

ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคฟлексผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์  
และแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตรกรรม

BIODEGRADABLE PLASTIC FILM FROM BLENDS OF ECOFLEX®/ESTER  
MODIFIED STARCH AND ECOFLEX®/PREGEL STARCH  
FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS

อัจฉราพร รักษามณี

ACHARAPORN RATANAMANEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-014-005

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคฟлексผสมแป้งดัดแปรเอสเทอร์  
และแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตรกรรม

BIODEGRADABLE PLASTIC FILM FROM BLENDS OF ECOFLEX®/ESTER  
MODIFIED STARCH AND ECOFLEX®/PREGEL STARCH  
FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



อจรรพร รัตนมณี

ACHARAPORN RATANAMANEE

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 95674  
วัน,เดือน,ปี..... 27 พ.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-014-005

**BIODEGRADABLE PLASTIC FILM FROM BLENDS OF ECOFLEX<sup>®</sup>/ESTER  
MODIFIED STARCH AND ECOFLEX<sup>®</sup>/PREGEL STARCH  
FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS**

**ACHARAPORN RATANAMANEE**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2009  
KMITL-2009-SC-M-014-005**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคฟлексผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์และแป้งพรีเจลสำหรับ  
งานเกษตรกรรม  
Biodegradable Plastic Film from Blends of Ecoflex<sup>®</sup> /Ester Modified Starch and Ecoflex<sup>®</sup>  
/Pregel Starch for Agricultural Applications





นักศึกษา                      นางสาวอัจฉราพร รัตนมณี

รหัสประจำตัว              49067901

ปริญญา                      วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                    เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภัทรารุช	มนตรีพิเศษ	
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มจักษ์	
ผศ.ดร.ชลลดา	ฤตวิรุพห์	
รศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	

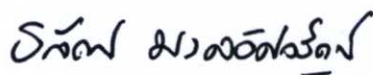
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 2 มีนาคม 2552 เวลา 09.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 12 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กซ์ผสมแป้งดัดแปรเอสเทอร์ และแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตรกรรม
นักศึกษา	นางสาวอัจฉราพร รัตนมณี
รหัสประจำตัว	49067901
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำแป้งสตาร์ชดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch, EMS) และแป้งสตาร์ชดัดแปรพรีเจล (Pregelatinized starch, PGS) นำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ คือ Ecoflex<sup>®</sup> เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและใช้เป็นฟิล์มสำหรับงานเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มคลุมดิน ถูเพาะชำ โดยผสมอัตราส่วนระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช 80:20, 70:30 และ 60:40 (โดยน้ำหนัก) และใช้ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ คือ กลีเซอรอลเป็น 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า (Blown film extrusion) โดยศึกษาปริมาณส่วนผสมของ Ecoflex<sup>®</sup> แป้งสตาร์ชและกลีเซอรอล จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา ดัชนีการหลอมไหล และการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม จากนั้นทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตจริง โดยการเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมแป้งสตาร์ชลงไป ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดของ Ecoflex<sup>®</sup> ลดลง เมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติด้านทนแรงดึงลดลง โดยสูตร Ecoflex<sup>®</sup>/PGS สูตร 80:20 มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงฉีกขาดและมอดูลัสสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น และ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS จากสันฐานวิทยาจะเห็นว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS และ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS เม็ดแป้งสตาร์ชกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในวัฏภาคของ Ecoflex<sup>®</sup> แต่ PGS ผสมเป็นเนื้อเดียวกับ Ecoflex<sup>®</sup> ได้ดีกว่า จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่า การเติมแป้งสตาร์ชลงใน Ecoflex<sup>®</sup> ไม่ส่งผลต่อค่า  $T_g$ ,  $T_m$  และ  $T_d$  แต่ร้อยละความเป็นผลึกของ Ecoflex<sup>®</sup> ลดลง จากผลการศึกษาสมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนพบว่าเมื่อปริมาณการเติมแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนค่าการซึม

ผ่านก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดย Ecoflex®/PGS มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า เนื่องจาก Ecoflex®/PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีและมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่น้อยกว่า และจากการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ Ecoflex® ผสมแป้งสตาร์ชมีค่าการดูดซับน้ำ และความสามารถในการย่อยสลายมากกว่า Ecoflex® บริสุทธิ์ โดยที่ Ecoflex®/PGS ดูดซับน้ำและย่อยสลายได้ดีกว่า Ecoflex®/EMS

จากการนำฟิล์มไปขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ พบว่า สามารถเป่าขึ้นรูปได้ โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 50-80 ไมครอน สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เป่าได้มีค่าเพิ่มขึ้นเทียบกับฟิล์มที่ขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากใช้อัตราส่วนเป่า (Blow-up ratio) สูงกว่า การผสมแป้งสตาร์ชในวัสดุสามารถช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ถึง 20-40% เทียบกับ Ecoflex® บริสุทธิ์ จึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มทางการเกษตรที่มีความหนาในช่วง 50-80 ไมครอน เช่น ถุงเพาะชำต้นไม้ ฯลฯ

<b>Thesis</b>	Biodegradable Plastic Film from Blends of Ecoflex <sup>®</sup> /Ester Modified Starch and Ecoflex <sup>®</sup> /Pregel Starch for Agricultural Applications
<b>Student</b>	Miss Acharaporn Ratanamane
<b>Student ID.</b>	49067901
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud

### ABSTRACT

In this research work, degradable bioplastics made from ester modified starch (EMS) and Pregelatinized starch (PGS) mixed with Ecoflex<sup>®</sup> were studied for cost reduction and used as film in agricultural applications, e.g., mulch film and nursery bag. Ecoflex<sup>®</sup> and EMS were mixed in different ratios (wt/wt), i.e., 80:20, 70:30 and 60:40. A plasticizer, glycerol, was added to the mixture at %loading of 50% (by wt of starch). The blends were prepared by using twin-screw extrusion and blown film extrusion techniques. Mechanical, physical, thermal, morphological, melt flow index (MFI), rheology and biodegradable properties were characterized. Some compound formulae were also selected to study for possible commercial production by using commercial blown film extruder. It was found that addition of the starch caused decreasing in tensile strength, Young's modulus and tear strength of Ecoflex<sup>®</sup>. The higher %starch loading, the lower the mechanical properties. The blend film at 80:20 Ecoflex<sup>®</sup>/PGS showed higher tensile strength, Young's modulus and tear strength compared to others. Mechanical properties of Ecoflex<sup>®</sup>/PGS blends were higher than those of Ecoflex<sup>®</sup>/EMS blends. From SEM results, it was reviewed that starch particles were dispersed well in Ecoflex<sup>®</sup> matrix. However, pregelatinized starch seemed to blend homogeneously with Ecoflex<sup>®</sup>. Thermal properties were studied by DSC and TGA. It was found that  $T_g$ ,  $T_m$  and  $T_d$  of the Ecoflex<sup>®</sup> were insignificantly changed when each starch was added. However %crystallinity of Ecoflex<sup>®</sup> was lower as the %starch loading was increased. Water vapor (WVP) and oxygen permeability (OP) of the blend film were increased when increasing starch loading. WVP was increased significantly whereas OP was slightly increased. WVP and OP of Ecoflex<sup>®</sup>/PGS blend were lower than those of

the Ecoflex<sup>®</sup>/EMS blend. From water absorption and burial test, it was proven that the Ecoflex<sup>®</sup>/starch had much higher % water absorption and biodegradability compared with the neat Ecoflex<sup>®</sup>. Ecoflex<sup>®</sup>/PGS seemed to have higher %water absorption and biodegradability than Ecoflex<sup>®</sup>/EMS.

In the test for possibility of commercial blown film process, it was found that thin film of the Ecoflex<sup>®</sup>/starch can be blown by the commercial extruder resulting in the film with thickness of 50-80 µm. Mechanical properties of the commercial film were slightly higher than the film produced by the laboratory machine due to the higher blow-up ratio. In conclusion, addition of the starch can reduce the material cost about 20-40%. Therefore, the results from this work are promising materials with high potential for commercial production especially thick agricultural film, such as 50 µm nursery bag.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆในการทำงานวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ คุณพิชัย ชูเอกวงษ์ และบริษัท วัลย์ศิพาศิษย์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนทางด้านทุนวิจัย รวมทั้งกรุณาเป็นธุระจัดหาไอโคเพล็กซ์ให้อีกด้วย

ขอขอบคุณสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนแก่งานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. และคุณสุชาวดี สูงสุมาลย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งสตาร์ชคัดแปรเอสเทอร์และแป้งสตาร์ชคัดแปรฟรีเจล

ขอขอบคุณคุณวุฒิ เตชะเกษมบัณฑิตย์ คุณสถาปติย์ อารานิ และบริษัท Mettler Toledo Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (DSC และ TGA) ตลอดจนคำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อนุวัตร แจ่มชัด ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและบุคลากรภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณพี่วราภรณ์ พุทธิสสะ(พี่เปิ้ล)ที่ให้คำแนะนำและคอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาในทุกๆเรื่อง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องๆ และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน คอยลุ้นและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อัจฉราพร รัตนมณี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.2 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.1.3 ระเบียบและนโยบายเพื่อนำไปสู่การใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้.....	7
2.1.4 สถานการณ์โลกในปัจจุบันด้านพลาสติกชีวภาพ.....	9
2.2 อีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex®).....	11
2.2.1 สมบัติและลักษณะทั่วไป.....	11
2.2.2 การใช้งาน.....	12
2.2.3 การย่อยสลาย.....	12
2.3 แป้ง.....	13
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง.....	13
2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	14
2.3.4 แป้งมันสำปะหลัง.....	20
2.3.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	21
2.3.6 แป้งคัดแปร.....	22
2.3.7 การคัดแปรแป้งทางเคมี.....	23
2.3.8 แป้งเอสเทอร์.....	24
2.3.9 แป้งอะซิเตด.....	25
2.3.10 แป้งฟรีเจล.....	26
2.3.11 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ.....	29
2.4 การย่อยสลายของแป้ง.....	29
2.4.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา.....	29
2.4.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์.....	30
2.5 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า.....	30
2.6 พลาสติกเพื่อการเกษตร.....	31
2.6.1 นิยามและความหมาย.....	31
2.6.2 สถานภาพปัจจุบัน.....	32
2.6.3 การใช้งาน.....	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.3.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม.....	43
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	43
3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	50
ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ.....	50
4.1 ลัคนฐานวิทยา.....	51
4.2 สมบัติเชิงกล.....	57
4.3 ความแข็งแรงของรอยขีด.....	60
4.4 สมบัติทางความร้อน.....	62
4.4.1 Differential scanning calorimetry.....	62
4.4.2 Thermogravimetric analysis.....	63
4.5 สมบัติทางกายภาพ.....	64
4.5.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ.....	64
4.5.2 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ.....	65
4.5.3 สมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	66
4.6 การฝังดิน.....	67
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ.....	74
ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก ก. สมบัติเชิงกล.....	88
ภาคผนวก ข. สมบัติทางความร้อน.....	90
ภาคผนวก ค. สมบัติทางกายภาพ.....	99
ภาคผนวก ง. ราคาต้นทุน.....	101
ภาคผนวก จ. ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติก โพลีเอทิลีนสำหรับ งานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน มอก.711-2530.....	102
ภาคผนวก ฉ. สมบัติเบื้องต้นบางประการของการคอมพาวด์ก่อนการขึ้นรูป.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	104

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไม โลสและอะไม โลเพกติน.....	16
2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะไม โลส.....	18
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป.....	21
2.4 พลาสติกคลุมดิน.....	33
2.5 การใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆในการคลุมดิน.....	34
2.6 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการคลุมดิน.....	35
3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ทำการทดลอง.....	43
4.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุผสมและพลาสติกไซเซเซอร์ แสดงผลความสามารถในการ เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม.....	51
4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC.....	63
4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสูตร Ecoflex® /PGS (60:40).....	76
4.4 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม.....	77
ก-1 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดในทิศ MD และTD (ตอนที่ 1).....	88
ก-2 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดในทิศ MD และTD (ตอนที่ 2).....	89
ก-3 ค่าความแข็งแรงของรอยขีด.....	89
ข-1 ปริมาณแป้งสตาร์ชที่แน่นอนในพอลิเมอร์สูตรต่างๆ.....	98
ค-1 ปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ Ecoflex® /แป้งสตาร์ช.....	99
ค-2 การค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม.....	99
ค-3 การค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน.....	100
ง ราคาต้นทุนวัตถุดิบ.....	101
จ ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติกโพลิเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน มอก. 711-2530.....	102
ฉ สมบัติ MFI ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	103

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างฟิล์มทางการเกษตร.....	2
2.1 วัฏจักรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.2 ตัวอย่างสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่าบรรจุภัณฑ์สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.3 กำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพในโลกแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบ.....	10
2.4 โครงสร้างของ Ecoflex® .....	12
2.5 กราฟแสดงปริมาณการย่อยสลายของ Ecoflex® .....	12
2.6 วัฏจักรแคลวิน.....	14
2.7 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน.....	15
2.8 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งมันฝรั่ง.....	16
2.9 โครงสร้างของอะไมโลส.....	17
2.10 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส.....	19
2.11 โครงสร้างอะไมโลเพกติน.....	19
2.12 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน.....	20
2.13 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในตลาดโลก.....	20
2.14 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	22
2.15 ปฏิกริยาระหว่างแป้งกับอะซิติคแอนไฮไดรด์.....	25
2.16 ปฏิกริยาระหว่างแป้งกับไวนิลอะซิเตด.....	26
2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน.....	27
2.18 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์.....	28
2.19 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	31
3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง.....	45
3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงแรงฉีกขาด.....	46
3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยขีด.....	46
3.4 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ.....	48
3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน.....	48
4.1 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ชที่กำลังขยาย 100X .....	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ชที่กำลังขยาย 500X .....	52
4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS สูตร 80:20.....	54
4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS สูตร 70:30.....	54
4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS สูตร 60:40.....	55
4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS สูตร 80:20.....	55
4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS สูตร 70:30.....	56
4.8 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS สูตร 60:40.....	56
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ..	58
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม ที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่าง.....	59
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ.....	59
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงนิกขาดของพอลิเมอร์ผสม ที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ.....	60
4.13 ภาพแสดงการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน.....	61
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยขีดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ แป้งสตาร์ชต่างๆ.....	61
4.15 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบริเวณที่ทำการ Seal หลังจากการทดสอบ ความแข็งแรงของรอยขีด.....	62
4.16 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> , แป้งสตาร์ช และพอลิเมอร์สูตรต่างๆ.....	63
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ Ecoflex <sup>®</sup> /แป้งสตาร์ช กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น.....	65
4.18 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ.....	66
4.19 ค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OP) ของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ.....	67
4.20 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ Ecoflex <sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช.....	68
4.21 ภาพแสดงการย่อยสลายของ Ecoflex <sup>®</sup> (โดยกระบวนการคอมโพสท์ (Composting) ที่อุณหภูมิ 55 °C).....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน.....	70
4.23 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน.....	70
4.24 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7.....	71
4.25 กราฟแสดงราคาค้นทุนที่ลดได้ในสูตรต่างๆ.....	75
4.26 ภาพแสดงการขึ้นรูปที่บริษัทวัลย์ดี พาณิชยอุตสาหกรรม จำกัด.....	78
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ แป้งสตาร์ชต่างๆ.....	79
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ.....	79
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ.....	80
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ.....	80
ท-1 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> .....	90
ท-2 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20).....	90
ท-3 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30).....	91
ท-4 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40).....	91
ท-5 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20).....	92
ท-6 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30).....	92
ท-7 DSC thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40).....	93
ท-8 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> .....	93
ท-9 TGA thermogram ของ EMS.....	94
ท-10 TGA thermogram ของ PGS.....	94
ท-11 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20).....	95
ท-12 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30).....	95
ท-13 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40).....	96
ท-14 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20).....	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-15 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30).....	97
ข-16 TGA thermogram ของ Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40).....	97
ข-17 TGA thermogram ของกึ่งซีออโรล.....	98

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Ecoflex <sup>®</sup>	หมายถึง อีโคเฟล็กซ์
EMS	หมายถึง สตาร์ชดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch)
PGS	หมายถึง สตาร์ชดัดแปรพรีเจล (Pregelatinized starch)
Ecoflex <sup>®</sup> /Starch	หมายถึง พอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex <sup>®</sup> และสตาร์ชทั้งสองชนิด (EMS และ PGS)
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS	หมายถึง พอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex <sup>®</sup> และสตาร์ชดัดแปรเอสเทอร์
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS	หมายถึง พอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex <sup>®</sup> และสตาร์ชดัดแปรพรีเจล
SEM	หมายถึง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
DSC	หมายถึง Differential scanning calorimetry
TGA	หมายถึง Thermogravimetric analysis
MFI	หมายถึง ค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI)
DS	หมายถึง องศาการแทนที่ (Degree of substitution)
php	หมายถึง ส่วนต่อร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (Part per hundred of polymer)
%wt	หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Percent weight)
WVTR	หมายถึง อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate)
WVP	หมายถึง การซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)
OTR	หมายถึง อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas transmission rate)
OP	หมายถึง การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลาสติก (Plastic) เป็นวัสดุที่มีสมบัติหลากหลายตรงตามความต้องการของสังคมในปัจจุบัน เช่น ความแข็งแรง ความอ่อนหยุ่นได้ ความใสหรือความขุ่นตามความต้องการ นอกจากนี้พลาสติกยังเป็นวัสดุที่นำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ใช้พลังงานน้อย และสามารถขึ้นรูปเป็นรูปต่างๆได้ตามความต้องการ ดังนั้นพลาสติกจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น

เนื่องจากการใช้พลาสติกเป็นจำนวนมากจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆตามมา เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เสื่อมสภาพหรือทำลายได้ยากในสภาวะแวดล้อม และพลาสติกมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ทำให้การกำจัดขยะที่เกิดจากพลาสติกทำได้ยาก

พลาสติกที่ใช้แล้วมักถูกกล่าวถึงทางด้านลบว่าเป็นสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากสมบัติที่ดีของพลาสติก โดยเฉพาะต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ และสมบัติที่หลากหลายของพลาสติกที่สามารถดัดแปลงได้เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท ประกอบกับความต้องการใช้พลาสติกที่เพิ่มในอัตราสูง ดังนั้นจึงเกิดพลาสติกที่ใช้แล้วเป็นจำนวนมาก เป็นสาเหตุของสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ท่อน้ำอุดตัน แม่น้ำลำคลองตื้นเขิน และปริมาณขยะที่ล้นเมือง เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย ปัญหาด้านปริมาณขยะในภาพรวมยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณขยะเกิดขึ้นทั่วประเทศถึง 14.63 ล้านตัน [1] วิธีการหลักที่ใช้กำจัดขยะคือ การนำไปฝังกลบ โดยมีการนำกลับมารีไซเคิลเพียงร้อยละ 11% เท่านั้น [2]

แนวทางการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพอลิเมอร์ที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน [2] คือ

1. การลดการใช้ (Reduce)
2. การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse)
3. การรีไซเคิล (Recycle)

ซึ่งทั้ง 3 แนวทางนี้ จะส่งผลให้มีการยืดอายุการใช้งานของพอลิเมอร์ให้ยาวนาน และมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะส่งผลให้การผลิตพอลิเมอร์ใหม่ลดลง แต่ก็มีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวม ค่าขนส่ง และกระบวนการต่างๆอีกมากมาย จึงทำให้ปริมาณพลาสติกที่เหลือทิ้งมากขึ้น จนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้วิธีการอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้เพื่อจัดการกับวัสดุเหล่านี้ เช่น การฝังกลบ การเผา แต่ก็ก่อให้เกิดปัญหาอื่นตามมาอีก เช่น การปนเปื้อนของสารพิษลงสู่แหล่งน้ำ หรือการเกิดก๊าซจากการเผาไหม้ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

แนวทางหนึ่งในการลดปัญหาขยะพลาสติกคือ การใช้พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) ซึ่งเป็นพลาสติกยุคใหม่ที่เกิดขึ้นจากความห่วงใยและตระหนักกับปัญหาสิ่งแวดล้อมในโลกปัจจุบันและอนาคต

พลาสติกย่อยสลายได้ได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ.1960 (พ.ศ. 2503) ด้วยแนวคิดว่าจะเป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางและประมาณ 15% ขยะในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ พลาสติกที่ถูกทิ้งในสิ่งแวดล้อมจะสลายตัวได้จากรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งได้จากดวงอาทิตย์ หรือจุลินทรีย์ในดิน โดยมีความร้อน ออกซิเจน ความชื้นช่วยเร่งการสลายตัว [3]

อย่างไรก็ตามการใช้พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ในปัจจุบันถือว่ายังจำกัดอยู่ในวงแคบ ซึ่งมีข้อจำกัดอยู่คือ มีราคาที่สูงกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะกับการใช้งาน

แป้ง (Starch) เป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีราคาถูก โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ซึ่งประเทศไทยจัดเป็นผู้ผลิตเป็นอันดับที่ 3 และเป็นประเทศผู้ส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก [4] ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดนำแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเอสเทอร์ (Ester Modified Starch; EMS) และแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรชนิดพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) นำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ คือ Ecoflex<sup>®</sup> เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและได้วัสดุที่สามารถที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีราคาถูกลงที่ผลิตได้ในประเทศไทย โดยเน้นการศึกษาเป็นฟิล์มทางการเกษตร เช่น ฟิล์มคลุมดิน (Mulch film), โรงเรือนพลาสติก (Plastic greenhouse)



(A)



(B)

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างฟิล์มทางการเกษตร (A) ฟิล์มคลุมดิน, (B) โรงเรือนพลาสติก [5]

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคฟлекс (Ecoflex<sup>®</sup>) ผสมแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรเอสเทอร์ (EMS) และแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรชนิดพรีเจล (PGS) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion)
2. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัมพันธวิทยาและความสามารถในการย่อยสลาย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของ Ecoflex<sup>®</sup> และสตาร์ช ที่จะนำมาทำการเป่าฟิล์มในห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาปริมาณของกลีเซอรอลที่เหมาะสม
3. ศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่
  - สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความแข็งแรงของรอยซีล (Seal strength)
  - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดน้ำ (Water absorption) สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) และสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate)
  - สมบัติทางความร้อนด้วย DSC, TGA
  - สัมพันธวิทยาด้วย SEM
  - ความสามารถในการย่อยสลาย
  - ดัชนีการหลอมไหล ((Melt Flow Index; MFI)
4. เลือกสูตรที่เหมาะสม แล้วนำไปทดสอบขึ้นรูปจริงในระดับอุตสาหกรรม แล้วทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมของ Ecoflex<sup>®</sup>, แป้งสตาร์ชและกลีเซอรอล ที่จะสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์มได้
2. ได้ฟิล์มที่มีสมบัติต่างๆที่ดี เหมาะจะนำไปใช้งานทางด้านเกษตรกรรมได้

3. สามารถผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ในประเทศที่มีราคาถูกลง และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคต
4. ส่งเสริมการนำแป้งมันสำปะหลังไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้กว้างขึ้น
5. เป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขยะและที่เกิดจากการกำจัดขยะพลาสติก

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์และนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลกให้ความสนใจในพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ โดยเฉพาะพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ทั้งนี้ พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบทั่วไป (Commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ [6]

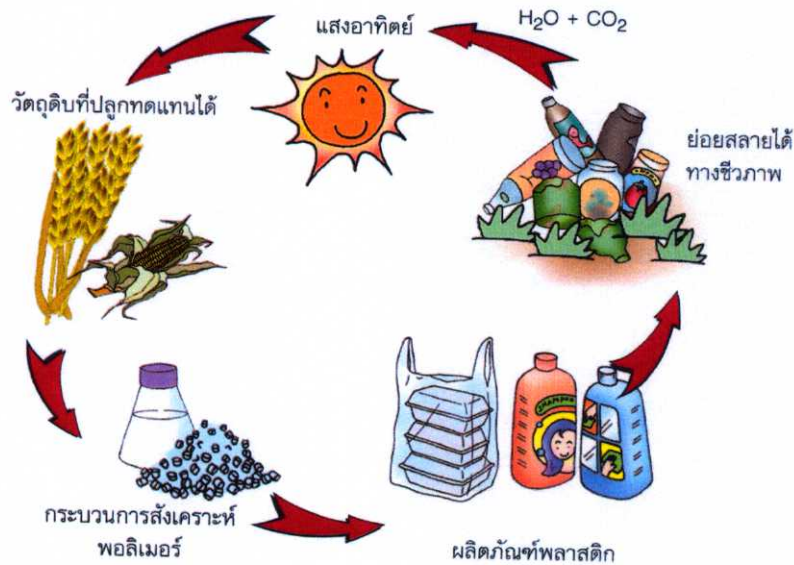
พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมา เพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ พลาสติกย่อยสลายได้ได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ. 1960 [3] ด้วยแนวคิดว่าจะเป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง ประมาณ 15% [3] ของขยะในอเมริกาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมางานวิจัยด้านนี้มีเพิ่มมากขึ้น โดยในระยะแรกงานวิจัยมักมุ่งเน้นการใช้งานทางการแพทย์ เช่น การสังเคราะห์ไหมละลายและการเกษตร เช่น แผ่นฟิล์มคลุมหน้าดิน หรือถุงสำหรับเพาะชำกล้าไม้ American Society for Testing and Materials (ASTM) [3] ได้ให้ความหมายพลาสติกย่อยสลายได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากการสูญเสียสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

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

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้

โดยจุลินทรีย์ โดยที่สภาพแวดล้อมและอัตราการย่อยสลาย จะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ การคอมโพสท์ (Composting)

ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch-based polymers) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทพอลิเอสเทอร์ (Biodegradable polyester) เช่น PHA- polyhydroxyalkanoate, PHB- polyhydroxybutyrate, PHH- polyhydroxyhexanoate, PHV- polyhydroxyvalerate, PLA- polylactic acid และ PCL- polycaprolactone นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ย่อยสลายได้อื่นๆ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics) พอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มีสมบัติควบคุมการย่อยสลาย (Controlled degradation additive masterbatches) เพื่อให้พอลิเมอร์มีขนาดโมเลกุลเหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่อไป

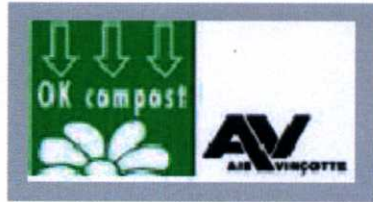


รูปที่ 2.1 วัฏจักรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้ [2]

### 2.1.2 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% [3] โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมจะต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และ

จะต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ เมื่อตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น OK compost ของประเทศเบลเยียม Compostable DIN CERTCO ของประเทศเยอรมนี Compostable ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ PBS GreenPla ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น [3]



(a)



(b)



(c)

**รูปที่ 2.2** ตัวอย่างสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่าบรรจุภัณฑ์สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

(a) ประเทศเบลเยียม (b) ประเทศเยอรมนี และ (c) ประเทศญี่ปุ่น [2]

### 2.1.3 ระเบียบและนโยบายเพื่อนำไปสู่การใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้

สหภาพยุโรปได้จัดทำแผนด้านการจัดการขยะ (EU Waste Management Strategy (COM (96) 399)) เพื่อช่วยลดปัญหาด้านสภาวะแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะ โดยกำหนดให้มีการปรับสภาพขยะเพื่อไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาวะแวดล้อมและมีข้อกำหนดต่างๆ เป็นเครื่องมือสำหรับ

