ PLA และวิเคราะห์ผลสำรวจด้านการใช้พลังงาน (Energy Consumption) ขยะมูลฝอย และภาวะเรือนกระจก แสดงดังตารางที่ 7 โดยใช้เทคโนโลยีในการผลิต PLA คือนำพลังงานจากก๊าซชีวภาพ กลับคืนร่วมกับการใช้พลังงานลมผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตวิธีเดียวกับงานวิจัย ของ Vink *et al.* (2003) ผลการ

วิเคราะห์ด้านพลังงาน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จนถึงการเสื่อมสลาย โดยการฝังกลบหรือเผาทั้ง พบว่า การผลิตแก้วน้ำดื่มขนาด 16 ออนซ์ ใช้พลังงานความร้อนเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประมาณ ร้อยละ 16 ถึง 20 ของพลังงานทั้งหมดในส่วนของการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์จนถึงการเสื่อมสลาย เมื่อเปรียบเทียบพลังงานในการผลิตวัตถุดิบพบว่า การผลิต PLA มีการใช้พลังงานมากกว่า PP และ PS แต่จะน้อยกว่า PET เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักมากขึ้นจึงต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการทำให้แห้ง และด้านผลสำรวจปริมาณขยะหลังจากการใช้ผลิตภัณฑ์ และภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ ผลิตภัณฑ์ที่น้ำหนักมากก่อให้เกิดปริมาณขยะมากเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 7 การใช้พลังงาน ขยะมูลฝอย และภาวะเรือนกระจกของบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้และวัสดุตั้งเดิม

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนัก/FU (kg)	พลังงาน (GJ)	ขยะ (kg)	ภาวะเรือนกระจก (kg CO ₂ eq)
แก้วน้ำดื่ม 16 ออนซ์(10,000 ใบ)				
PLA	148	14.5	118	510
HIPS	123	13.3	98.4	576
PP	158	9.82	84	345
PET	105	16.1	126	719
กล่องบรรจุอาหาร (10,000 กล่อง) แบบน้ำหนักเบา				
PLA	180	17.2	144	589
GPPS	149	15.7	119	684
แบบน้ำหนักมาก				
PLA	200	19.3	160	669
GPPS	256	26.2	205	1,170
ฟิล์มห่อ (10,000,000 ตร.นิ้ว)				
PLA	23.6	2.03	18.8	62.6
GPPS	19.7	1.87	15.8	76.1
ถาดโฟม (10,000 ถาด)				
PLA Foam	54.8	5.59	43.8	192
GPPS Foam	52.2	5.77	41.8	231
ขวดน้ำ 12 ออนซ์ (10,000 ขวด)				
PLA	210	19.8	168	744
PET	203	21.4	162	961

ที่มา: Franklin Associates (2006)

Meedech *et al.* (2006) ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตการผลิต ถุงพลาสติก น้ำหนัก 1,000 กรัม จากวัสดุ 3 ประเภท คือ พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนผสมกับสารช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสง (Polyethylene-Photo Additive) และพอลิเอทิลีนผสมกับแป้ง (Polyethylene-Starch) โดยใช้โปรแกรม SimaPro 5.1 ควบคู่กับวิธี Eco-indicator 95 และ Eco-indicator 99 ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ พบว่า การผลิตถุงโดยใช้พอลิเอทิลีนผสมกับสารช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสงและพอลิเอทิลีนผสมกับแป้ง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการผลิตที่ใช้เฉพาะพอลิเอทิลีน 3.11 และ 5.33 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Garrain *et al.* (2007) ทำการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตแผ่นฟิล์มหลายชั้น (multiplayer film) สำหรับห่อหุ้มเส้นพาสต้า แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ระหว่างแผ่นฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพกับพลาสติก แผ่นฟิล์มหลายชั้นที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วยชั้นฟิล์ม 3 ชั้น แผ่นฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตจากพอลิเมอร์ชีวภาพ ด้านนอก 2 ชั้นผลิตจาก PLA และชั้นด้านในผลิตจาก PCL ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสองชนิดนี้ผลิตจากข้าวโพดและมันฝรั่ง ส่วนแผ่นฟิล์มหลายชั้นที่ผลิตจากพลาสติก ชั้นด้านนอกและด้านในสุดผลิตจาก PP และชั้นกลางผลิตจากพอลิเอไมด์ไนลอน 6 (Polyamide nylon 6: PA₆) โดยมีรายการผลกระทบที่พิจารณา ได้แก่ การทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การก่อให้เกิดความเป็นกรด ภาวะขาดอาหารในน้ำเกินสมดุล และการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล จากการประเมินพบว่า การผลิตแผ่นฟิล์มหลายชั้นจากพลาสติกก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพ และรายการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดคือ การก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน โดยมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพถึงร้อยละ 90 เนื่องจากปริมาณ CO₂ ที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมของการผลิตแผ่นฟิล์มหลายชั้นจากพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถถูกดูดกลับไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืชได้อีก เมื่อพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนการกำจัดแผ่นฟิล์มหลายชั้น ด้วยวิธีการเผา การฝังกลบ และการคอมโพสท์ พบว่า การกำจัดแผ่นฟิล์มหลายชั้นจากพลาสติกด้วยการเผาก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด การฝังกลบก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อย และการคอมโพสท์ไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่วนการกำจัดแผ่นฟิล์มหลายชั้นจากพอลิเมอร์ชีวภาพด้วยการฝังกลบ จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมามากที่สุด รองลงมาคือ การคอมโพสท์และการเผา ตามลำดับ

Madival *et al.* (2009) ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกล่องบรรจุ สตรอเบอร์รี่ที่ทำจาก PLA PET และ PS ด้วยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยมีขอบเขต การศึกษาตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงการจัดการซากในขั้นสุดท้าย และการนำกลับมาใช้ใหม่ (cradle-to-cradle) มีหน่วยการทำงานคือ บรรจุภัณฑ์จำนวน 1000 ชิ้น ใช้บรรจุสตรอเบอร์รี่ น้ำหนัก 1 ปอนด์ พื้นที่ทำการศึกษและเก็บข้อมูลอยู่ในแถบ ยุโรป อเมริกาตอนเหนือ และ

ตะวันออกกลาง โดยทำการประเมินผลกระทบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ด้วยวิธี IMPACT 2002+ พบว่า PET มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เนื่องมาจากน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก PET มีน้ำหนักมากที่สุด ขั้นตอนการขนส่งเรซินและตัวบรรจุของทั้งสามชนิดจะส่งผลกระทบมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่นในวัฏจักรชีวิต โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านของ ภาวะโลกร้อน การลดลงของชั้น และระบบนิเวศในน้ำ

Khoo *et al.* (2010) ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ ถุงพลาสติกจาก PHA ที่ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา เปรียบเทียบกับ PP ที่ผลิตในประเทศสิงคโปร์ ด้วยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยมีขอบเขตการศึกษาตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงการกำจัดในขั้นสุดท้าย หน่วยการทำงานคือ ถุงพลาสติกขนาดมาตรฐานที่มีความสามารถในการบรรจุ 20 กิโลกรัม โดยทำการประเมินผลกระทบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ด้วยวิธี EDIP 2003 จะเห็นได้ว่า ถุง PHA ที่ใช้พลังงานได้พื้นพิภพในกระบวนการผลิต และการกำจัดโดยวิธีการคอมโพสที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

Hakkinen and Vares (2010) ได้ศึกษาการผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนจากการเลือกวัสดุของถ้วยเครื่องดื่มเย็นที่ทำจากกระดาษเคลือบด้วย PE หรือ PLA เปรียบเทียบกับถ้วยที่ทำจาก PET มีหน่วยหน้าที่การทำงานคือ ถ้วยแบบใช้ครั้งเดียวที่มีความจุเท่ากัน และการใช้งาน เช่น ความสามารถในการกันน้ำ ความแข็งแรงและความคงทนต่อการใช้งานที่เหมือนกัน จำนวน 100,000 ใบ โดยคำนวณผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนตาม IPCC 2007 ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงการผลิต ถ้วยกระดาษเคลือบด้วย PE และ PLA มีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเท่ากับ 1,030 และ 1,090 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าตามลำดับ เมื่อเทียบกับถ้วยที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งมีค่า 4,710 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ส่วนการจัดการหลังการใช้งาน งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการกำจัดที่สำคัญคือ การเผาและการฝังกลบ พบว่า กระดาษเคลือบที่ถูกเคลือบด้วย PLA และถ้วยที่ทำจาก PET ที่มีการกำจัดด้วยการเผา จะมีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเท่ากับ 1,050 และ 7,510 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า แต่เมื่อกำจัดโดยการฝังกลบ จะมีค่าเท่ากับ 4,830 และ 4,710 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

Suwanmanee *et al.* (2010) ได้ศึกษาการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของถาดที่ทำจากพอลิสไตรีนที่มีการผลิตในประเทศไทย พอลิแลกติกแอซิดจากข้าวโพดที่มีการผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา และพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เม็ด PLA ที่มีวัตถุดิบทางชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตในประเทศไทย และมีการลดปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป โดยทำการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือในการศึกษา มีหน่วยหน้าที่การทำงานคือ ภาชนะบรรจุอาหารจำนวน 1,000 ชิ้น แต่ละชิ้นมี

ขนาด 20×14×1.5 เซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่า PLA ที่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต มีการใช้พลังงาน และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด นอกจากนี้ได้มีศึกษาวิธีการกำจัด พบว่า การเผาแบบได้พลังงานกลับคืนเหมาะสำหรับการกำจัดที่มาจาก PS การคอมโพสท์และการฝังกลบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน เหมาะสำหรับการกำจัดที่มาจาก PLA และ PLA ที่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต

Herman *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นต์ (Energy footprint) ในการกำจัดวัสดุย่อยสลายได้ ได้แก่ กระจาด เซลลูโลส แป้ง PLA MaterBi พอลิบิวทีลีน อะดิเพต โคเทเรฟทาเลต (Polybutyrate-adipate-terephthalate: PBAT, Ecoflex) PHA เพื่อหาวิธีที่ดีที่สุดในการจัดการ โดยงานวิจัยนี้ทำงานศึกษาการจำกัด 4 วิธี คือ การคอมโพสท์ระดับอุตสาหกรรม การคอมโพสท์ระดับครัวเรือน การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน โดยมีหน่วยหน้าที่การทำงานคือ วัสดุ 1 กิโลกรัม และศึกษาเฉพาะส่วนการกำจัดผลิตภัณฑ์ ไม่คิดถึงการใช้งานและการขนส่ง ซึ่งคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ตาม IPCC 2007 และ เอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นต์ ในรูปของ NREU จากการศึกษาพบว่า การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ น้อยที่สุดสำหรับเทคโนโลยีในปัจจุบัน แต่ถ้ามมีการปรับปรุงค่าพลังงานในการเผา อาจจะทำให้การเผา กลายเป็นวิธีที่ส่งผลน้อยที่สุด สำหรับวิธีการคอมโพสท์ระดับครัวเรือน เมื่อมีการใช้คาร์บอนเครดิตในการพิจารณาคาร์บอนและเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นต์ จะทำให้การคอมโพสท์ระดับครัวเรือน และการเผาแบบได้พลังงานกลับคืนมีค่าใกล้เคียงกัน และยังมีผลที่สอดคล้องกับการคอมโพสท์ระดับอุตสาหกรรมที่มีการใช้ค่าคาร์บอนเครดิตทดแทนการใช้ฟางข้าว เพราะเหตุนี้คาร์บอนเครดิตจึงมีผลต่อค่าคาร์บอนและเอ็นเนอร์จีฟุตพริ้นต์ แต่ในการคำนวณค่าคาร์บอนเครดิตก็อาจทำให้ได้ค่าที่ไม่แน่นอนเช่นกัน อย่างไรก็ตามในการเลือกวิธีการกำจัดขยะชีวภาพจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบคาร์บอนในดิน

Pasqualino *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ที่พบเห็นได้ทั่วไปในท้องตลาดเพื่อใส่น้ำผลไม้ เบียร์ และน้ำเปล่า เนื่องจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์นั้นไม่ได้คำนึงถึงแต่ในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงกระบวนการบรรจุ การขนส่ง รวมไปถึงกระบวนการกำจัดด้วย ในการผลิตและวิธีการกำจัดบรรจุภัณฑ์หลัง งานวิจัยนี้จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทำการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตและวิธีการกำจัดหลังการใช้งานของบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันและมีขนาดต่างกัน น้ำผลไม้จะเปรียบเทียบกับกระป๋องอลูมิเนียม แก้ว และ HDPE ส่วนที่สองทำการประเมินผลของบรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก PET กับแก้ว ซึ่งขนาดของบรรจุภัณฑ์ที่นำมาใช้วิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 200 มิลลิลิตรถึง 8 ลิตร ส่วนที่สองทำการประเมินผลของบรรจุภัณฑ์

ตลอดวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่ผลกระทบที่เกิดจากการผลิตเครื่องดื่ม การขนส่ง การผลิตบรรจุภัณฑ์ รวมไปถึงการกำจัดหลังการใช้งาน โดยปกติมี 3 วิธี คือ การฝังกลบ การเผา และการนำกลับมาใช้ใหม่ จากการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าควรใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดใดเพื่อบรรจุเครื่องดื่ม โดยงานวิจัยนี้มีหน่วยหน้าที่การทำงานคือบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุเครื่องดื่ม 1 ลิตร และพิจารณารายการผลกระทบ 2 ด้าน คือ ศักยภาพที่ทำให้เกิดโลกร้อน (GWP, kg CO₂ eq.) และความต้องการใช้พลังงานสะสม (Cumulative Energy Demand: CED, MJ) จากการศึกษาพบว่า การกำจัดบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า จะมีผลกระทบน้อยกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กกว่า เมื่อพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิต การผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับเบียร์และการผลิตเบียร์เป็นขั้นตอนที่ส่งผลกระทบสูงที่สุด แต่สำหรับน้ำและน้ำผลไม้ ผลกระทบเกิดจากขั้นตอนการผลิตบรรจุภัณฑ์เป็นส่วนใหญ่

Kendall (2012) ทำการศึกษาพลังงานหลักที่ใช้และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Polyhydroxybutyrate: PHB) จากชิ้นส่วนของเซลล์โลสที่ได้จากของเสียอินทรีย์ ซึ่งโดยปกติจะถูกนำไปฝังกลบ งานวิจัยนี้มีหน่วยหน้าที่การทำงานคือ 1 กิโลกรัมของ PHB โมเดลที่ใช้ในการศึกษานั้นขึ้นกับการศึกษากระบวนการหมักที่เกิดขึ้น 2 กระบวนการ (fermentation process) และศึกษาการหมัก การสกัด การทำความสะอาด รวมไปถึงกระบวนการทำให้แห้งอีก 2 กระบวนการด้วย ซึ่งเป็นที่มาที่ทำให้สามารถเข้าใจถึงสารขาเข้าและสารขาออกของระบบการผลิตได้ ผลการศึกษาพบว่า การผลิต PHB 1 กิโลกรัม ใช้พลังงานหลักประมาณ 55-76 เมกะจูล และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 3.4-5.0 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการผลิต PHB จากผลผลิตทางเกษตรกรรม เช่น ข้าวโพด พบว่า พลังงานที่ใช้และก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาเป็น 2 เท่าของการผลิตจากเซลล์โลส เนื่องจากเซลล์โลสจากสารอินทรีย์ที่ใช้แล้วจากหลุมฝังกลบขยะนั้น จะสามารถปลดปล่อยก๊าซ CO₂ จากหลุมฝังกลบ เนื่องจากคาร์บอนในเซลล์โลสถูกเปลี่ยนไปเป็นสารตั้งต้นและเป็นอาหารของแบคทีเรียที่ใช้เพื่อผลิต PHB นอกจากนี้ยังสามารถลดการปล่อยก๊าซมีเทนจากหลุมฝังกลบได้ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับหลุมฝังกลบที่ไม่มีระบบเก็บก๊าซ

Suwanmanee *et al.* (2013) ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตกล่องพอลิสไตรีน (PS) กับกล่องพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และกล่องพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง (PLA/starch) โดยใช้ฐานข้อมูลพลังงานในประเทศไทย คือ การผลิตไฟฟ้าพื้นฐานของไทย (Thai electricity grid mix: TEGM) การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน (Thai coal electricity: TCE) การผลิตไฟฟ้าพลังงานร่วมก๊าซธรรมชาติ (Thai natural gas combine cycle: TNGCC) และการผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมกับกระบวนการผลิตก๊าซจากถ่านหิน

(Thai coal integrated gasification combine cycle: TIGCC) จนถึงขั้นตอนการใช้งาน โดยทำการศึกษาผลกระทบ 3 ด้าน คือ ด้านภาวะโลกร้อน โดยคิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงการแปลงการใช้พื้นที่ (Land use change: LUC) ด้านภาวะความเป็นกรด และด้านการเกิดมลพิษชั้นทุติยภูมิจากปฏิกิริยาออกซิเดชันแสงเคมี โดยการศึกษานี้มีหน่วยหน้าที่การทำงานคือ กล่องบรรจุ ขนาด $8.0 \times 10.0 \times 2.5$ เซนติเมตร จำนวน 10,000 ชิ้น คิดเป็นน้ำหนัก PS, PLA และ PLA/starch คือ 447.60 597.60 และ 549.56 กิโลกรัม ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การผลิตกล่อง PLA และ PLA/starch ที่ใช้พลังงานแบบ TEGM ซึ่งเป็นพลังงานพื้นฐานของประเทศไทย ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตกล่อง PS 23.01 และ 25.75 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามพลังงานที่ใช้ในการผลิตกล่อง จะเห็นว่า เมื่อเปลี่ยนการใช้พลังงานแบบ TEGM เป็นแบบ TCE จะทำให้ผลกระทบเพิ่มขึ้น 3.77% สำหรับกล่อง PLA และ 14.77% สำหรับกล่อง PLA/starch เมื่อเปลี่ยนเป็นแบบ TNGCC จะทำให้ผลกระทบเพิ่มขึ้น 24.15% สำหรับกล่อง PLA และ 7.36% สำหรับกล่อง PLA/starch แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้พลังงานแบบ TIGCC จะให้ผลกระทบลดลง 12.59–33.00 % และจะเห็นได้ว่าการแปลงการใช้พื้นที่ของวัตถุดิบที่ทดแทนได้ (ข้าวโพดและมันสำปะหลัง) เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนของกล่อง PLA และ PLA/starch ดังนั้นสำหรับกล่อง PLA และ PLA/starch ที่ใช้พลังงานแบบ TIGCC และไม่คำนึงถึงการแปลงการใช้พื้นที่ จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากล่อง PS 1.59 และ 1.09 เท่า ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นพลังงานที่สะอาดและเหมาะสมสำหรับการผลิตกล่อง PLA และ PLA/starch

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์
 - 1.1 คอมพิวเตอร์ส่วนตัว (ฮาร์ดแวร์ Intel® Core™ 2 Duo)
 - 1.2 ระบบปฏิบัติการ Microsoft XP
 - 1.3 โปรแกรม Microsoft Office 2007 (Word, Excel, PowerPoint)
 - 1.4 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro เวอร์ชัน 7.2
2. เครื่องมือ
 - 2.1 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Digital balance, 4 digits): Denver Instrument
 - 2.2 เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven chamber): Cole parmer
 - 2.3 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter)
 - 2.5 เตาอบ (Oven) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 - 2.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer) รุ่น Digi-Scense: Cole parmer
 - 2.7 แผ่นโพลีเอทิลีน (Polyethylene frame) ขนาด 0.16 x 0.20 เมตร
 - 2.8 ปากคัสแตนเลส แบบไม่มีเคียว
3. วัตถุดิบและสารเคมี
 - 3.1 น้ำบริสุทธิ์ (Deionized water)
 - 3.2 น้ำกลั่น (Distilled water)
 - 3.3 ขยะอินทรีย์ (Agricultural waste)
4. เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่าง
 - 4.1 เครื่องมือวัดความหนา (Thickness): Digimatic micrometer, Mitutoyo
 - 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบ (Elementary analysis: %C H N): Leco TruSpec® CHNS (micro) Analyzer
 - 4.3 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas analyser)
 - 4.4 ปั๊มสุญญากาศ (Vacumn pump)
 - 4.5 กล้องดิจิทัล (Canon 550D)

วิธีการ

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนของการประเมินวัฏจักรชีวิต ใช้วิธี จากหลักการของ อนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งวิธีการดำเนินการมี 4 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย

1.1 การกำหนดเป้าหมาย

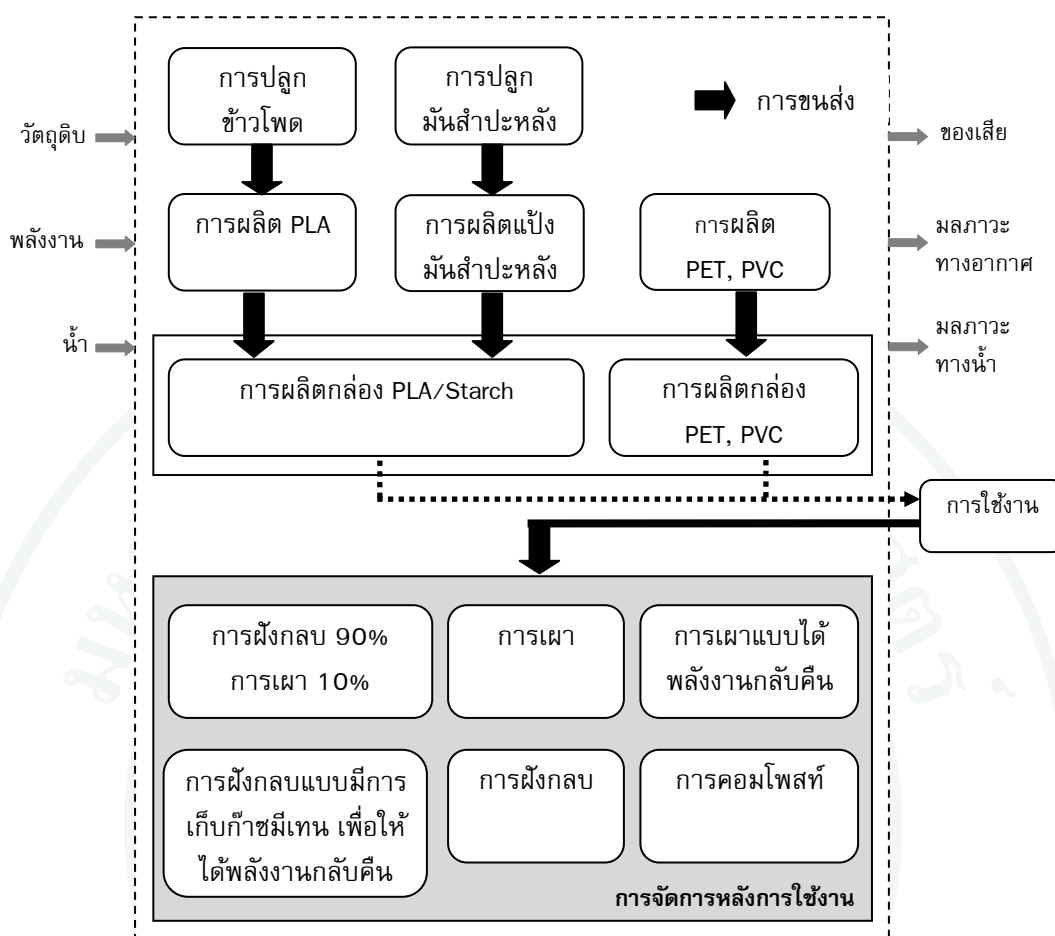
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้วัตถุดิบประเภทต่างๆ ในการผลิต กล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง เปรียบเทียบกับ กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยศึกษาว่าวัตถุดิบประเภทใดเป็น กล่องที่ส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุดตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิต รวมทั้งศึกษาว่า ขั้นตอนใดในการผลิต กล่องส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักร ชีวิตของการผลิตมากที่สุด เพื่อหาแนวทางในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม

1.2 หน่วยการทำงาน

งานวิจัยนี้ศึกษากล่องแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งขนาด 8 x 10 x 2.8 เซนติเมตร จำนวน 10,000 ใบ ซึ่งมีปริมาตรรวม 22,400 ลิตร สามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 100 กรัม เป็นหน่วยเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กับกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

1.3 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย

วัตถุดิบที่ทำการศึกษเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง คือ ข้าวโพด และ แป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ส่วนวัตถุดิบในการผลิต กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต พอลิไวนิลคลอไรด์ คือ น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ โดยการศึกษาจะทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่การเพาะปลูกวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิต การขนส่งวัตถุดิบไปยังโรงงานผลิต กล่อง การผลิตกล่อง การขนส่ง กล่องไปยังแหล่งกำจัด โดยขอบเขตการศึกษาของวัตถุดิบแต่ละประเภทแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ขอบเขตการศึกษาของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

ในการศึกษานี้ในขั้นตอนการกำกจัดใช้แบบจำลองของการจัดการหลังการใช้งาน โดยอ้างอิงพื้นฐานการจัดการขยะของประเทศไทย คือ การฝังกลบ 90 เปอร์เซ็นต์และการเผา 10 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการเผา 100 เปอร์เซ็นต์ การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ การฝังกลบ 100 เปอร์เซ็นต์ การฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ และการคอมโพสท์ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 8

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการศึกษานี้ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro เวอร์ชัน 7.2 มาช่วยในการประเมินผลกระทบ โดยใช้รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามวิธี CML 2 Baseline 2000 เวอร์ชัน 2.03 ใช้ตัวประกอบการเทียบหน่วยในระดับโลก (ปี 1995) และตัวประกอบการให้น้ำหนักความสำคัญ เพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต แสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณา 3 รายการเป็นสำคัญ คือ การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติประเภทที่ไม่สามารถทดแทนได้ (Abiotic depletion) การก่อให้เกิดภาวะ

โลกร้อน (Global warming) และการใช้พื้นที่ (Land use) ส่วนการคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ จะใช้ค่าศักยภาพทางความร้อนของ ก๊าซเรือนกระจกที่ 100 ปี ตามพิธีสารเกียวโต (IPCC, 2007)

ตารางที่ 8 รายการการจัดการกล่อบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งาน

การจัดการหลังการใช้งาน	ร้อยละ					
	1	2	3	4	5	6
- การเผา	10	100	-	-	-	-
- การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	-	-	100	-	-	-
- การฝังกลบ	90	-	-	100	-	-
- การฝังกลบแบบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน	-	-	-	-	100	-
- การคอมโพสท์	-	-	-	-	-	100

ตารางที่ 9 รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม ตัวประกอบการเทียบหน่วย และตัวประกอบการให้น้ำหนักความสำคัญ ที่ใช้ในการศึกษานี้

รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม	ตัวประกอบการเทียบหน่วย (kg/person eq./year)	ตัวประกอบการให้น้ำหนัก ความสำคัญ
Abiotic depletion	6.39E-12	25.86
Global warming	2.41 E-14	20.00
Ozone layer depletion	1. 94E-09	4.04
Human toxicity	1.75E-14	10.51
Fresh water aquatic ecotoxicity	4.9E-13	4.85
Marine aquatic ecotoxicity	1.95E-15	6.46
Terrestrial ecotoxicity	3.72E-12	12.93
Photochemical oxidation	1.04E-11	4.04
Acidification	3.11E-12	6.46
Eutrophication	7.56E-12	4.85
Land use	8.06E-15	10.60

ที่มา: Guinee *et al.* (2001)

2. การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการ จะประกอบด้วย การเก็บข้อมูล การระบุชนิดและปริมาณการใช้วัตถุดิบ น้ำ พลังงาน การปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยนี้ข้อมูลจะมีการใช้ทั้งข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงงาน ทำปฏิบัติการทดสอบ และจากการสอบถามจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ศึกษา และข้อมูลทุติยภูมิซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มีการเก็บรวบรวมไว้แล้วจากหน่วยงานต่างๆ หรือข้อมูลจากงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่อย่างเป็นทางการ เพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในการผลิต ก่อตั้งทั้ง 3 ชนิด โดยแหล่งข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง แสดงดังตารางที่ 10 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 แหล่งข้อมูลบัญชีรายการของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง

ขั้นตอน	วิธีการจัดเก็บข้อมูล	แหล่งข้อมูล
การเพาะปลูกข้าวโพด	ทุติยภูมิ	- Ecoinvent 2.0
การเพาะปลูกมันสำปะหลัง	ทุติยภูมิ	- สุธี (2552)
การผลิตแป้งมันสำปะหลัง	ทุติยภูมิ	- สุธี (2552)
การผลิตเม็ด PLA	ทุติยภูมิ	- Vink <i>et al.</i> (2010)
การผลิตกล่อง	ปฐมภูมิ	- หน่วยวิจัยพอลิเมอร์ (MTEC)
การขนส่ง	ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	- กรมทางหลวง
การจัดการหลังการใช้งาน		
	ปฐมภูมิ	- การทดสอบ ที่จังหวัดสุพรรณบุรี และห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC)
- 90% การฝังกลบ, 10% การเผา	ทุติยภูมิ	- Molgaard (1995), Pichtel (2005) และ Finnveden <i>et al.</i> (1995)
	ปฐมภูมิ	- ห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC)
- การเผา	ทุติยภูมิ	- Molgaard (1995) และ Pichtel (2005)
	ปฐมภูมิ	- ห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC)
- การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	ทุติยภูมิ	- Molgaard (1995) และ Pichtel (2005)
	ปฐมภูมิ	- การทดสอบ ที่จังหวัดสุพรรณบุรี
- การฝังกลบ	ทุติยภูมิ	- Finnveden <i>et al.</i> (1995)
	ปฐมภูมิ	- การทดสอบ ที่จังหวัดสุพรรณบุรี
- การฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน	ทุติยภูมิ	- Finnveden <i>et al.</i> (1995) และ Huitric และ Kong (2006)
- การคอมโพสท์	ปฐมภูมิ	- หน่วยวิจัยพอลิเมอร์ (MTEC) และกรมพัฒนาที่ดิน

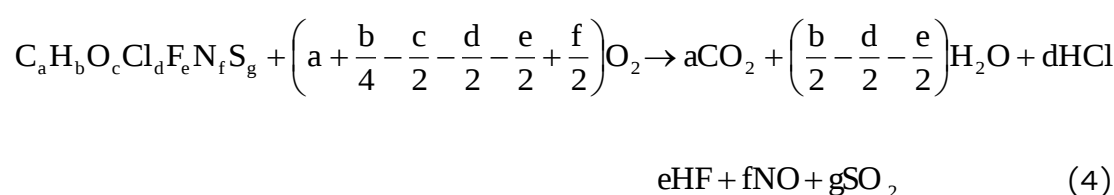
ตารางที่ 11 แหล่งข้อมูลบัญชีรายการของกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเรต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์แหล่งข้อมูลบัญชีรายการของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง

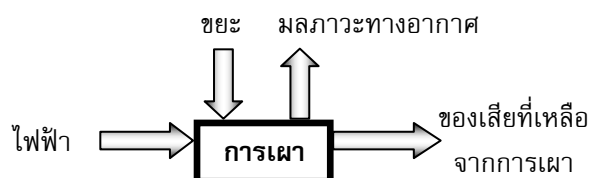
ขั้นตอน	วิธีการจัดเก็บข้อมูล	แหล่งข้อมูล
การผลิต PET	ทุติยภูมิ	- Ecoinvent 2.0
การผลิต PVC	ทุติยภูมิ	- ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ (MTEC, 2009)
การผลิตกล่อง	ปฐมภูมิ	- หน่วยวิจัยพอลิเมอร์ (MTEC)
การขนส่ง	ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	- กรมทางหลวง
การจัดการหลังการใช้งาน		
- 90% การฝังกลบ, 10% การเผา	ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ	- ห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC) - Molgaard (1995), Pichtel (2005) และ BUWAL 250
- การเผา	ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ	- ห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC) - Molgaard (1995) และ Pichtel (2005)
- การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน	ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ	- ห้องปฏิบัติการฟิลิกส์พอลิเมอร์ (MTEC) - Molgaard (1995) และ Pichtel (2005)
- การฝังกลบ	ทุติยภูมิ	- BUWAL 250

สำหรับข้อมูลบัญชีรายการการกำจัดซากทั้ง 6 วิธีมีการเก็บรวบรวมจากการทำการทดลองและข้อมูลทุติยภูมิ

2.1 การกำจัดโดยการเผา

ข้อมูลบัญชีรายการการกำจัดโดยการเผาได้ข้อมูลมาจากการวิจัยของ Molgaard (1995) และจากการทดลอง โดยคิดค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาพลาสติกต่อกิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 0.05 กิโลวัตต์ และของเสียที่เหลือจากการเผาคำนวณจากคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกแต่ละชนิด (% Ash content) ในส่วนของปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยในขั้นตอนการเผาไหม้ คำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (4) (Pichtel, 2005) โดยต้องทดสอบหาปริมาณองค์ประกอบในพลาสติก (element analysis) แสดงดังตารางที่ 13 ดังนั้นปริมาณสารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผา แสดงดังภาพที่ 11





ภาพที่ 11 สารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผา

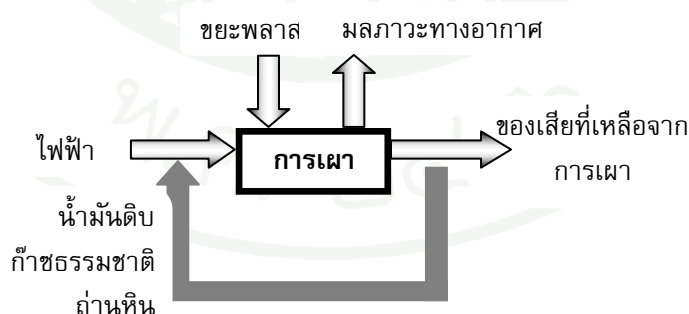
ที่มา: suwanmanee (2010)

2.2 การกำจัดโดยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน

ข้อมูลบัญชีรายการการกำจัดโดยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืนได้ข้อมูลมาจากการวิจัยของ Molgaard (1995) และจากการทดลอง โดยคิดค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาพลาสติก และปริมาณของเสียที่เหลือเช่นเดียวกับวิธีการเผาธรรมดาเผาแบบธรรมดา (Molgaard, 1995) ในส่วนของการคิดค่าพลังงานกลับคืนคำนวณได้จากสมการที่ (5) และสมการที่ (6) โดยการทดสอบหองศ์ประกอบของพลาสติก (Pichtel, 2005) แสดงดังตารางที่ 12 โดยปริมาณพลังงานที่ได้กลับคืนมีค่าเทียบเท่ากับค่าพลังงานจาก น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ดังนั้นปริมาณสารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผา แสดงดังภาพที่ 12

$$\text{HHV} = 0.339(\text{C},\%) + 1.44(\text{H},\%) - 0.139(\text{O},\%) + 0.105(\text{S},\%) \quad (\text{MJ/kg}) \quad (5)$$

$$\text{LHV} = \text{HHV}(\text{MJ/kg}) - 0.0244 [(\text{moisture},\%) + (9 \times (\text{Hydrogen},\%))] \quad (\text{MJ/kg}) \quad (6)$$



ภาพที่ 12 สารเข้าและออกในการกำจัดด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน

ที่มา: suwanmanee (2010)

ตารางที่ 12 ค่า Proximate value และ Element analysis ของขยะพลาสติก

Proximate analysis	Element analysis
1. Moisture (%)	1. Carbon (%)
2. Volatile matter (%)	2. Hydrogen (%)
	3. Oxygen (%)
	4. Nitrogen (%)
	5. Sulfur (%)

2.3 การกำจัดโดยการฝังกลบในสภาวะจริงของประเทศไทย

การทดสอบฝังกลบ ได้ดำเนินงานที่จังหวัดสุพรรณบุรี ในการทำการทำการขุดหลุมทดสอบขนาดเท่ากับ 3 x 3 x 1 เมตร แสดงดังภาพที่ 13(ก) และเตรียมชั้นงานพลาสติกสำหรับทดสอบการฝังกลบให้มีขนาดเท่ากับ 0.14 x 0.18 เมตร นำชั้นงานทดสอบลงในหลุม แสดงดังภาพที่ 13(ข) หลังจากนั้นทำการกลบหน้าดิน แสดงดังภาพที่ 13(ค) และเก็บชั้นงานพลาสติกที่ผ่านการทดสอบทั้งสองเดือนโดยทำการล้างด้วยน้ำกลั่นและอบในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณน้ำหนักที่ลดลงของชั้นงานทดสอบ และยืนยันผลการทดสอบด้วยบันทึกผลการทดสอบด้วยภาพถ่ายทั้งก่อนและหลังการทดสอบฝังกลบ นอกจากนี้ทำการบันทึกอุณหภูมิและความเป็นกรดต่างทั้งสองเดือนไปตลอดจนการทดสอบสิ้นสุด



ก)



ข)



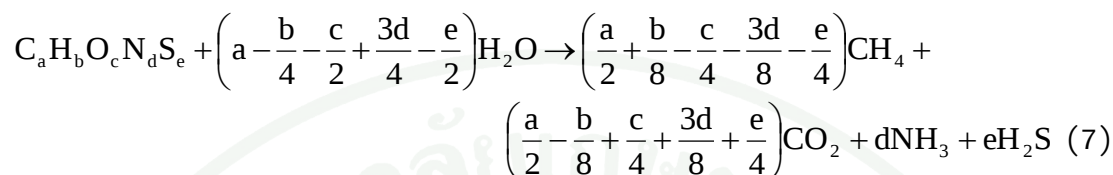
ค)

ภาพที่ 13 การทดสอบการฝังกลบ:

ก) การเตรียมหลุมฝังกลบ ข) การเตรียมและวางชั้นงาน ค) การกลบหลุม

ที่มา: suwanmanee (2010)

ข้อมูลบัญชีรายการการ ผังกลบ คำนวณได้จาก การหาปริมาณน้ำหนักที่หายไป และหาปริมาณองค์ประกอบของพลาสติกเพื่อหาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งแสดงดังสามการที่ (7) (Finnveden *et al.*, 1995)



2.4 การผังกลบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน

ข้อมูลบัญชีรายการการ ผังกลบ คำนวณได้จาก การหาปริมาณน้ำหนักที่หายไป และหาปริมาณองค์ประกอบของพลาสติกเพื่อหาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งแสดงดังสามการที่ (7) และปริมาณพลังงานที่ได้กลับคืนมาจะอยู่ในรูปของไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเก็บก๊าซมีเทน โดยมีประสิทธิภาพการกลับคืนของก๊าซมีเทน 75 เปอร์เซ็นต์ เทียบจากปริมาณการปลดปล่อยก๊าซมีเทน (Huitric and Kong, 2006)