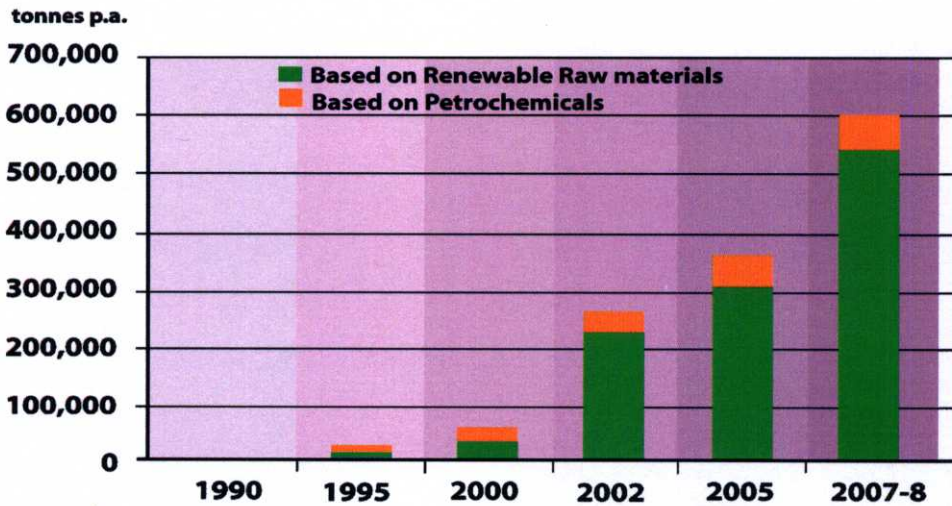
ควบคุมปริมาณและการจัดการขยะ เช่น Packaging and Packaging Waste Directive 94/62/EC Landfill Directive 99/31/EC Sewage Sludge Directive 86/278/EEC the Organic Farming Regulation (EEC) No. 2092/91 และ The Eco-label for Soil Improvers and Growing Media (Commission Decision 2001/688/EC) เป็นต้น โดยได้กำหนดแนวทางสำหรับการกำจัดขยะที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อช่วยลดปัญหาด้านสภาวะแวดล้อม ส่งผลต่อการจัดการและการพัฒนาแบบยั่งยืนของประเทศ โดยส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมหลายด้าน เช่น ลดผลกระทบจากสภาวะก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากขยะย่อยสลายได้ทางชีวภาพหากถูกกำจัดโดยการทิ้งในบ่อฝังกลบ อาจเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเกิดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การนำขยะที่ย่อยสลายได้ เช่น ขยะอินทรีย์ และพลาสติกย่อยสลายได้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ผ่านกระบวนการคอมโพสท์ (Composting) สามารถนำคอมโพสท์ที่หมักได้มาใช้ในการผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อใช้ในทางด้านเกษตร ปัจจุบันกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรปได้ให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณขยะอินทรีย์ที่จะถูกส่งไปกำจัดยังบ่อฝังกลบ การเกิดทะเลทรายและการกัดกร่อนของผิวดิน รวมถึงการควบคุมการใช้สารเคมีและการเพาะปลูกอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลให้มีอินทรีย์สารในดินลดลง

ตัวอย่างนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมและมาตรการของประเทศต่างๆ ที่มุ่งลดปริมาณการบริโภคบรรจุภัณฑ์ลง เช่น เมืองฟลอเรนซ์ ประเทศอิตาลี มีการห้ามซื้อขายภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากพลาสติกที่ไม่ย่อยสลาย ประเทศเดนมาร์กประกาศห้ามใช้ภาชนะบรรจุเครื่องดื่มที่ทำจากพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ประเทศนอร์เวย์ได้มีความพยายามลดปริมาณการใช้พลาสติกโดยให้ร้านค้าต่างๆ เริ่มเก็บเงินค่าถุงพลาสติกจากผู้บริโภค รัฐบาลของแอฟริกาใต้ประกาศให้ผู้ผลิตผลิตถุงพลาสติกที่มีความหนา ทนทาน และมีราคาสูงมากขึ้น เพื่อให้มีการใช้งานที่น้อยลง ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดการใช้งานลงถึง 90% ประเทศไอร์แลนด์ได้จัดให้มีการเรียกเก็บภาษี 15 เซนต์ต่อถุง 1 ใบ เริ่มใช้ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2545 ซึ่งทำให้เกิดการลดปริมาณการใช้ถุงลง 95% เมือง Ladakh ประเทศอินเดียประสบความสำเร็จในการรณรงค์การใช้ถุงพลาสติกภายในจังหวัด และได้กำหนดวันที่ 1 พฤษภาคมของทุกปี เป็นวันประกาศห้ามใช้พลาสติก (Plastic ban day) โอลิมปิกเกมส์ที่เมืองซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2543 ได้ใช้ภาชนะและถุงที่ทำจากพลาสติกย่อยสลายได้ และทำการเก็บรวบรวมขยะอินทรีย์ได้ 75% ของเศษขยะอาหารที่เกิดขึ้นในสถานแข่งขันและที่พักนักกีฬาทั้งหมด เพื่อนำมาคอมโพสท์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการคัดแยกขยะที่เป็นบรรจุภัณฑ์ออกก่อนทิ้งและประกาศห้ามใช้มาตรการจัดการขยะพลาสติกประกอบด้วย ความร่วมมือของผู้บริโภค (ต่อต้านการทิ้งรีไซเคิล) มาตรการของความร่วมมือและออกกฎหมายเพื่อใช้ในการปรับคนที่ทิ้งขยะรีไซเคิล เป็นจำนวนเงิน 60-4000 เหยี่ยวออสเตรเลีย นอกจากนี้ร้านค้าต่างๆ เช่น บริษัท IKEA และบริษัท ALDI เริ่มเก็บเงินเพิ่ม (10-15 เซนต์) สำหรับลูกค้าที่ต้องการใช้ถุงพลาสติกของทางร้าน ในประเทศฝรั่งเศส การประชุมสภาสมัชชาได้ข้อสรุปในวันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2548 อย่างเป็นทางการในการออกร่างกฎหมาย (Legislation) ห้ามการขายในแจกจ่าย

ถุงพลาสติกทุกประเภท ซึ่งจะเริ่มใช้ในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2553 ยกเว้นถ้าผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ปัจจุบันอยู่ในความเห็นชอบของวุฒิสภา มีการเคลื่อนไหวในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำนวนมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ตัวอย่างเช่น รัฐ 11 รัฐ ได้ออกกฎหมายในการสนับสนุนตลาดผลิตภัณฑ์รักษาสิ่งแวดล้อมและหลายรัฐได้ออก Green report 1 และ 2 ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะในการประชาสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีสนธิสัญญา MARPOL ห้ามไม่ให้ทิ้งพลาสติกลงในทะเล ทั้งนี้การเคลื่อนไหวส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับพลาสติกย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และเริ่มมีการจัดเก็บ Bottle bills ค่าธรรมเนียม 5 เซนต์ สำหรับกระป๋องและขวดน้ำดื่ม ยกเว้น เครื่องดื่มประเภทนม และค่าธรรมเนียม 17 เซนต์สำหรับถุงใส่ของ และประเทศแคนาดามีการจัด “โครงการถือถุงมาเองที่ร้านค้า” เป็นต้น [6]

#### 2.1.4 สถานการณ์โลกในปัจจุบันด้านพลาสติกชีวภาพ

เมื่อพิจารณาความเป็นมาของรูปแบบธุรกิจของอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 จากการค้นคว้าทดลองด้านเทคโนโลยี งานวิจัย การทดสอบต่างๆเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพจนถึงการประสบความสำเร็จในการผลิตระดับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน จะเห็นว่า ส่วนแบ่งของการตลาดพลาสติกชีวภาพที่จะไปทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมีนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 2.3) โดยกำลังการผลิตในโลกในปี ค.ศ.2005 มีประมาณ 360000 ตัน คิดเป็นส่วนแบ่งตลาดประมาณร้อยละ 1 ของการใช้พลาสติกทั่วไป โดยในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 นอกจากนี้ยังเห็นได้จากจำนวนหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพ การมีการลงทะเบียนเป็นสมาชิกของสมาคมพลาสติกชีวภาพระหว่างประเทศ (IBAW-International biodegradable polymers association) ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจากการประมาณของการ IBAW ในปี ค.ศ.2005 แสดงให้เห็นถึงการบริโภคพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นถึงสามเท่าจากปี ค.ศ.2000 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ประเภทถุงขยะที่เป็นปุ๋ยหมักได้และโพนกันกระแทกที่ผลิตจากแป้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดที่ใหญ่ที่สุดในยุโรป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอังกฤษ อิตาลี และเนเธอร์แลนด์ ซึ่งมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการตลาดของพลาสติกชีวภาพอย่างรุดหน้า ดังเห็นได้จากการที่บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นพบได้ทั่วไปในหมวดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลาดหลักของบรรจุภัณฑ์ผัก ผลไม้ ตลอดจนผลิตภัณฑ์อเนกมัย โดยสามารถนำมาเป็นกรณีศึกษาถึงความสำเร็จในระยะเริ่มต้น [4]



รูปที่ 2.3 กำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพในโลแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบ [4]

ประเทศเยอรมนีเป็นตัวอย่างหนึ่งที่เราได้เห็นชัดถึงรูปแบบธุรกิจอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็กด้านพลาสติกชีวภาพอย่างก้าวกระโดด โดยเฉพาะด้านการพัฒนาเทคโนโลยีการผสมเม็ดพลาสติกชีวภาพกับสารเติมแต่งชีวภาพอื่นๆ (Compounding) เพื่อให้เม็ดพลาสติกชีวภาพสามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้นและมีสมบัติเชิงกลและกายภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ประเทศเยอรมนียังมีการผลักดันโครงสร้างพื้นฐานที่สนับสนุนการใช้พลาสติกชีวภาพโดยการออกมาตรการจากภาครัฐทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับชาติ โดยเฉพาะมาตรการด้านภาษี สำหรับพลาสติกที่ไม่ย่อยสลายเพื่อให้มีราคาที่สูงขึ้น อันเป็นการเอื้อให้พลาสติกชีวภาพอยู่ในราคาที่แข่งขันได้ในตลาด

ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่มีเทคโนโลยีขั้นหน้าที่แข็งแกร่ง ทำให้มีการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพ ประเภทต่างๆ เป็นอันดับหนึ่งของโลก เช่น บริษัท NatureWorks LLC ผลิต PLA ได้ 140000 ตัน (สถิติ ปี ค.ศ.2003) ซึ่งเมื่อเทียบกับการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ แล้ว นับว่าเป็นปริมาณสูงที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 90 ของส่วนแบ่งทางการตลาด สำหรับส่วนที่เหลือเป็นของ PBS PVA และพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ บริษัท Matabolix กำลังอยู่ในระหว่าง การพัฒนาการผลิต PHAs โดยวางแผนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมให้ได้ 50000 ตัน ภายในปี ค.ศ.2008

ประเทศญี่ปุ่นมีโรงงานนำร่องสำหรับการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพภายในประเทศ เช่น บริษัท Toyota สามารถผลิต PLA ในโรงงานระดับนำร่อง ขนาด 1000 ตันต่อปี ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปผลิตพลาสติกชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ บริษัท Mitsui Chemicals สามารถผลิต PLA แต่จากราคาที่ไม่สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายใหญ่ได้ โครงการนี้จึงยุติลง อย่างไรก็ตาม ประเทศญี่ปุ่นประสบความสำเร็จเป็นอย่างยิ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพโดยใช้เม็ดพลาสติก PLA ที่นำเข้าจากประเทศสหรัฐอเมริกามาต่อขยายด้วยเทคโนโลยีการผสมสารเติมแต่งหรือคอมเปาเวตโรงงานคอมเปาเวตขนาดใหญ่ของประเทศญี่ปุ่นได้แก่ บริษัท Unitika บริษัท Toray

บริษัท Mitsui Chemicals บริษัท Mitsubishi Plastics และบริษัท Kuraray ซึ่งมีคอมเปาวด์ที่ผลิตได้ทั้งหมดนี้มีจุดประสงค์เพื่อการใช้งานในประเทศ โดยนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ บริษัทธุรกิจหลัก เช่น Sony บริษัท Panasonic ต่างได้มีการริเริ่มใช้พลาสติกชีวภาพไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ บริษัท Toshiba บริษัท NEC บริษัท Fujitsu และบริษัท Seiko-Epson เริ่มนำไปผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และแผ่นซอฟต์แวร์ประเภทต่างๆ บริษัท Toyota บริษัท Mazda และบริษัท Mitsubishi Motor corp. เริ่มผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ ทั้งนี้มีปริมาณการบริโภคพลาสติกย่อยสลายได้ในประเทศญี่ปุ่นอยู่ในระดับ 15000-20000 ตัน/ปี

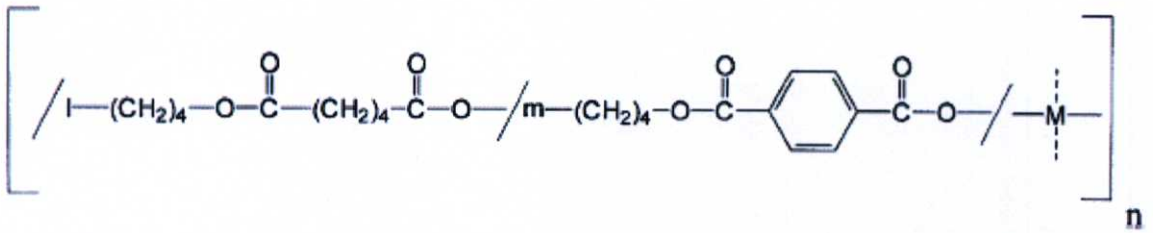
ประเทศจีนเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีรูปแบบธุรกิจด้านพลาสติกย่อยสลายได้อย่างก้าวกระโดด บริษัท B&G ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนระหว่างประเทศจีนและเบลเยียมเป็นผู้ผลิตกรดแลคติกที่มีกำลังผลิตเป็นอันดับ 2 ของโลก ซึ่งผลิตได้ 30000 ตัน/ปี บริษัท Tianan สามารถผลิต PHA ในเชิงพาณิชย์ได้ 1000 ตัน/ปี

ในขณะนี้บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพยังคงพัฒนาเม็ดพลาสติกชีวภาพหรือพอลิเมอร์ชนิดใหม่และสารประกอบคอมเปาวด์โดยมีเป้าหมายให้ผลิตได้โดยใช้วัตถุดิบชีวมวลและ/หรือมีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพและสามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้สารประกอบดังกล่าวอาจถูกพัฒนาโดยการผสมพลาสติกชีวภาพกับเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยจากปอ ลินิน กัญชา เชื้อไม้จากต้นยาคา (Sisal) [4]

## 2.2 อีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex®)

### 2.2.1 สมบัติและลักษณะทั่วไป

อีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex®) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ร่วมกันของแอลิเฟติกพอลิเอสเทอร์ ผลิตโดยบริษัท BASF Corporation ซึ่งมีสมบัติการย่อยสลายทางธรรมชาติกับอะโรแมติกพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีความแข็งแรงและทนความร้อน Ecoflex® จึงมีสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน เป็นพลาสติกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ ที่มีสมบัติเหมือนพลาสติกทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีนสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อลดต้นทุนได้ แต่ Ecoflex® มีข้อเสียเปรียบในเชิงการค้าบางประการ เช่น ในทางกฎหมายของบางประเทศ มีการแยกความแตกต่างระหว่างพลาสติกย่อยสลายได้ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถทดแทนใหม่ได้ (Renewable resource) เช่น PLA และ PHAs กับ Ecoflex® ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้วัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป ทำให้ในปัจจุบันการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ในบางประเทศต้องมีส่วนประกอบที่ใช้วัตถุดิบที่ปลูกหรือทดแทนใหม่ได้อย่างน้อย 50% ในการผลิตจึงมักนำมาผสมกับแป้ง เซลลูโลส หรือ PLA ในอัตราส่วนที่เหมาะสม



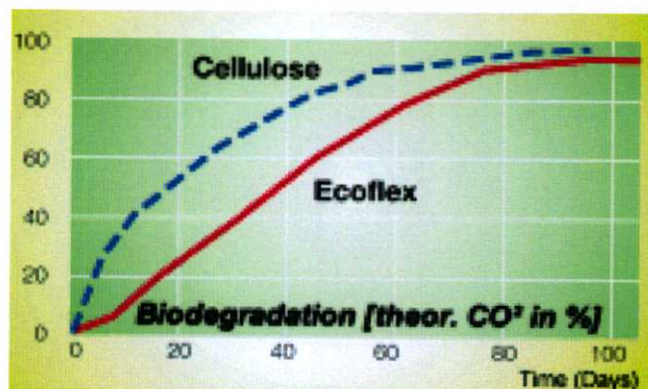
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ Ecoflex<sup>®</sup> (M คือ โมดูลาร์คอมโพเนนท์ (Modular components)) [7]

### 2.2.2 การใช้งาน

Ecoflex<sup>®</sup> ได้ถูกผลิตเป็นเกรดต่างๆ โดยการควบคุมปริมาณกิ่งสาขา และความยาวสายโซ่ เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานด้านต่างๆ Ecoflex<sup>®</sup> มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยเฉพาะเกรดเป่าฟิล์ม รวมทั้งมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานในรูปฟิล์มยืด (Cling film) เนื่องจากมีความใส และมีความยืดหยุ่น เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฟิล์มห่ออาหารผลไม้ และผัก

### 2.2.3 การย่อยสลาย

Ecoflex<sup>®</sup> สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ผลิตภัณฑ์คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ เป็นผลทำให้พลาสติกย่อยสลายได้จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภายใน 12 อาทิตย์ ซึ่งอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับความชื้น อุณหภูมิ พื้นที่ผิว และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อีกด้วย [6]



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงปริมาณการย่อยสลายของ Ecoflex<sup>®</sup> [8]

จากมาตรฐาน European standard EN 13432 ระบุว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงของวัสดุไปเป็นคาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon) อย่างน้อย 90% ภายใน 180 วัน จากการทดสอบ พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> เกิดการสลายตัวและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้มากกว่า

90% ในระยะเวลาเพียง 80 วันเท่านั้น โดยกราฟแสดงการย่อยสลายของ Ecoflex® แสดงดังรูป 2.5 [7]

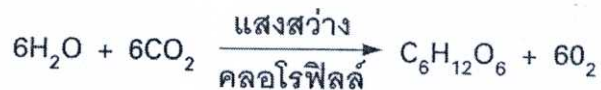
## 2.3 แป้ง

### 2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง [9]

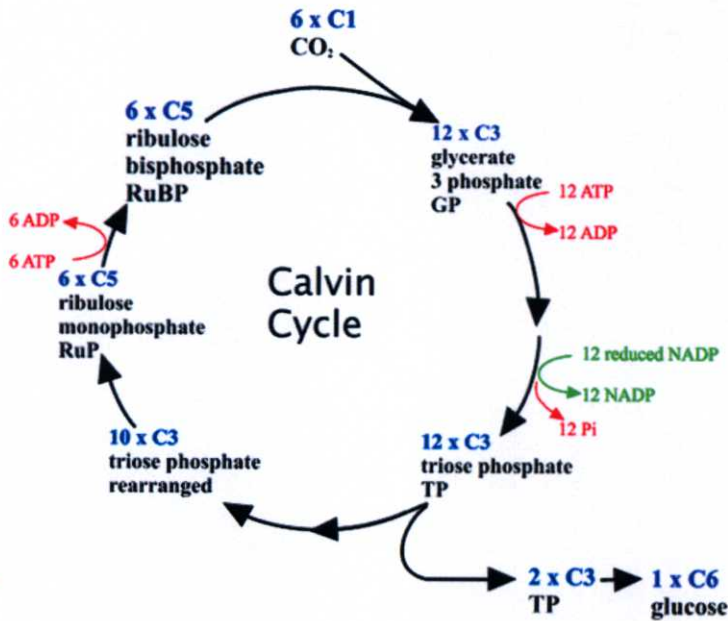
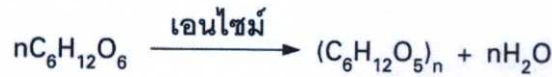
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิภาคในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือหรือกลางจะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย แอฟริกามีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลกคือแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและแป้งมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ องค์ประกอบหลักของอาหารทุกชนชาติส่วนใหญ่จะมีแป้ง เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า

### 2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรฟิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างกรดฟอสโฟกลีเซอริก (Phosphoglyceric acid; PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม PGA จะผ่านวัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่ายได้ดังนี้

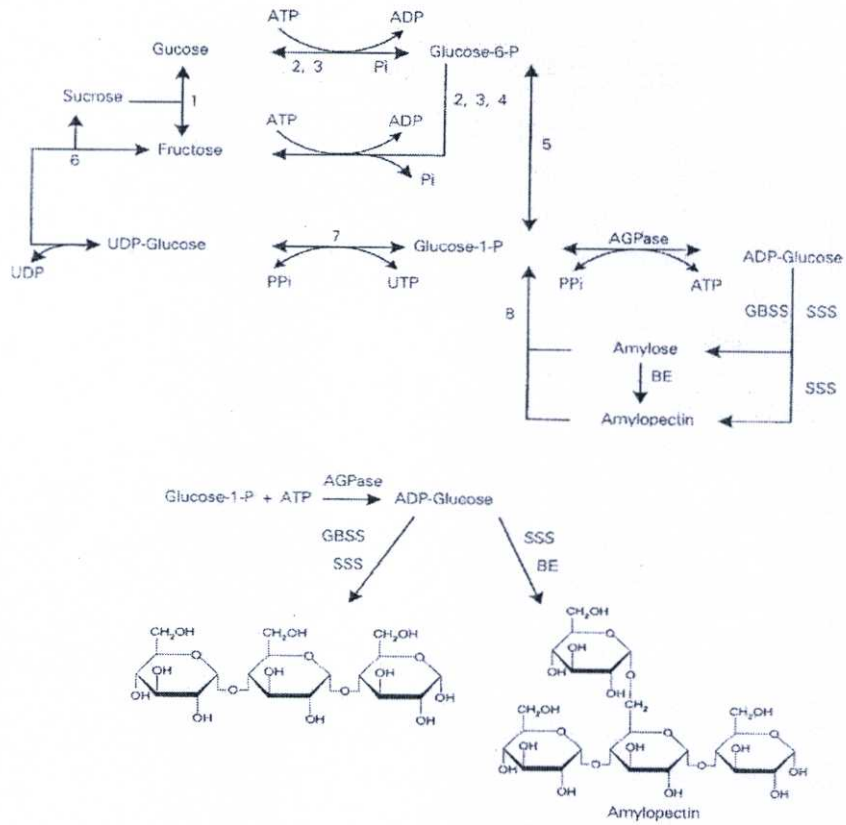


รูปที่ 2.6 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) [10]

ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้ง ขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมอยู่ในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันฝรั่ง มันเทศ หัวยาขม) เก็บไว้ในลำต้น (สาเก สับปะรด)

### 2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง

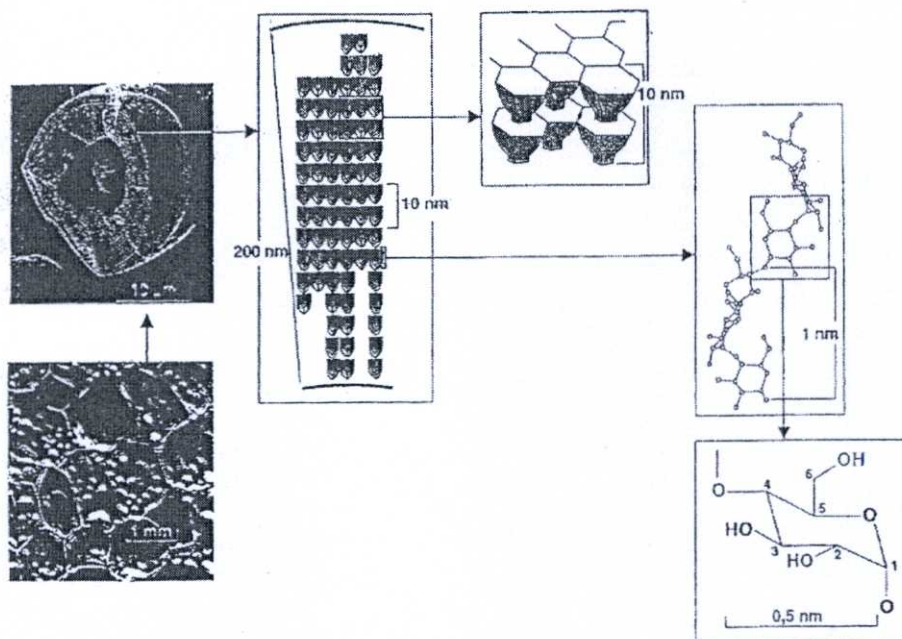
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง ดังรูปที่ 2.8 แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1 ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน [11]



รูปที่ 2.7 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน [9]

คำย่อ; AGPase: ADP-glucose pyrophosphorylase; G-1-P: glucose-1-phosphate; GBSS: granule-bound starch synthase; SSS:soluble starch synthase; BE:branching enzyme

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง; 1. invertase 2. hexokinase 3.hexose-6-phosphate 4.glucose-phosphate isomerase 5. phosphoglucomutase 6.sucrose synthase 7. UDP-glucose pyrophosphorylase 8.starch phosphorylase



รูปที่ 2.8 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งมันฝรั่ง [9]

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

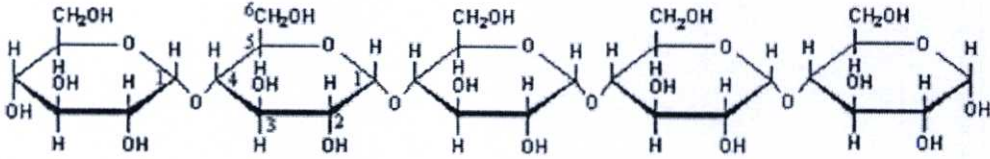
1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin)
3. สารมัธยันต์ (Intermediate material)

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [9]

คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha$ -1,4	$\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6
ขนาด	200-2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะ จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.3.3.1 อะไมเลส (Amylase)

อะไมเลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอะไมเลส [12]

อะไมเลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมเลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเก มีปริมาณอะไมเลสต่ำประมาณ 20% Waxy starch ไม่มีอะไมเลสเลย และแป้งจาก Amylomaize มีอะไมเลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมเลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน (Da) ซึ่งอะไมเลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมเลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมเลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมเลสในช่วง 200 ถึง 1200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมเลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมเลสมีกึ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะไมเลสของแป้งหลายๆ ชนิดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [9]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโลส (%)	$\beta$ - Amylase Limit (%)	DP เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย เฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
Indica	-	73	1000	4.0	250	49
Japonica	-	81	1100	3.4	320	31
แป้งมัน สำปะหลัง	17	75	2600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4900	9.5	240	-

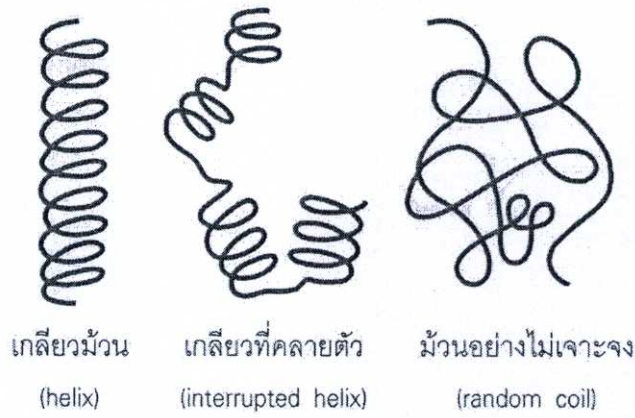
หมายเหตุ  $\beta$ -amylolysis = %การย่อยแป้งโดย  $\beta$ -amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