2.5 การกำจัดโดยการคอมโพสท์

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 14855-1 วิธีการทดสอบมาตรฐาน สำหรับประเมินการสลายตัวได้ทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนของชิ้นงานพลาสติกภายใต้สภาวะ การหมักที่มีการควบคุม (การหมักแบบใช้อากาศ)

วิธีการทดสอบ

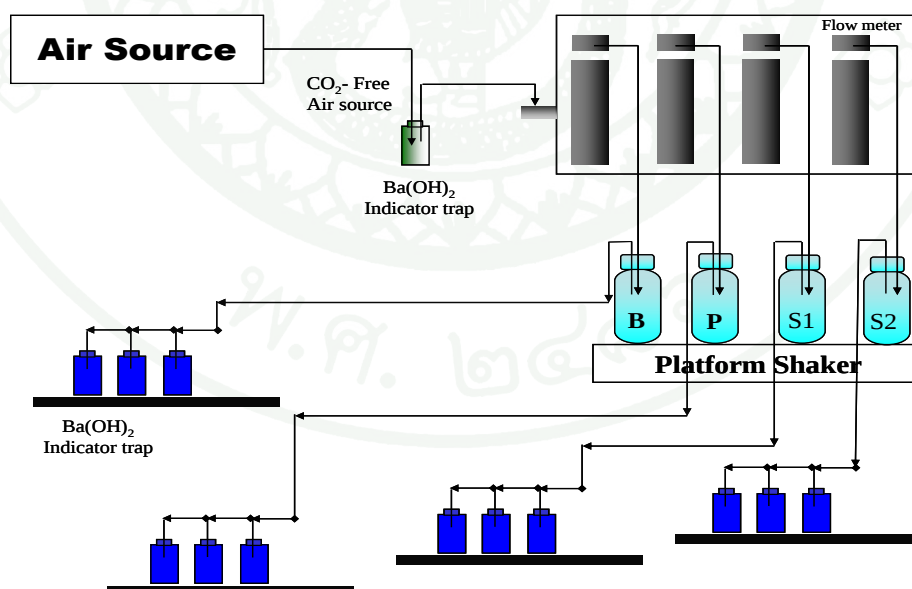
- ก. การเตรียมชิ้นวัสดุตัวอย่าง: แผ่นพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง และพอลิเอทิลีน ตัดให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร
- ข. การเตรียมแหล่งจุลินทรีย์: แหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบให้มีขนาดเล็ก กว่า 10 มิลลิเมตร และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

การทดสอบ

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพทำได้โดยการผสมแหล่งจุลินทรีย์กับตัวอย่างที่ ต้องการทดสอบ คลุกเคล้าให้เข้ากันในขวดทดสอบการย่อยสลายขนาด 2 ลิตร แล้วต่อเข้ากับ

เครื่องมือทดสอบซึ่งแสดงดังภาพที่ 13 โดยการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างตัวอย่าง 2 ชิ้นและทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเซลลูโลส (cellulose) หรือตัวควบคุม ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร ผสมกับแหล่งจุลินทรีย์สำหรับการทดสอบควบคุมเชิงบวก (Positive control) จำนวน 2 ชิ้น และเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนผสมกับจุลินทรีย์สำหรับการทดสอบควบคุมมาตรฐานเชิงลบ (Negative standard) จำนวน 2 ชิ้น และแหล่งจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวเพื่อใช้ในการทดสอบแบบไร้ชิ้นงานตัวอย่าง (blank) จำนวน 2 ชิ้น ระหว่างการทดสอบชุดทดสอบทั้งหมดจะต้องทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันและในระยะเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นที่ใช้ในการทดสอบได้เท่ากันหมด

เครื่องมือทดสอบมีอุปกรณ์ดักจับก๊าซ CO_2 ที่เกิดจากชุดทดสอบแต่ละชุด ระหว่างการทดสอบต้องควบคุมปริมาณแสงโดยทำการทดสอบในที่มืด และควบคุมอุณหภูมิที่ $58.0 (\pm 2.0)$ องศาเซลเซียส และผ่านอากาศที่ปราศจากก๊าซ CO_2 เป็นเวลาอย่างน้อย 45 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายเบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) และทดสอบหาปริมาณก๊าซ CO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับ $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ได้จากการหาความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ที่เหลืออยู่ด้วยการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายทางชีวภาพ



ภาพที่ 14 การทดสอบคอมโพสท์ตามมาตรฐาน ISO 14855-1

ที่มา: suwanmanee (2010)

ผลและวิจารณ์

1. การทำบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

1.1 การเพาะปลูกข้าวโพด

ข้อมูลในการเพาะปลูกข้าวโพดได้จากฐานข้อมูล Ecoinvent แสดงดังภาคผนวกที่ 1 โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนในการเพาะปลูกข้าวโพด มีดังต่อไปนี้

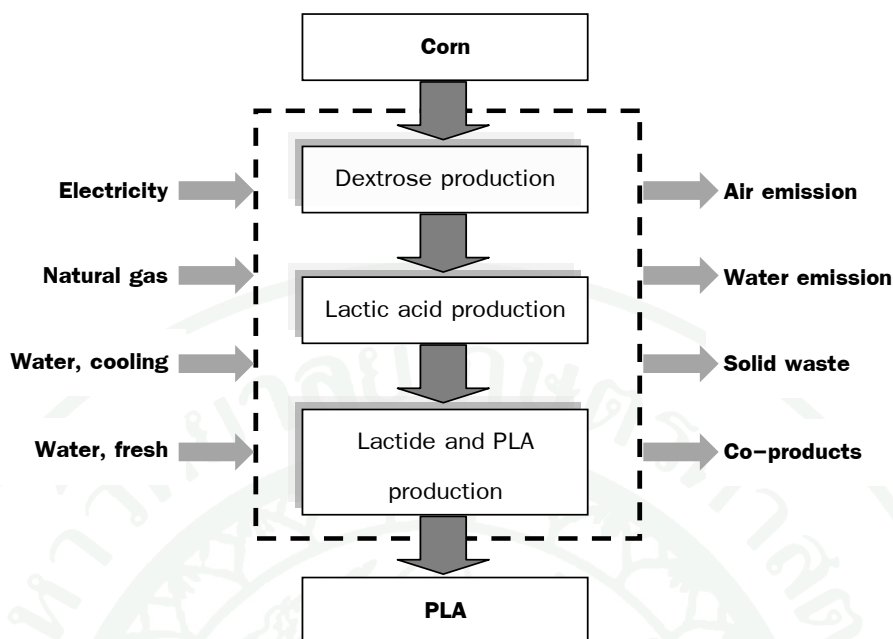
ขั้นตอนการเพาะปลูก จะประกอบไปด้วยกิจกรรมที่สำคัญ ได้แก่

- การกำจัดวัชพืชโดยการไถพรวนและการใช้สารเคมี รวมทั้งการใส่ปุ๋ย
- การใช้น้ำมันดีเซลในกิจกรรมต่าง ๆ ได้แก่ การไถพรวนดิน และการถากหญ้าโดยใช้รถแทรกเตอร์
- การเก็บเกี่ยววัตถุดิบในพื้นที่การเพาะปลูก โดยใช้เครื่องกล

ขั้นตอนต่าง ๆ ในการเพาะปลูกนั้น อาจมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ รถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการไถพรวนเตรียมดินก่อนการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยวผล เครื่องสูบน้ำเพื่อใช้ในการสูบน้ำเข้าไปใช้ในพื้นที่การเพาะปลูก และเครื่องพ่นยาประเภทใช้เครื่องยนต์

1.2 การผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด

กระบวนการผลิตพอลิแลกติกแอซิด แสดงดังภาพที่ 15 โดยนำข้าวโพดมาผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ และกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) จนได้เป็นเม็ดพอลิแลกติกแอซิด โดยข้อมูลบัญชีรายการการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด ได้ข้อมูลมาจากการวิจัยของ Vink et al. (2010) ซึ่งในการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด 1 กิโลกรัม จะใช้พลังงานรวมทั้งหมด 37.99 เมกะจูล



ภาพที่ 15 กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด

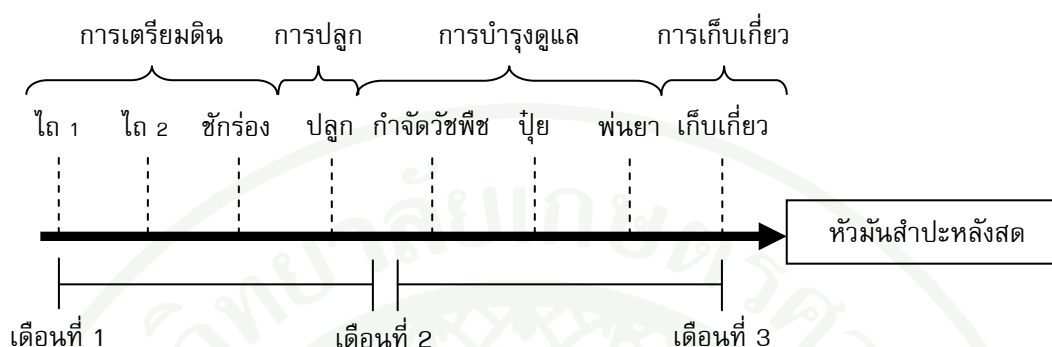
ที่มา: Vink et al. (2010)

1.3 การเพาะปลูกมันสำปะหลัง

ในการเพาะปลูกมันสำปะหลัง มีขั้นตอน ได้แก่ 1) การเตรียมดินก่อนการเพาะปลูก โดยการไถพรวนดิน เพื่อกำจัดวัชพืช และทำแนวร่องเพาะปลูก เพื่อความสะดวกในการเพาะปลูก 2) การเตรียมพันธุ์และการเพาะปลูก เริ่มตั้งแต่การรวบรวมท่อนพันธุ์ และนำท่อนพันธุ์มาสับให้ได้ขนาดพอเหมาะ แล้ววางรายตามแนวร่อง 3) การบำรุง/การดูแลรักษา ประกอบไปด้วยกิจกรรมที่สำคัญ คือ การกำจัดวัชพืช โดยการไถพรวนละใช้สารเคมี และการใส่ปุ๋ยบำรุงพืช ซึ่งเกษตรกรมักใช้ปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมี 4) การเก็บเกี่ยวผลผลิต สามารถทำได้โดยใช้เครื่องกลเก็บเกี่ยว หรือแรงงานคนชุดหัวมันสำปะหลังโดยตรง ซึ่งเกษตรกรมักใช้แรงงานคนในการเก็บเกี่ยวเป็นส่วนใหญ่ ลำดับและขั้นตอนการเพาะปลูกมันสำปะหลัง แสดงดังภาพที่ 16

ข้อมูลของการใช้วัตถุดิบ ทรัพยากร และพลังงาน ตลอดจนมวลสารต่าง ๆ ที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกมันสำปะหลัง ได้ใช้ข้อมูลการเพาะปลูกของสถาบันพัฒนามันสำปะหลัง (ห้วยบง) จังหวัดนครราชสีมา และสถานีวิจัยเขาคันทรง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งได้ จากงานวิจัยของสุธี (2552) เรื่อง “การ

ประเมินวัฏจักรชีวิตของหัวมันและแป้งมันสำปะหลัง ” ข้อมูลบัญชีรายการของการ เพาะปลูกมันสำปะหลัง 1,000 กิโลกรัม แสดงดังตารางผนวกที่ 2



ภาพที่ 16 ลำดับและขั้นตอนการเพาะปลูกมันสำปะหลัง

ที่มา: วรยุทธ (2551)

1.4 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานโดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือแบบสไลด์แห้ง ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตสำคัญ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ก. การเตรียมวัตถุดิบ หัวมันสำปะหลังจะถูกล้างให้สะอาดโดยผ่านเครื่องล้างหัวมัน เพื่อล้างเอาเศษดินที่ยังติดอยู่กับหัวมันออกไปกับน้ำ

ข. การม่หัวมันสำปะหลัง โดยลำเลียงหัวมันเข้าสู่เครื่องสับหัวมันให้มีขนาดเล็กลงก่อนแล้วนำไปม่ ในระหว่างการม่มีการเติมน้ำ เพื่อให้สามารถม่หัวมันได้ง่าย ในขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวชั้นที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และสิ่งเจือปนต่างๆ

ค. การสกัดแป้ง ของเหลวชั้นจากเครื่องม่จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องแยกน้ำทั้งที่มีโปรตีนและไขมันออกจากเนื้อแป้ง แล้วน้ำแป้งที่ได้จะเข้าสู่หน่วยสกัดแป้ง โดยจะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องสกัดแป้งซึ่งเป็นเครื่องแยกน้ำแป้งออกจากเส้นใยและกาก โดยเครื่องนี้จะแบ่งหน้าที่ตามการกรองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดสกัดหยาบ และชุดสกัดละเอียด ซึ่งน้ำแป้งจะผ่านชุดสกัดหยาบก่อนเพื่อแยกกากหยาบออก แล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียดเพื่อให้บริสุทธิ์ขึ้น โดยผ่านผ้ากรองที่มีขนาดเล็กลงของเครื่องสกัดละเอียด จากนั้นน้ำแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะถูกสูบจากถังพัก ก

มายังเครื่องสไลด์แห้ง ซึ่งจะเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งทำให้ได้แป้งหมากที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 35-40

ง. การอบแห้ง แป้งหมากจะถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียสจากเตาเผาขึ้นไปบนปล่องอบแห้ง แล้วตกลงมาเข้าสู่ไซโคลบความชื้นทำให้ความชื้นหายไปบางส่วน

ข้อมูลบัญชีรายการการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ใช้ฐานข้อมูลผลิตแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทย จากงานวิจัยของ สุธี (2552) เรื่อง “การประเมินวัฏจักรชีวิตของหัวมันและแป้งมันสำปะหลัง” ข้อมูลบัญชีรายการของการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 1,000 กิโลกรัม แสดงดังตารางผนวกที่ 3

1.5 การผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง

ในขั้นตอนการผลิตกล่อง มีเพียงการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค เทอโมฟอร์ม (Thermoforming technique) ข้อมูลบัญชีรายการการขึ้นรูปกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ข้อมูลบัญชีรายการการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง 10,000 ชิ้น

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
พลาสติก	609.57	430.66	900.34	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	48.65	43.59	38.92	กิโลวัตต์
สารขาออก				
กล่อง	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
เศษพลาสติก	59.92	51.46	96.34	กิโลกรัม

1.6 การขนส่ง

การขนส่งข้าวโพดจากแหล่งเพาะปลูกไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดที่จังหวัดระยองมาทางรถบรรทุก 6 ล้อ และส่งต่อไปยังโรงงานผลิต กล่อง ที่ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ที่กรุงเทพฯ และนครปฐม โดยใช้รถบรรทุกขนาด 6 ล้อ

การขนส่งมันสำปะหลังจากแหล่งเพาะปลูกไปยังโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังภายในจังหวัดเดียวกันหรือจังหวัดใกล้เคียง โดยใช้รถบรรทุกขนาด 6 ล้อ และส่งต่อไปยังโรงงานผลิตถั่วเหลือง ที่ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ที่กรุงเทพฯ และนครปฐม โดยใช้รถบรรทุกขนาด 6 ล้อ

ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบของถั่วเหลืองสกัดกึ่งแปรรูป แสดงดังตารางผนวกที่ 4, 5 และ 6

1.7 การปันส่วน (allocation)

ข้อมูลที่ได้จากการผลิตสินค้าอาจพบว่า บางโรงงานอาจมีผลิตภัณฑ์ร่วมหรือผลพลอยได้จากระบวนการผลิต ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณผลมีความชัดเจน จึงต้องมีการปันส่วนข้อมูล ซึ่งการปันส่วนเป็นวิธีการแบ่งหรือให้น้ำหนักกับสาขาเข้าและสาขาออกของระบบผลิตภัณฑ์ที่สนใจศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทที่ชัดเจน โดยทำเพื่อเป็นการกระจายภาระทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมหนึ่งๆ ไปยังแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยหลักการสำคัญ คือ

ก. การปันส่วนโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น น้ำหนักผลิตภัณฑ์หากไม่มีข้อมูลเฉพาะของการผลิต จำเป็นต้องทำการปันส่วนโดยใช้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ร่วมในการกำหนดสัดส่วนที่จะใช้ในการคำนวณ

ข. การปันส่วนโดยใช้อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ ในบางครั้งการปันส่วนด้วยปริมาณไม่สามารถใช้เป็นพื้นฐานได้ การปันส่วนตามราคาของผลิตภัณฑ์จึงเป็นอีกวิธีการปันส่วนที่ได้รับความนิยม เนื่องจากราคาผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวแปรที่กำหนดความต้องการในการผลิตของโรงงาน จึงควรให้สัดส่วนน้ำหนักสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูงในการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ราคาต่ำกว่า (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2554)

ในงานวิจัยนี้ใช้การปันส่วนโดยใช้อัตราราคา สำหรับการเพาะปลูกมันสำปะหลังและการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังตารางที่ 14 โดยในช่วงการเพาะปลูกมันสำปะหลังจะได้ผลิตภัณฑ์คือ มันสำปะหลัง ท่อนพันธุ์ และเศษพืช ส่วนช่วงการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะได้ผลิตภัณฑ์คือ แป้งมันสำปะหลัง เปลือกและเหง้า กากมันสำปะหลัง และทราย โดยใช้ราคาข้อมูลปี 2554 เป็นปีฐาน ราคาท่อนพันธุ์อ้างอิงจากสถาบันวิจัยพืชไร่ ราคาแป้งมันสำปะหลังอ้างอิงจากสมาคมแป้งมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย ราคากาก เปลือก และเหง้ามันสำปะหลังอ้างอิงจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ราคาทรายอ้างอิงจากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า

ตารางที่ 14 ค่าการปันส่วนโดยราคาของการเพาะปลูกมันสำปะหลัง และการผลิตแป้งมัน
สำปะหลังสำหรับกระบวนการผลิตกล่อง

ขั้นตอนการผลิต	ปริมาณ (กิโลกรัม)	ราคาเฉลี่ย (บาท/หน่วย)	ค่าการปันส่วน (ร้อยละ)
<u>การเพาะปลูกมันสำปะหลัง</u>			
มันสำปะหลัง	1,000	2.68	65.70
ท่อนพันธุ์	436	1.60	34.20
เศษพืช	555.05	0.0075	0.10
<u>การผลิตแป้งมันสำปะหลัง</u>			
แป้งมันสำปะหลัง	1,000	14.35	79.27
เปลือกมันสำปะหลัง	135.99	0.30	0.22
เหง้ามันสำปะหลัง	68.22	0.50	0.19
กากมันสำปะหลัง	1,457.28	2.52	20.29
ทราย	20	0.25	0.03

2. การทำบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของ กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

2.1 การผลิตเม็ดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

ข้อมูลบัญชีรายการขั้นตอน การผลิตเม็ดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ใช้ข้อมูลบัญชีรายการจากฐานข้อมูล Ecoinvent ส่วนการผลิตเม็ดพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้จากการจัดทำฐานข้อมูลบัญชีรายการของประเทศไทย (MTEC, 2009)

2.2 การผลิตกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์

ในขั้นตอนการผลิตกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ มีเพียงการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคเทอร์โมฟอร์ม ข้อมูลบัญชีรายการการขึ้นรูปกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ข้อมูลบัญชีรายการการผลิต กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิล คลอไรด์ 10,000 ชิ้น

หัวข้อ	PET	PVC	หน่วย
สารขาเข้า			
พลาสติก	673.53	462.51	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	23.20	58.38	กิโลวัตต์
สารขาออก			
กล่อง	582.77	397.20	กิโลกรัม
เศษพลาสติก	90.76	65.31	กิโลกรัม

1.3 การขนส่ง

การขนส่งเม็ดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และเม็ดพอลิไวนิลคลอไรด์จากจังหวัดระยองมาทางรถบรรทุก 6 ล้อ ไปยังโรงงานผลิต กล่อง ที่ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ที่กรุงเทพฯ และ นครปฐม คิดเป็นระยะทาง 207 กิโลเมตร

3. การจัดการหลังการใช้งาน

คุณสมบัติทางกายภาพของขยะพลาสติกทั้ง 5 ชนิด แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 คุณสมบัติทางกายภาพของขยะพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการจัดการขยะ

พลาสติก	Moisture (%)	Ash (%)
PLA/starch (70/30 wt%)	12.6694	0.0589
PLA/starch (50/50 wt%)	18.6431	0.1071
PLA/starch (30/70 wt%)	19.7069	0.1967
PET	0.6833	0.0764
PVC	0.1162	0.0849

3.1 การขนส่งกล่องที่ใช้แล้วไปยังแหล่งกำจัด

การขนส่งกล่องที่ใช้แล้วไปยังแหล่งกำจัด คัดจากกรุงเทพฯ เป็นแหล่งศูนย์กลาง โดยการเผาขนส่งไปยังโรงเผาที่จังหวัดสมุทรปราการ ส่วนการฝังกลบคิดระยะทางการขนส่ง

เฉลี่ยระหว่างจังหวัดฉะเชิงเทราและจังหวัดนครปฐม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 การขนส่งกล่องที่ใช้แล้วไปยังแหล่งกำจัด

จุดเริ่มต้น-ปลายทาง	พาหนะ	ระยะทาง 1 เที่ยว (กิโลเมตร)
กรุงเทพฯ- โรงเผาขยะ	รถบรรทุก ขนาด 28 ตัน	35.25
กรุงเทพฯ- แหล่งฝังกลบ	รถบรรทุก ขนาด 28 ตัน	81.64
กรุงเทพฯ- โรงคอมโพสท์	รถบรรทุก ขนาด 28 ตัน	81.64

3.2 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการหลังการใช้งาน ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์

3.2.1 การจัดการด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10 (option 1) ซึ่งเป็นสถานการณ์การจัดการขยะในประเทศไทย โดยข้อมูลบัญชีรายการการจัดการด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10 ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 18 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 18 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
อากาศ	0.39	0.360	0.30	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	2.75	1.90	4.02	กิโลวัตต์
สารขาออก				
คาร์บอนไดออกไซด์	641.87	470.54	1,012.53	กิโลกรัม
มีเทน	153.89	106.00	211.58	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการฝังกลบ	11.23	0.02	0.00	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	3.24	4.06	15.82	กิโลกรัม

ตารางที่ 19 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10

หัวข้อ	PET	PVC	หน่วย
สารขาเข้า			
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	582.77	397.20	กิโลกรัม
อากาศ	0.65	0.24	
ไฟฟ้า	2.91	1.99	กิโลวัตต์
สารขาออก			
คาร์บอนไดออกไซด์	116.44	54.84	กิโลกรัม
มีเทน	-	-	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการฝังกลบ	524.49	357.48	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	4.95	3.04	กิโลกรัม

3.2.2 การจัดการด้วยการเผา (option 2) ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการด้วยการเผาร้อยละ 100 ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 20 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 20 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการเผา

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
อากาศ	3.94	3.60	3.05	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	27.48	18.96	40.20	กิโลวัตต์
สารขาออก				
คาร์บอนไดออกไซด์	898.28	566.89	1,022.18	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	32.37	40.61	158.15	กิโลกรัม

ตารางที่ 21 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการเผา

หัวข้อ	PET	PVC	หน่วย
สารขาเข้า			
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	582.77	397.20	กิโลกรัม
อากาศ	6.52	2.35	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	29.14	19.86	กิโลวัตต์
สารขาออก			
คาร์บอนไดออกไซด์	1,164.45	548.36	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	49.48	30.35	กิโลกรัม

3.2.3 การจัดการด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน (option 3) ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน ร้อยละ 100 ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 22 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 22 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
อากาศ	3.94	3.60	3.05	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	27.48	18.96	40.20	กิโลวัตต์
สารขาออก				
น้ำมันดิบ	23.00	15.43	30.88	กิโลกรัม
ก๊าซธรรมชาติ	192.58	129.20	258.60	กิโลกรัม
ถ่านหิน	71.86	48.21	96.50	กิโลกรัม
คาร์บอนไดออกไซด์	898.28	566.89	1,022.18	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	32.37	40.61	158.15	กิโลกรัม

ตารางที่ 23 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และ กล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน

หัวข้อ	PET	PVC	หน่วย
สารขาเข้า			
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	582.77	397.20	กิโลกรัม
อากาศ	6.52	2.35	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	29.14	19.86	กิโลวัตต์
สารขาออก			
น้ำมันดิบ	29.78	12.65	กิโลกรัม
ก๊าซธรรมชาติ	249.34	105.88	กิโลกรัม
ถ่านหิน	93.04	39.51	กิโลกรัม
คาร์บอนไดออกไซด์	1,164.45	548.36	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการเผา	49.48	30.35	กิโลกรัม

3.2.4 การจัดการด้วยการฝังกลบตามธรรมชาติในประเทศไทย (option 4)
ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการด้วยการฝังกลบตามธรรมชาติในประเทศไทย ร้อยละ 100 ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 24 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ใช้ข้อมูลบัญชีรายการจากฐานข้อมูล Landfill BUWAL250

ตารางที่ 24 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบตามธรรมชาติในประเทศไทย

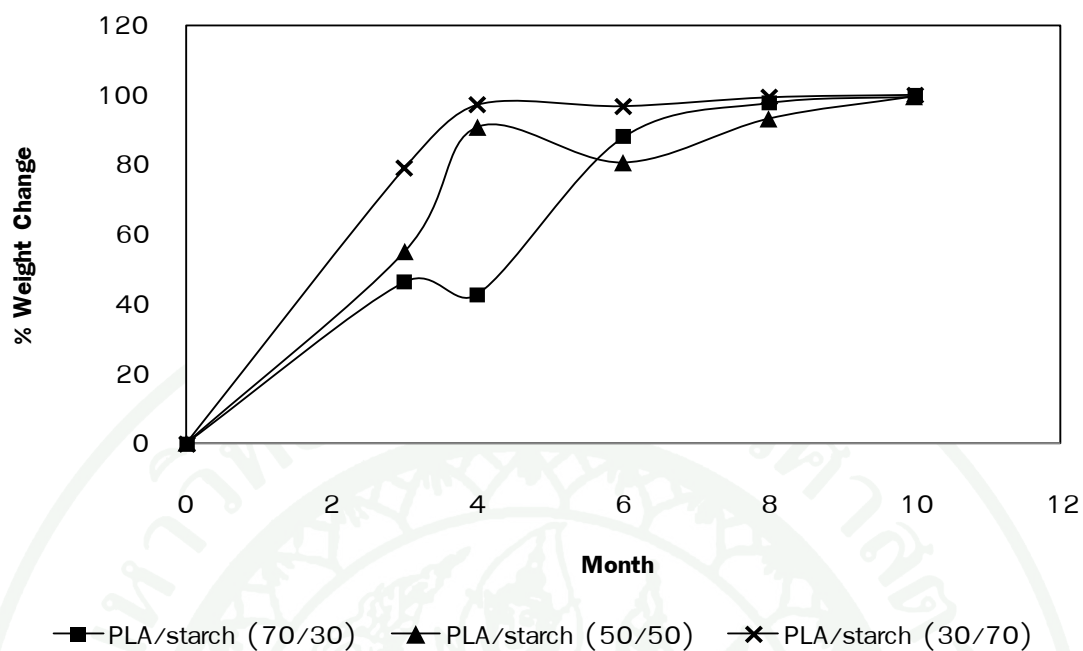
หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
สารขาออก				
คาร์บอนไดออกไซด์	613.38	459.84	1,011.46	กิโลกรัม
มีเทน	107.99	117.78	235.09	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการฝังกลบ	12.47	0.20	0.00	กิโลกรัม

สำหรับการทดสอบฟังกลบ ได้วัดค่าสภาวะขณะดำเนินการฟังกลบ ตลอดระยะเวลา 10 เดือน คือ ค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 25 โดยค่าความเป็นกรดต่าง มีค่าระหว่าง 8.03 ถึง 8.36 หรือมีค่าเฉลี่ย 8.18 ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างนี้ยังอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ (ความเป็นกรดต่าง 5-8) (Lenz, 1993) และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 32.5 ถึง 62 องศาเซลเซียส

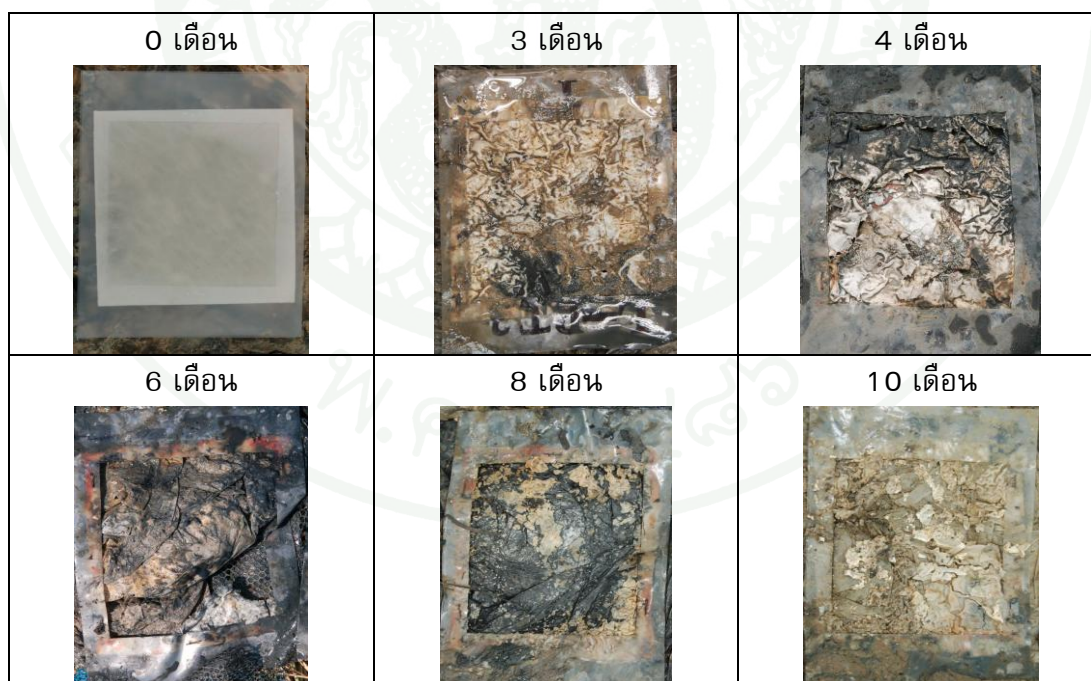
ตารางที่ 25 อุณหภูมิและความเป็นกรดต่าง

เดือน	อุณหภูมิ	ความเป็นกรดต่าง
เดือนที่ 2 (มิ.ย.-ส.ค.)	32.5-34.5	8.05
เดือนที่ 4 (ส.ค.-ก.ย.)	32.5-34.5	8.21
เดือนที่ 6 (ต.ค.-พ.ย.)	32.5-34.5	8.36
เดือนที่ 8 (พ.ย.-ม.ค.)	59.0-62.0	8.25
เดือนที่ 10 (ม.ค.-พ.ค.)	32.5-62.0	8.03

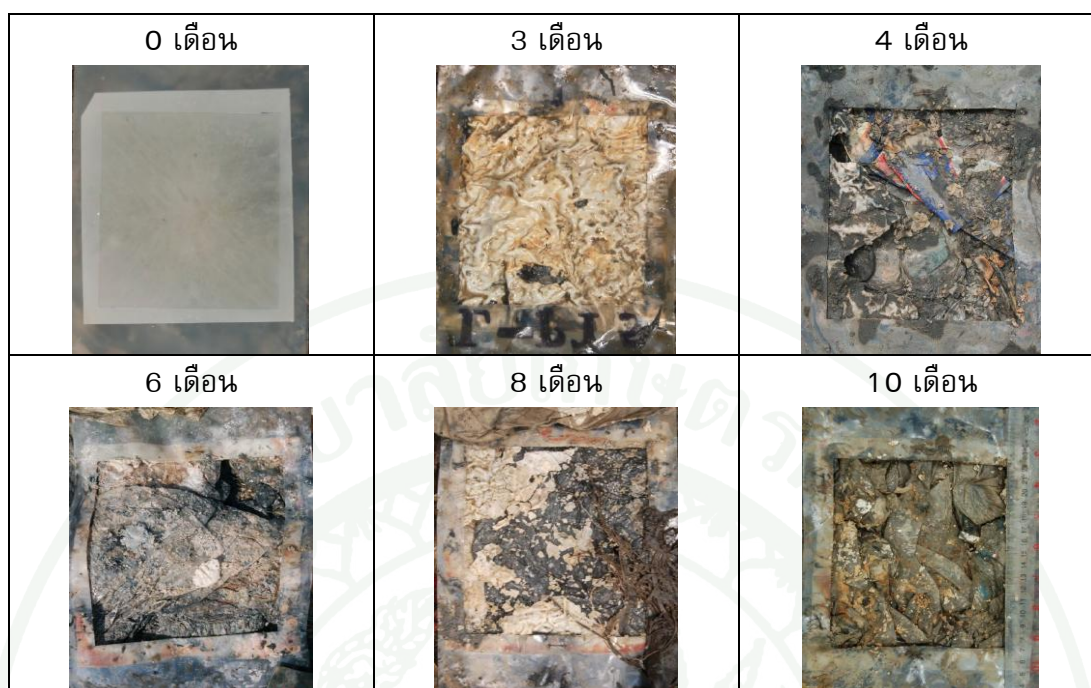
การจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฟังกลบ 10 เดือน แสดงดังภาพที่ 17 พบว่า พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 และ 50/50 เกิดการย่อยสลาย 99.81 และ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนที่อัตราส่วน 30/70 ย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ คือ ย่อยสลายได้หมด 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฟังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 แสดงดังภาพที่ 18 19 และ 20 ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกล่องทั้ง 3 ชนิด ตลอดระยะเวลาฟังกลบ 10 เดือน แสดงดังตารางผนวกที่ 7



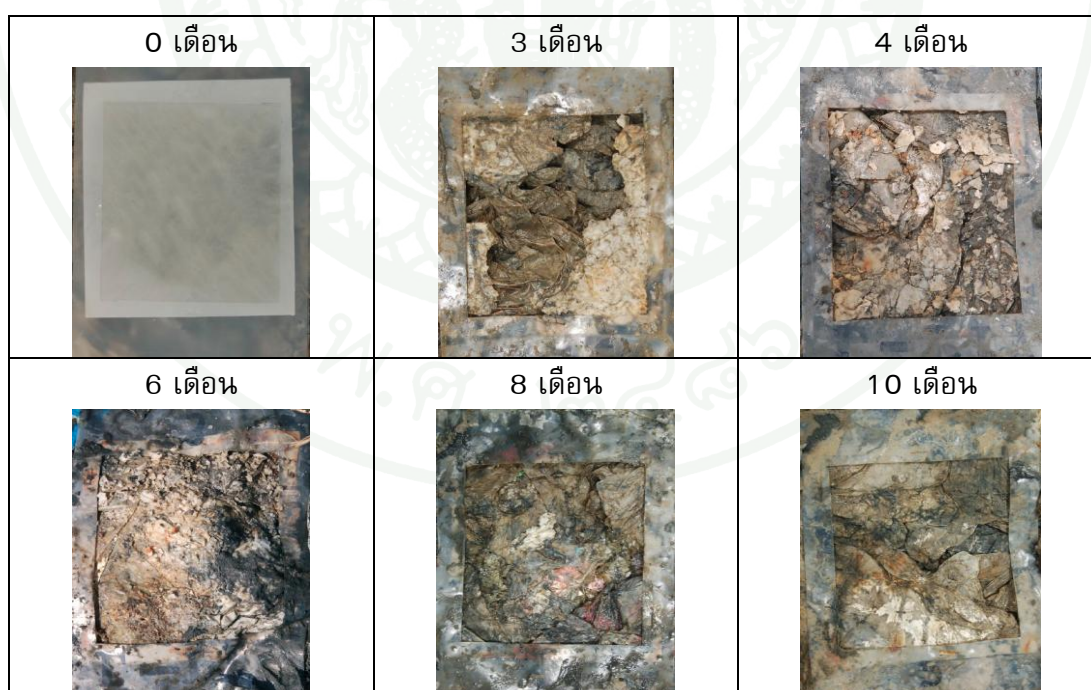
ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ลดลงของพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ตลอดระยะเวลา 10 เดือน



ภาพที่ 18 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30



ภาพที่ 19 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติก
แอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 50/50



ภาพที่ 20 ผลการทดสอบการย่อยสลายภายใต้สภาวะการฝังกลบ 10 เดือน ของ พอลิแลกติก
แอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 30/70

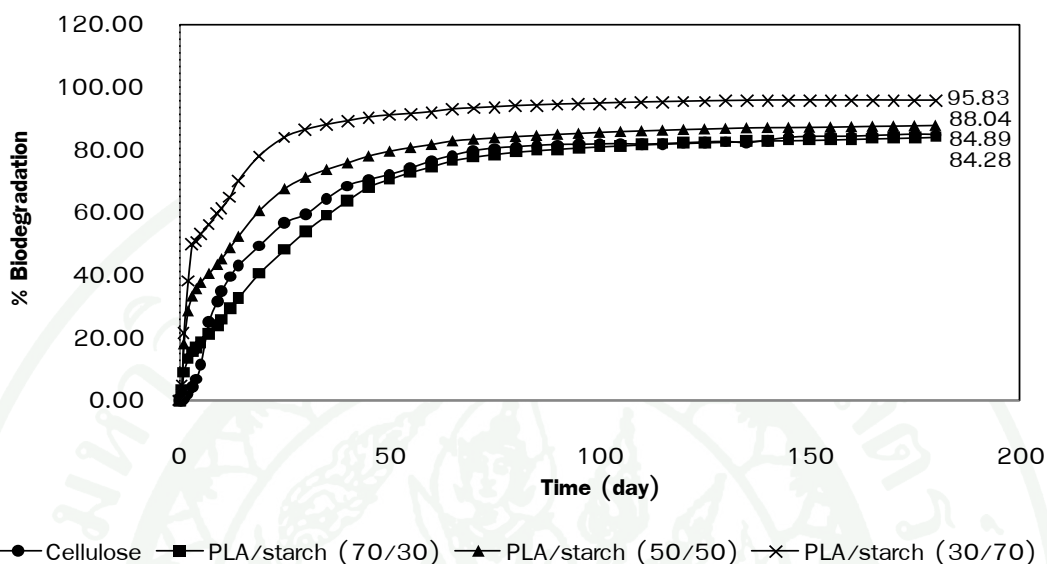
3.2.5 การจัดการด้วยการฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน (option 5) ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการด้วยการฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน ร้อยละ 100 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบการย่อยสลาย และคิดค่าพลังงานที่ได้กลับคืนมาในรูปของไฟฟ้า สำหรับกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 26 ส่วนกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ใช้ค่าตามการฝังกลบตามธรรมชาติ เนื่องจากไม่มีการเกิดก๊าซมีเทนในกระบวนการ