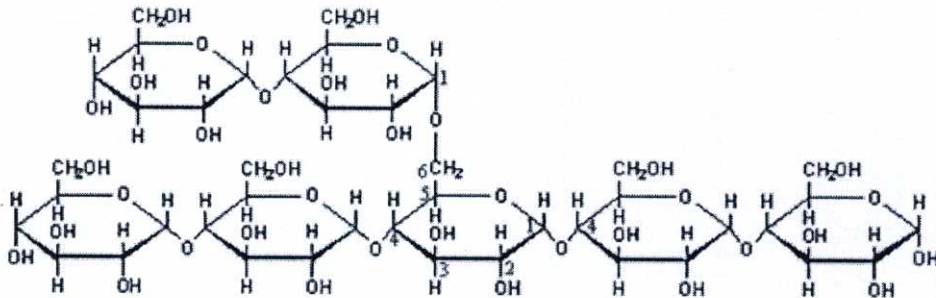
โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random coil) ดังรูปที่ 2.10 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6500 ถึง 160000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง



รูปที่ 2.10 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [9]

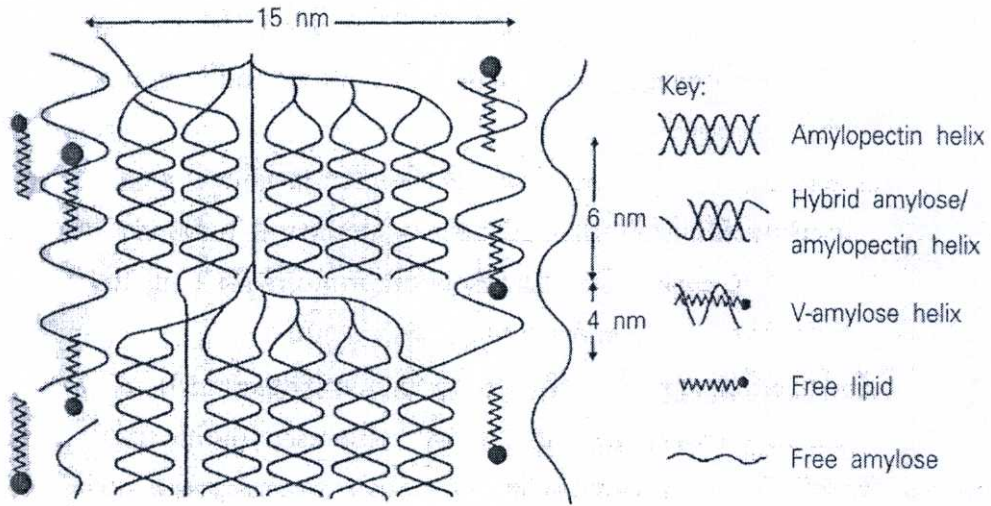
2.3.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างอะไมโลเพกติน [11]

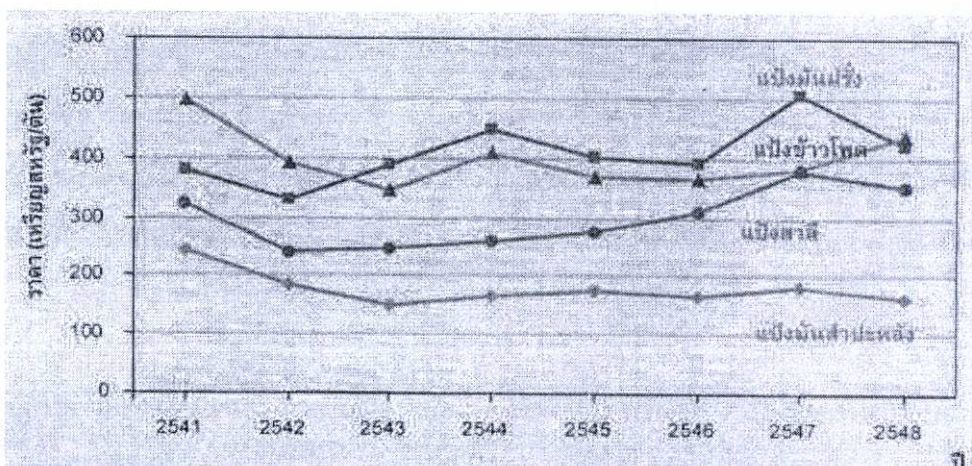
แบบจำลองของโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและ Monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.12 อะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (Double helix) [9]



รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน [9]

### 2.3.4 แป้งมันสำปะหลัง

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมไปด้วยวัตถุดิบชีวมวลหรือผลผลิตจากการเกษตร ได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยเป็นผลผลิตจากการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือเส้นใย (เซลลูโลส) เหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ แต่เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการแข่งขันด้านราคาและความสามารถในการเพาะปลูกของประเทศไทยแล้ว อาจจัดได้ว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเมื่อเทียบราคาแป้งมันสำปะหลังกับแป้งที่ทำจากพืชชนิดอื่นตามราคาตลาดโลก แป้งมันสำปะหลังจะมีราคาถูกที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ราคาที่แข่งขันได้ของมันสำปะหลังแล้ว ประเทศไทยยังสามารถส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลกด้วย



รูปที่ 2.13 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในตลาดโลก [4]

ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยผลิตหัวมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 16.94 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของผลผลิตมันสำปะหลังโลกและจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย หัวมันสำปะหลังสด ร้อยละ 73.5 ถูกส่งออกในรูปของมันอัดเม็ด มันเส้น และแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกว่า 30000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีน และได้หวัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย หัวมันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 ใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน [4]

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [13]

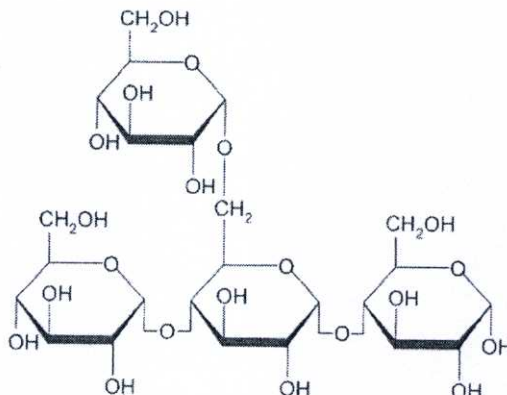
องค์ประกอบ	ปริมาณ(ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.00
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

### 2.3.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

โครงสร้างของเม็ดแป้งในสำปะหลังแสดงดังรูปที่ 2.14 เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โพลาริซซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า ไบรฟริงเจนซ์ (Birefringence)

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วย

พันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่าบริเวณผลึก (Crystalline regions) หรือ ไมเซลล์ (Micelles) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่าบริเวณอสัณฐาน (Amorphous regions) เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย [13]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [13]

### 2.3.6 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งมีสิ่งเจือปนอื่น เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือเล็กน้อย แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกขจัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (Starch) สตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาต่างๆ มากมาย

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสถานะต่างๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสถานะในการผลิตได้ดี การเกิดเจล การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลที่ดีขึ้น มีสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งในบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมหรือยังไม่เหมาะสมกับสถานะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติบางอย่าง แป้งดัดแปรความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 [9] หมายถึง

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มา เปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือ สารเคมีต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่างๆ ของแป้งคัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการปนเปื้อนของสารประกอบเคมีอื่นๆ ต่ำ เหมาะต่อการนำมาทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนออสถฐานอะไมโลเพกตินจะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด

### 2.3.7 การตัดแปรแป้งทางเคมี

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้งโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอยที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิเป็นเจลหรือเจลาติโนเซชัน (45-50 °C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งขึ้นที่พื้นผิวบริเวณทั้งส่วนเปลือกและภายในส่วนออสถฐาน

เนื่องจากเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับไอโอดีน ที่มีน้ำเป็นตัวกลาง เม็ดแป้งจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดแป้งแห้ง กับ ไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้น ดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อ ทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่ชุ่มน้ำหรือเม็ดแป้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยค่า่าง เม็ดแป้งจะพองตัวและ สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1000 ได้

ในระหว่างการตัดแปรแป้งทางเคมีจะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลได้โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต หรือโซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม การตัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาน้อย ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ทำในน้ำ ให้ค่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution; DS) ต่ำ ประมาณ 0.1-0.2 ใช้วิธีการตัดแปรหลายๆ วิธีร่วมกัน ให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถ ปรับปรุงได้

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าองศาการแทนที่ (DS) คือ จำนวนหมู่ ฟังก์ชันที่เข้ามาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยกลูโคส ในโมเลกุลกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลถูก แทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ค่าองศาการแทนที่จะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่ระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่ การแสดงค่า DS จะเป็นการแสดง ค่าเฉลี่ยของทั้งโมเลกุล

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ย}}{\text{โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคส}}$$

แป้งดัดแปรที่ได้จากการเกิดอนุพันธ์ แบ่งชนิดของปฏิกิริยาการดัดแปรออกเป็น 3 ชนิด คือ

- อีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เกิดการแทนที่ใน โมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของอีเทอร์
- เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification) เกิดการแทนที่ใน โมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของเอสเทอร์
- การเชื่อมโยง (Crosslinking) เกิดการแทนที่ใน โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า

ทั้งแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์จัดเป็นแป้งที่ให้ความคงตัว (Stabilized starch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับ Etherifying agent หรือ Esterifying agent ในสภาวะเบส โดยทั่วไป แป้งอีเทอร์ และแป้งเอสเทอร์ที่ใช้ในทางการค้ามีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 หมู่ฟังก์ชันต่างๆจะเข้าแทนที่ภายในกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ส่วนใหญ่แป้งอะซิเตดไฮดรอกซีอัลคิลสตาร์ช คาร์บอนซีเมทิลสตาร์ช และแคทไอออนิกสตาร์ช จะมีหมู่แทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ส่วนหมู่แทนที่อื่นๆ จะเข้าแทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 สำหรับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะมีหมู่ฟังก์ชันเข้ามาแทนที่น้อยมาก

การแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชัน 1 หมู่ภายใน โมเลกุลกลูโคสของแป้งอีเทอร์หรือแป้งเอสเทอร์ทำให้โมเลกุลอะไมโลส โครงสร้างของเม็ดแป้งดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้การยับยั้งการคืนตัวของเม็ดแป้งและทำให้มีความหนืดคงตัว แสดงลักษณะเป็นแป้งที่ให้ความคงตัว สำหรับการเข้าแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ของแป้งเชื่อมโยง มีจุดประสงค์เพื่อสร้างพันธะเชื่อมโยงข้ามระหว่างหมู่อะไมโลเพกติน ทำให้อัตราการพองตัวของแป้งลดลง

แป้งอนุพันธ์จะมีสมบัติดังนี้

1. จะมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ
2. จะมีการพองตัว การละลายและความชื้นมากกว่าแป้งดิบ
3. ความหนืดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของสารให้อนุพันธ์และขนาดโมเลกุลของอนุพันธ์ ทั้งนี้จะไม่แปรผันทางเดียวกัน เช่น เพิ่มการแทนที่ระดับหนึ่ง แป้งอนุพันธ์ให้ความหนืดมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอีกระดับหนึ่ง อาจจะทำให้ความหนืดน้อยลง เป็นต้น
4. จะให้สมบัติเป็นสารให้ความคงตัว (Stabilizing agent) เช่น ทนต่อการคืนตัวหลังแช่แข็ง (Freeze-thaw) เป็นต้น

### 2.3.8 แป้งเอสเทอร์

แป้งเอสเทอร์ (Ester Modified Starch) เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่เอสเทอร์ของสารเคมี แป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ในทางการค้าได้แก่ แป้งอะซิเตดและแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ของสารเคมี แป้งดัดแปรทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส มีความอ่อนตัวและยึด

เกาะกันเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเป็นสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด หมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์แป้งเอสเทอร์ มีดังนี้ อะซิเตต (Acetate) เบนโซเอต (Benzoate) ฟอสเฟต (Phosphate) ซัคซิเนต (Succinate) มาลิเนต (Malinate) เป็นต้น

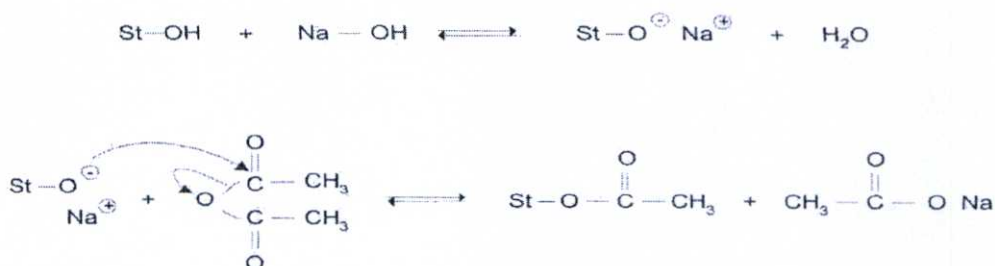
ในการผลิตแป้งเอสเทอร์สามารถแบ่งตามระดับการทำปฏิกิริยาออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 นิยมทำกันโดยทั่วไป
2. การทำปฏิกิริยาโดยไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่สูงประมาณ 3 ใช้ไพริดีน (Pyridine) เป็นตัวทำละลาย
3. การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่ปานกลาง ใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำละลาย

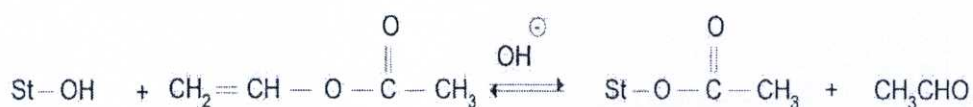
### 2.3.9 แป้งอะซิเตต

แป้งอะซิเตตเป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาอะซิเตชัน (Acetylation) ระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อะซิเตต เช่น อะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate) หรือกรดอะซิติก (Acetic acid) หมู่อะซิติกที่เข้าแทนที่หมู่อไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลของแป้งจะยับยั้งการรวมตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ทำให้แป้งสามารถต้านทานการคืนตัว หลังจากเกิดแป้งเปียกและทำให้เย็นลง แป้งดัดแปรชนิดนี้ใช้เป็นสารคงตัวและสารให้ความข้น (Thickener) ในอุตสาหกรรมอาหาร

ปฏิกิริยาอะซิเตชันเกิดขึ้นระหว่างเม็ดแป้งหรือแป้งที่ผ่านการเกิดเจลแล้วกับสารเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการควบคุม pH ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับอะซิติกแอนไฮไดรด์ และรูปที่ 2.16 เป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับไวนิลอะซิเตต



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับอะซิติกแอนไฮไดรด์ [9]



รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับไวนิลอะซิเตต [9]

การผลิตแป้งอะซิเตตโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ระดับการแทนที่ต่ำ เดิมอะซิติกแอนไฮไดรด์ หรือไวนิลอะซิเตตอย่างช้าๆ ลงในสารแขวนลอยของแป้ง ความเข้มข้นของแป้งที่ผสมกับน้ำอยู่ในช่วง 30-55% ขึ้นอยู่กับเทคนิคของการผสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพการผลิตสูงสุดในด้านของผลิตภัณฑ์ (Yield) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 25-30 °C และควบคุม pH ให้อยู่ที่ 7-11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3% หลังจากนั้นใช้กรดเจือจางปรับให้สารแขวนลอยมี pH 5.5-6.5 กรอง ล้างเกลือและผลพลอยได้ (By product) ออก ทำให้แห้ง จะได้แป้งอะซิเตตที่มีหมู่อะซิติกไม่เกิน 5% มีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2

การผลิตแป้งอะซิเตตโดยไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ระดับการแทนที่สูง แป้งทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์โดยใช้ไพรีดีนเป็นตัวทำละลาย สามารถผลิตแป้งอะซิเตตที่มีระดับการแทนที่ 3 ได้ แต่สำหรับการผลิตทางการค้าโดยใช้สารละลายชนิดนี้ยังมีปัญหาเนื่องจากไพรีดีนมีราคาแพง มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ล้างออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยากและมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง

การผลิตแป้งอะซิเตตโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ระดับการแทนที่ปานกลาง แป้งอะซิเตตที่มีระดับการแทนที่ปานกลางสามารถย่อยได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ในการผลิตปรับปรุงสมบัติของแป้งด้วยอะซิติกแอนไฮไดรด์ 40% จะควบคุม pH เท่ากับ 8 เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ [9]

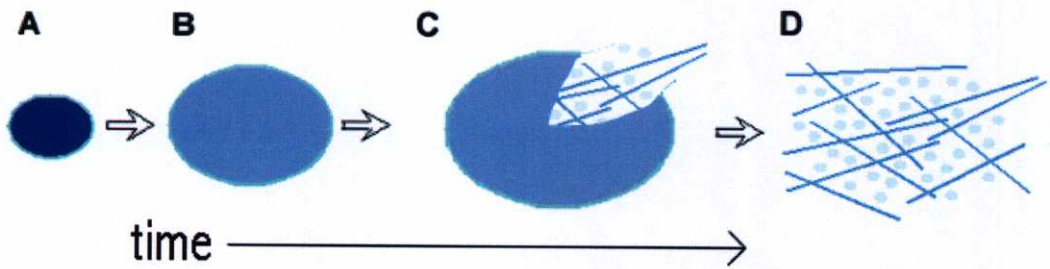
### 2.3.10 แป้งพรีเจลาทีไนซ์

แป้งพรีเจลาทีไนซ์ (Pregelatinized starch) หรือ แป้งพรีเจล ทางการค้าเรียกว่าอัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยให้ความร้อนแก่แป้ง ทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาทีไนซ์ แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องทำแห้งแบบสเปรย์ (Spray dryer) หรือ เครื่องเอ็กทรูดเดอร์ (Extruder) และบดให้ละเอียด ได้แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล

การผลิตแป้งพรีเจลาทีไนซ์สามารถใช้ทั้งแป้งดิบ และแป้งดัดแปรทางเคมีชนิดต่างๆ โดยป้อนแป้งในรูปสารแขวนลอยหรือแป้งเปียก ลงในเครื่องทำแห้ง ซึ่งในสารแขวนลอยจะมีปริมาณของแข็งได้สูงถึง 44% และ 42% นอกจากนี้มีการเติมสารช่วยการเกิดเจลาทีไนซ์ (Gelatinization aid) เช่น เกลือหรือเบส เติมสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้แป้งติดกับลูกกลิ้ง (Surface active agent) เติมเกลือ เช่น โซเดียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต เกลืออะลูมิเนียม เพื่อป้องกันแป้งเกาะกันเป็นก้อน

เติมสารปรุงแต่งรส หรือส่วนผสมอื่นๆ ในการป้อนแป้งสู่เครื่องทำแห้งต้องมีการควบคุมให้แป้ง มีความหนาสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

เมื่อนำน้ำแป้งสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้น้ำในน้ำแป้งระเหย ออกไป ได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกขูดออกโดยใบมีด หลังจากนั้นนำไปอบแห้งและบดให้ละเอียด แผ่นแป้งที่ฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้งที่บางเกินไปจะทำให้เกิดการ สูญเสียผลิตภัณฑ์ และถ้าแผ่นแป้งหนาเกินไปจะทำให้ใบมีดทำงานไม่สะดวก [9]



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [14]

จากรูปที่ 2.17 ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อ Crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ double helical region เกิด Break up ของโครงสร้างผลึก Side chain ของอะไมโลเพกตินที่แยกตัวออกมาจะถูก Hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด Stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิด Hydration ต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ Granule แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย [14]

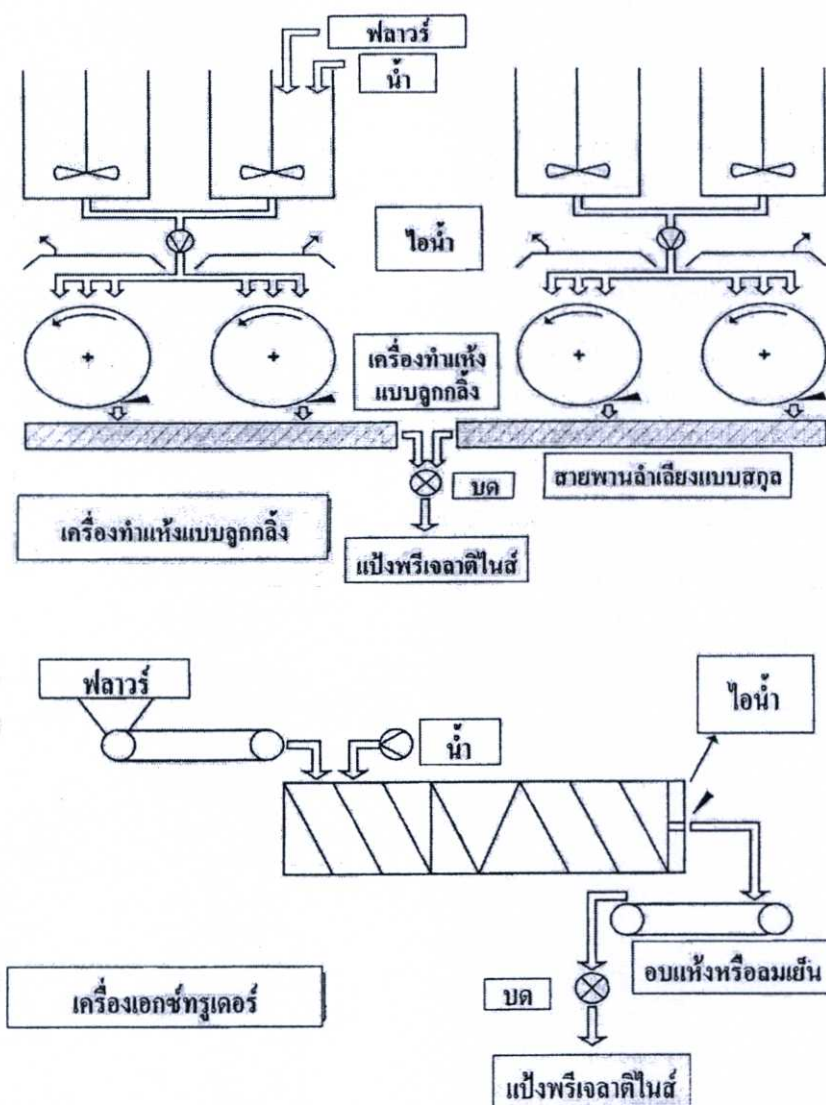
เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการผลิตแป้งพรีเจลมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบสเปรย์ และเครื่องเอ็กทราคเตอร์ ซึ่งเครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อ วัตถุประสงค์และผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นวิธีที่เหมาะสม และนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถมีอัตราการผลิต (ผลิตภัณฑ์/เวลา) สูง ส่วนการใช้เครื่องมืออัด แรงสูงอย่างเอ็กทราคเตอร์ มีอัตราการผลิตต่ำแต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะอาด การควบคุม คุณภาพ

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีทั้งแบบเดี่ยว (Single) และแบบคู่ (Double) โดยต้องมีการปรับ อุณหภูมิของผิวลูกกลิ้งและอัตราการหมุน ให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นและความสามารถในการ

การเกิดเจลาทีไนซ์ของแป้งแต่ละชนิด สำหรับแบบลูกกลิ้งคู่จะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เท่ากันตลอดแนวความยาวของลูกกลิ้ง และให้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในลูกกลิ้ง อัตราการหมุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของโลหะที่ใช้ทำลูกกลิ้ง

แป้งบางชนิดที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว เมื่อนำมาผลิตแป้งพรีเจลจะทำให้เกิดกลิ่นหืน (Rancidity) เนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลาย สามารถแก้ไขกลิ่นหืนนี้โดยการเติมเกลือออร์โทฟอสเฟต หรือทำการสกัดกรดไขมันด้วยเมธานอลและแอมโมเนียเพื่อปรับปรุงกลิ่นรสของแป้ง

แป้งพรีเจลสามารถละลายและกระจายตัวในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีการเกิดเจลหรือมีแนวโน้มในการเกิดเจลลดลง และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ



รูปที่ 2.18 เครื่องทำแป้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ [9]

### 2.3.11 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมและใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างมากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ยารักษาโรค และวัสดุก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น การที่สามารถนำแป้งไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากสมบัติของแป้งในด้านความเหนียวข้น การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดเป็นฟิล์ม แป้งยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย นอกจากนั้นแป้งยังสามารถใช้ผสมในพลาสติกเป็นสารตัวเติม เพื่อให้มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพและยังมีประโยชน์ในการใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อด้วย โดยปัจจุบันได้มีการทำโพรพอสติกจากแป้ง โพรพอสติกจากแป้งเพื่อทำภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น [9]

## 2.4 การย่อยสลายของแป้ง [13]

### 2.4.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ

#### 1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

#### 2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือ รอยด่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

#### 3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยด่างดำ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน

- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่อนรีควิง และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 6 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกทิน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงและแตกทรินไปเป็นกลูโคส

- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายอนรีควิง

#### 2.4.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical hydrolysis)

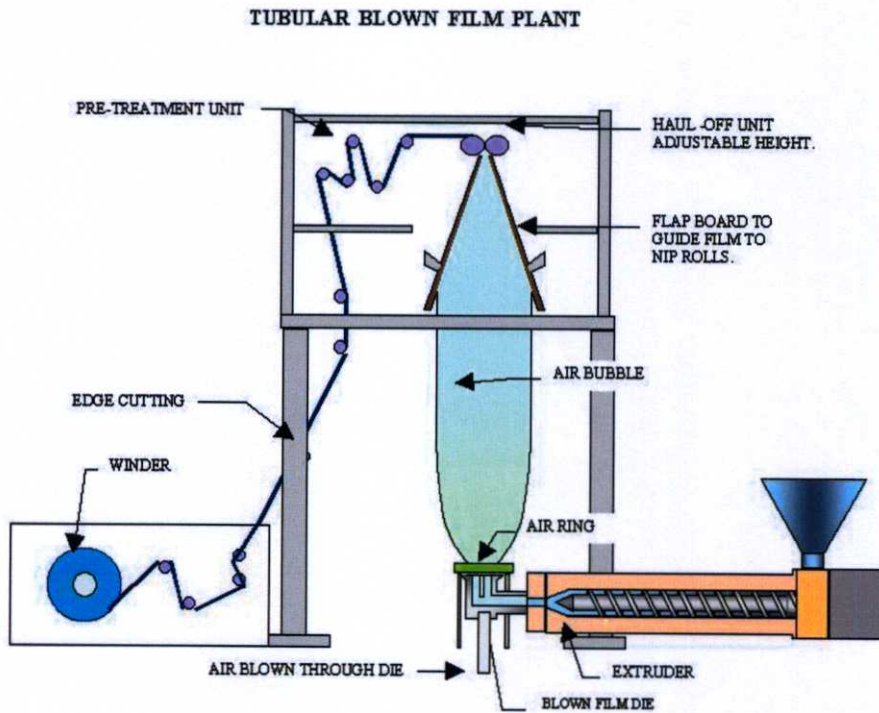
แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแปรงคัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งคัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส โซโคลเดกซ์ทริน

### 2.5 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า [15]

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเอ็กทรูดเดอร์ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวคาย (Die head) รูปร่างแหวนไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้นี้จะถูกบังคับให้อยู่ในรอบแกนหมุนที่อยู่ในคายและไหลออกผ่านคายเปิดรูปร่างกลม ในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและพองออก ซึ่งหัวคายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขั้วนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบหัวไขว้ (Cross head) คือ อยู่ในแนวตั้งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อไม่ให้ผิวฟิล์มติดกันและลดแรงดึงกันภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับท่อพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บ เพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบอกใส่สกรูและคาย รวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในคายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วยเพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่พองถูกทำให้เย็นก็จัดว่ามีความสำคัญใน

การได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกั้น (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up roll) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุมและทิศทางของอากาศก็จัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [16]

## 2.6 พลาสติกเพื่อการเกษตร

### 2.6.1 นิยามและความหมาย [17]

พลาสติกเพื่อการเกษตรหรือ Plasticsulture มาจากการรวมคำว่า Plastic กับ Agriculture เข้าไว้ด้วยกัน หมายถึง การใช้พลาสติกในงานทางด้านเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มพลาสติกคลุมดินรอบโคน (Plastic film mulch) สายให้น้ำแบบหยด (Drip irrigation tape) ฟิล์มพลาสติกคลุมแปลงปลูก (Row cover หรือ Low tunnel และ High tunnel) โรงเรือนเพาะปลูกคลุมด้วยฟิล์มพลาสติก (Greenhouse) ถุงใส่อาหารสัตว์ (Silage bag) พลาสติกห่อม้วนหญ้าแห้ง (Hay bale wrap) รวมทั้ง ถาดถู หรือกระถางที่ใช้ในการปลูกและย้ายต้นกล้า เป็นต้น ซึ่งการใช้พลาสติกเพื่อการเกษตรดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น ผัก ผลไม้ รวมทั้งดอกไม้ และไม้ประดับนั้น กำลังได้รับความสนใจอย่างยิ่งในช่วงสิบปีที่ผ่านมา เพราะพลาสติกเพื่อการเกษตรช่วยลดปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอากาศทั้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และลม

ตามธรรมชาติ ซึ่งบางครั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่รุนแรงดังกล่าวสามารถทำให้พืชที่ปลูกไว้ตาย เสียหาย หรือผลผลิตน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

## 2.6.2 สถานภาพปัจจุบัน [18]

การนำพลาสติกไปใช้งานของบรรดาประเทศที่มั่งคั่งในช่วง 35 ปีที่ผ่านมา ได้ทำให้ประสิทธิภาพและศักยภาพในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมการเกษตรเพิ่มสูงขึ้น

ในช่วงเวลาไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา ได้มีการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ทางเทคโนโลยีมากมาย หนึ่งในนวัตกรรมเหล่านั้นที่สมควรกล่าวถึงเป็นพิเศษคือ แนวทางใหม่ในการนำพลาสติกไปใช้งานด้านเกษตร ซึ่งนอกจากจะต้องอาศัยโครงสร้างของการผลิตที่ทันสมัยแล้ว นวัตกรรมใหม่ๆเหล่านั้นอาจไม่สามารถประสบความสำเร็จได้เลย ถ้าไม่ได้รับความร่วมมือจากวงการอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

การขยายตัวอย่างต่อเนื่อง รวดเร็วของตลาดโลกและเศรษฐกิจยุคโลกาภิวัตน์ได้เป็นตัวเร่งการพัฒนาไปสู่สมดุลใหม่ในโลกของการเกษตร ขณะนี้จะพบเห็นการผสมผสานพลาสติกเข้ากับกลยุทธการผลิตใหม่ๆที่ดีกว่า ทำให้สามารถคาดหวังได้ว่าจะสามารถนำกลยุทธ์ดังกล่าวไปถ่ายทอดให้กับประเทศต่างๆที่กำลังปรับปรุงศักยภาพในการผลิต และพัฒนาด้านอุตสาหกรรมการเกษตร

ตัวอย่างอันหลากหลายที่แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีของพลาสติกเมื่อนำมาใช้กับการเกษตรสามารถช่วยยกระดับเศรษฐกิจของคนส่วนใหญ่อย่างเห็นได้ชัดที่มีการยกมาอ้างอิงบ่อยๆ ได้แก่ ที่เอลอีจิโด (El Ejido) ในแอลเมริเรีย (Almeria) ของประเทศสเปน ที่ซึ่งการขยายตัวของพื้นที่เพาะปลูกโดยใช้พลาสติก ยังคงเป็นดัชนีหลักในการชี้วัดสภาพทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากร ในปี ค.ศ. 1950 เอลอีจิโดมีประชากรเพียง 7100 คน ปัจจุบันจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นเป็น 60000 คน และเป็นเมืองที่มีอัตราการพัฒนาสูงที่สุดของประเทศ

ในปี ค.ศ. 1987 ทวีปยุโรปมีพื้นที่เพาะปลูกโดยใช้พลาสติก 25000 เฮกเตอร์ ในขณะที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน และใช้พลาสติกเป็นวัสดุหลัก มีพื้นที่ 3000 เฮกเตอร์ ปัจจุบันนี้พื้นที่ดังกล่าวได้ขยายออกตัวไปอีกมาก

การใช้พลาสติกในการเกษตรยังคงเพิ่มขึ้น ในประเทศอังกฤษมีการใช้พลาสติกห่อฟ่อนหญ้าแห้ง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเก็บรักษาอาหารสัตว์ไว้ในทุ่งถึงปีละ 15000 ตัน

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา มีการนำเข้าและส่งออกผักผลไม้จำนวนมากทั่วโลก การค้าขายผลผลิตทางการเกษตร เช่น แอปเปิ้ลและสาลี่จากซีกโลกใต้ กีวีจากนิวซีแลนด์ มะเขือเทศจากแอฟริกา หน่อไม้ฝรั่งจากเปรูและโบลิเวีย เห็ดจากไต้หวัน ลูกพลัมจากอเมริกาเหนือและมะนาวจากจีน เป็นผลที่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงที่ต้องจดจำของการขยายตัวของการใช้พลาสติกเหนือพื้นที่เพาะปลูก และจากการจัดสรรน้ำ การบังคับให้ไม้ผลติดผลเร็วขึ้น และได้ทั้งผลผลิตและคุณภาพสูง แต่การใช้พลาสติกในทางการเกษตรเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาขยะและของเสียที่ส่งผลกระทบต่อภาวะแวดล้อม การใช้ฟิล์มคลุมดินที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้จะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและ

กำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นงาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาฟิล์มทางการเกษตรที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้

### 2.6.3 การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร

การใช้งานพลาสติกชนิดต่างๆในทางการเกษตรมีมากมาย ได้แก่

#### 1. พลาสติกคลุมดิน (Mulching)

เกษตรกรใช้เทคนิคของการคลุมดินเพื่อประหยัดน้ำและทำให้ผลผลิตออกก่อนฤดู ได้ผลผลิตสูงขึ้น ตลอดจนทำให้ผลผลิตที่ได้มีผิวสวยขึ้น การคลุมดินมีประโยชน์ต่อดินและสิ่งแวดล้อม ซึ่งรวมถึงการควบคุมความชื้น รักษาโครงสร้างของดิน ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยได้มากขึ้น ปกป้องพืชที่ปลูกและตัดปัญหาการกำจัดวัชพืช ถ้าใช้พลาสติกทึบแสง

การคลุมดินในสมัยก่อนใช้ฟางข้าว ปัจจุบันถูกทดแทนโดยพลาสติก วิธีคลุมดินมี 2 วิธี คือ คลุมทั้งหมดและคลุมบางส่วน ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวมีความแตกต่างกันอยู่ในตัวเอง

การติดตั้งแผ่นพลาสติกมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้อาจจะปูโดยการกลบทับด้านข้างและหัวท้ายด้วยดิน การเกษตรกรรมอื่นๆสามารถดำเนินการไปพร้อมๆกับการปูแผ่นพลาสติก ดินจะได้รับการไถพรวนใส่ปุ๋ยและปลูกไปพร้อมกันเลยทีเดียว ดังนั้นผลกระทบที่เครื่องจักรจะทำให้ดินชั้นล่างแน่นจะลดน้อยลง การใช้พลาสติกทุกชนิดในการคลุมดิน จะเพิ่มอุณหภูมิของดินในเวลากลางวัน นอกจากพลาสติกสีขาวและสีเงินซึ่งจะสะท้อนแสง พลาสติกสีดำจะป้องกันการงอกของวัชพืชได้ดีที่สุด ภายในโรงเรือนพลาสติกคลุมดินสีขาวถูกใช้ในการสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มปริมาณแสงให้กับพืช

#### ตารางที่ 2.4 พลาสติกคลุมดิน [18]

ชนิดของแผ่นฟิล์มพลาสติก	วัตถุประสงค์หลัก
โปร่งใส	- เพิ่มอุณหภูมิของดินในช่วงกลางวัน - เร่งการเจริญเติบโต - จัดการน้ำ
สีดำ	- ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - จัดการน้ำ
ทึบแสงและกักความร้อน	- กักความร้อนไว้ในช่วงกลางคืน - ป้องกันวัชพืช - จัดการน้ำ

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) [18]

ชนิดของแผ่นฟิล์มพลาสติก	วัตถุประสงค์หลัก
2 สี ดำ-ขาว	- ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - สะท้อนแสง - จัดการน้ำ
เสื่อมสภาพได้	- เพิ่มอุณหภูมิของดิน - ทำให้สามารถใช้เครื่องจักรในการเก็บเกี่ยวได้

ตารางที่ 2.5 การใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ในการคลุมดิน [18]

โปร่งใส	สีดำ	สีเทา/เขียวอ่อน/น้ำตาล	สีดำขาว
- พืชล้มลุก - ชนิดบาง: แตง, ฝ้าย	- พืชอายุ 1-3 ปี	- พืชตามฤดูกาล อายุ 1-2 ปี	- พืชล้มลุก - พืชยืนต้น
- ดินที่ไม่มีวัชพืช	- ดินที่มีวัชพืช	- ดินที่มีวัชพืชบ้าง	- ดินที่มีวัชพืช
- ในเขตที่มีอากาศ หนาวที่มีโอกาสเกิด น้ำค้างแข็ง	- ในเขตร้อนที่ ปราศจากน้ำค้าง แข็ง	- ในเขตร้อนหรือ หนาวที่ปราศจาก น้ำค้างแข็ง	- ในเขตร้อนที่ปราศจาก น้ำค้างแข็งโดยเฉพาะ อย่างยิ่งเมื่อปลูกในฤดู ร้อน
- เพื่อเร่งให้ผลผลิต สุกเร็วมากกว่าการ เพิ่มผลผลิต	- เพื่อเพิ่มผลผลิต มากกว่าการเร่งให้ ผลผลิตสุกเร็ว	- เพื่อเพิ่มผลผลิตและ การเร่งให้ผลผลิตสุก เร็ว	- เมื่อต้องการแสงสว่าง มาก

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการคลุมดิน [18]

ชนิด	โปร่งใส	สีดำ	สีเทา	สีเขียว/สีน้ำตาล	สีดำและสี ขาว
%ของแสงที่ผ่าน	80%	-	35%	65%	-
การเจริญเติบโตของ วัชพืช	สูง	-	น้อย	น้อยกว่าชนิดใส	-
การดูดซับความร้อน	ต่ำ	สูง	ปกติ	ต่ำ	ปกติ
อายุการใช้งาน	สั้น	นาน	ปกติ	สั้นแต่ดีกว่าชนิดใส	ค่อนข้าง นาน
การป้องกันอากาศเย็น	ดี	ปกติ	ปานกลาง	ปกติ	น้อย
ปริมาณผลผลิต	น้อยกว่า ชนิดดำ	สูง	ดีกว่าชนิด ดำ	เหมือนชนิดใส	สูงกว่า ชนิดดำ
ผลสุกและเก็บเกี่ยวได้ ก่อน	สูง	ปาน กลาง	ปกติ	สูง	สูง

การพัฒนาพลาสติกขึ้นอยู่กับสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีนสีฟ้าสามารถให้ทั้งความร้อน และควบคุมวัชพืชได้ ด้วยความหนาเพียง 50 ไมครอน แผ่นฟิล์มจึงไม่ทำให้ผลผลิตเสียหาย

การคลุมดินมีประโยชน์อย่างยิ่งในเขตแห้งแล้ง ซึ่งช่วยให้การทำเกษตรยั่งยืน การคลุมดินไม่ได้จำกัดเฉพาะพืชที่ปลูกใหม่เท่านั้น ในพืชยืนต้นก็สามารถใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกัน

## 2. พลาสติกคลุมโดยตรง (Direct covers)

พลาสติกที่ใช้คลุมโดยตรงจะใช้คลุมดินหลังจากหยอดเมล็ดหรือปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะถูกพองไว้โดยคันพืชและจะยกสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช การใช้พลาสติกคลุมโดยตรง ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพลาสติกคลุมโปง (Thermic blankets) สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืช ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีขนาดใหญ่ขึ้นและแก่ก่อนกำหนดประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ และสามารถลดการใช้สารเคมีในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช การใช้พลาสติกคลุมโปงเป็นเทคนิคการจัดการ ป้องกันและบังคับพืชที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำ เหมาะที่นำไปใช้กับพืชสวนได้หลายชนิด ไม่ว่าจะปลูกในที่โล่งหรือภายในโรงเรือนและไม่ว่าจะคลุมโดยใช้เครื่องจักรหรือแรงคน

## 3. อุโมงค์หลังคาต่ำ (Low tunnels)

การใช้พลาสติกสร้างอุโมงค์หลังคาต่ำและใช้คลุมดินเพื่อการปลูกพืชเป็นเทคนิคที่รู้จักกันทั่วไป เนื่องจากราคาถูกและใช้ง่าย ความยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติก เป็นสิ่งที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ในการสร้างโรงเรือนรูปโค้งครึ่งวงกลมแบบง่ายๆ แต่สามารถใช้งานตามวัตถุประสงค์

ประสงค์ได้เป็นอย่างดี อุโมงค์หลังคาต่ำ ส่วนใหญ่มักใช้เพื่อช่วยในการผลิตพืชเพื่อต้องการให้  
 สุกแก่เร็วขึ้น นอกจากนี้สามารถช่วยป้องกันความหนาว ลม หิมะ และสิ่งที่มาทำลายพืช ช่วยให้การ  
 ใช้ปุ๋ยและน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ค่าลงทุนในการติดตั้งพลาสติกคลุมลงบน โครงสร้างของอุโมงค์  
 ขึ้นกับชนิดเครื่องจักรกลที่ใช้และรูปแบบของอุโมงค์ อุโมงค์หลังคาต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็น  
 หลายรูปแบบตามตัวแปรต่างๆ และระบบการให้น้ำ (ระบบหยด หรือให้น้ำแบบปล่อยท่วมบนผิว  
 ดิน)

#### 4. โรงเรือนพลาสติก (Greenhouses)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีพลาสติกได้นำไปสู่การใช้งานใหม่ๆ ในอุตสาหกรรมเรือนเพาะ  
 ขำ โรงเรือนแบบอุโมงค์จัดว่าเป็นต้นแบบเริ่มต้นที่นำไปสู่การพัฒนาโรงเรือนพลาสติกที่ทันสมัย  
 โครงสร้างที่มีลักษณะโค้งสามารถสร้างขึ้นมาได้เพราะพลาสติก ด้วยการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติ  
 ของแผ่นฟิล์มและพลาสติกกึ่งคงรูป รูปแบบโรงเรือนพลาสติกถูกกำหนดโดยสภาพภูมิอากาศที่พืช  
 ต้องการในเขตอบอุ่น สภาพเศรษฐกิจและความต้องการทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อการผลิตไม้  
 ดอก ไม้ผลและผัก ปัจจุบันนี้การออกแบบโรงเรือนพลาสติกได้ก้าวหน้าไปมาก และการประมาณ  
 ค่าใช้จ่ายไม่เพียงแต่คิดราคาต่อตารางเมตรเท่านั้น แต่รวมไปถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน  
 การใช้ประโยชน์จากดิน โปรแกรมการปลูกพืชหลายๆชนิด และวัสดุที่ใช้คลุมโรงเรือน

การใช้ประโยชน์จากโรงเรือนสมัยใหม่มักใช้ในการผลิตเมล็ดพันธุ์ การเพาะกล้าผัก ไม้  
 ดอก ไม้ประดับ ไม้ผล และไม้ป่า พืชที่ยังเล็กจะเสียหายได้ง่ายจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพ  
 ภูมิอากาศ การงอกและความสามารถในการอยู่รอดและเจริญเติบโตจะเป็นไปได้ดีเมื่ออยู่ภายใน  
 โรงเรือน

#### 5. การใช้พลาสติกในฟาร์ม (Farming applications)

พลาสติกถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เช่น นำไปมุงหลังคา ทำรั้วสำหรับเลี้ยงโค กระบือ  
 และใช้ในการเก็บหญ้าอาหารสัตว์ ซึ่งในการใช้งานเฉพาะด้านนี้ ได้มีการพัฒนาเครื่องจักรกลเข้ามา  
 ใช้ในการห่มห่อฟ่อนหญ้าแห้งแบบสุญญากาศ ตั้งแต่ ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา พลาสติกถูกนำไปใช้ใน  
 อุตสาหกรรมเกษตร และระบบการทำฟาร์ม เช่น ทำหญ้าแห้ง (หลายๆ วิธีการ) ในฟาร์ม และทำรั้ว  
 ในฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและคอกปศุสัตว์ การใช้งานเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดทึบแสงและ  
 กันน้ำ (ก๊าซและของเหลวผ่านได้เล็กน้อย) ที่มีราคาถูก เทคนิคในการนำพลาสติกไปใช้งานในฟาร์ม  
 ส่วนใหญ่ ได้มาจากการพัฒนาคุณภาพและคุณลักษณะเฉพาะของพลาสติกเหล่านั้น

#### 6. การให้น้ำหรือระบบชลประทาน (Irrigation)

การจัดการน้ำในการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับการพัฒนาระบบชลประทานให้  
 ทันสมัย ในปัจจุบันนี้พัฒนาระบบชลประทานจะไม่สามารถทำได้เลย ถ้ามิได้นำเอาวัสดุที่ทำจาก  
 พลาสติกมาใช้งานอย่างกว้างขวาง การนำพลาสติกมาใช้งานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงการ

เกษตรอย่างมาก โดยเฉพาะในการชลประทาน วัสดุที่ทำจากพลาสติกถูกนำมาใช้กันแพร่หลาย ในการขนส่งน้ำไปให้ต้นพืช ผ่านท่อประธาน ท่อแขนง และท่อน้ำหยด

1 ใน 3 ของพลาสติกเพื่อการเกษตรใช้อยู่ในระบบชลประทาน เป็นการยากที่จะประมาณพื้นที่ที่ใช้ระบบชลประทานน้ำน้อยทั้งหมดที่ใช้อยู่ทั่วโลกได้ แต่ไม่มีพืชสวนสมัยใหม่ชนิดใดเลยที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ระบบให้น้ำแบบนี้ได้ ไม่ว่า สตรอเบอร์รี่ มะเขือเทศ เมล่อน ฝ้าย และกล้วย ตลอดจนไปถึงมะกอก และอะโวคาโด แม้กระทั่งการให้น้ำในโรงเรือน

#### 7. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponics)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตพืชสวน ซึ่งพัฒนาขึ้นมาเพื่อปลูกพืชผักต่างๆ ให้กับทหารที่ไปสู้รบในสมรภูมิที่ไม่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกพืช ให้สามารถผลิตผักเพื่อเป็นอาหารได้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการผลิตพืชได้ดีแต่ต้องการความรู้และทักษะในการจัดการที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้ได้พัฒนาอย่างกว้างขวางในช่วงทศวรรษ 1980 พร้อมกับ การพัฒนาพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยวิธีอัดรีดร่วม (Co-extrude)

#### 8. พลาสติกคาดแหล่งน้ำ (Waterproof sheeting)

พลาสติกช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากระบบการเก็บกัก การลำเลียงและการจัดสรรน้ำช่วยให้การจัด การแหล่งน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในศตวรรษนี้ การขาดแคลนน้ำในหลายพื้นที่ของโลกเป็นข้อจำกัดหลักในการปรับปรุงสภาพความเป็นอยู่ของประชากร การขาดแคลนน้ำเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่แน่นอน ขณะเดียวกันฤดูกาลที่มีความต้องการสูงสุด มักจะตรงกับช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำมีน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเหตุให้ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ลดลง ดังนั้นการสร้างอ่างเก็บน้ำช่วยลดปัญหาเหล่านี้ลงได้ เกษตรกรแต่ละรายมักจะไม่มีความสามารถทางเศรษฐกิจที่จะสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่และคลองส่งน้ำคาดด้วยคอนกรีตของตนเองได้ ดังนั้นการใช้แผ่นพลาสติกคาดแหล่งน้ำซึ่งมีราคาถูกกว่า จึงเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหา

#### 9. ตาข่ายและตะแกรงลดพลังงาน (Nets and energy screens)

ลมเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการทำเกษตร นับตั้งแต่ในอดีตเป็นต้นมาเกษตรกรได้พัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องลมมาโดยตลอด ด้วยการสร้างกำแพงกัน ซึ่งสามารถให้ลมที่มาปะทะทะลุผ่านไปได้น้อยแตกต่างกัน การใช้ตาข่ายพลาสติกเป็นแนวกันลมทำให้สามารถลดความหนาของกำแพงลงได้ จึงเหลือพื้นที่เพาะปลูกกว้างมากขึ้น แนวกันลมที่ใช้ตาข่ายพลาสติกกำลังเข้ามาแทนที่การปลูกต้นไม้เป็นแนวกันลม เพราะต้นไม้ที่ใช้เป็นแนวกันลมนั้นนอกจากจะแย่งน้ำและอาหารของพืชที่ปลูกแล้ว ยังเป็นแหล่งอาศัยของศัตรูพืชได้อีกด้วย การสร้างแนวกันลมจะมีผลต่อสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น เช่น ต่ออุณหภูมิ ความชื้นของดิน การคายน้ำของพืชไปจนถึงเรื่องการกระจายของฝนด้วย

ชนิดของตาข่ายพลาสติกแบ่งออกเป็น

- ตาข่ายพลาสติกพรางแสง (Shading nets)
- ตาข่ายช่วยพยุงลำต้น และหลักพลาสติก (Trellising nets and stakes)
- ตาข่ายพลาสติกกันรากพืช (Anti-root nets)
- ตาข่ายพลาสติกลดความร้อน (Energy screens)
- ตาข่ายพลาสติกชนิดอื่นๆ (Other nets)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.Godbole และคณะ [19] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของฟิล์มผสมย่อยสลายได้ของ พอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทีเรท (Poly-3-hydroxybutyrate; PHB) ผสมแป้งมันฝรั่ง เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุน โดยศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ PHB:แป้ง คือ 70:30 (w/w) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดและสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ ส่วนค่าอุณหภูมิในการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมแป้งลงไป โดยวัสดุนี้อาจประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบบนแผ่นกระดาษ หรือกระดาษแข็ง เพื่อใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

พรรวี สุมิตร [20] ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดรับประทานได้จากโคโคซานกับแป้งคัดแปรเอสเทอร์ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 (w/w) มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงสุด ฟิล์มที่เตรียมจากแป้งคัดแปรที่มีองค์การแทนที่ 0.02 มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนที่ดีกว่าแป้งคัดแปรที่มีองค์การแทนที่ 0.06 ส่วนผลของปริมาณกลีเซอรอลพบว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลปริมาณ 5% ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้มี  $T_g$  ลดลง

กรรณิการ์ ไพรศรี และ กิ่งกาญจน์ พิษณุลักษณะ [7] ศึกษาการเตรียมและสมบัติต่างๆของพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคฟлекс (Ecoflex<sup>®</sup>) และ PLA ผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) ในอัตราส่วน 50:50 (w/w) โดยใช้ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ตั้งแต่ 0-20% โดยน้ำหนัก ซึ่ง Ecoflex<sup>®</sup> ใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่วน PLA ใช้กลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) จากการทดลองพบว่า ค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index; MFI), ค่ามอดูลัส, ค่าความแข็งแรงกดและ Heat deflection temperature (HDT) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใส่พลาสติกไซเซอร์มีค่าสูงกว่าอีโคฟлексและ PLA ที่ไม่มีการผสมแป้งแต่ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำกว่า เมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ ค่า MFI และ ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, ค่ามอดูลัส, ค่าความแข็งแรงกด และค่า HDT ลดลง สำหรับ PLA ที่ผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์ โดยใช้ PEG เป็นพลาสติกไซเซอร์ มีสมบัติที่ดีกว่าใช้กลีเซอรอลเป็น

พลาสติกไฮเซอรั การดูดซับน้ำของอีโคเฟล็กซ์และ PLA ที่ไม่ได้ผสมแป้งสามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ขณะที่พอลิเมอร์ผสมจะดูดซับน้ำอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าแป้งเป็นอนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอในอีโคเฟล็กซ์และ PLA ได้ และจากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสม พบว่าการใส่แป้งลงไปทำให้ความสามารถการย่อยสลายดีขึ้น

**สุภสิทธิ์ ผู้มีโชค [21]** ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปรและไม่คัดแปรกับพอลิโพรพิลีน โดยผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50% แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จนไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ และเมื่อปริมาณแป้งเป็น 0-50% พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังคัดแปรมีสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติด้านความทนการตัดโค้ง การดูดซึมความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการคัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

**วรวิทย์ โพนนิกร [11]** ศึกษาผลของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม ผลการทดลองพบว่า เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลี 30% หลังการฝังกลบมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และพอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่า  $T_m$  และ  $T_c$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกโดย XRD พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก และผลจากการศึกษาโดย SEM หลังการฝังกลบ สรุปได้ว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลีเกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด

**P. Matzions และคณะ [22]** ศึกษากระบวนการขึ้นรูปและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวโพดและพอลิคาโพรแลกทัม (Poly( $\epsilon$ -caprolactone); PCL) ซึ่งใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ คือ Extrusion, Injection molding และ Film blowing โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50% พบว่าอนุภาคของแป้งที่ขึ้นรูปโดยวิธี Injection molding มีขนาดเล็กกว่า Film blowing อาจเนื่องมาจาก Injection molding มี shear rates ที่สูงกว่า PCL ที่ผสมแป้งมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง ส่วน  $T_m$  ของ PCL ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมแป้งลงไป

**U. Witt และคณะ [23]** ได้ศึกษาพฤติกรรมของการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ Aliphatic-aromatic copolyester หรือมีชื่อทางการค้าว่า "Ecoflex<sup>®</sup>" โดยศึกษาอัตราการย่อยสลายได้ทางชีวภาพและ

รูปแบบของสารมัธยันต์ (Intermediates) ในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย พบว่า หลังจาก 22 วัน เกิดการย่อยสลายได้มากกว่า 99.9% จะเห็นว่าเกิดการย่อยสลายในส่วนของ Aiacid และ Diol ของ Ecoflex<sup>®</sup> โดย Monomer ของ Copolyester (1,4-butanediol, terephthalate และ adipate) สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ GC-MS การย่อยสลายได้ทดสอบกับ Monoester ของ Adipic acid และ Terephthalic acid กับ 1,4-butanediol โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของ Monomer ส่วนความเป็นพิษ ทดสอบกับ *Daphnia magna* และ *Photobacterium phosphoreum* พบว่าไม่มีความเป็นพิษ และจากการประเมินความอันตราย สามารถสรุปได้ว่าไม่มีสิ่งใดที่บ่งบอกว่า Ecoflex<sup>®</sup> เป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อม

**G.S. Mugnozza และคณะ [24]** ศึกษาสมบัติเชิงกลที่ลดลงและฐานานวิทยาของฟิล์มย่อยสลายได้ของฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร โดยงานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มคลุมดินที่ทำมาจาก Mater-Bi<sup>®</sup> ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกผสมกับแป้ง และใช้ต้นสตอเบอร์รี่ในการทดสอบ หาสมบัติเชิงกลต่างๆโดยใช้เทคนิค SEM, IR, Tensile และ ATR พบว่า ฟิล์มคลุมดินเกิดการย่อยสลายในส่วนที่เป็นแป้งก่อน บริเวณของฟิล์มที่ถูกดินฝังจะเกิดการย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่ไม่ได้ถูกฝัง รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดก็ลดลงมากกว่าด้วย และเมื่อทำการทดลองไปประมาณ 10 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด จะมีค่าลดลงประมาณ 300%

**N. Tzankova Dintcheva และ F.P. La Mantia [25]** ศึกษาการออกซิเดชันด้วยแสงและสารเสถียรภาพทางแสงของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ Mater-Bi<sup>®</sup> เป็นสิ่งที่ได้มีการค้นคว้าเพื่อที่จะทราบความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุนี้ในทางการเกษตร การย่อยสลายได้ดูจากสมบัติเชิงกลซึ่งเกี่ยวข้องกับเวลาการออกซิเดชันด้วยแสง ส่วนรายละเอียดอื่นๆ ดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด พอลิเมอร์ทำจากแป้งข้าวโพดและพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ จากการทดลองพบว่าวัสดุนี้มีความต้านทานต่อรังสี UV ก่อนข้างต่ำ โดยดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อใส่สารเสถียรภาพทางแสงลงในพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มความทนทานต่อแสงได้มาก สารเสถียรภาพ Benzophenone มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า Benzotriazoles, Triazine และ Sterically hindered amine เพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงในช่วง UV ได้มากกว่าของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

**P. Bergo และ P.J.A. Sobral [26]** ได้ศึกษาผลกระทบของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเจลาติน (Gelatin) ที่ทำมาจากหนังหมู ซึ่งการเติมพลาสติกไซเซออร์เป็นการแก้ไขสมบัติบางประการ เช่น ความยืดหยุ่น ความว่องไวต่อความชื้น เป็นต้น โดยวัตถุประสงค์ของการทำการวิจัยนี้สนใจผลกระทบของกลีเซอรอลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ จากผลการทดลองพบว่า พลาสติกไซเซออร์มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ โดยพลาสติกไซเซออร์ไปลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่ที่อยู่ใกล้กัน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นซึ่งส่งผลให้ไปเพิ่มความว่องไวต่อความชื้นและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์

**H.J. Park และคณะ [27]** ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ต่อฟิล์มเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose) และฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose) โดยใช้พลาสติกไซเซออร์ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน ไกลคอล พรอพิลีน ไกลคอล และกลีเซอริน ที่มีความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 0.17, 0.33, 0.50 และ 0.66 มิลลิลิตรพลาสติกไซเซออร์ต่อกรัมเซลลูโลส และควบคุมความหนาของฟิล์ม พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นพลาสติกไซเซออร์เพิ่มมากขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มทั้งสองจะลดลง แต่การยืดตัวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเอทิลีน ไกลคอลมีผลต่อการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มมากกว่าพลาสติกไซเซออร์อีก 2 ชนิด สมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ โดยในกรณีของกลีเซอรอลค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มทั้งสองชนิดจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่า 0.33 มิลลิลิตรพลาสติกไซเซออร์ต่อกรัมเซลลูโลส

**กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ [28]** ศึกษาผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ผสมแป้ง/polycaprolactone (PCL) จากการศึกษาการใช้แป้งผสมกับ PCL ในเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ พบว่าที่ปริมาณแป้ง 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ให้ค่า Tensile strength 12.21 MPa และ %Elongation 295 และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งจะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง การย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งที่ใช้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อปริมาณแป้งที่ 75 เปอร์เซ็นต์ จะมีการย่อยสลายให้ค่า Total Organic Carbon (TOC) ถึง 1728 ppm และจากภาพถ่ายของ Scanning Electron Microscope (SEM) ยืนยันว่าเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น แป้งจะกระจายอยู่ใน PCL เมทริกซ์ ซึ่งเมื่อแป้งถูกย่อยสลายไปด้วยเอนไซม์โครงสร้างของวัสดุจะเป็นรูพรุนทำให้การย่อยสลายของ PCL ง่ายขึ้น การย่อยสลายของแป้งผสม PCL โดยการฝังดิน (burial test) เกิดได้เร็วกว่า PCL อย่างเดียว การเติมแป้งปริมาณ 75 เปอร์เซ็นต์สามารถย่อยสลายได้ในดินภายใน 4 เดือน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Ecoflex<sup>®</sup> (เกรด F) บริษัท BASF Corporation Co.,Ltd.
2. แป้งสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรชนิดเอสเทอร์ องศาการแทนที่ (Degree of substitution; DS 0.02) บริษัท Siam modified starch Co.,Ltd.
3. แป้งสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรชนิดพรีเจล บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd.
4. กลีเซอรอล (เกรดการค้ำ) บริษัท Thai Pure Science Co., Ltd.
5. Phenolic antioxidant (Anox<sup>®</sup> 20) บริษัท Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd.
6. Phosphite antioxidant (Alkanox<sup>®</sup> 240) บริษัท Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd.