ตารางที่ 26 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
สารขาออก				
ไฟฟ้า	1980.60	1364.34	2723.14	กิโลวัตต์
คาร์บอนไดออกไซด์	613.38	459.84	1,011.46	กิโลกรัม
มีเทน	42.73	29.45	58.77	กิโลกรัม
ของเสียที่เหลือจากการฝังกลบ	12.48	0.20	0.00	กิโลกรัม

3.2.6 การจัดการด้วยการคอมโพสท์ (option 6) ผลการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 14855-1 โดยการนำขยะอินทรีย์มาหมักกับชิ้นงานทดสอบ แสดงดังภาพที่ 21 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 45 วัน เซลลูโลสเกิดการย่อยสลาย 70.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การประเมินผลการทดสอบตามมาตรฐานที่ว่า ภายใน 45 วัน เปอร์เซ็นต์การสลายตัวทางชีวภาพของเซลลูโลส ต้องมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 เดือน กล่อง PLA/starch (70/30) และ (50/50) เกิดการย่อยสลาย 84.28 และ 88.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนกล่อง PLA/starch (30/70) เกิดการสลายตัวได้ถึง 95.83 เปอร์เซ็นต์ จากข้อกำหนดตามอนุกรมมาตรฐานกำหนดให้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ใกล้เคียง 90 เปอร์เซ็นต์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นปุ๋ย ซึ่งจะมีส่วนประกอบของแร่ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และองค์ประกอบคาร์บอนในดิน โดยคำนวณได้จากองค์ประกอบคาร์บอนในชิ้นงานพลาสติกและเศษขยะอินทรีย์ที่แปรสภาพกลับมาเป็นปุ๋ย แทนที่จะย่อยสลายโดยการฝังกลบตามธรรมชาติ แล้วเกิดการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ และ CH₄ (Razza *et al.*, 2009 และ Bohlmann, 2004) อย่างไรก็ตามนอกจากการคอมโพสท์จะได้ปุ๋ยแล้ว แต่ก็ยังมีปริมาณ

โลหะหนักที่ปนเปื้อนมาด้วย ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม ดังนั้นผลข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งด้วยการคอมโพสท์ แสดงดังตารางที่ 27



ภาพที่ 21 ร้อยละของการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง โดยวิธีการคอมโพสท์ที่ระยะเวลา 180 วัน

ตารางที่ 27 ข้อมูลบัญชีรายการการจัดการกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ด้วยการคอมโพสท์

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
สารขาเข้า				
กล่องพลาสติก (ของเสีย)	549.65	379.20	804.00	กิโลกรัม
ขยะอินทรีย์	3,428.05	2,394.25	5,161.94	กิโลกรัม
อากาศ	1,223.42	899.32	1,787.12	กิโลกรัม
สารขาออก				
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	353.26	247.91	516.03	กิโลกรัม
คอมโพสท์	3,514.45	2,439.60	5,195.47	กิโลกรัม
- เศษพลาสติก	86.40	45.35	33.53	กิโลกรัม
- ปุ๋ยไนโตรเจน	51.31	34.95	69.80	กิโลกรัม
- ปุ๋ยฟอสฟอรัส	27.84	21.08	41.16	กิโลกรัม
- ปุ๋ยโพแทสเซียม	45.74	33.56	68.61	กิโลกรัม

ตารางที่ 27 (ต่อ)

หัวข้อ	PLA/Starch (70/30)	PLA/Starch (50/50)	PLA/Starch (30/70)	หน่วย
- คาร์บอน	493.89	339.87	715.71	กิโลกรัม
- อาซิติก	1.18E-02	9.94E-03	1.92E-02	กิโลกรัม
- แคลเซียม	1.59E-03	1.11E-03	2.39E-03	กิโลกรัม
- โครเมียม	1.04E-01	8.93E-02	1.60E-01	กิโลกรัม
- ทองแดง	8.39E-02	6.74E-02	1.44E-01	กิโลกรัม
- ตะกั่ว	2.15E-02	1.66E-02	3.28E-02	กิโลกรัม
- สังกะสี	2.58E-01	1.96E-01	4.16E-01	กิโลกรัม

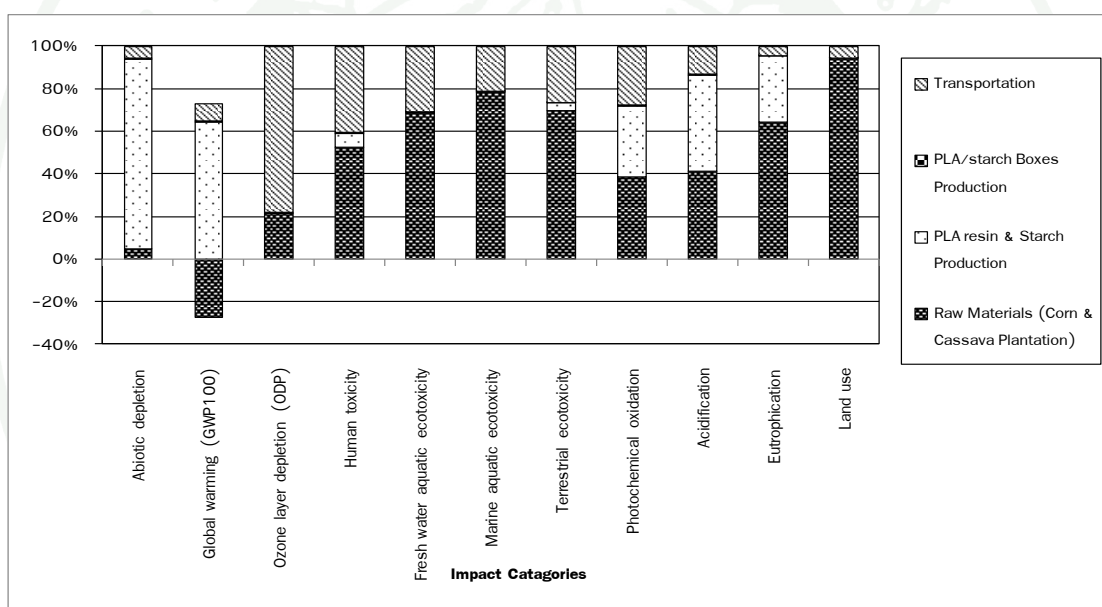
4. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment) ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

การวิเคราะห์ปัญหาการด้านสิ่งแวดล้อมในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการรวบรวมข้อมูลจากกระบวนการต่างๆ ตามเป้าหมายและขอบเขตที่กำหนดไว้ แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าระบบผลิตภัณฑ์มีการใช้วัตถุดิบทรัพยากร และปล่อยมลสารและของเสียสู่สิ่งแวดล้อมมากเท่าใด ในขั้นถัดไป คือ การจำแนกข้อมูลเหล่านั้นตามรายการผลกระทบ แล้วจึงแปลงค่าข้อมูลดังกล่าวให้อยู่ในรูปของผลกระทบสิ่งแวดล้อมหรือการกำหนดบทบาท โดยเทียบกับศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมของสารอ้างอิง หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนการหาขนาดผลกระทบ โดยเทียบกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมในระดับต่างๆ เช่น ระดับประเทศ ระดับทวีป หรือระดับโลก และขั้นตอนการให้น้ำหนัก สุดท้ายจะได้คะแนนผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงเดี่ยว (Single score) ซึ่งคะแนนเชิงเดี่ยวสามารถเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างผลิตภัณฑ์ได้ เรียกขั้นตอนการดำเนินการทั้งหมดนี้ว่า การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้วิธี CML 2 Baseline 2000 เวอร์ชัน 2.03 ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยแยกพิจารณาเป็น 2 ช่วง คือ 1) ตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงการผลิตกล่อง (cradle-to-gate) 2) การจัดการหลังสิ้นสุดการใช้งาน (cradle-to-grave) การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 จำนวน 10,000 ชิ้น (2,240 ลิตร) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30

ปริมาณผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการกำหนดบทบาท โดยจำแนกตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 แสดงดังภาพที่ 22 พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ในแต่ละรายการเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด และการใช้ปุ๋ยในขั้นตอนการเพาะปลูก แต่ในขั้นตอนการเพาะปลูกก็เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน เนื่องจากพืชมีการดูดซับก๊าซ CO₂ มาใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แสง ซึ่งเกิดจากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือข้าวโพดและมันสำปะหลัง

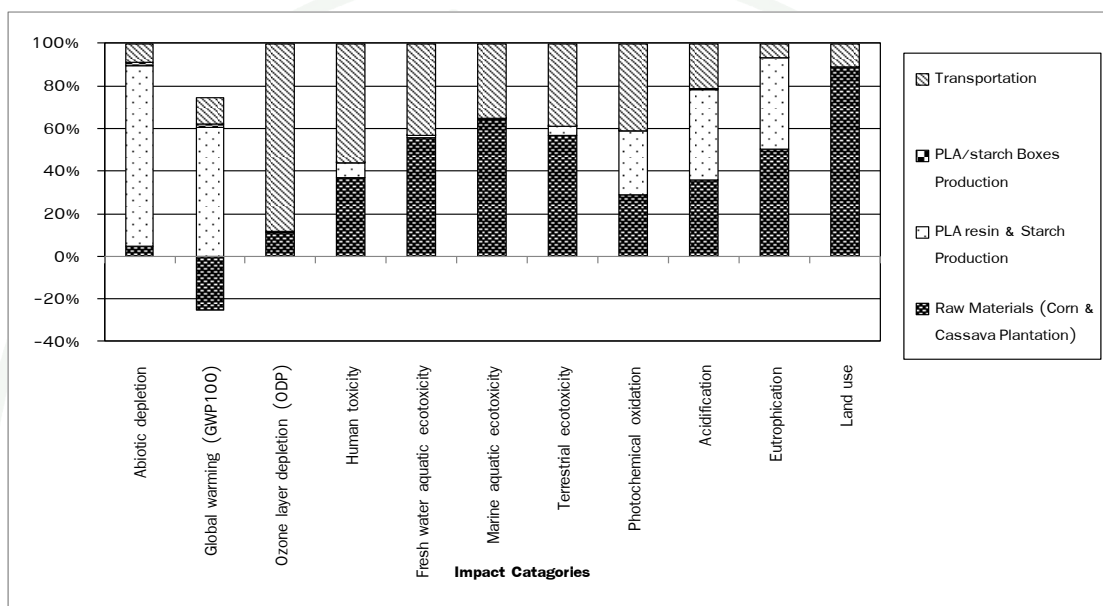


ภาพที่ 22 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30

4.2 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50

ปริมาณผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาท โดยจำแนกตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50 แสดงดังภาพที่ 23 พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ในแต่ละรายการเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด และการใช้ปุ๋ยในขั้นตอนการเพาะปลูก

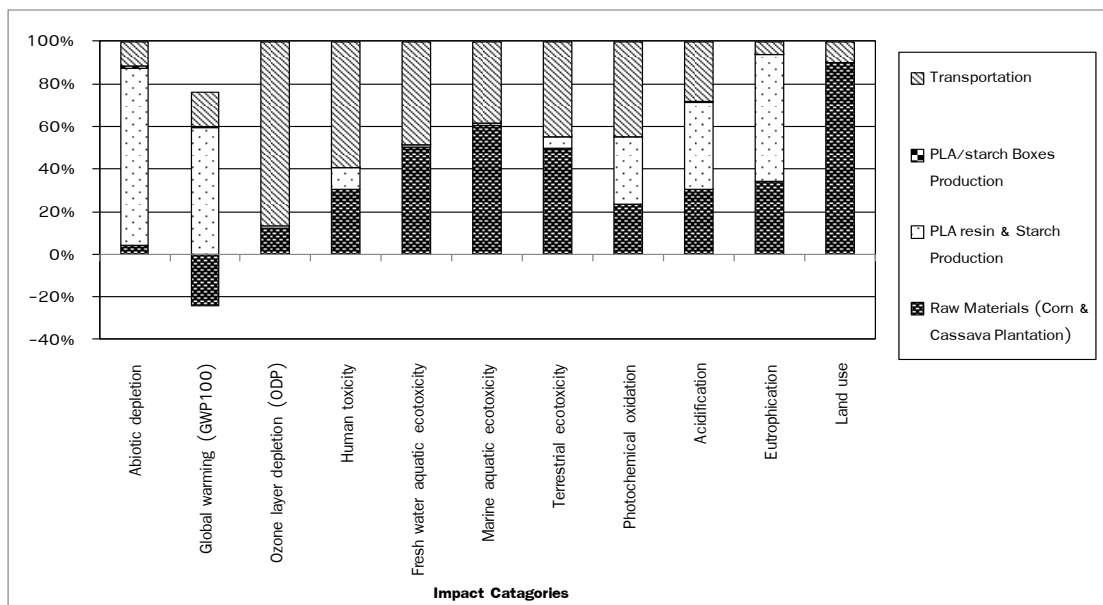
แต่ในขั้นตอนการเพาะปลูกก็เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน เนื่องจากพืชมีการดูดซับก๊าซ CO_2 มาใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แสง ซึ่งเกิดจากวัฏศดับ 2 ชนิด คือ ข้าวโพดและมันสำปะหลัง แต่จะมีสัดส่วนการดูดซับก๊าซ CO_2 ลดลง เมื่อมีสัดส่วนในการแบ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวโพดสามารถดูดซับก๊าซ CO_2 ได้ดีกว่ามันสำปะหลังต่อปริมาณผลผลิตที่เท่ากัน



ภาพที่ 23 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50

4.3 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 30/70

ปริมาณผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาท โดยจำแนกตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อม ในช่วงการผลิตกล่อง พอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 30/70 แสดงดังภาพที่ 24 พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ในแต่ละรายการเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตเม็ดพอลิแล กติกแอซิด และการใช้ปุ๋ยในขั้นตอนการเพาะปลูก แต่ในขั้นตอนการเพาะปลูกก็เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน เนื่องจากพืชมีการดูดซับก๊าซ CO_2 มาใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แสง ซึ่งเกิดจากวัฏศดับ 2 ชนิด คือ ข้าวโพดและมันสำปะหลัง แต่จะมีสัดส่วนการดูดซับก๊าซ CO_2 ลดลง เมื่อมีสัดส่วนในการแบ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น 70 เปอร์เซนต์ เนื่องจากข้าวโพดสามารถดูดซับก๊าซ CO_2 ได้ดีกว่ามันสำปะหลังต่อปริมาณผลผลิตที่เท่ากัน

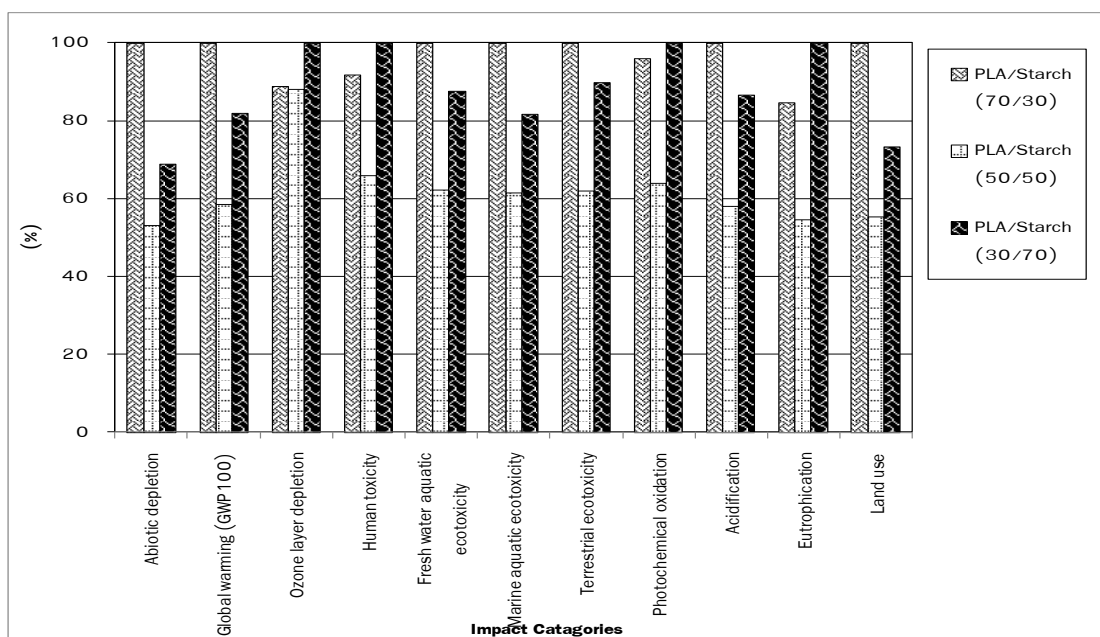


ภาพที่ 24 การจำแนกข้อมูลตามรายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 30/70

4.4 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

ข้อมูลปริมาณผลกระทบสิ่งแวดล้อมในแต่ละรายการผลกระทบ ในช่วงการผลิตกล่องทั้ง 3 ประเภท เปรียบเทียบผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาท แสดงดังภาพที่ 25 พบว่า กล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมในช่วงผลิตมากที่สุด ยกเว้น ด้านการลดลงของชั้นโอโซน การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ การเกิดมลพิษชั้นหุติยภูมิจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และภาวะธาตุอาหารในน้ำเกินสมดุล

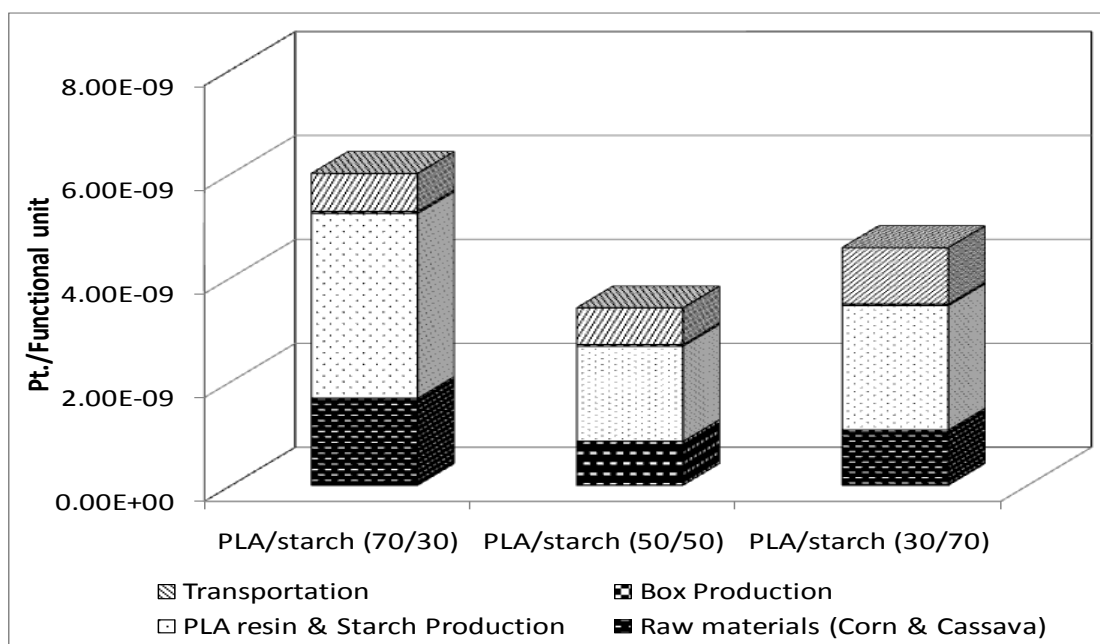
ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่อน้ำหนักของเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม พบว่าเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดมีผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 4.75 เท่า ดังนั้นการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมของแป้งที่มีการลดอัตราส่วนลงจาก 70/30 เป็น 50/50 จะช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ แต่เมื่อผสมกล่องพอลิแลกติกแอซิดกับแป้งที่อัตราส่วน 30/70 จะทำให้ผลกระทบทุกด้านเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมของแป้งที่อัตราส่วน 50/50 เนื่องในขั้นตอนการเพาะปลูกมีการใช้พื้นที่มากขึ้น ซึ่งแปรผันตามกับปริมาณการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้น พร้อมกับในขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการปลดปล่อยของเสีย และน้ำเสียในปริมาณมาก