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ปริกัณฑ์เครื่องแก้ว
2. ตู้อบ
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น PL-20 บริษัท Intro Engineering Co.,Ltd.
5. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) รุ่น Bosco A600 บริษัท Bosco Engineering Co.,Ltd.
6. เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt flow indexer) รุ่น 6841 บริษัท Ceast Co., Ltd.
7. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LRX PLUS บริษัท Lloyd Instrument Co.,Ltd.
8. เครื่องอัดรีดแบบฟิล์มเป่า (Blown-film extruder) รุ่น Type LF 400 บริษัท Lab Tech Engineering Co.,Ltd.
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) รุ่น JEOL SJM 62 บริษัท Jeol Co.,Ltd.
10. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential scanning calorimeter) รุ่น DSC1 บริษัท Mettler Toledo Co., Ltd
11. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer) รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo Co., Ltd

12. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeation analyzer) รุ่น L80-4000 บริษัท Lyssy Co., Ltd.
13. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeation analyzer) รุ่น 8000 บริษัท Illinois instrument Co., Ltd.
14. เครื่องปิดผนึกถุงพลาสติก (Heat sealer) รุ่น PCS-200 บริษัท Hamco Co., Ltd.

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 สูตรพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองผสมสูตรโดยใช้อัตราส่วนต่างๆดังตารางที่ 3.1 เพื่อหาอัตราส่วนที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ทำการทดลอง

Ecoflex <sup>®</sup>	Starch	Glycerol (php)
80	20	10
		20
70	30	10
		15
		20
60	40	20
		30
50	50	25
		30

#### 3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. อบ Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสาลีไขมันต่ำปะหลังคัดแปรชนิดเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่
2. ผสม Ecoflex<sup>®</sup>, แป้งสาลีและกลีเซอรอลที่อัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 และเติม Anitioxidant - Anox<sup>®</sup> - 20 กับ Antioxidant - Alkanox<sup>®</sup> - 240 อย่างละ 0.05 Part per hundred part of polymer (php)

3. ทำการผสมสารแต่ละสูตรให้เข้ากันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยตั้งอุณหภูมิที่ Feed zone, Compression zone, Metering zone และ Die zone 150 °C ความเร็วสกรู (Screw speed) 50 รอบ/นาที
4. นำพอลิเมอร์ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
5. นำพอลิเมอร์ผสมที่บดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่เพื่อกำจัดความชื้น
6. นำพอลิเมอร์ผสมใส่ลงในส่วนป้อนสาร (Hopper) ของเครื่องอัดรีดแบบฟิล์มเป่า โดยตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิหัวคายเท่ากับ 130 °C และความเร็วรอบของสกรูของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเท่ากับ 40 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณส่วนทอโค้งที่ต่อเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวกับเครื่องเป่าฟิล์ม บริเวณส่วนทอตรงด้านล่าง และทอตรงด้านบนเท่ากับ 130 °C และใช้ความเร็วในการดึงฟิล์ม (Take-off speed) 1.1 m/min
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของแป้งสตาร์ช จากแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรเอสเทอร์เป็นแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรฟรีเจล โดยเลือกเฉพาะสูตรที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่ได้

#### 1. การวัดดัชนีการไหล (Melt flow index: MFI)

ทำการวัดความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Melt flow indexer โดยใช้ อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม รายงานผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 [29]

#### 2. ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

แช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จากนั้นทำการหักอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบผิวที่จะศึกษาด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูที่ผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

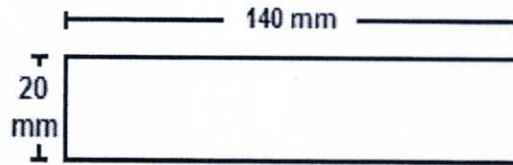
#### 3. ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

##### 3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester วัดค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดและค่ามอดูลัส โดยตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 mm × 140 mm วัดตัวอย่างทั้งใน

แนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) มาตรฐาน ASTM D 882 [30] ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	500	นิวตัน

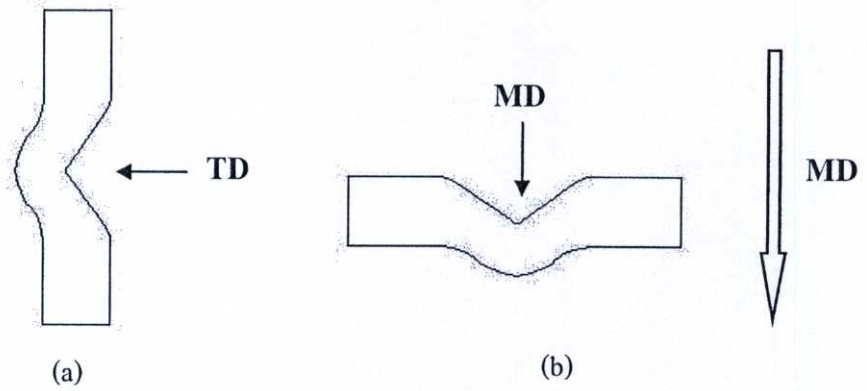


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง

### 3.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนก แบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 [31] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester ทดสอบตามแนว MD และแนว TD โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน กล่าวคือ ฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงานตามทิศทาง TD จะพิจารณาเป็นค่าความแข็งแรงฉีกขาดในทิศทาง TD ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	50	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	500	นิวตัน

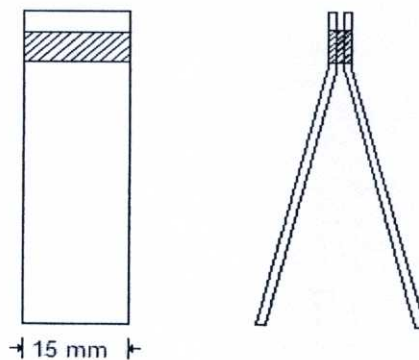


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง MD

### 3.3 ศึกษาความแข็งแรงของรอยซีล (Seal strength)

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดและเชื่อมติด (Seal) ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งที่อุณหภูมิประมาณ  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตัดเป็นชิ้นงานให้มีความกว้าง  $15\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$  และความยาวเพียงพอสำหรับทดสอบ ดังรูปที่ 3.3 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester ตามมาตรฐาน มอก. 1027-2534 [32] ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร สภาพที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	500	นิวตัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยซีล

#### 4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

##### 4.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 [33] นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 2 วัน ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$M_t(\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น

$W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

$W_w$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

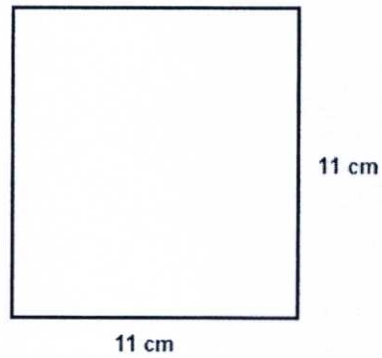
##### 4.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate)

ศึกษาค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability: WVP) โดยกำหนดขนาดของชิ้นงาน  $11 \times 11 \text{ cm}^2$  วางลงในเครื่อง ปล่อยไอน้ำเข้าไป โดยเครื่องจะทำการบันทึกและอ่านค่าปริมาตรไอน้ำที่ผ่านออกจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มพลาสติกในระยะเวลาที่กำหนดและในสภาวะที่คงที่ ที่อุณหภูมิ 38 °C และความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ 90% โดยวิธี Transfer time method โดยใช้เครื่อง Water vapor permeation analyzer รายงานผลเป็นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) สูตรละ 2 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ISO 15106-1 [34] โดยค่าการซึมผ่านของไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2

$$\text{WVP} = \text{WVTR} \times \text{ความหนาของฟิล์ม} \quad (3.2)$$

เมื่อ WVP คือ Water vapor permeability มีหน่วยเป็น  $\text{g} \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$

WVTR คือ Water vapor transmission rate ซึ่งอ่านได้จากเครื่อง มีหน่วยเป็น  $\text{g} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

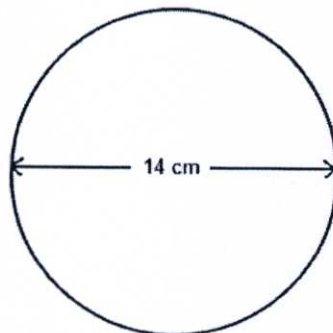
#### 4.3 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas transmission rate)

ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability: OP) โดยวางฟิล์มที่ตัดเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm ตรงกลางระหว่างเซลล์ ปล่องก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเข้าไป โดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวนำก๊าซออกซิเจนที่สามารถผ่านแผ่นฟิล์มไปยังด้านที่มีก๊าซออกซิเจนต่ำกว่า เครื่องจะทำการบันทึกและอ่านค่าปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ผ่านออกจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มภายใต้สภาวะคงที่ รายงานผลเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas transmission rate: OTR) สูตรละ 2 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D 3985 [35] โดยค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.3

$$OP = OTR \times \text{ความหนาของฟิล์ม} \quad (3.3)$$

เมื่อ OP คือ Oxygen permeability มีหน่วยเป็น  $\text{cc} \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$

OTR คือ Oxygen gas transmission rate ซึ่งอ่านได้จากเครื่อง มีหน่วยเป็น  $\text{cc} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

## 5. ศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

### 5.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัมให้มีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องจนถึง  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนถึง  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  และให้ความร้อนครั้งที่ 2 ด้วยอัตรา  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนมีอุณหภูมิถึง  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [36] ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ได้จากสมการที่ 3.4

$$\% \text{Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^{\circ}} \times \frac{100}{\% \text{ Ecoflex}^{\circledR} \text{ ในวัสดุ}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

$\Delta H_f^{\circ}$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ Ecoflex<sup>®</sup> ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $114\text{ J/g}$  [37]

### 5.2 Thermogravimetric analysis (TGA)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131 [38]

## 6. ศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้โดยการฝังดิน (Burial Test)

เป็นการทดสอบความสามารถการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆในดิน โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร และขุดขึ้นมาเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงทุกอาทิตย์โดยมีการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรดด่างของดิน ตามวิธีของ Pranamuda และคณะ (1969)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวัสดุผสมระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชดัดแปร (Modified starch) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งสตาร์ช ได้แก่ แป้งสตาร์ชเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) และแป้งสตาร์ชพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชดัดแปร (Modified starch) ที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล (เช่น ความแข็งแรงดึง, เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, โมดูลัสของยัง, ความแข็งแรงฉีกขาด และความแข็งแรงของรอยขีด) สมบัติทางกายภาพ (ได้แก่ ปริมาณการดูดซับน้ำ, สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน) สมบัติทางความร้อน (ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_d$ )) สัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติการย่อยสลายได้ ดัชนีการหลอมไหล สมบัติต่างๆ ที่ศึกษาจะเป็นปัจจัยสำคัญในการนำพอลิเมอร์ผสมไปใช้งาน ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน โดยตอนที่ 1 จะศึกษาการเตรียมฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนตอนที่ 2 จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม โดยการเลือกบางสูตรจากตอนที่ 1 นำไปเป่าขึ้นรูปอีกครั้งโดยใช้เครื่องผลิตระดับอุตสาหกรรม

#### ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองผสมสูตรโดยใช้อัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 แล้วนำไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม สามารถแสดงอัตราส่วนต่างๆที่เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดังตารางที่

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุผสมและพลาสติกไซเซออร์ แสดงผลความสามารถในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

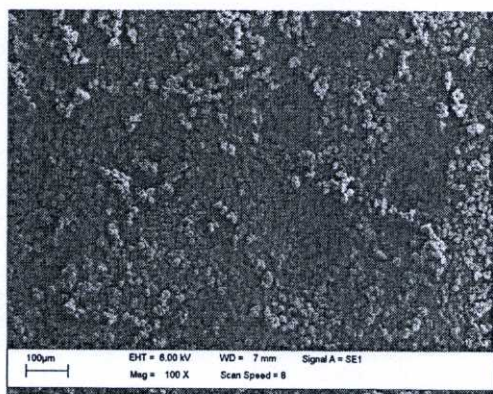
Ecoflex <sup>®</sup>	Starch (EMS)	Glycerol (php)	เป่าขึ้นรูป	
			ได้	ไม่ได้
80	20	10	/	
		20		/
70	30	10		/
		15	/	
		20		/
60	40	20	/	
		30		/
50	50	25		/
		30		/

จากตารางที่ 4.1 สามารถสรุปอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้คือ 80:20, 70:30 และ 60:40 โดยเติมกลีเซอรอลเป็น 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช โดยพบว่า ถ้าใส่กลีเซอรอลน้อยกว่า 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ไม่ดี โดยมีอนุภาคของแป้งสตาร์ชกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนบนผิวฟิล์มอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ฟิล์มเป็นรู และขาดได้ แต่ถ้าใส่มากเกินไป 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช ฟิล์มที่ได้มีลักษณะอ่อนนิ่ม พื้นผิวมีลักษณะเหนียวติด (Sticky) มีสีเหลืองเข้มกว่าปกติ คาดว่าเกิดจากการใช้กลีเซอรอลพลาสติกไซเซออร์มากเกินไปทำให้มีกลีเซอรอลอิสระแพร่ออกจากวัสดุ (Bleeding) ส่วนที่อัตราส่วน 50/50 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เลย คาดว่าเนื่องจากใช้แป้งสตาร์ชปริมาณมาก ทำให้วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) คือ Ecoflex<sup>®</sup> มีสัดส่วนที่น้อยลงเทียบกับอนุภาคแป้งสตาร์ช ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาในการศึกษาต่อไป ดังนั้น ในการศึกษาดอนต่อไปจะควบคุมปริมาณกลีเซอรอลคงที่ที่ 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช

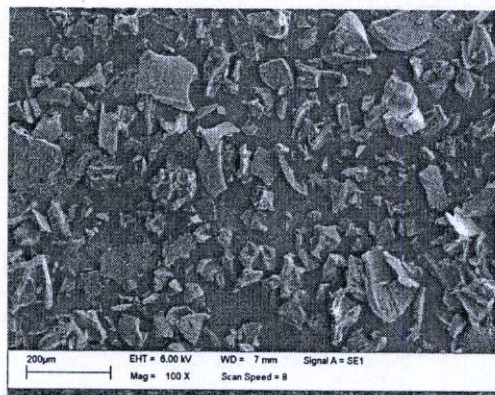
#### 4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

สัณฐานวิทยาของ Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ คือ EMS และ PGS สามารถศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 เป็นสัณฐานวิทยาของ EMS กับ PGS จะเห็นได้ว่า EMS มีรูปร่างเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีอนุภาคขนาดประมาณ  $11 \pm 3$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ส่วน PGS มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดประมาณ  $45 \pm 30$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) เนื่องจาก PGS

เป็นแป้งสตาร์ชตัดแปรที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า กระบวนการพรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization) โดยป้อนแป้งในรูปสารแขวนลอยหรือแป้งเปียก ลงในเครื่องทำแห้งเมื่อน้ำแป้งเข้าสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้ไอน้ำในน้ำแป้งระเหยออกไป ได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกขูดออกโดยใบมีด หลังจากนั้นนำไปอบแห้งและบดให้ละเอียด [9] รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน ทำให้เวลานำ EMS และ PGS ลงไปผสมใน Ecoflex<sup>®</sup> จึงเห็นลักษณะวิทยาที่ไม่เหมือนกัน

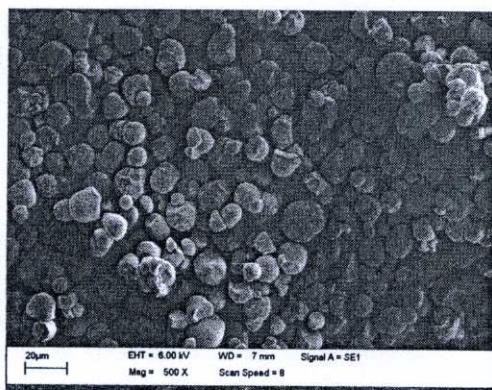


(A)

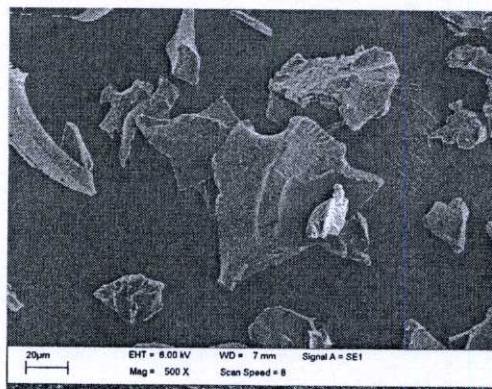


(B)

รูปที่ 4.1 SEM แสดงลักษณะวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) PGS ที่กำลังขยาย 100X



(A)



(B)

รูปที่ 4.2 SEM แสดงลักษณะวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) PGS ที่กำลังขยาย 500X

จากรูปที่ 4.3-4.8 แสดงลักษณะวิทยาของ Ecoflex<sup>®</sup> ผสมกับแป้งสตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ ทั้งส่วนภาคตัดขวางฟิล์ม ผ่านการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) (รูป A) และพื้นผิวฟิล์ม (รูป B) พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชสามารถผสมเข้ากันได้ดี เนื่องจาก Ecoflex<sup>®</sup> มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิเอสเตอร์และแป้งสตาร์ชมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต่างเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว โดยแป้งสตาร์ชซึ่งเป็นสารตัวเติม (Filler) กระจายตัวค่อนข้างดีอยู่ในเมทริกซ์

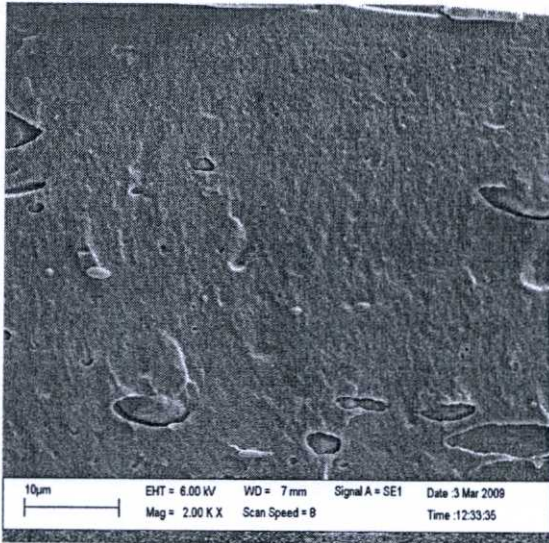
Ecoflex<sup>®</sup> และพบช่องว่างเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดจาก

1. ความสามารถในการยึดตัวไม่เท่ากันในขณะเป่าขึ้นรูป โดยพอลิเมอร์สามารถยึดตัวได้มากกว่าแป้งสตาร์ช
2. จากการเตรียมตัวอย่างจากการแช่ในโตรเจนเหลว ซึ่งพอลิเมอร์และแป้งสตาร์ชมีการขยายตัวได้ไม่เท่ากัน

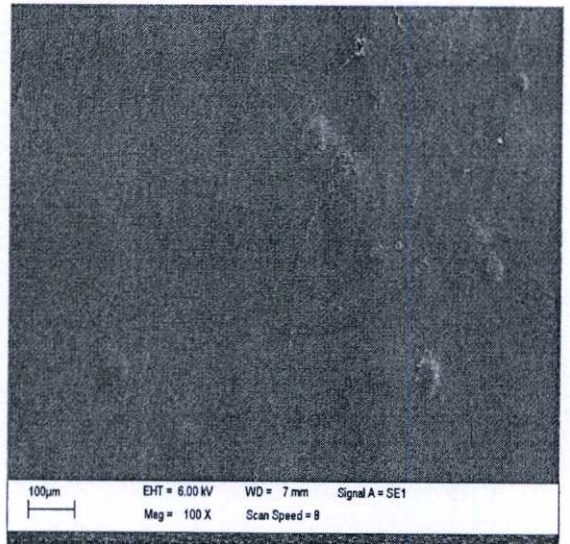
นอกจากนี้พบว่า แป้งสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) จากทรงกลมไปเป็นวงรี เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บ และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์ม ซึ่งเม็ดแป้งสตาร์ชค่อนข้างนิ่ม จึงถูกดึงและเปลี่ยนรูปได้

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม EMS และ PGS จะเห็นว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า โดยพบช่องว่างเพียงเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> กับ PGS สามารถอธิบายได้จากธรรมชาติและสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด เนื่องจาก EMS เป็นแป้งสตาร์ชที่ตัดแปรทางเคมี พื้นผิวของอนุภาคเม็ดแป้งสตาร์ช EMS ยังคงมีสัณฐานวิทยาเหมือนเดิม ในขณะที่ PGS เป็นแป้งสตาร์ชตัดแปรทางกายภาพ โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า กระบวนการพรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization) ซึ่งเม็ดแป้งสตาร์ชบวมตัวแตกออกหรือถูกทำลาย ทำให้ผนังแข็งของเม็ดแป้งสตาร์ชแตกออก จึงมีสัณฐานวิทยาที่ไม่เหมือนเดิม

พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพ (B) ของรูปที่ 4.3-4.8 มีความขรุขระมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากแป้งสตาร์ชเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวฟิล์มที่ผสม EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า PGS มีพื้นผิวฟิล์มเรียกว่า EMS เล็กน้อย เนื่องจาก PGS มีลักษณะเป็นแผ่น ส่วน EMS มีลักษณะเป็นเม็ดกลม จึงทำให้เห็นเป็นเม็ดได้ชัดเจนกว่า

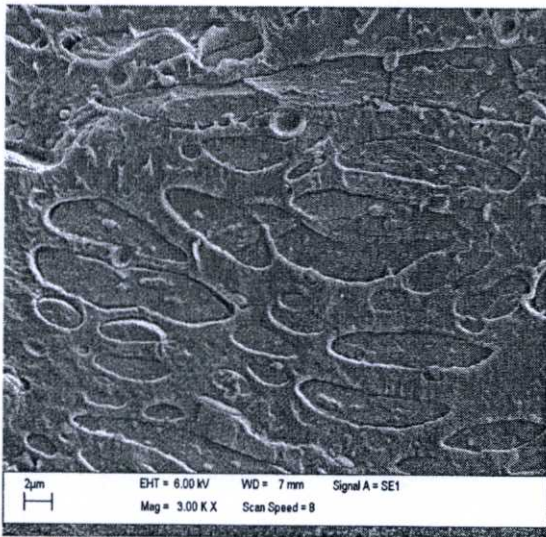


(A)

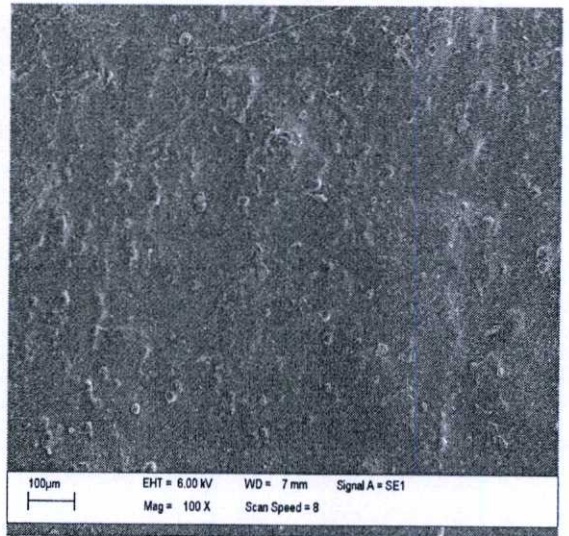


(B)

รูปที่ 4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex<sup>®</sup>/EMS สูตร 80:20 (A) ภาคตัดขวาง  
(B) พื้นผิว

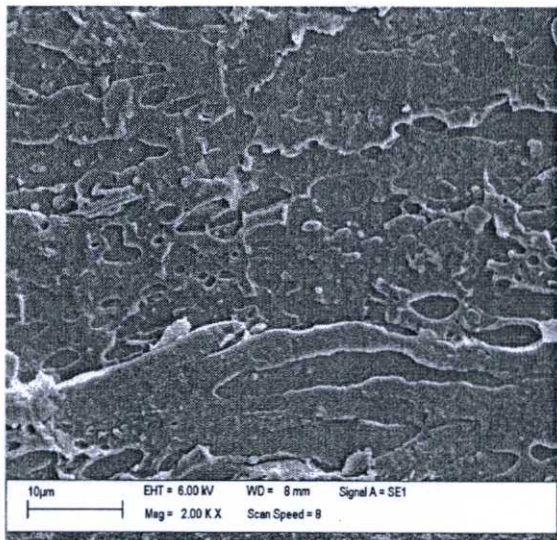


(A)

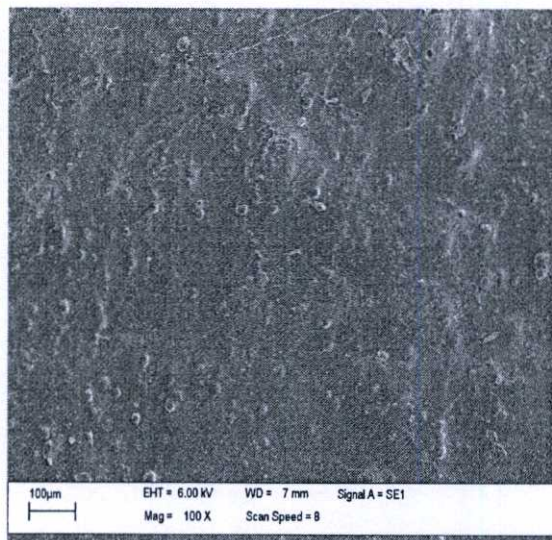


(B)

รูปที่ 4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex<sup>®</sup>/EMS สูตร 70:30 (A) ภาคตัดขวาง  
(B) พื้นผิว

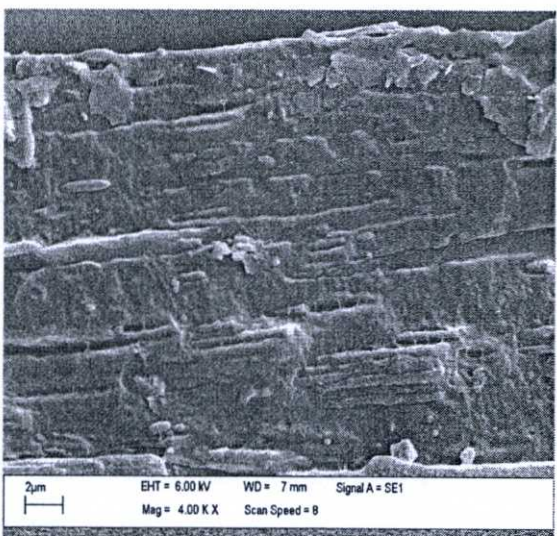


(A)

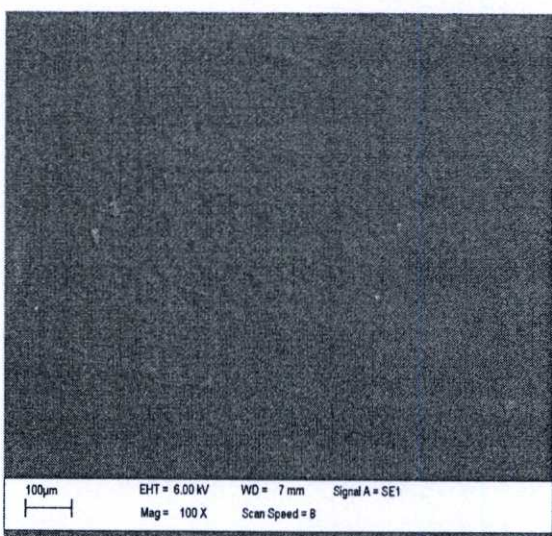


(B)

รูปที่ 4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex®/EMS สูตร 60:40 (A) ภาควัดคขวาง  
(B) พื้นผิว

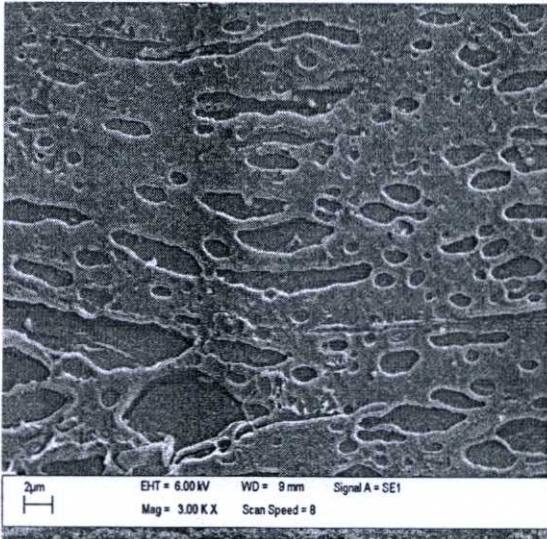


(A)

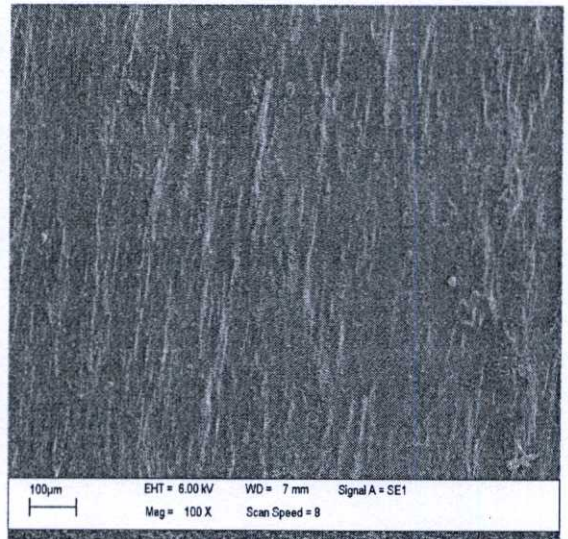


(B)

รูปที่ 4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex®/PGS สูตร 80:20 (A) ภาควัดคขวาง  
(B) พื้นผิว

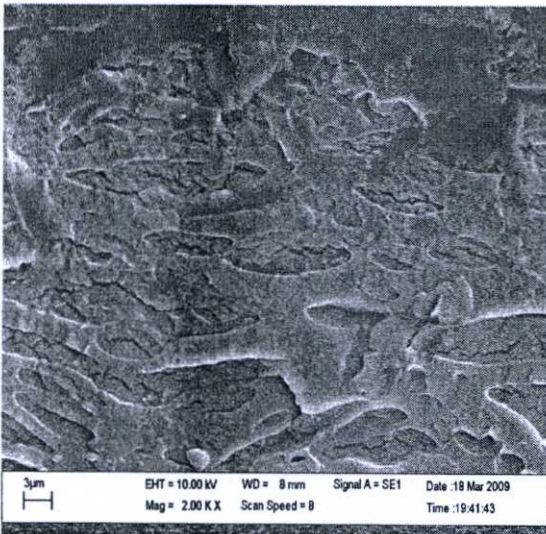


(A)

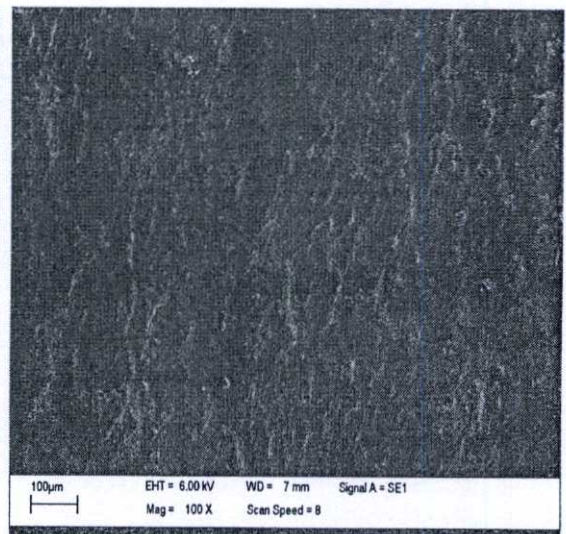


(B)

รูปที่ 4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex®/PGS สูตร 70:30 (A) ภาคตัดขวาง  
(B) พื้นผิว



(A)



(B)

รูปที่ 4.8 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ Ecoflex®/PGS สูตร 60:40 (A) ภาคตัดขวาง  
(B) พื้นผิว

## 4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกล ได้ใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์คือ กลีเซอรอลเป็น 50% ของแป้งสตาร์ช

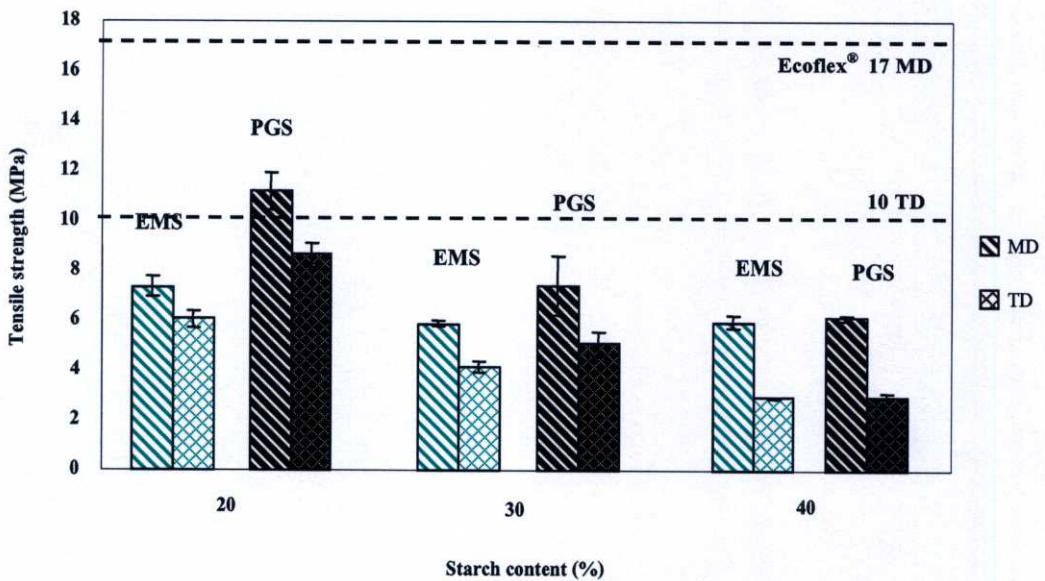
จากรูปที่ 4.9-4.12 พบว่า เมื่อมีการผสมแป้งสตาร์ชลงไป Ecoflex<sup>®</sup> ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจากอนุภาคแป้งสตาร์ชจะแทรกตัวอยู่ระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียหาย นอกจากนี้ การที่เติมแป้งสตาร์ชลงไปอาจทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน และสูตรที่ผสมแป้งสตาร์ชมีการใส่พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ปริมาณ 50% ของน้ำหนักแป้งสตาร์ช เป็นที่ทราบกันดีว่า พลาสติกไซเซอร์ทำให้วัสดุนิ่มขึ้น ความแข็ง และความแข็งแรงลดลง ดังนั้น เมื่อได้รับแรงดึงจึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

อัตราส่วนระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> กับ PGS ที่ 80:20 มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงฉีกขาดและมอดูลัสของยังสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น โดยเมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวที่ดี ไม่เป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคแป้งสตาร์ช สามารถผสมเข้ากันได้ดี และมีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ แป้งสตาร์ชยังมีสมบัติที่แข็ง ไม่มีความอ่อนตัวเท่า Ecoflex<sup>®</sup> ดังนั้นจึงทำให้สูตรที่มีปริมาณแป้งสตาร์ชน้อยคือ 80:20 มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสูตร 70:30 และ 60:40 ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ Ecoflex<sup>®</sup> และพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งสตาร์ชชนิดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆอัตราส่วน เนื่องจาก เม็ดแป้งสตาร์ชค่อนข้างนิ่ม ทำให้เปลี่ยนรูปเป็นไปวงรีได้ จึงไม่ค่อยส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

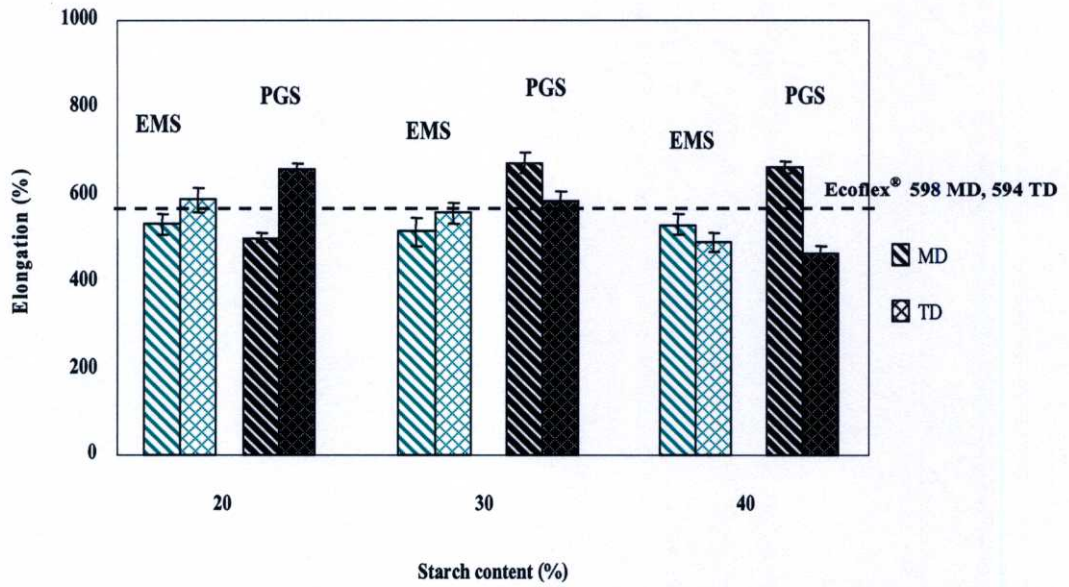
เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนกัน พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว PGS มีค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดที่ดีกว่า เนื่องจาก PGS เป็นแป้งสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการพรีเจลลิตินในเซชัน (Pregelatinization) ทำให้เม็ดแป้งสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (Denature) ทำให้ PGS มีลักษณะที่ยืดหยุ่นและผสมเข้ากันได้ดีกว่า EMS ทำให้สามารถรับแรงกระทำและถ่ายเทแรงได้มากกว่า และจากผลการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) จะเห็นว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสม PGS มีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคน้อยกว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสม EMS แต่เมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของ PGS และ EMS ไม่แตกต่างกันมากนัก

จากการทดสอบฟิล์มใน 2 ทิศทาง คือ แนว MD และ TD พบว่า สมบัติเชิงกลในทิศทาง MD มีสมบัติโดยรวมมากกว่าในทิศทาง TD เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป โดยมีกาให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนว MD และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนว TD ทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ Ecoflex® ทั้งสองทิศทาง โดยแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนว MD อาจมีมากกว่าแรงที่ใช้ในการเป่าขยายในแนว TD จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD ได้มากกว่า นอกจากนี้ แนว TD ได้ค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากขนาดเครื่องที่ใช้เป็นเครื่องเป่าฟิล์มในห้องปฏิบัติการ ไม่สามารถเป่าฟิล์มขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนการเป่าขยาย (Blow-up ratio) มากๆ ได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการเป่าในแนว TD

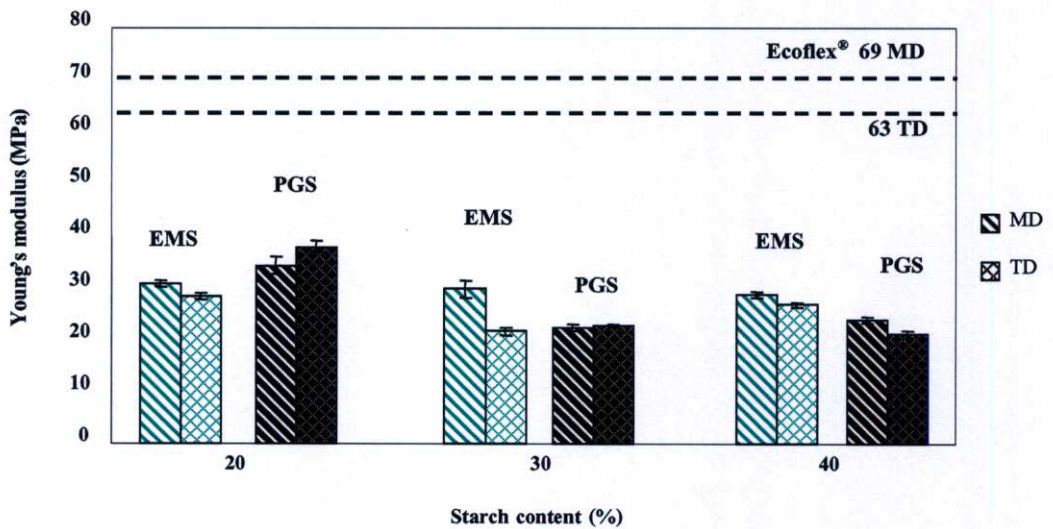
เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน มอก.711-2530 โดยดูจากภาคผนวก จ ซึ่งใช้เป็น Benchmark กับฟิล์มที่เป่าได้ในตอนนี้ จะเห็นว่าทุกสูตรผ่านเกณฑ์ค่าความยืดที่จุดขาดและแรงฉีกขาด แต่มีปัญหาในเรื่องค่าแรงดึงขาดโดยต่ำกว่าเกณฑ์



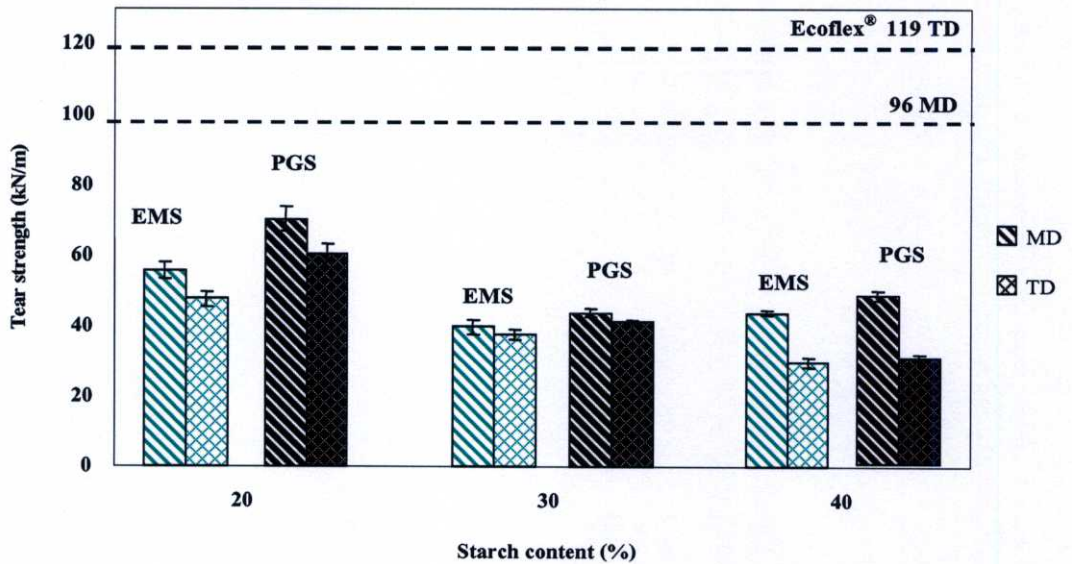
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่าง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ

#### 4.3 การศึกษาความแข็งแรงของรอยซึล (Seal strength)

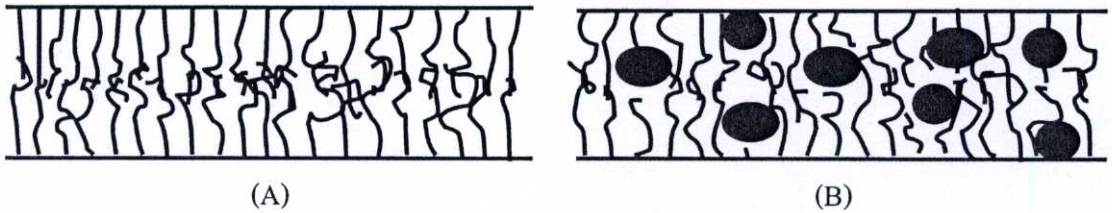
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแข็งแรงของรอยซึลหรือรอยเชื่อมต่อ (Seal strength) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มชนิดนี้ไปใช้เป็นฟิล์มทางการเกษตรที่ต้องมีการเชื่อมต่อกับความร้อน เช่น ถุงเพาะชำ ถุงห่อผลไม้ขณะปลูก ฯลฯ

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยซึล (Seal strength) ของ Ecoflex® และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Ecoflex® กับแป้งสตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของรอยซึลของ Ecoflex® ผสมกับแป้งสตาร์ชที่สูตรต่างๆ มีค่าต่ำกว่า Ecoflex® บริสุทธิ์เนื่องจาก

1. แป้งสตาร์ชจะแทรกตัวอยู่ระหว่าง Ecoflex® เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียหาย

2. การเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชเป็นการลดปริมาณ Ecoflex® ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุที่จะเกิดการหลอมและเชื่อมประสานที่รอยซึลเมื่อได้รับความร้อนขณะ Seal เกิดการยึดติดโดยการพันกันระหว่างสายโซ่ (Interdiffusion) แสดงดังรูปที่ 4.13 (A และ B)

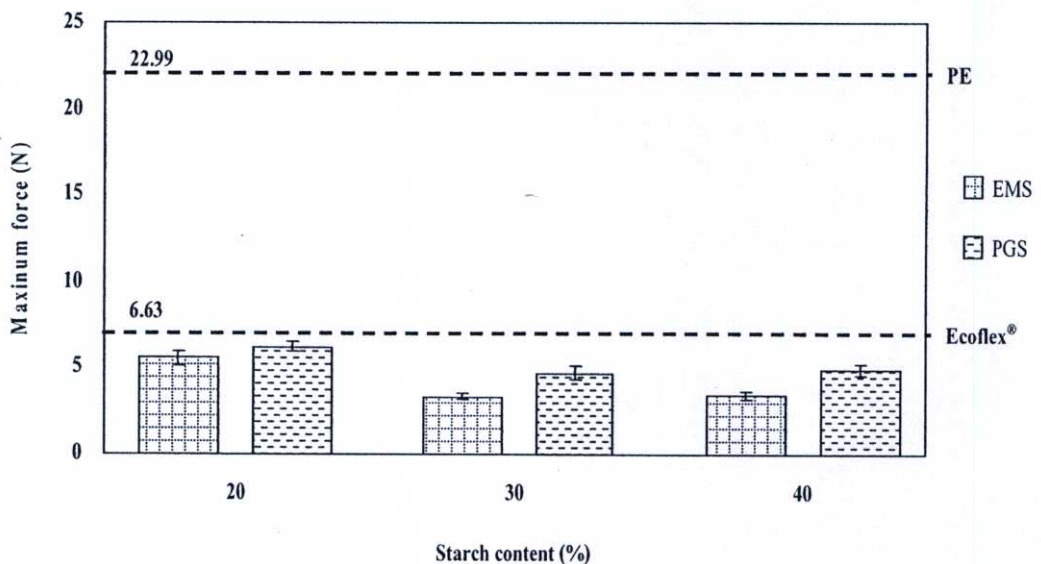
การยึดเกาะแบบนี้เป็นแบบการแพร่เข้าหากันหรืออินเตอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่าจะมีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นกับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการพันกัน



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน (A) Pure Ecoflex<sup>®</sup>  
(B) Ecoflex<sup>®</sup>/starch

3. สูตรที่ผสมแป้งสตาร์ชมีการใส่พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็กแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ ส่งผลให้การพันกันของสายโซ่เกิดการหลุดออกจากกัน (Chain disentanglement) ง่ายกว่า ทำให้มี Seal strength ต่ำกว่า

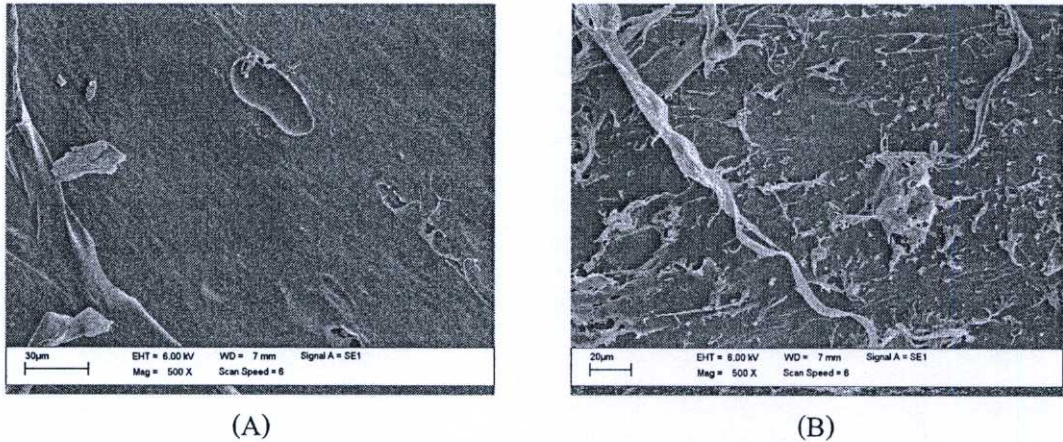
นอกจากนี้ ฟิล์ม Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสมแป้งสตาร์ชมีพื้นผิวที่ไม่ค่อยเรียบเท่าฟิล์ม Ecoflex<sup>®</sup> บริสุทธิ์ ทำให้ยากลำบากแก่การ Seal ให้ได้แน่นหนา



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยซึลของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า PGS มีค่าความแข็งแรงของรอยซึลที่ดีกว่า เนื่องจาก PGS ผงแข็งของเม็ดแป้งแตกออก ทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินอิสระสามารถเกิดการพันกันของสายโซ่ได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.15 โดยจะเห็นได้ว่า Ecoflex<sup>®</sup>/PGS บิดคดได้ดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS เมื่อทำการ

ทดสอบโดยการดึงฟิล์มให้ขาดออกจากกันบริเวณรอยขีด ซึ่ง Ecoflex®/PGS ขาดแบบ Cohesive failure ส่วน Ecoflex®/EMS ขาดแบบ Adhesive failure



รูปที่ 4.15 SEM แสดงลักษณะผิวหน้าของพื้นผิวฟิล์มบริเวณที่ทำการ Seal หลังจากการทดสอบความแข็งแรงของรอยขีด (A) EMS และ (B) PGS สูตร 60/40

#### 4.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

##### 4.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC เพื่อหาค่าของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่า  $T_m$  ของ Ecoflex® ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแป้งสตาร์ชทั้งสองชนิดลงไป แสดงว่าแป้งสตาร์ชไม่มีผลต่อความสมบูรณ์และขนาดผลึกของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม ค่า %Crystallinity ของ Ecoflex® ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมแป้งสตาร์ช ทั้งนี้เป็นผลจากการที่อนุภาคแป้งสตาร์ชเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันอย่างเป็นระเบียบน้อยลง ความเป็นผลึกจึงลดลง และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชพบว่า %Crystallinity มีค่าไม่แตกต่างกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนกัน พบว่า %Crystallinity ของ Ecoflex®/EMS มีค่าใกล้เคียงกันกับ Ecoflex®/PGS แสดงว่าชนิดของแป้งสตาร์ชไม่มีผลต่อ %Crystallinity ของพอลิเมอร์