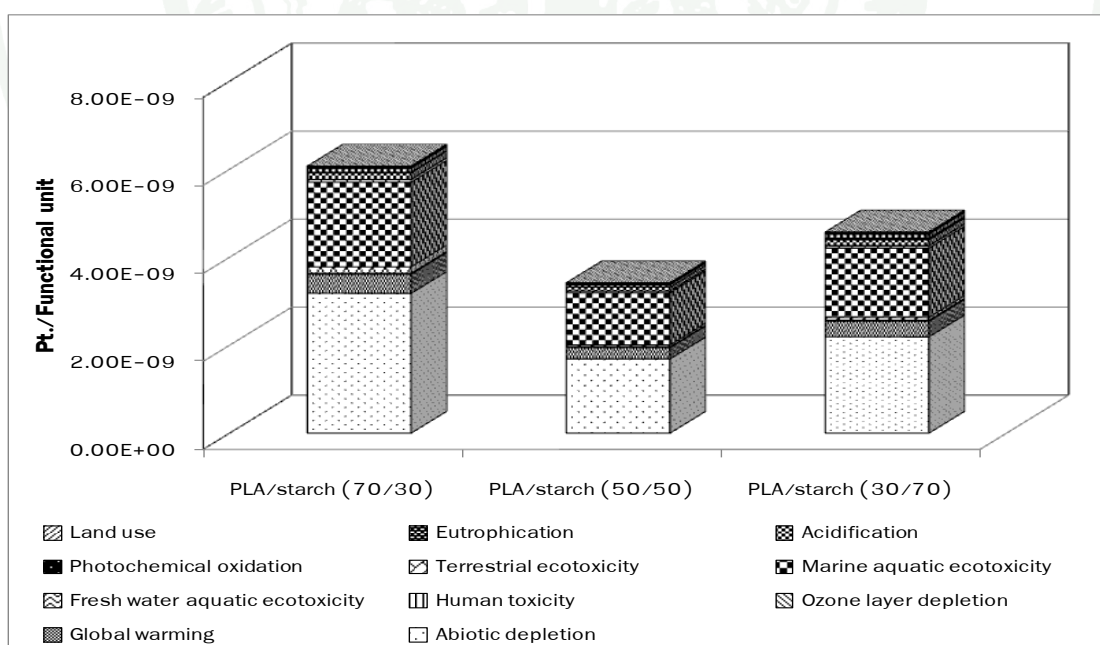
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมแต่ละรายการในขั้นตอนการกำหนดบทบาทในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

4.5 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดี่ยว ในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70

การเปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 ซึ่งจำแนกตามขั้นตอนและตามรายการผลกระทบ แสดงดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่ากล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าผลกระทบ 6.00×10^{-9} Pt ซึ่งมีผลกระทบมากกว่า กล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50 และ 30/70 เท่ากับ 1.76 และ 1.31 เท่า ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลังเป็นหลัก รองลงมาคือ ขั้นตอนการเพาะปลูกข้าวโพดและมันสำปะหลัง และมีรายการผลกระทบที่มากที่สุด คือ การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติประเภทที่ไม่สามารถทดแทนได้ การก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำทะเล และการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ตามลำดับ โดยผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นตอนการวิเคราะห์ในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในขั้นตอนการกำหนดบทบาท คือ การผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง 70/30 เป็น 50/50 จะช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ แต่เมื่อผสมกล่องพอลิแลกติกแอซิดกับแป้งที่อัตราส่วน 30/70 จะทำให้ผลกระทบทุกด้านเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50



ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดียวในแต่ละขั้นตอนการผลิตตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70



ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดียวในช่วงการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามรายการผลกระทบ

4.6 รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการกำหนดบทบาท ในช่วงการผลิต
กล่องจนถึงขั้นตอนการจัด ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50
และ 30/70

หลังจากพิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกล่อง 3 ประเภทตลอดวัฏจักรชีวิต
แยกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการผลิตภาชนะบรรจุ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น
ในแต่ละขั้นตอน และระบุถึงขั้นตอนที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และช่วงการ
จัดการหลังสิ้นสุดการใช้งาน เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจาก
การจัดด้วยวิธีต่างๆ โดยสร้างแบบจำลองของการจัดการ 6 ประเภท ได้แก่ การฝังกลบ 90
เปอร์เซ็นต์ และการเผา 10 เปอร์เซ็นต์ (option1) การเผา 100 เปอร์เซ็นต์ (option2) การ
เผาแบบได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ (option3) การฝังกลบตามธรรมชาติ 100
เปอร์เซ็นต์ (option4) การฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน 100
เปอร์เซ็นต์ (option5) และการคอมโพสท์ (option6) โดยผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักร
ชีวิตนี้ จะนำขั้นตอนการขนส่งกล่อง 3 ประเภทไปยังสถานที่กำจัดเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย

รายการผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่อง
พอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 แสดงดัง
ตารางที่ 28 29 และ 30 ตามลำดับ

ตารางที่ 28 รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 70/30

PLA/starch (70/30) +MSW options Impact catagories	Option 1: 90% Landfill, 10% Incineration	Option 2: Incineration	Option 3 : Incineration + Heat Recovery	Option 4 : Landfill	Option 5 : Landfill + CH₄ Recovery	Option 6 : Composting	Unit
Abiotic depletion	3.85E+01	3.87E+01	3.73E+01	3.85E+01	2.36E+01	3.64E+01	kg Sb eq
Global warming	5.99E+03	2.72E+03	2.06E+03	6.36E+03	2.30E+03	-6.56E+03	kg CO ₂ eq
Ozone layer depletion	3.27E-04	3.26E-04	3.25E-04	3.27E-04	3.27E-04	2.96E-04	kg CFC-11 eq
Human toxicity	2.43E+02	2.42E+02	1.96E+02	2.43E+02	2.39E+02	1.56E+02	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic toxicity	6.08E+01	6.05E+01	4.77E+01	6.09E+01	6.08E+01	1.05E+02	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic toxicity	3.07E+05	3.06E+05	2.60E+05	3.07E+05	3.07E+05	1.47E+05	kg 1,4-DB eq
Terrestrial toxicity	2.38E+00	2.37E+00	1.80E+00	2.38E+00	2.34E+00	4.88E+01	kg 1,4-DB eq
Photochemical oxidation	1.23E+00	3.09E-01	2.58E-01	1.34E+00	5.26E-01	-1.75E+00	kg C ₂ H ₄ eq
Acidification	1.48E+01	1.48E+01	1.33E+01	1.48E+01	1.20E+01	1.28E+01	kg SO ₂ eq
Eutrophication	7.99E+00	7.99E+00	7.77E+00	7.99E+00	7.53E+00	6.38E+00	kg PO ₄ eq
Land use	1.70E+02	1.70E+02	1.70E+02	1.70E+02	1.70E+02	1.56E+02	m ² yr

ตารางที่ 29 รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 50/50

PLA/starch (50/50) +MSW options Impact catagories	Option 1: 90% Landfill, 10% Incineration	Option 2: Incineration	Option 3 : Incineration + Heat Recovery	Option 4 : Landfill	Option 5 : Landfill + CH₄ Recovery	Option 6 : Composting	Unit
Abiotic depletion	2.05E+01	2.06E+01	1.96E+01	2.05E+01	1.02E+01	1.90E+01	kg Sb eq
Global warming	3.97E+03	1.63E+03	1.20E+03	4.23E+03	1.43E+03	-4.70E+03	kg CO ₂ eq
Ozone layer depletion	3.23E-04	3.23E-04	3.22E-04	3.23E-04	3.23E-04	3.01E-04	kg CFC-11 eq
Human toxicity	1.74E+02	1.74E+02	1.43E+02	1.74E+02	1.71E+02	1.20E+02	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic toxicity	3.79E+01	3.77E+01	2.91E+01	3.79E+01	3.79E+01	7.45E+01	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic toxicity	1.89E+05	1.88E+05	1.57E+05	1.89E+05	1.89E+05	7.19E+04	kg 1,4-DB eq
Terrestrial toxicity	1.47E+00	1.47E+00	1.09E+00	1.48E+00	1.45E+00	4.01E+01	kg 1,4-DB eq
Photochemical oxidation	8.42E+00	2.06E-01	1.72E-01	9.13E-01	3.56E-01	-1.21E+00	kg C ₂ H ₄ eq
Acidification	8.57E+00	8.57E+00	7.56E+00	8.57E+00	6.67E+00	7.13E+00	kg SO ₂ eq
Eutrophication	5.15E+00	5.15E+00	5.00E+00	5.15E+00	4.83E+00	3.94E+00	kg PO ₄ eq
Land use	9.42E+01	9.42E+01	9.42E+01	9.42E+01	9.42E+01	8.43E+01	m ² yr

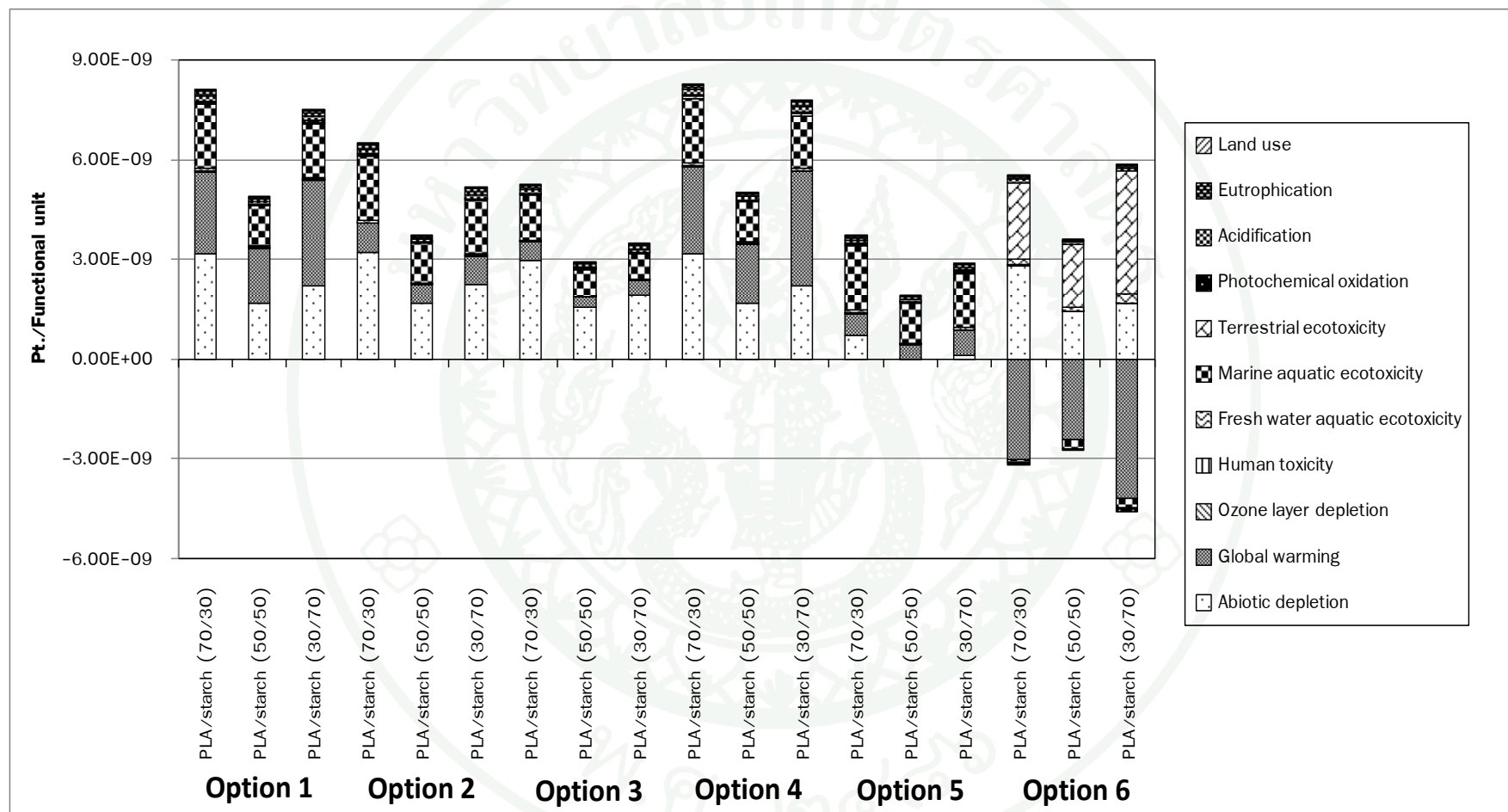
ตารางที่ 29 รายการผลกระทบในขั้นตอนการกำหนดบทบาทตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 30/70

PLA/starch (30/70) +MSW options Impact catagories	Option 1: 90% Landfill, 10% Incineration	Option 2: Incineration	Option 3 : Incineration + Heat Recovery	Option 4 : Landfill	Option 5 : Landfill + CH₄ Recovery	Option 6 : Composting	Unit
Abiotic depletion	2.66E+01	2.683E+01	2.49E+01	2.66E+01	1.62E+01	2.36E+01	kg Sb eq
Global warming	7.37E+03	2.52E+03	1.64E+03	7.91E+03	1.85E+03	-1.06E+04	kg CO ₂ eq
Ozone layer depletion	3.68E-04	3.67E-04	3.66E-04	3.69E-04	3.67E-04	3.25E-04	kg CFC-11 eq
Human toxicity	2.65E+02	2.64E+02	2.03E+02	2.65E+02	2.61E+02	1.34E+02	kg 1,4-DB eq
Fresh water aquatic toxicity	5.37E+01	5.32E+01	3.60E+01	5.37E+01	5.32E+01	1.34E+02	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic toxicity	2.52E+05	2.51E+05	1.89E+05	2.52E+05	2.51E+05	2.29E+05	kg 1,4-DB eq
Terrestrial toxicity	2.15E+00	2.13E+00	1.37E+00	2.15E+00	2.11E+00	7.80E+01	kg 1,4-DB eq
Photochemical oxidation	1.59E+00	3.23E-01	2.54E-01	1.73E+00	4.71E-01	-2.65E+00	kg C ₂ H ₄ eq
Acidification	1.28E+01	1.28E+01	1.08E+01	1.28E+01	1.09E+01	9.97E+00	kg SO ₂ eq
Eutrophication	9.44E+00	9.44E+00	9.13E+00	9.44E+00	9.11E+00	7.07E+00	kg PO ₄ eq
Land use	1.25E+02	1.25E+02	1.25E+02	1.25E+02	1.25E+02	1.05E+02	m ² yr

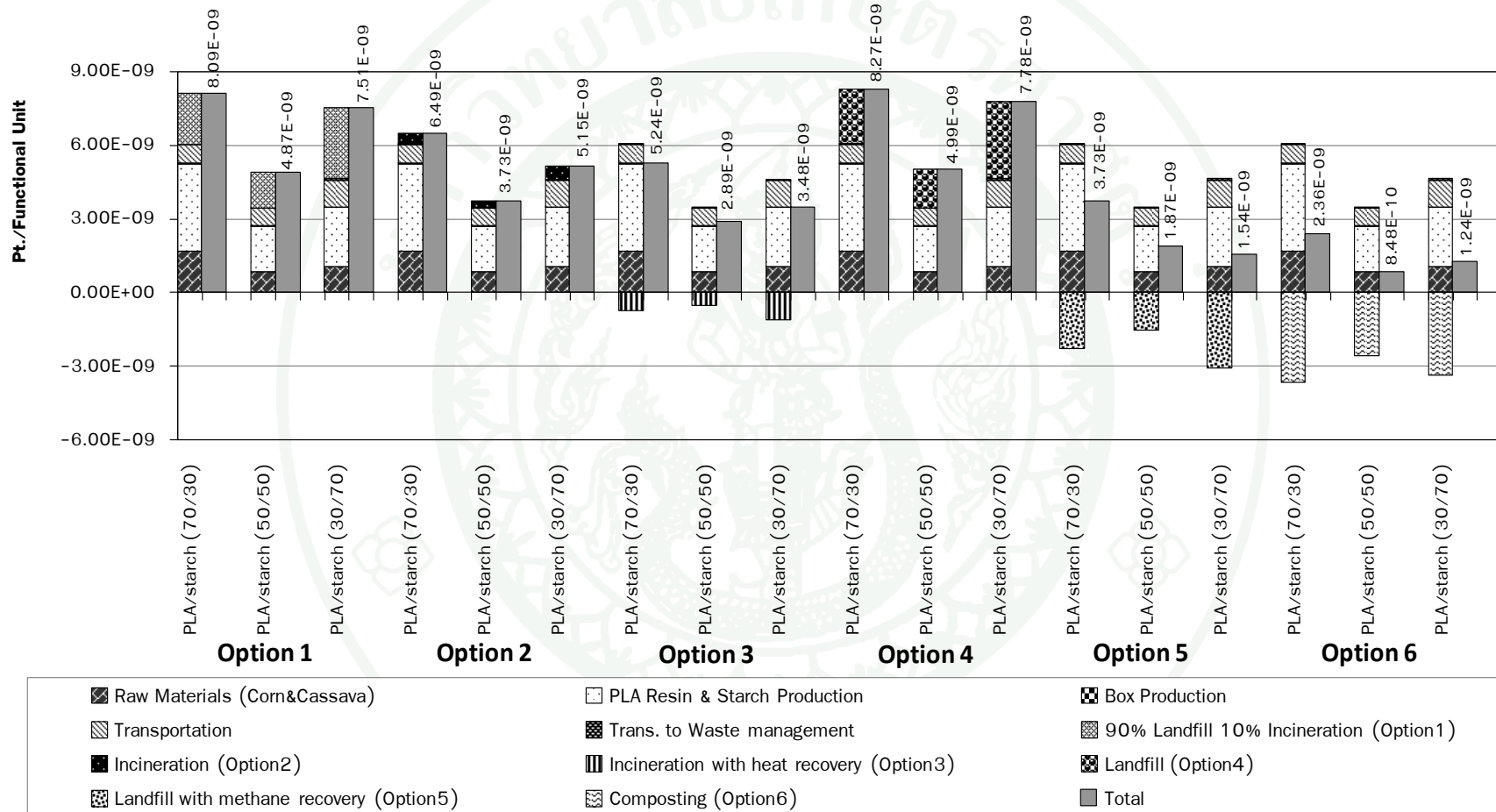
4.7 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปคะแนนเชิงเดี่ยว ในช่วงการผลิต
กล่องจนถึงขั้นตอนการจำกัด ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50
และ 30/70