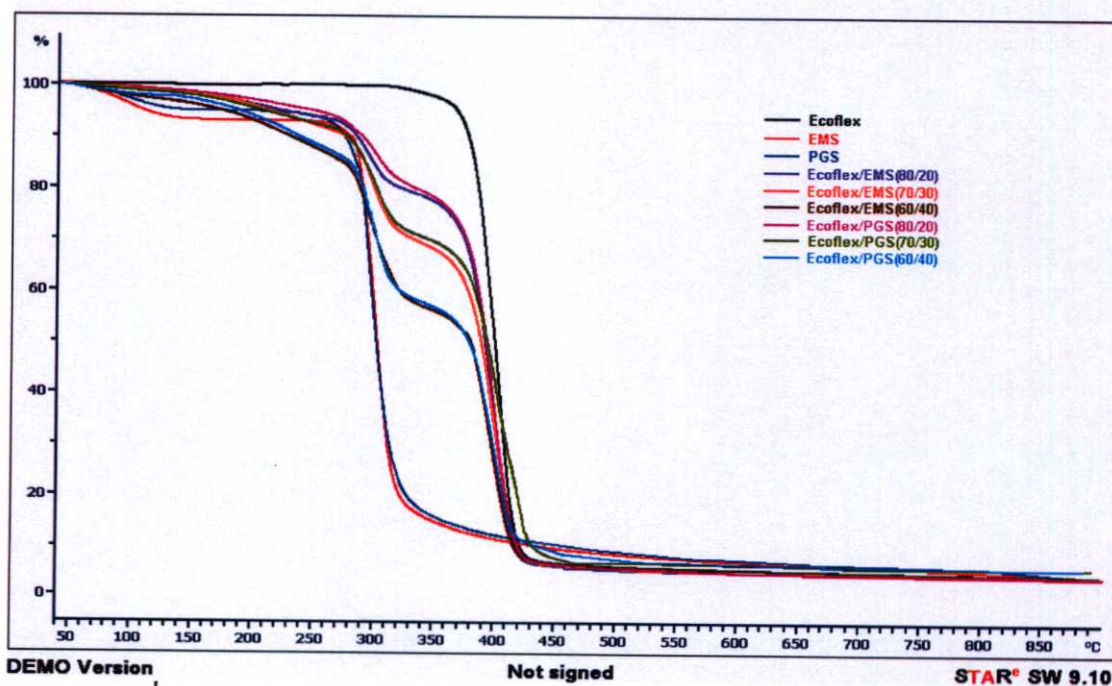
จากการทดสอบหาค่า  $T_g$  พบว่าค่า  $T_g$  ไม่แตกต่างกันในทุกอัตราส่วน

ตารางที่ 4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC

สูตร	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	%Crystallinity
Ecoflex®	-29.3	119.7	17.3
Ecoflex®/EMS (80:20)	-30.9	120.3	15.3
Ecoflex®/EMS (70:30)	-30.7	120.1	15.0
Ecoflex®/EMS (60:40)	-30.2	119.2	14.2
Ecoflex®/PGS (80:20)	-30.5	119.9	15.1
Ecoflex®/PGS (70:30)	-31.3	119.4	14.8
Ecoflex®/PGS (60:40)	-32.4	118.8	13.4

#### 4.4.2 Thermogravimetric analysis (TGA)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณแป้งสตาร์ชที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในภาคผนวก ข และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 TGA thermogram ของ Ecoflex®, แป้งสตาร์ช และพอลิเมอร์สูตรต่างๆ

จากการศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ดังรูปที่ 4.16 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ Ecoflex<sup>®</sup>, EMS และ PGS คือ 386, 290.1 และ 290.7 °C ตามลำดับ

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของ Ecoflex<sup>®</sup>/แป้งสตาร์ช เมื่อได้รับความร้อนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 3 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0-100 °C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของแป้งสตาร์ชในช่วงอุณหภูมิประมาณ 288-292 °C และช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ Ecoflex<sup>®</sup> ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 385-387 °C จากเทอร์โมแกรมแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ Ecoflex<sup>®</sup>/แป้งสตาร์ช เนื่องจาก Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ช ไม่ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) และทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่เหมือนกัน

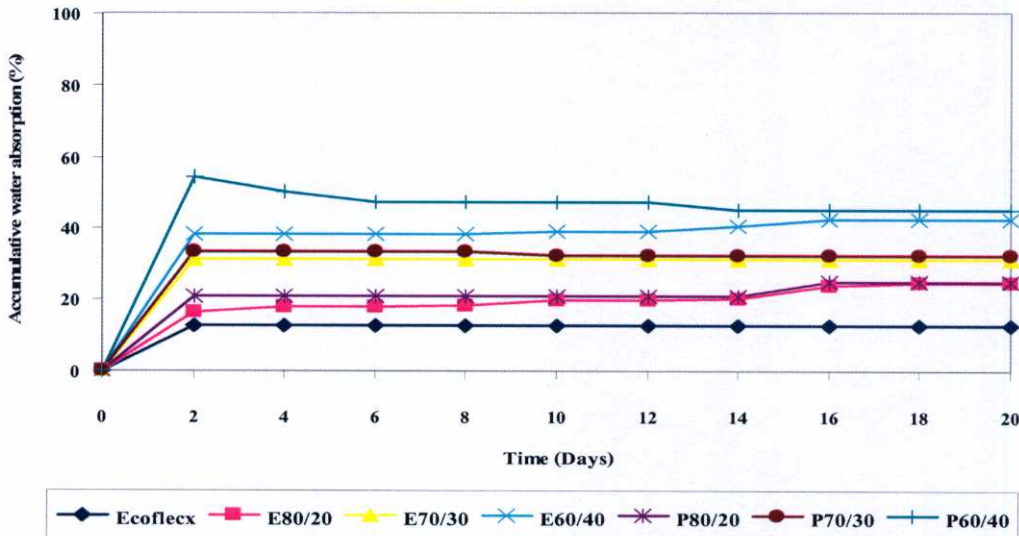
จากการศึกษาปริมาณแป้งสตาร์ชที่แน่นอนในพอลิเมอร์ผสม พบว่ามีค่าน้อยกว่าที่กำหนดเล็กน้อย ดังแสดงในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข-1) อาจเนื่องจากในขั้นตอนการผสม เมื่อเทเม็ด Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสมแป้งสตาร์ช กติเซอร์รอด และสารทำให้เกิดเสถียรภาพลงในช่องรับสาร (Hopper) ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เม็ด Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ชจะเคลื่อนที่ตามแรงขับของสกรู และเกิดการผสม แต่อนุภาคบางส่วนของแป้งสตาร์ชจะติดค้างอยู่ในร่องสกรู และเกิดการฟุ้งกระจายในขั้นตอนการผสมได้ง่ายเนื่องจากแป้งสตาร์ชมีลักษณะเป็นผง จึงส่งผลให้ปริมาณแป้งสตาร์ชที่พบในพอลิเมอร์ผสมมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด

## 4.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

### 4.5.1 การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ Ecoflex<sup>®</sup> /แป้งสตาร์ช กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> มีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด แต่เมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์แต่ละสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าแป้งสตาร์ชมีความสามารถในการดูดซับน้ำเป็นอย่างมาก ในขณะที่ Ecoflex<sup>®</sup> มีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่า และในช่วงแรกของการแช่น้ำ ฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วใน 2 วันแรก ต่อมาจะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากอนุภาคของแป้งสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาก เมื่อเม็ดแป้งสตาร์ชเกิดการบวมตัว (Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งสตาร์ชเกิดการอึดตัวไปด้วยน้ำ จึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก

จากรูปที่ 4.17 ยังเห็นว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสมกับ PGS มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่ผสมกับ EMS อาจเนื่องมาจาก สมบัติการชอบน้ำและลักษณะสัณฐานวิทยาของ PGS



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ Ecoflex<sup>®</sup> /แป้งสตาร์ช กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น

#### 4.5.2 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อการเจริญเติบโตของต้นพืช เช่น ฟิล์มคลุมดินควรจะมีสมบัติลดการระเหยของน้ำ เพื่อให้เกิดความชุ่มชื้นขึ้นภายในแปลงปลูก หรือฟิล์มโรงเรือนพลาสติกควรจะยอมให้ไอน้ำผ่านได้ดี จะทำให้ภายในโรงเรือนไม่เกิดการหนาแน่นของไอน้ำมากเกินไป [17]

สมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยเลือกสูตรที่มีปริมาณแป้งสตาร์ชมากและน้อยสุด นำมาทดสอบเพื่อที่จะดูแนวโน้มของค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability: WVP) โดยค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) สามารถนำไปคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มได้ โดยการนำเอาความหนาของฟิล์มมาคูณกับค่า WVTR ที่วัดได้ (ข้อมูลดังแสดงในภาคผนวก ก.)

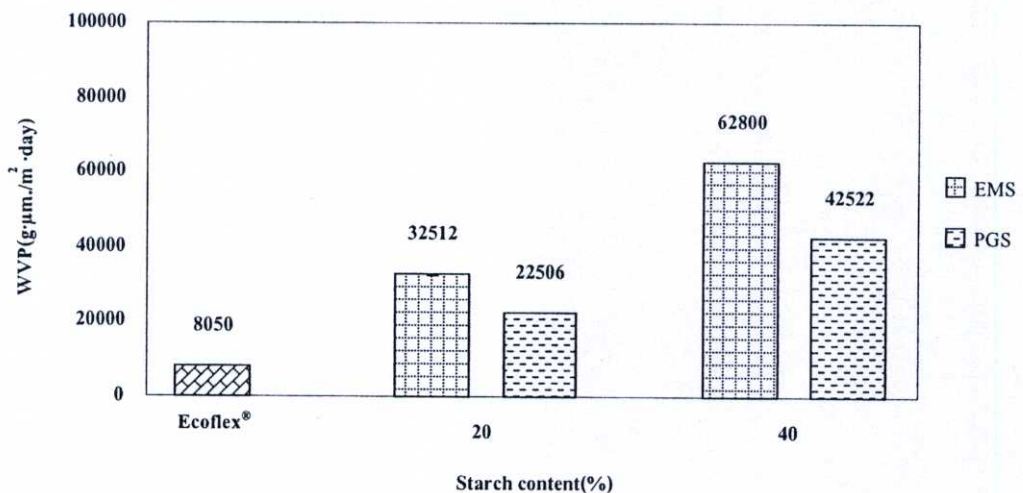
จากรูปที่ 4.18 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนปริมาณแป้งสตาร์ชในฟิล์มวัสดุผสม Ecoflex<sup>®</sup>/แป้งสตาร์ช พบว่า ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากเทียบกับฟิล์มอีโคฟล็กซ์บริสุทธิ์ จากกราฟจะเห็นได้ว่า การใส่แป้งสตาร์ช 20% ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น 3-4 เท่า การใส่แป้งสตาร์ชตัดแปร 40% ทำให้การซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นถึง 5-7 เท่าโดยประมาณ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่า แป้งสตาร์ชมีความสามารถในการดูดความชื้นดีมาก (แต่มีความสามารถในการจับกับออกซิเจนน้อยกว่า) การเพิ่มแป้งสตาร์ชในวัสดุผสมทำให้เพิ่มสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity)

ทำให้อิโนน้ำสามารถเกิดการดูดซับ (Adsorption) ที่ผิวของด้านความชื้นสูงและเกิดการหลุดออก (Desorption) ที่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งความเป็นไปได้ที่อิโนน้ำจะสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มอาจเกิดจาก

1. อิโนน้ำสามารถซึมผ่านรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ของ Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ช
2. อิโนน้ำสามารถซึมผ่านบริเวณออสถฐานของ Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช

จากผลทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน (จากตารางที่ 4.2) เพราะฉะนั้นบริเวณออสถฐานน่าจะใกล้เคียงกันด้วย นั่นแสดงว่าการซึมผ่านอิโนน้ำของฟิล์มโดยส่วนมากเกิดจากการซึมผ่านรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากกว่า ซึ่งการเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชลงใน Ecoflex<sup>®</sup> จึงเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มรอยต่อระหว่างวัฏภาคให้มีจำนวนมากขึ้น อิโนน้ำสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้มาก ดังนั้น WVP ของแผ่นฟิล์มจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านอิโนน้ำของ Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม EMS และ PGS พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม PGS มีค่าการซึมผ่านอิโนน้ำที่ต่ำกว่า เนื่องจาก Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีและมีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.18 ค่าการซึมผ่านอิโนน้ำ (WVP) ของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ

#### 4.5.3 สมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

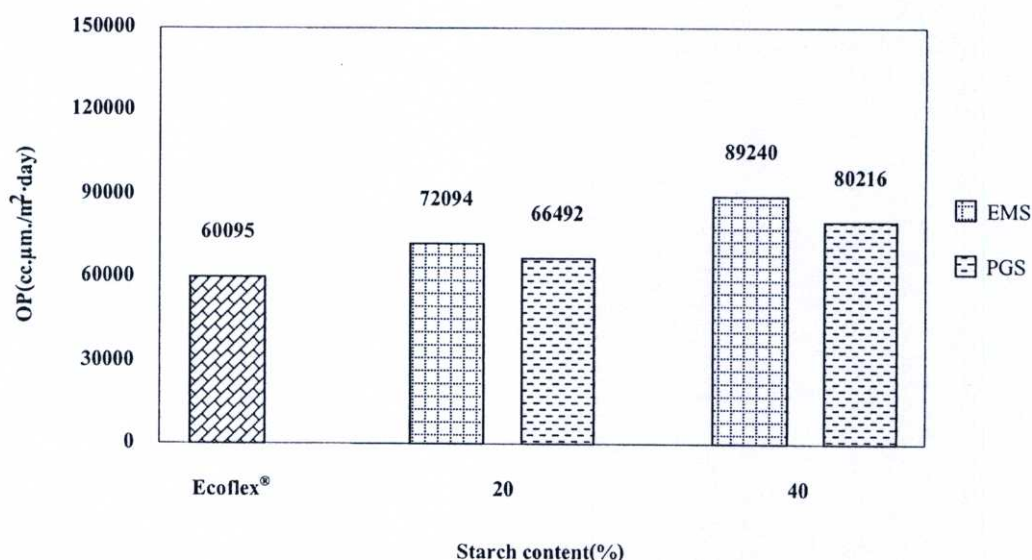
ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability, OP) ของ Ecoflex<sup>®</sup> และ Ecoflex<sup>®</sup> ผสมแป้งสตาร์ชสูตร 80:20 และ 60:40 แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณการเติมแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น โดยกลไกการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนนั้นเกิดขึ้นคล้ายกับการซึมผ่านอิโนน้ำคือ

1. ก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ช

## 2. ก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านบริเวณสัณฐานของ Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช

ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแป้งสตาร์ชลงในพอลิเมอร์เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มรอยต่อระหว่างวัฏภาค ทำให้ก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของ Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม EMS และ PGS พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม PGS มีค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนที่ต่ำกว่า เนื่องจาก Ecoflex<sup>®</sup> ที่เติม PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีและมีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.19 ค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OP) ของพอลิเมอร์สูตรต่างๆ

## 4.6 การทดสอบการฝังดิน (Burial test)

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์มีมาตรฐานของการทดสอบที่ได้รับความนิยมเป็นที่ยอมรับในระดับชาติ โดยทั่วไปมีหลายมาตรฐาน เช่น DIN V 54900 EN 13432 รวมถึง ASTM D 6400 [1] แต่เนื่องจากการทดสอบมาตรฐานข้างต้นต้องเสียเวลาในการเตรียมค่อนข้างนานและมีค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบแนวเปรียบเทียบเพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่สภาวะเดียวกันในระดับเบื้องต้น โดยมีการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรดด่างของดิน

โดยได้ทำการทดสอบสมบัติการย่อยสลายของ Ecoflex<sup>®</sup> และพอลิเมอร์ผสม Ecoflex<sup>®</sup> กับแป้งสตาร์ชทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.24 (A-G) พบว่า Ecoflex<sup>®</sup> ผสมแป้งสตาร์ช เกิดการย่อยสลายของวัสดุได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับ Ecoflex<sup>®</sup> บริสุทธิ์ และเมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี หรือเกิดการย่อยสลายมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งสตาร์ชมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, -OH) จำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง ชีดเกาะกัน

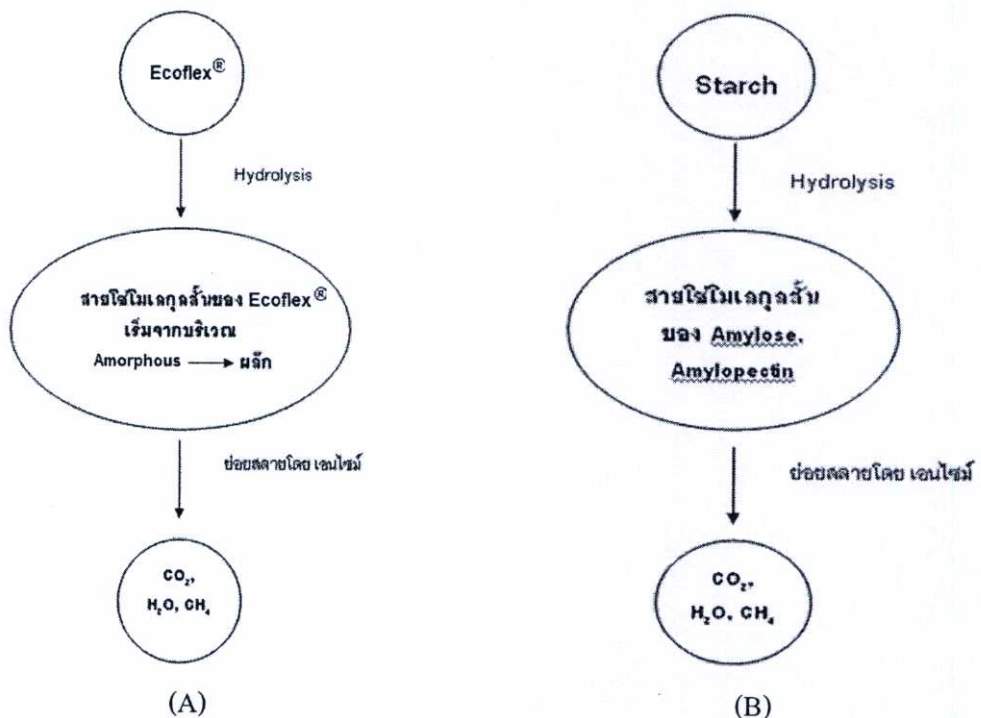
ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้สามารถดูดซึมความชื้นได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) [40] ของจุลินทรีย์ในดินซึ่งต้องอาศัยความชื้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชจึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น

ซึ่งกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของพอลิเมอร์มี 2 ขั้นตอน โดย

- ขั้นที่ 1 น้ำจะแพร่เข้าไป เป็นผลให้ฟิล์มเกิดการบวมและเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นบนฟิล์ม

- ขั้นที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ [41]

โดยเราสามารถสรุปกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของ Ecoflex<sup>®</sup> และแป้งสตาร์ช ได้ดังรูปที่ 4.20 (A และ B)



รูปที่ 4.20 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ (A) Ecoflex<sup>®</sup> และ (B) แป้งสตาร์ช [42]

ผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ [28] ที่ศึกษาผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้งผสมกับ Polycaprolactone (PCL) พบว่า PCL ที่ถูกฝังภายในระยะเวลา 4 เดือนยังไม่เกิดการย่อยสลาย แต่เมื่อผสมแป้งเข้าไปทำให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งซึ่งกระจายในโครงสร้างของ PCL จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ง่ายกว่า PCL และทำให้โครงสร้างมีรูพรุนซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ เอนไซม์ และกระบวนการทางไฮโดรไลซิส

เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า PGS สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่า เนื่องจาก PGS เป็นแป้งสตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Denature) เม็ดแป้งสตาร์ชแตกออก จึงทำให้แป้งสตาร์ชมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น มีโอกาสที่น้ำจะสัมผัสกับแป้งสตาร์ชมากขึ้น จุลินทรีย์จึงเติบโตได้มากกว่า โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสในพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) นั้นจะเกิดปฏิกิริยาบริเวณของส่วนอสัณฐาน (Amorphous) จนสมบูรณ์ก่อนเพราะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า ส่วนของผลึก (Crystalline) จากนั้นจึงเริ่มเกิดปฏิกิริยาในส่วนของผลึกต่อไป [42]

จากการทดสอบการฝังดินของ Ecoflex<sup>®</sup> บริสุทธิ์จะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ชัดเจนนัก แต่ได้มีการรับรองโดยมาตรฐาน ASTM D 6400, European Standard EN 13432, and GreenPla Standard [43] แล้วว่า Ecoflex<sup>®</sup> สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ผลิตภัณฑ์คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ เป็นผลทำให้พลาสติกย่อยสลายได้จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าภายใน 12 อาทิตย์ ซึ่งอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับความชื้น อุณหภูมิ พื้นที่ผิว และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อีกด้วย [6]



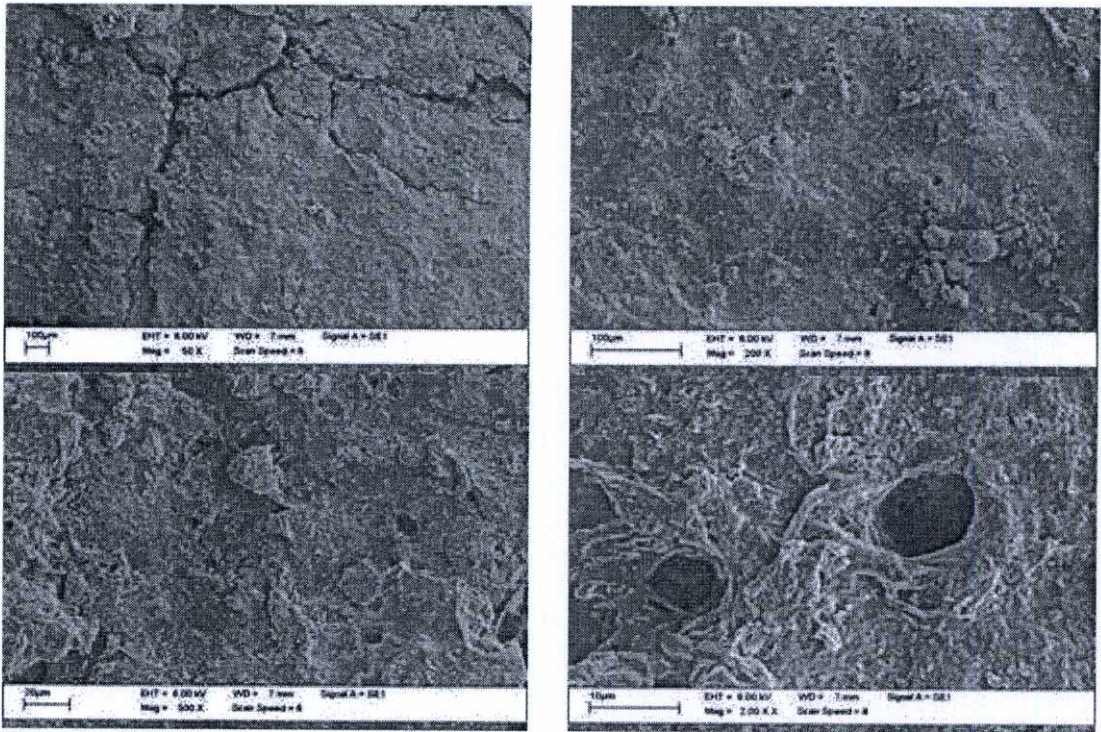
ก่อนการทดสอบ

2 สัปดาห์

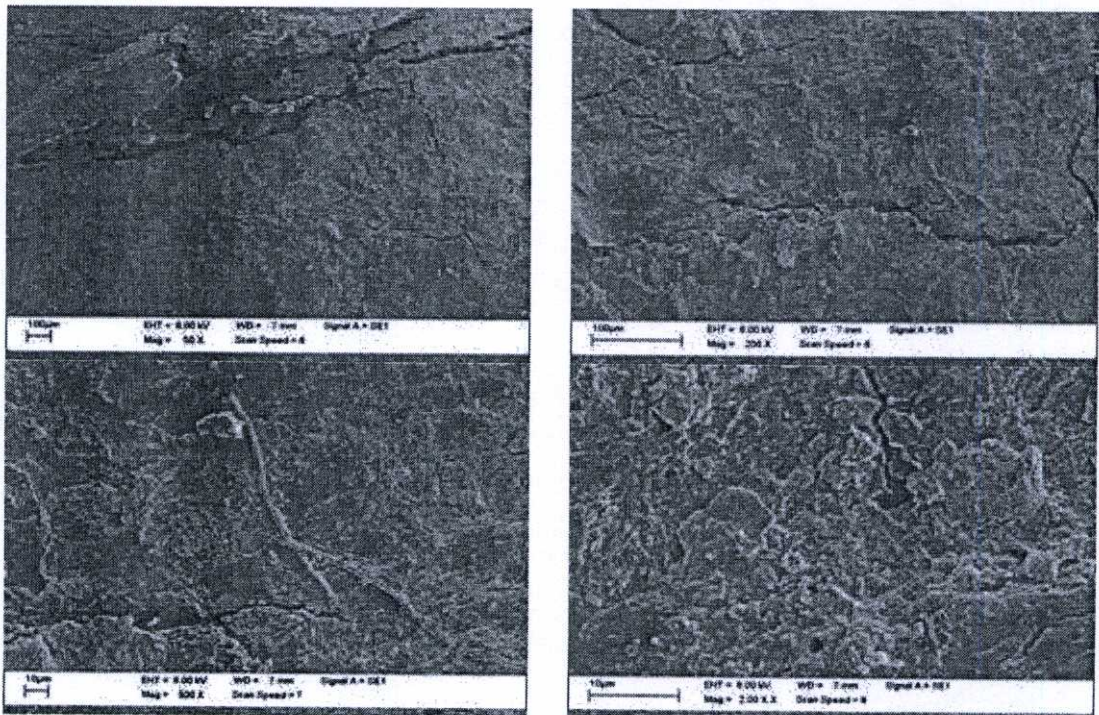
4 สัปดาห์

รูปที่ 4.21 ภาพแสดงการย่อยสลายของ Ecoflex<sup>®</sup> (โดยกระบวนการคอมโพสท์ (Composting) ที่อุณหภูมิ 55 °C) [44]

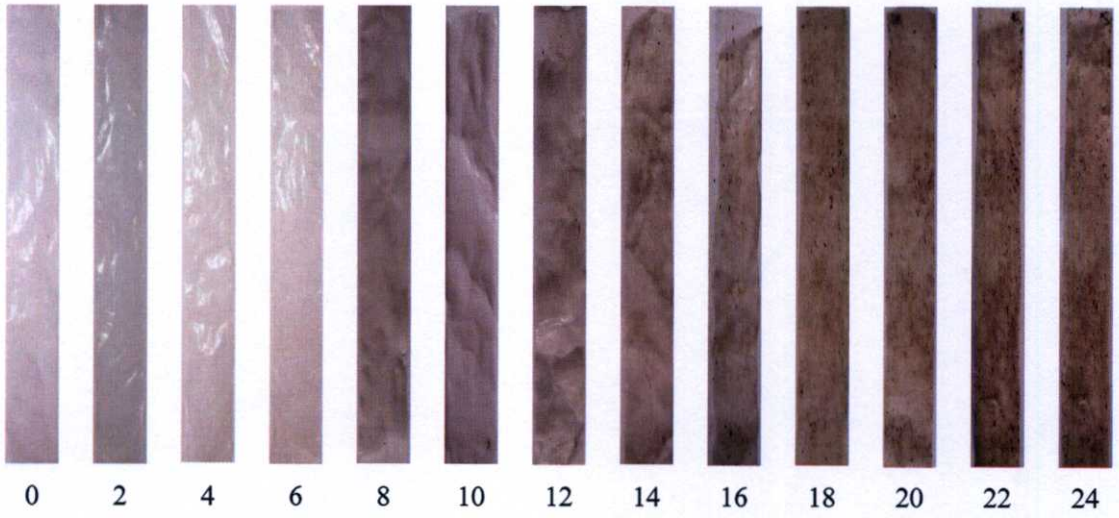
เมื่อพิจารณาพื้นผิวของชิ้นงานของ Ecoflex<sup>®</sup> ผสมแป้งสตาร์ชที่ผ่านการฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน (รูปที่ 4.22 และ 4.23) พบว่ามีการย่อยสลาย โดยสังเกตได้จากเกิดรอยแตกที่พื้นผิว (Crack) นอกจากนี้จากภาพถ่าย SEM จะสังเกตเห็นตำหนิบนผิวที่เป็นรูเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของแป้งสตาร์ชโดยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนั่นเอง [28] เพราะลักษณะของรูที่เกิดขึ้น มีขนาดเท่ากับขนาดของเม็ดแป้งสตาร์ช ซึ่งเม็ดแป้งสตาร์ชมีขนาดประมาณ  $11 \pm 3 \mu\text{m}$  ส่วนสภาพพื้นผิวของ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS ดังรูปที่ 4.23 อาจเห็นรูของเม็ดแป้งสตาร์ชไม่ชัดเจนเท่ากับ Ecoflex<sup>®</sup>/EMS เนื่องจากลักษณะรูปร่างของ PGS ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่น ทำให้ยากแก่การมอง



รูปที่ 4.22 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ Ecoflex®/EMS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน



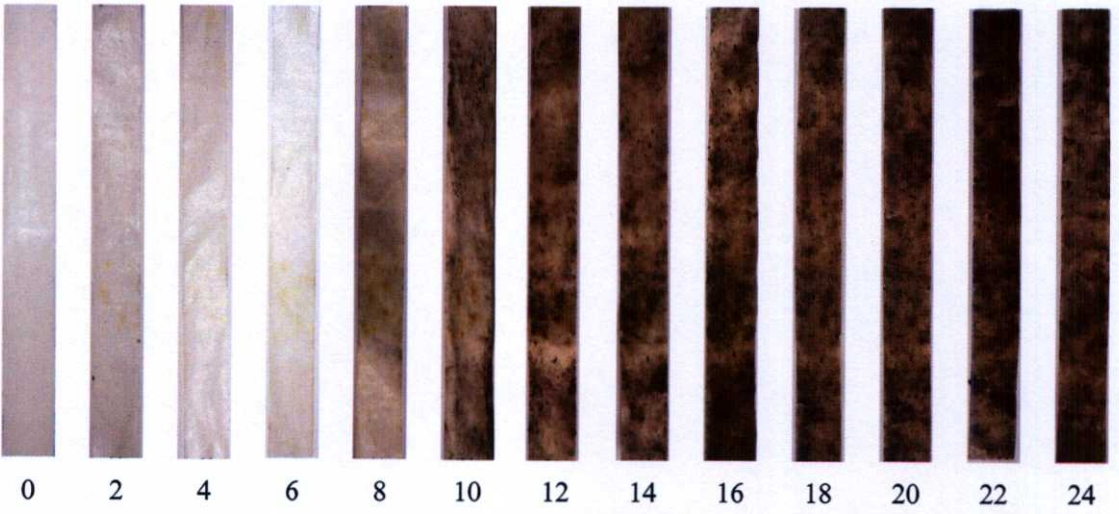
รูปที่ 4.23 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ Ecoflex®/PGS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

weeks

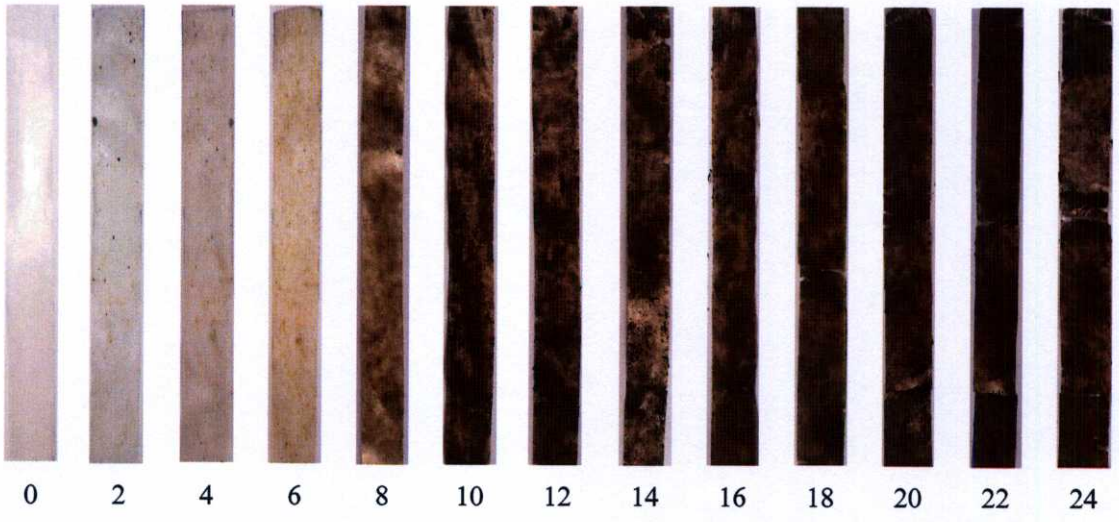
(A)



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

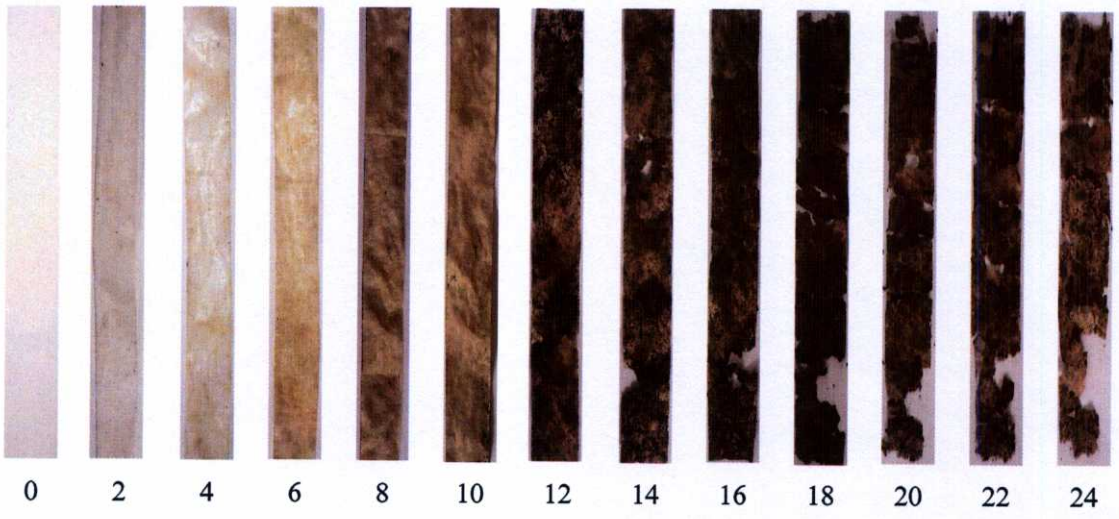
weeks

(B)



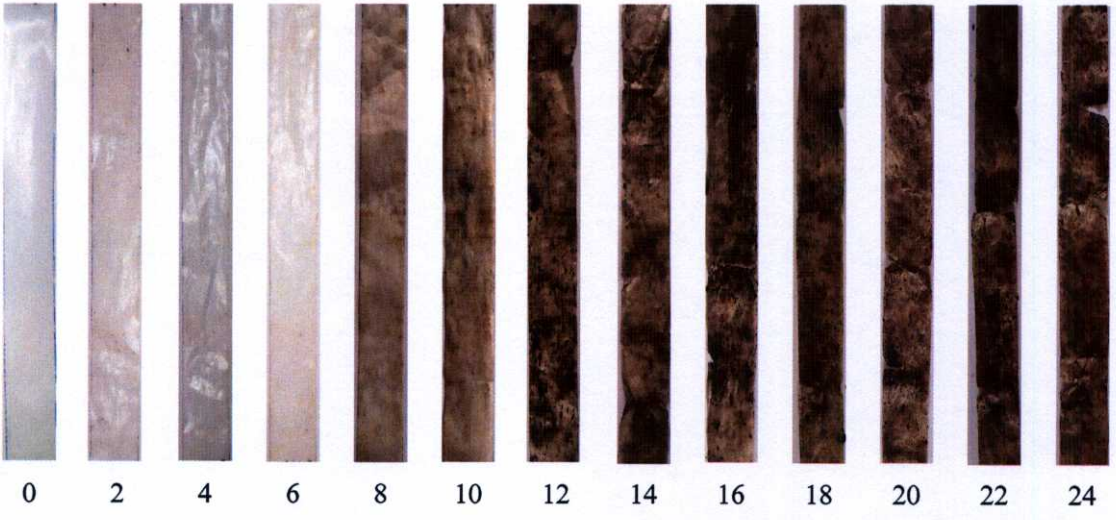
weeks

(C)



weeks

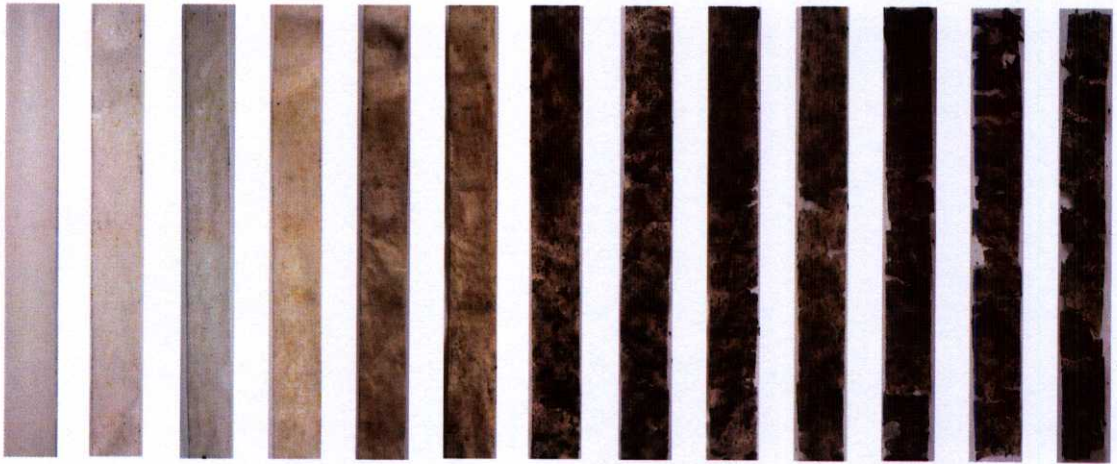
(D)



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

weeks

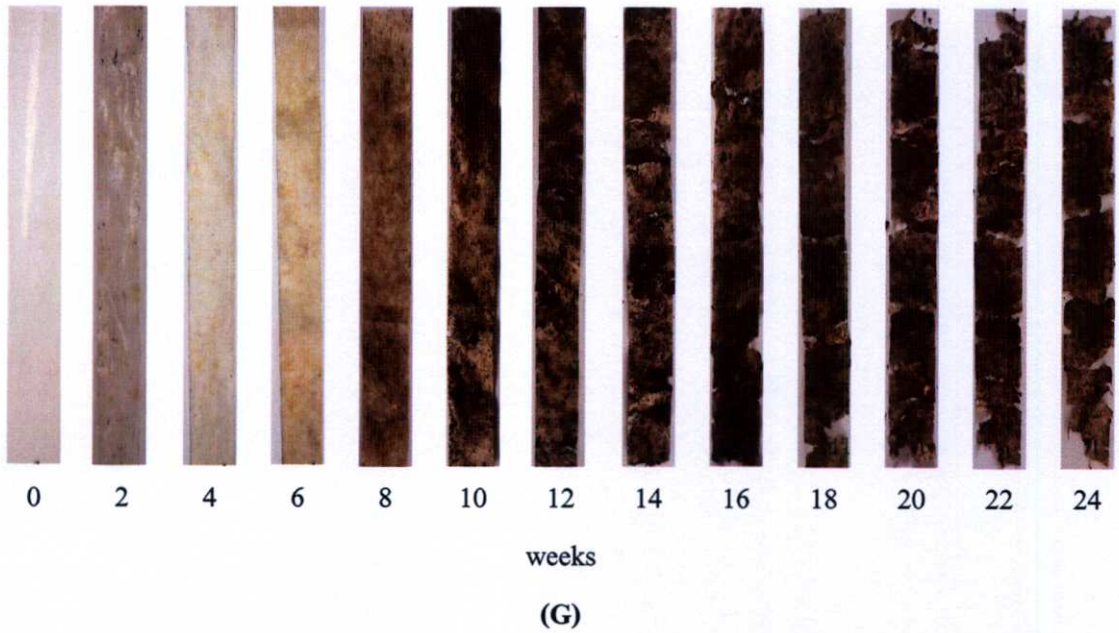
(E)



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

weeks

(F)



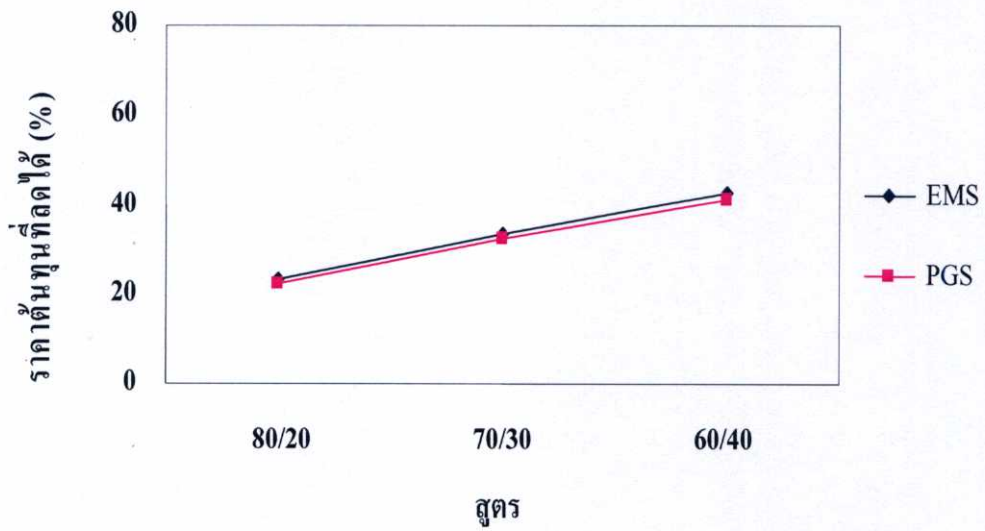
**รูปที่ 4.24** ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7  
 (A) Pure Ecoflex<sup>®</sup>, (B) Ecoflex<sup>®</sup>/EMS (80/20), (C) Ecoflex<sup>®</sup>/EMS (70/30),  
 (D) Ecoflex<sup>®</sup>/EMS (60/40), (E) Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (80/20), (F) Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (70/30) และ  
 (G) Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (60/40)

#### 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

จากการที่พลาสติกย่อยสลายได้มีราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีการพยายามคิดค้นที่จะลดต้นทุนในการผลิตโดยนำเอาวัตถุดิบที่หาง่าย ราคาถูกและมีคุณภาพดีนำมาผสม โดยงานวิจัยนี้้นำเอาแป้งสตาร์ชที่ทำจากมันสำปะหลังซึ่งมีมากในประเทศไทยนำมาใช้ เพื่อปรับราคาค่าต้นทุนไม่ให้สูงเกินไป

จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางตัวอย่างการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสูตร Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (60:40) ส่วนสูตรอื่น ๆ คิดได้เช่นเดียวกัน โดยดูจากภาคผนวก ง จะเห็นได้ว่า Ecoflex<sup>®</sup> มีราคาค่อนข้างสูงคือ กิโลกรัมละ 270 บาท (เป็นราคา ณ เดือนธันวาคม 2551) ส่วน EMS และ PGS มีราคากิโลกรัมละ 18 และ 28 บาท ตามลำดับ (เป็นราคา ณ เดือนธันวาคม 2551) ซึ่งมีราคาค่อนข้างถูก โดยเมื่อนำไปผสม ทำให้พอลิเมอร์สูตรต่างๆมีราคาตกลง ดังนี้ Ecoflex<sup>®</sup>/EMS สูตร 80/20, 70/30 และ 60/40 มีราคากิโลกรัมละ 208.0, 181.0 และ 156.3 บาท ตามลำดับ ส่วน Ecoflex<sup>®</sup>/PGS สูตร 80/20, 70/30 และ 60/40 มีราคากิโลกรัมละ 209.8, 183.6 และ 159.5 บาท ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมสตาร์ชลงไป สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ถึง 20-40% (ขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งสตาร์ชที่ใช้) เมื่อเทียบกับ Ecoflex<sup>®</sup> บริสุทธิ์ แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.25 นั่นก็แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้การนำสตาร์ชมาผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตรงกับความต้องการใช้งานเพิ่มขึ้น สามารถนำมาใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การเกษตร และ

บรรจุกัญชี เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งทางด้านเศรษฐกิจและการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมของผู้บริโภคที่มีเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงราคาต้นทุนที่ลดได้ในสูตรต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสูตร Ecoflex®/PGS (60:40)

สารเคมี	ราคา (บาท/ กก.)	อัตราส่วนผสม			
		Pure Ecoflex®		Ecoflex®/PGS	
				60/40	
		ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท/ กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท/ กิโลกรัม)
Ecoflex®	270	100	270	60	162
EMS	18	-	-	-	-
PGS	28	-	-	40	11.2
Glycerol	90	-	-	20	18
Anox® 20	430	-	-	0.05	0.215
Alkanox® 240	370	-	-	0.05	0.185
		รวม	270	รวม	190.4
				ราคาต่อ 1 kg	159.5
				ประหยัด (%)	40.9

หมายเหตุ ราคานี้ยังไม่ได้รวมค่า Compounding

Ecoflex® ราคา ณ เดือนธันวาคม 2551

EMS, PGS และ Glycerol ราคา ณ เดือนธันวาคม 2551

Anox® 20, Alkanox® 240 ราคา ณ เดือนธันวาคม 2551

## ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม

จากตอนที่ 1 เป็นการเตรียมตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสม Ecoflex® ผสมแป้งสตาร์ชดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งสตาร์ชดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) และแป้งสตาร์ชดัดแปรพรีเจด (Pregelatinized starch; PGS) โดยใช้เครื่องในห้องปฏิบัติการขนาดเล็ก (เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) รุ่น PL-20 บริษัท Hakke Co.,Ltd. คู่กับเครื่องเป่า (Blown-film unit) บริษัท Lab tech engineering Co.,Ltd. ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวดาย (Die diameter) 50 mm มีอัตราส่วนเป่าฟิล์ม (Blow-up ratio) ก่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 2 เท่า) ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาค่อนข้างมาก ประมาณ 60-130 ไมครอน และความแข็งแรงในแนว TD ต่ำกว่าที่ควรเป็นในการผลิต

จริง ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 นี้ จึงทำการคัดเลือกสูตรผสม โดยดูจากสมบัติเชิงกล, ลักษณะรูปลักษณะภายนอก และราคาต้นทุนวัตถุดิบที่สามารถลดได้ ซึ่งได้ทำการคัดเลือกมา 3 สูตร ได้แก่ Ecoflex®/PGS (80:20), Ecoflex®/PGS (60:40) และ Ecoflex®/EMS (60:40) แล้วนำมาเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ รุ่น FRECON FII F010II-E4 บริษัท A.P.Y Engineering Co.,Ltd. มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวตาย (Die diameter) 40 mm ที่บริษัทวัลย์ดี พาณิชยอุตสาหกรรม จำกัด ดังรูปที่ 4.26 โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลบางประการของฟิล์มที่เตรียมในการทดลองตอนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.26-4.29

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม

	สภาวะ
อัตราเร็วสกรู	18-20 rpm
อุณหภูมิสกรู	145 °C
อัตราการดึงฟิล์ม	10 m/min

จากการทดลองขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพ Ecoflex® ผสมแป้งดัดแปรสูตรต่างๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้โดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม พบว่าสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้บางลง เนื่องจากใช้อัตราการเป่าฟิล์ม (Blow-up ratio) ประมาณ 3 เท่า โดยฟิล์มมีความหนาน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 50-80 ไมครอน แต่ฟิล์มที่ได้ยังมีความหนามากกว่าเป้าหมายที่ต้องการของงานวิจัยและฟิล์มเชิงพาณิชย์ (ความหนาประมาณ 30 ไมครอน) อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตจริง ความหนาของฟิล์มสามารถลดลงได้จากการปรับแต่งเครื่องอัดรีดและสภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม รวมทั้งความชำนาญและประสบการณ์ของผู้ผลิต

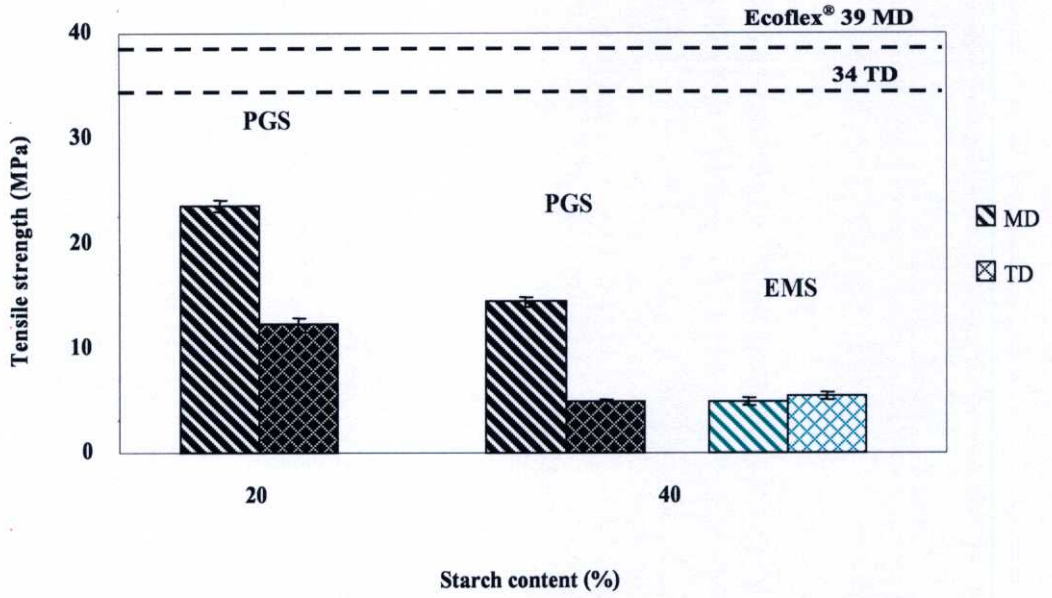
จากสมบัติเชิงกลของตอนที่ 1 พบว่าที่ปริมาณแป้งสตาร์ชน้อย PGS มีสมบัติเด่นกว่า EMS มาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชขึ้นไปเริ่มจะไม่เห็นความแตกต่าง เนื่องจากงานวิจัยตอนที่ 1 ใช้เครื่องเป่าฟิล์มขนาดเล็ก อาจผสมเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร ผลเลยไม่แตกต่างกัน แต่ตอนที่ 2 ยังคงมีความแตกต่างกันระหว่าง PGS กับ EMS เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชขึ้นไป เนื่องจากงานวิจัยตอนที่ 2 ใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม มี Screw ที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น นอกจากนี้ การเป่ายังมีแรงเบ่งมากกว่า

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน มอก.711-2530 โดยดูจากภาคผนวก จ ซึ่งใช้เป็น Benchmark กับฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ จะเห็นว่าสูตร Ecoflex®/PGS (80:20) เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนสูตร Ecoflex®/PGS (60:40) ผ่านเกณฑ์เกือบหมด มีปัญหาในค่าแรงดึงขาดในทิศ

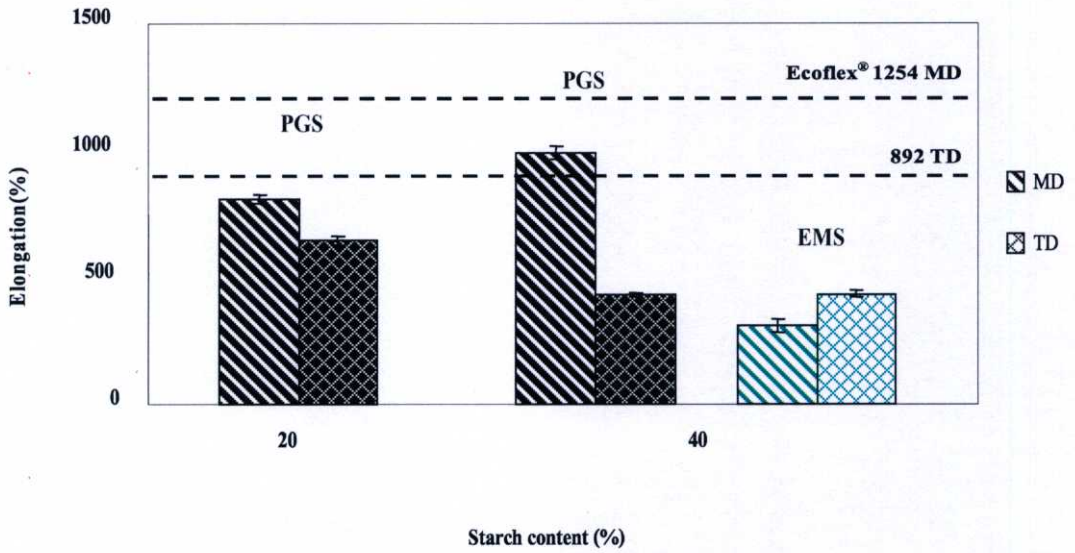
TD ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย และสูตร Ecoflex®/EMS (60:40) มีปัญหาเฉพาะค่าแรงดึงขาด ซึ่งถ้ามีการปรับปรุงปัจจัยการผลิตให้ดีขึ้น น่าจะมีแนวโน้มที่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นทำให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



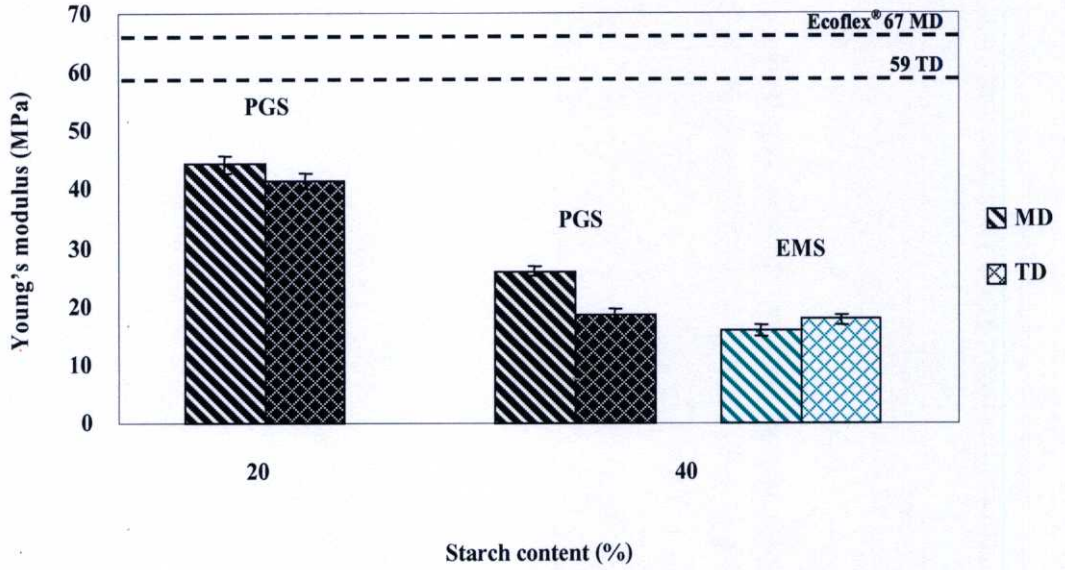
รูปที่ 4.26 ภาพแสดงการขึ้นรูปที่บริษัทวัลย์ดี พลาสติกอุตสาหกรรม จำกัด