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต ในรูปคะแนนเชิงเดี่ยว
ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมกับแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 แสดงดัง
ภาพที่ 28 และ 29 พบว่า รายการผลกระทบที่มากที่สุดของกล่องสลายตัวได้ทั้ง 3 ประเภท คือ
การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติประเภทที่ไม่สามารถทดแทนได้ การก่อให้เกิดความเป็น
พิษต่อระบบนิเวศน้ำทะเล และการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ตามลำดับ และวิธีที่เหมาะสมใน
การกำจัดกล่อง PLA/starch ที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ การคอมโพสท์ เนื่องจากการคอมโพสท์
สามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ 2.59×10^{-9} Pt ถึง 3.67×10^{-9} Pt คิดเป็นร้อยละ 61
ถึง 75 ซึ่งคำนวณได้จากการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นปุ๋ยซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และลด
ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้การจัดการด้วยการฝังกลบแบบมีการเก็บ
ก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน และการจัดการด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืนเป็น
วิธีการที่เหมาะสมเช่นกัน เพราะสามารถลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ 1.57×10^{-9} Pt ถึง
 3.09×10^{-9} Pt และ 7.68×10^{-10} Pt ถึง 1.12×10^{-9} Pt ตามลำดับ การกำจัดที่ก่อให้เกิด
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดสำหรับกล่อง PLA/starch ที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ การกำจัด
ด้วยวิธีการฝังกลบ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน
ระหว่างการฝังกลบ เนื่องจากกล่อง PLA/starch ที่อัตราส่วนต่าง ๆ สามารถย่อยสลายได้เกือบ
สมบูรณ์ภายในระยะเวลา 10 เดือน ดังนั้นการกำจัดด้วยวิธีการนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อ
สิ่งแวดล้อมเนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก คือ ก๊าซ CO_2 และก๊าซ CH_4

สำหรับการกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ 90 เปอร์เซ็นต์และการเผา 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง
เป็นวิธีการจัดการในปัจจุบันของประเทศไทย พบว่า เป็นวิธีที่ยังก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม
ค่อนข้างมาก ถึงแม้จะมีสัดส่วนการฝังกลบลดลง แต่การกำจัดโดยการเผามีการปลดปล่อย
ก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ ก๊าซ CO_2 ในขณะเดียวกันเมื่อนำไปเปรียบเทียบ
ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมกับการกำจัดโดยการฝังกลบ พบว่า การฝังกลบสำหรับพลาสติก
สลายตัวยากจะมีอิทธิพลต่อค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าการเผา ดังนั้น ถ้าการจัดการที่
ปรับให้มีสัดส่วนให้มีการฝังกลบมากกว่าสัดส่วนของการนำไปเผาจะทำให้เกิดปริมาณ
ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่มากกว่าเช่นกัน



ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามรายการผลกระทบ



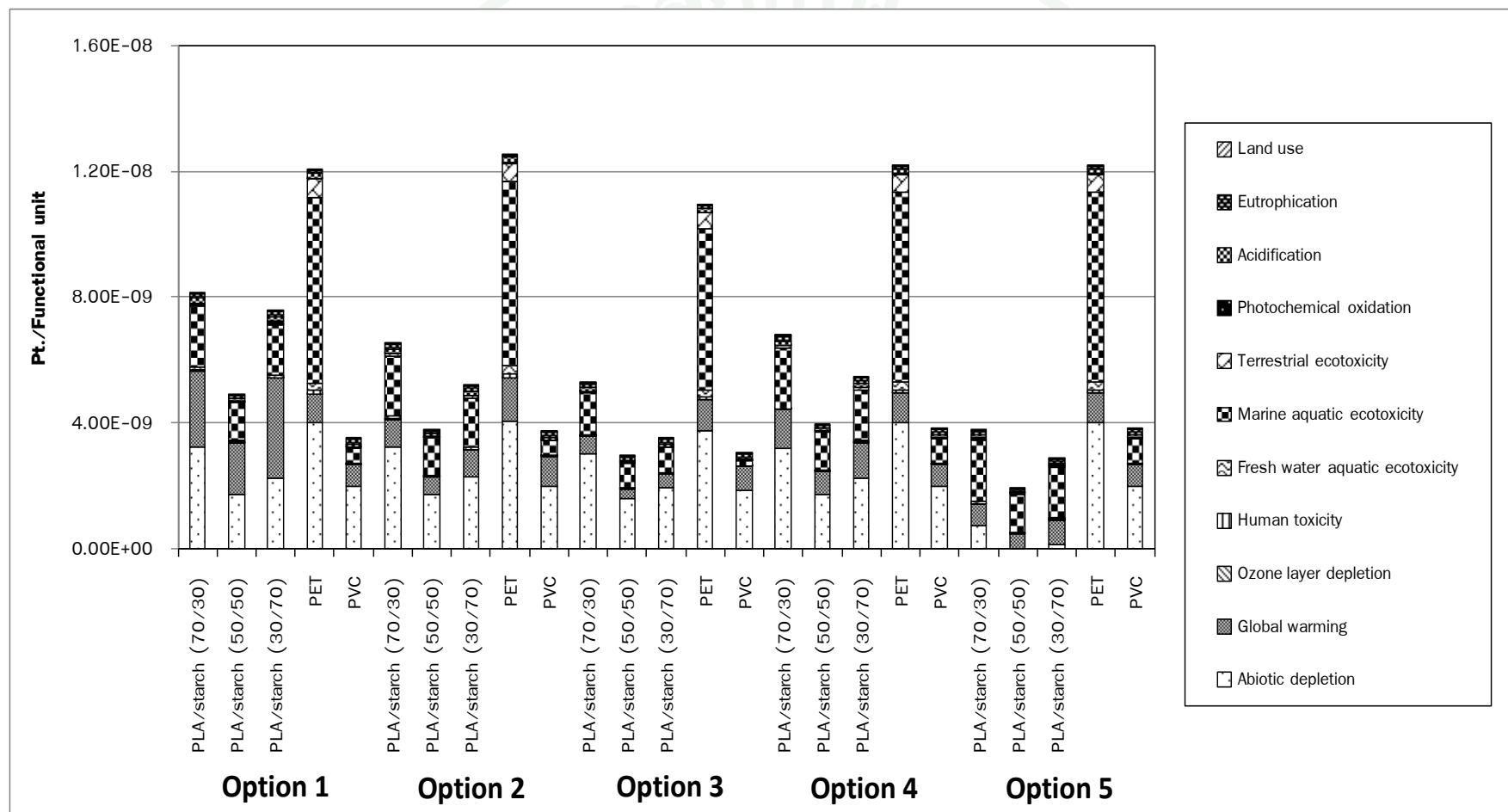
ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงเดี่ยวของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยจำแนกตามขั้นตอน

5. การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต ในรูปคะแนนเชิงเดี่ยว ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กับกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์

พิจารณาเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกล่อง 5 ประเภท ได้แก่ กล่องสลายตัวได้จากพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 ตามลำดับ และกล่องสลายตัวจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ตลอดวัฏจักรชีวิต แสดงดังภาพที่ 30 โดยเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ โดยพิจารณาแบบจำลองของการจัดการ 5 ประเภท ได้แก่ การฝังกลบ 90 เปอร์เซ็นต์ และการเผา 10 เปอร์เซ็นต์ (option1) การเผา 100 เปอร์เซ็นต์ (option2) การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ (option3) การฝังกลบตามธรรมชาติ 100 เปอร์เซ็นต์ (option4) การฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ (option5) โดยที่ไม่นำการคอมพิวเตอร์มาพิจารณาเปรียบเทียบ เนื่องจากกล่องที่ใช้วัดดูได้จากกระบวนการปิโตรเคมี (กล่อง PET และ PVC) ไม่ย่อยสลายในภาวะคอมพิวเตอร์

เมื่อเปรียบเทียบภาพรวมผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต พบว่า กล่อง PET ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการสกัดวัตถุดิบ (น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ) จนได้เม็ดพลาสติก ในขณะที่กล่อง PVC มีผลกระทบต่ำกว่า เนื่องจากกล่อง PVC มีน้ำหนักเบากว่ากล่อง PET แสดงว่ามีการใช้วัตถุดิบและพลังงานในปริมาณน้อยกว่า ส่วนกล่อง PLA/starch (50/50) ส่งผลกระทบน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาตามวิธีการกำจัด การจัดการโดยการคอมพิวเตอร์สำหรับกล่องแบบสลายตัวได้ มีค่าผลกระทบเท่ากับ 8.48×10^{-10} Pt ถึง 2.36×10^{-9} Pt ซึ่งเป็นวิธีการจัดการที่ดีที่สุด แต่ไม่ได้นำมาพิจารณาเปรียบเทียบ ส่วนการฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน และการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน ก็เป็นวิธีการจัดการที่เหมาะสมสำหรับกล่องแบบสลายตัวได้เช่นกัน สำหรับกล่องแบบสลายตัวยาก มีวิธีการจัดการที่เหมาะสมคือ การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน ซึ่งช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้เท่ากับ 3.89×10^{-10} Pt ถึง 1.68×10^{-9} Pt คิดเป็นร้อยละ 14 ถึง 40 เนื่องจากมีการนำพลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาในระบบกลับมาใช้ประโยชน์ โดยกลับคืนมาในรูปของน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ในขณะที่การจัดการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดสำหรับกล่องสลายตัวได้ คือ การฝังกลบ มีค่าผลกระทบเท่ากับ 4.99×10^{-9} Pt ถึง 8.27×10^{-9} Pt เนื่องจากมีการปล่อยก๊าซ CH_4 และก๊าซ CO_2 และสำหรับกล่องสลายตัวยาก คือ การเผา มีค่าผลกระทบเท่ากับ 3.70×10^{-9} Pt ถึง 1.25×10^{-8} Pt เนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซ CO_2 ในขั้นตอนการเผา



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในรูปคะแนนเชิงตัวเลขของกล่องสลายตัวได้จากพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กับกล่องสลายตัวจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

6. ผลการวิเคราะห์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 เปรียบเทียบกับกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์

ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของกล่องทั้ง 5 ประเภทตลอดวัฏจักรชีวิต แสดงดังตารางที่ 31 โดยจำแนกตามการกำจัด 6 ประเภท ได้แก่ การฝังกลบ 90 เปอร์เซ็นต์ และการเผา 10 เปอร์เซ็นต์ (option1) การเผา 100 เปอร์เซ็นต์ (option2) การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ (option3) การฝังกลบตามธรรมชาติ 100 เปอร์เซ็นต์ (option4) การฝังกลบแบบมีการเก็บก๊าซมีเทน เพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน 100 เปอร์เซ็นต์ (option5) และการคอมโพสท์ (option6) พบว่า กล่อง PLA/starch ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่มีการจัดการด้วยการคอมโพสท์ จะมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.046 ถึง 0.109 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เนื่องจากการคอมโพสท์ได้ปุ๋ยเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.491 ถึง 1.03 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า สำหรับกล่อง PET และ PVC ที่มีการจัดการด้วยการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์น้อยที่สุด เท่ากับ 0.140 และ 0.117 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ เนื่องจากการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน มีการนำพลังงานความร้อนกลับคืนมาในรูปของน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.020 ถึง 0.033 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

ตารางที่ 31 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 เปรียบเทียบกับกล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์

ชนิดกล่อง	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (kg CO ₂ eq) ต่อผลิตภัณฑ์ 1 กล่อง					
	1	2	3	4	5	6
PLA/starch (70/30)	0.344	0.271	0.205	0.352	0.241	0.109
PLA/starch (50/50)	0.205	0.163	0.119	0.210	0.151	0.057
PLA/starch (30/70)	0.310	0.252	0.164	0.316	0.250	0.046
PET	0.202	0.288	0.140	0.193	0.193	-
PVC	0.154	0.209	0.117	0.148	0.148	-

7. การเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น

จากผลการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ของเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง (PLA/starch) ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 กับพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และแป้ง (starch) ของงานวิจัยอื่นต่อน้ำหนักเม็ดพลาสติก 1 กิโลกรัมแสดงดังตารางที่ 32 พบว่า การผลิตเม็ด PLA ในการศึกษาที่ใช้ข้อมูลบัญชีรายการตามงานวิจัยของ Vink et al. (2010) แต่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า 0.11 kg CO₂ eq. หรือคิดเป็นร้อยละ 8.46 ทั้งนี้เนื่องจากมีการปรับเปลี่ยนข้อมูลไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเป็นฐานข้อมูลของประเทศไทย และพบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่างานวิจัยของ Madival et al. (2009) 0.21 kg CO₂ eq. หรือคิดเป็นร้อยละ 12.96 ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยของ Madival et al. (2009) ใช้ข้อมูลตามงานวิจัยของ Vink et al. (2007) ซึ่งใช้พลังงานลมในการผลิตส่วนการผลิตแป้งในการศึกษานี้ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่างานวิจัยของ Keeratiurai (2012) 0.02 kg CO₂ eq. หรือคิดเป็นร้อยละ 6.25 ทั้งนี้เนื่องจากจากการศึกษานี้มีปริมาณแป้งต่อหัวมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม น้อยกว่างานวิจัยของ Keeratiurai (2012) เท่ากับ 0.057 กิโลกรัม และเมื่อผสมเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดกับแป้ง จะทำให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงตามอัตราส่วน เนื่องจากการผลิตแป้งปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิด และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งในการศึกษานี้มีค่า อยู่ในช่วงระหว่างเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดและแป้งของงานวิจัยอื่น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกัน

ตารางที่ 32 การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเม็ดพอลิแลกติกแอซิด (PLA) เม็ดพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง (PLA/starch) และแป้ง (Starch) กับงานวิจัยอื่น (หน่วย: kg CO₂ eq./kg ของเม็ดพลาสติก)

	PLA	PLA/starch (70/30)	PLA/starch (50/50)	PLA/starch (30/70)	Starch
การศึกษานี้	1.41	0.99	0.79	0.59	0.34
Vink et al. (2010)	1.30	-	-	-	-
Madival et al. (2009)	1.62	-	-	-	-
Keeratiurai (2012)	-	-	-	-	0.32

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของกล่องแบบสลายตัวได้ 3 ประเภท คือ พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยน้ำหนัก มีน้ำหนัก 549.65 397.20 และ 804.00 กิโลกรัม ตามลำดับ เปรียบเทียบกับกล่องแบบสลายตัวจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและพอลิไวนิลคลอไรด์ มีน้ำหนัก 582.77 และ 462.51 กิโลกรัม ตามลำดับ กำหนดหน่วยหน้าที่ คือ งานวิจัยนี้ศึกษากล่องแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งขนาด 8x10x2.8 เซนติเมตร จำนวน 10,000 ใบ ซึ่งมีปริมาตร 2,240 ลิตร และสามารถรองรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 100 กรัม โดยใช้โปรแกรมประเมินวัฏจักรชีวิต SimaPro เวอร์ชัน 7.2 โดยวิธี CML 2 Baseline 2000 เวอร์ชัน 2.03 สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ได้ข้อมูลบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง

ได้รวบรวมข้อมูลบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 โดยน้ำหนัก แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง โดยเก็บข้อมูลการใช้ทรัพยากร พลังงานและของเสียที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต รวมทั้งข้อมูลบัญชีรายการในช่วงการจัดการหลังการใช้บรรจุภัณฑ์ 6 วิธี คือ การฝังกลบร้อยละ 90 และการเผาร้อยละ 10 การเผาแบบธรรมดา การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน การฝังกลบตามธรรมชาติ การฝังกลบแบบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน และการคอมโพสท์

2. ได้ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องแบบสลายตัวได้ เปรียบเทียบกับกล่องแบบสลายตัวยาก

กล่องแบบพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 50/50 ที่มีการจัดการด้วยวิธีการคอมโพสท์ มีค่าผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตต่ำสุด คือเท่ากับ 8.48×10^{-10} Pt ส่วนกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 และ 30/70 ที่มีการจัดการด้วยวิธีการคอมโพสท์ มีค่าผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 2.36×10^{-9} Pt และ 1.24×10^{-9} Pt ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากที่สุดสำหรับกล่องสลายตัวได้ทั้งหมด 3 ประเภท คือ ขั้นตอนการผลิตเม็ดพอลิแลกติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลัง และขั้นตอนการเพาะปลูก ซึ่ง

คิดเป็นสัดส่วนคะแนนเชิงเดี่ยวของผลกระทบสิ่งแวดล้อมเท่ากับร้อยละ 52 ถึง 60 และ 23 ถึง 28 ตามลำดับ

วิธีการจัดการที่ดีที่สุดสำหรับกล่องสลایต์ตัวได้พอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 คือ การคอมโพสท์ มีค่าผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 8.48×10^{-10} Pt ถึง 2.36×10^{-9} Pt นอกจากนี้การจัดการที่เหมาะสมสำหรับกล่องสลایต์ตัวได้ คือ การฝังกลบที่มีการเก็บก๊าซมีเทนเพื่อให้ได้พลังงานกลับคืน และการเผาแบบได้พลังงานกลับคืน ซึ่งมีค่าผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 1.54×10^{-9} Pt ถึง 3.73×10^{-9} Pt และ 2.89×10^{-10} Pt ถึง 5.24×10^{-9} Pt ตามลำดับ และวิธีการจัดการที่เหมาะสมสำหรับกล่องสลایต์ตัวจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ คือ การเผาแบบได้พลังงานกลับคืน มีค่าผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 3.02×10^{-9} Pt ถึง 1.09×10^{-8} Pt

3. ได้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องสลایต์ตัวได้และกล่องสลایต์ตัวจาก

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนตลอดวัฏจักรชีวิตของกล่องจากพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งอัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70 พบว่า การจัดการโดยการคอมโพสท์ทำให้เกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนน้อยที่สุดต่อกล่องสลایต์ตัวได้ทั้ง 3 ประเภท โดยมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ 0.046 ถึง 0.109 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า สำหรับกล่องสลایต์ตัวจากเมื่อพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตพบว่า กล่องพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและกล่องพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการกำจัดด้วยวิธีการเผาแบบได้พลังงานกลับคืนทำให้เกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนน้อยที่สุด โดยมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ 0.117 และ 0.140 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงข้อมูลการเพาะปลูกมันสำปะหลัง การผลิตแป้งมันสำปะหลัง และการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยให้ทันสมัยใกล้เคียงกับปัจจุบัน เนื่องจากสภาพแวดล้อม ทรัพยากร และกระบวนการผลิตอาจมีการเปลี่ยนแปลง
2. ควรศึกษาพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วนอื่น โดยเฉพาะในช่วงที่ใกล้เคียงกับ 50/50 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมกันระหว่างเม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลัง อีกทั้งยังเป็นประโยชน์กับการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์อื่นในอนาคต
3. ควรศึกษาวิธีการขึ้นรูปกล่องบรรจุด้วยวิธีอื่น หรืออาจมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง และมีความคงตัวมากที่สุด อันจะมีส่วนทำให้เกิดผลกระทบโดยรวมต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง
4. ควรศึกษาพลาสติกชีวภาพชนิดอื่น เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นต้น เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุชีวภาพชนิดอื่นในการผลิตบรรจุภัณฑ์
5. ควรทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง ที่อัตราส่วน 70/30, 50/50 และ 30/70 พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ในรูปบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น แก้วน้ำดื่ม แก้วกาแฟ ช้อน ส้อม ภาชนะบรรจุชนิดอื่น เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาแนวทางการจัดการผลิตภัณฑ์พลาสติกและโฟม.**
แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/>, 20 พฤศจิกายน 2552.

_____. 2555. **สรุปสถานการณ์ขยะพิษของประเทศไทย.** แหล่งที่มา:
<http://www.pcd.go.th/>, 20 มีนาคม 2555.

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2553. **สอบถามระยะทางระหว่างจังหวัดหรืออำเภอ.**
แหล่งที่มา: <http://gisweb.doh.go.th/doh/download/>, 30 กรกฎาคม 2555.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2548. **ระยะเวลาในการย่อยสลายของขยะ.** แหล่งที่มา: <http://www.deqp.go.th/>,
24 พฤศจิกายน 2552.

_____. 2554. **โครงการส่งเสริมการใช้ฉลากคาร์บอนสำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชน: แนวทางการผลิตของผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ได้รับฉลากคาร์บอน.** พิมพ์ครั้งที่ 1.
บริษัทสามารถท้อปปี จำกัด. กรุงเทพฯ.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2555. **กระทรวงอุตสาหกรรมเผยแผนในอีก 5 ปีข้างหน้าเตรียมทุ่มงบ 720 ล้านบาทพัฒนาธุรกิจเอสเอ็มอีพลาสติก รองรับการค้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (เออีซี).** แหล่งที่มา:
<http://news.voicetv.co.th/business/42607.html>, 14 ธันวาคม 2555.

กษิตศ อัมประไพ, อรพิน เกิดชูชื่น และ ญัฐฐา เลหากุลจิตต์. 2553. **การศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของฟิล์มไบโโกล์ได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง.** ว. วิทย. กษ. 41 (3/1) (พิเศษ): 609-612.

เก่งพงศ์ กิจเกตุ และ วรวิทย์ ดาน้ำคำ. 2547. **พลาสติกย่อยสลายจากแป้งผสมพอลิเอสเตอร์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยรังสิต.

คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์. 2554. **แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ ภายใต้โครงการส่งเสริมการใช้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

ชลเจริญ กรู๊ป. 2553. **ประวัติมันสำปะหลังของประเทศไทย**. แหล่งที่มา:

<http://www.thaitapiocastarch.com>, 24 มิถุนายน 2555.

ธนาดี ลี้จากภัย. 2549. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

ปนัดดา พวงเกษม. 2540. **การเตรียมฟิล์มไบโโกล์ได้จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 3-27.

วรภัทร ลัคนทินวงศ์. 2545. **การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อผักผลไม้สดแปรรูปพร้อมบริโภค**. ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2546. **การศึกษาวัสดุย่อยสลายได้ กระบวนการที่เหมาะสมในการขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุย่อยสลายได้**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วรยุทธ สายบัวตรง. 2551. **การศึกษาเปรียบเทียบพลังงานสุทธิและผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของวัตถุดิบหลักในการผลิตเอทานอล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วลัยพร มุขสุวรรณ. 2551. **พลาสติกในชีวิตประจำวัน-ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย**. แหล่งที่มา:

<http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12>,

20 กรกฎาคม 2552.

สมาคมแป้งมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2553. **สถิติราคาแป้งมันสำปะหลังภายในประเทศ**. แหล่งที่มา: <http://www.thaitapiocastarch.org>, 20 ธันวาคม 2554.

_____. 2554. **การสำรวจภาวะการผลิตและการค้ามันสำปะหลัง**. แหล่งที่มา: <http://www.thaitapiocastarch.org>, 13 มกราคม 2555.

สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2550. **วัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับการพัฒนางานวิจัยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสู่ธุรกิจนวัตกรรม**. กระทรวงวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

_____. 2553. **บทที่ 3 เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. แหล่งที่มา: <http://www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf>, 12 ตุลาคม 2553.

สุธี คงศิริ. 2552. **การประเมินวัฏจักรชีวิตของมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลัง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาวดี บุญออก. 2547. **การเลือกบรรจุภัณฑ์พลาสติกให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหาร**. แหล่งที่มา: <http://www.ismed.or.th/SME/src/bin/controller.php?view=knowledgeInsite.KnowledgesDetail&p=&nid=&sid=69&id=931&left=84&right=85&level=3&lv1=3>, 20 พฤศจิกายน 2553.

หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง. 2540. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Bohlmann, G.M. 2004. Biodegradable Packaging Life Cycle Assessment. **Environment Progress** 23: 342-346.

Crop and Food Research, The New Zealand Baking Industry Research Trust. 2004. **Bread Ingredients**. Available Source: http://www.bakeinfo.co.nz/school/school_info/bread_ingredients.php, January 5, 2010.

Finnveden, G., A.C. Albertsson, J. Berendson, E. Eriksson, L.O. Hogland, S. Karlsson and J.O. Sundqvist. 1995. Solid waste treatment within the framework of life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production** 3(4): 189–199.

Franklin Associates. 2006. **Life Cycle Inventory of Five Product Produced From Polylactide (PLA) and Petroleum-Based Resins**. Athena Institute International.

Ganjyai, G.M., R. Waber and M.A. Hanna. 2007. Laboratory composting of extrude starch acetate and poly lactic acid blend foams. **Bio-resource Technology** 98: 3176–3179.

Garraín, D., R. Vidal, P. Martinez, V. Franco and D. Cebrian-Tarrason. 2007. LCA of biodegradable multiplayer film from biopolymer. *In* **Proceedings of the 3rd International Conference on Life Cycle Management**. University of Zurich, Switzerland.

Guineee, J., M. Gorree, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijin and A. Koning. 2001. **Life cycle assessment, an operational guide to the ISO standards, part 1 and part 2a**. Final report. The Netherlands: Centre of Environmental Science, Leiden University (CML).

Hakkinen, T. and S. Vares. 2010. Environmental impacts of disposable cups with special focus on the effect of material choices and end of life. **Journal of Cleaner Production** 18: 1458–1463.

Herman, B.G., L. Debeer, B. De Wilde, K. Blok and M.K. Patel. 2011. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. **Polymer Degradation and Stability** 96: 1159–1171.

Horikoshi, Y., T. Hashitani, M. Kutami, K. Yazaki and Y. Ando. 2005. **Life-cycle Assessment of LSI Packaging Embossed Tape Made from Bio-based Polymer**. *In* **Proceedings of the 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse**. pp. 122–123. Tokyo, Japan.

Huitric, R.L. and D. Kong. 2006. Measuring Landfill Gas Collection Efficiency Using Surface Methane Concentrations. *In* **Proceedings from the Solid Waste Association of North America's 29th Annual Landfill Gas Symposium**. St. Petersburg, Florida, USA.

International Organization for Standardization. 2005. **ISO 14855-1: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions – Method by analysis of evolved carbon dioxide – part 1: general method**.

_____. 2006a. **ISO 14040: Environmental management–Life Cycle Assessment–Principle and framework**.

_____. 2006b. **ISO 14044: Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines**.

IPCC. 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Johansson, M. 2005. **Life cycle assessment of fossil and bio based materials for 3D shell applications: Material eco-profiles and example with blow moulded clear rigid packaging**. Stockholm, Sweden.

Kaplan, D.L., J.M. Mayer, S.J. Lombardi, B. Wiley and P. Stenhouse. 1993. Fundamentals of Biodegradable Polymers, pp. 1–42. In C. Ching, D.L. Kaplan and E.L. Thomas, eds. **Biodegradable Polymers and Packaging**. Technomic Publishing Co.,Ltd, Lancaster, *Pennsylvania*, USA.

Karli, J and T. Grant. 2003. **LCA of Degradable Plastic Bags**. Department of Environment and Heritage, Australia.

Keeratiurai P. 2012. Carbon Footprint of Tapioca Starch Production using Life Cycle Assessment in Thailand. **European Journal of Scientific Research** 77(2): 293-302.

Kendall, A. 2012. A life cycle assessment of biopolymer production from material recovery facility residuals. **Resources, Conservation and Recycling** 61: 69-74.

Khoo, H.H., R. B.H. Tan and K. W.L. Chng. 2010. Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags Part 1: Life cycle production. **Int J Life Cycle Assess** 15: 284-293.

_____ and R. B.H. Tan. 2010. Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags Part 2: end-of-life options. **Int J Life Cycle Assess** 15: 338-345.

Lenz, R.W. 1993. Biodegradable polymers, in *Advances in Polymer Science*. **Springer-Verlag** 107: 1-40.

Liao, H.T and C.S. Wu. 2009. Preparation and characterization of ternary blends composed of polylactide, poly(ϵ -caprolactone) and starch. **Materials Science and Engineering A** 515: 207-214.

Madival, S., R. Auras, S.P. Singh and R. Narayan. 2009. Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. **Journal of Cleaner Production** 17: 1183-1194.

Meedeche, J., M. Nithitanakul and P. Malakul. 2006. Life Cycle Assessment of Polyethylene Shopping Bag Production in Thailand. In **Proceedings of International Conference on Green and Sustainable Innovation 2006**. Thailand.

Molgaard, C. 1995. Environmental impacts by disposal of plastic from municipal solid waste. **Resour Conserv Recycl** 15: 51–63.

National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand. 2009. **National life cycle inventory database project**. Science Park, Pathumthani, Thailand.

Pasqualino, J., M. Meneses and F. Castells. 2011. The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal. **Journal of Food Engineering** 103: 357–365.

Patel, M., E. Jochem, F. Marscheider-Weidemann, P. Radgen and N. von Thienen. 1999. **C–STREAMS–Estimation of material, energy and CO₂ flows for model systems in the context of non–energy use, from a life cycle perspective**. Fraunhofer ISI Karlsruhe, Germany.

_____. 2001. **Review of Life Cycle Assessment for Bioplastics**. Utrecht University, Netherlands.

Pichtel, J. 2005. **Waste management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial**. Taylor and Francis Group, LLC. CRC Press is an imprint of Taylor and Francis Group.

Pre' Consultants. 2008. **SimaPro 7.2 software**. Amersfoort, Netheland.

Razza, F., M. Fieschi, F.D. Innocenti and C. Bastioli. 2009. Compostable cutlery and waste management: An LCA approach. **Waste Management** 29: 1424–1433.

Schwarzwalder, B., R. Estermann and L. Marini. 2000. **The Part of Life Cycle Assessment for Biodegradable Products : Bag and Loose Fills**. Geheidweg 24, 4600 Olten, Swizerland and Novamont SpA, via Fauser, 28100 Novara, Italy.

Suwanmanee, U. 2010. **Modeling and Life Cycle Environmental Assessment of Conventional and Degradable Plastic Packages**. Ph.d. Thesis, Kasetsart University.

_____, T. Leejarkpai, Y. Rudeekit and T. Mungcharoen. 2010. Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Polylactic acid (PLA) and Polystyrene (PS) Trays. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 44: 703–716.

_____, V. Varabuntoonvit, P. Chaiwutthinan, M. Tanjan, T. Mungcharoen and T. Leejarkpai. 2013. Life cycle assessment of single use thermoform boxes made from polystyrene (PS), polylactic acid (PLA), and PLA/starch: cradle to consumer gate. **Int J Life Cycle Assess** 18: 401–417.

Vink, E.T.H., D.A. Glassner, J.J. Kolstad, R.J. Wooley and R.P. O'Connor. 2007. The eco-profiles for current and near future NatureWorks® polylactide (PLA) production. **Industrial Biotechnology** 3(1): 58–81.

_____, K.R. Rabago, D.A. Glassner and P.R. Gruber. 2003. Applications of Life Cycle Assessment to NatureWork™ Polylactide(PLA) Production. **Polymer Degradation and Stability** 80: 403–419.

_____, S. Davies and J.J. Kolstad. 2010. The eco-profile for current Ingeo® polylactide production. **Industrial Biotechnology** 6(4): 212–224.

Wikipedia. 2007a. **Polyethylene Terephthalate**. Available Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate, July 22, 2010.

_____. 2007b. **Polyvinyl chloride**. Available Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride, July 22, 2010.



ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลบัญชีรายการการเพาะปลูกข้าวโพด (1000 กิโลกรัม)

หัวข้อ	จำนวน	หน่วย
สารขาเข้า		
เมล็ดพันธุ์	3.65	กิโลกรัม
ปุ๋ยไนโตรเจน	48.30	กิโลกรัม
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	75.56	กิโลกรัม
ปุ๋ยโพแทสเซียม	18.44	กิโลกรัม
ดีเซล	1,060.50	เมกกะจูล
แอมโมเนีย	0.20	กิโลกรัม
การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	2,095.50	กิโลกรัม
พื้นที่เพาะปลูก	158.73	ตร.ม.
สารขาออก		
ข้าวโพด	1,000.00	กิโลกรัม
ไนโตรเจนออกไซด์	0.051	กิโลกรัม
ไนตรัสออกไซด์	0.205	กิโลกรัม
ไนเตรท	23.89	กิโลกรัม
ฟอสฟอรัส	0.025	กิโลกรัม
แอมโมเนีย	2.73	กิโลกรัม
แอมโมเนียม	0.0894	กิโลกรัม

ที่มา: Pre' Consultants (2008)

ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลบัญชีรายการการเพาะปลูกมันสำปะหลัง (1000 กิโลกรัม)

หัวข้อ	จำนวน	หน่วย
สารขาเข้า		
ท่อนพันธุ์	43.12	กิโลกรัม
เปลือกมัน	1,076.00	กิโลกรัม
มูลไก่	258.00	กิโลกรัม
ปุ๋ยไนโตรเจน	1.25	กิโลกรัม
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	0.70	กิโลกรัม
ปุ๋ยโพแทสเซียม	1.34	กิโลกรัม
ดีเซล	2.48	กิโลกรัม
สังกะสี	0.09	กิโลกรัม
อลาคลอร์	0.10	กิโลกรัม
พาราควอท	0.15	กิโลกรัม
ไกลโฟเสท	0.29	กิโลกรัม
พื้นที่เพาะปลูก	438.12	ตร.ม.
สารขาออก		
หัวมันสำปะหลัง	1,000.00	กิโลกรัม
ลำต้น	436.00	กิโลกรัม
เศษมันสำปะหลัง	555.05	กิโลกรัม
คาร์บอนไดออกไซด์	8.32	กิโลกรัม
ไนโตรเจนออกไซด์	0.17	กิโลกรัม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.01	กิโลกรัม
ไนตรัสออกไซด์	0.04	กิโลกรัม
แอมโมเนีย	0.26	กิโลกรัม
ของแข็งระเหยได้ (VOC)	0.06	กิโลกรัม

ที่มา: สู่ (2552)

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลบัญชีรายการการผลิตแป้งมันสำปะหลัง (1,000 กิโลกรัม)

หัวข้อ	จำนวน	หน่วย
สารขาเข้า		
หัวมันสำปะหลัง	4,803.10	กิโลกรัม
กำมะถัน	0.95	กิโลกรัม
น้ำ	12,435.76	กิโลกรัม
น้ำมันเตา	34.50	ลิตร
ไฟฟ้า	176.77	กิโลวัตต์
สารขาออก		
แป้งมันสำปะหลัง	1,000	กิโลกรัม
เปลือกแห้ง	135.99	กิโลกรัม
เหง้า	68.224	กิโลกรัม
กากมันสำปะหลัง	1,457.27	กิโลกรัม
ทราย	20	กิโลกรัม
เศษแป้งสูญเสีย	121.58	กิโลกรัม
คาร์บอนไดออกไซด์	61.53	กิโลกรัม
ไนโตรเจนออกไซด์	0.25	กิโลกรัม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.33	กิโลกรัม
ไอน้ำ	212.64	กิโลกรัม
น้ำเสีย	13,664.65	กิโลกรัม
บีโอดี	127.57	กิโลกรัม
ซีโอดี	265.13	กิโลกรัม
ไนโตรเจนทั้งหมด	6.50	กิโลกรัม
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	0.40	กิโลกรัม
ของแข็งแขวนลอย	90.05	กิโลกรัม

ที่มา: สุธี (2552)

ตารางผนวกที่ 4 ระยะทางเฉลี่ยจากแหล่งเพาะปลูกข้าวโพดในประเทศไทย ไปยังการผลิต
เม็ดพอลิแลกติกแอซิดที่จังหวัดระยอง

จังหวัด	ผลผลิต ปี 2554 (ตัน/ปี)	ระยะทาง (กิโลเมตร)
นครสวรรค์	195,330	419
เพชรบูรณ์	667,370	525
เลย	354,960	699
นครราชสีมา	536,280	345
ลพบุรี	183,930	332
ผลผลิตรวม	1,937,870	
ระยะทางเฉลี่ย (กิโลเมตร)		480.49

ตารางผนวกที่ 5 ระยะทางเฉลี่ยจากการผลิตแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย ไปยังการผลิต
กล่องที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและนครปฐม

จังหวัด	ผลผลิต ปี 2554 (ตัน/ปี)	ระยะทาง (กิโลเมตร)
กำแพงเพชร	409,317	386
ชัยภูมิ	276,549	370
นครราชสีมา	1,288,578	287
ฉะเชิงเทรา	229,763	110
สระแก้ว	288,150	265
ชลบุรี	248,304	109
ผลผลิตรวม	2,740,661	
ระยะทางเฉลี่ย (กิโลเมตร)		251.48

ตารางผนวกที่ 6 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้ง

วัตถุดิบ	แหล่งที่มา – ป้ายทาง	การขนส่ง	ระยะทาง (กิโลเมตร)
เมล็ดข้าวโพด	ภายในจังหวัดเดียวกันและใกล้เคียง	รถบรรทุก	20.7*
ท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง	ภายในจังหวัดเดียวกันและใกล้เคียง	รถบรรทุก	20.7*
ข้าวโพด	แหล่งเพาะปลูกข้าวโพด – ระยอง	รถบรรทุก	480.49
มันสำปะหลัง	ภายในจังหวัดเดียวกันและใกล้เคียง	รถบรรทุก	20.7*
แป้งมันสำปะหลัง	โรงงานแป้งมันสำปะหลัง – กรุงเทพฯ/นครปฐม	รถบรรทุก	251.48
เม็ดพอลิแลกติกแอซิด	ระยอง – กรุงเทพฯ/นครปฐม	รถบรรทุก	207

หมายเหตุ: * กำหนดระยะทางการขนส่งให้ระยะทางภายในจังหวัดเดียวกันและใกล้เคียงเท่ากับ 20.7 กิโลเมตร

ตารางผนวกที่ 7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกล่องพอลิแลกติกแอซิดผสมแป้งที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิธีการฝังกลบที่ระยะเวลา 10 เดือน

% weight change month	PLA/starch (70/30)	PLA/starch (50/50)	PLA/starch (30/70)
0	0	0	0
3	-46.45	-55.24	-79.02
4	-42.88	-91.12	-97.16
6	-88.09	-80.88	-96.75
8	-97.98	-93.53	-99.29
10	-99.81	-99.95	-100.00

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาว เมทินี แสพนมณีชัย
เกิดวันที่	23 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ระดับอุดมศึกษา วท.บ. (เทคโนโลยีทางกระบวนการเคมีและฟิสิกส์) คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บธ.บ. (การจัดการทั่วไป) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา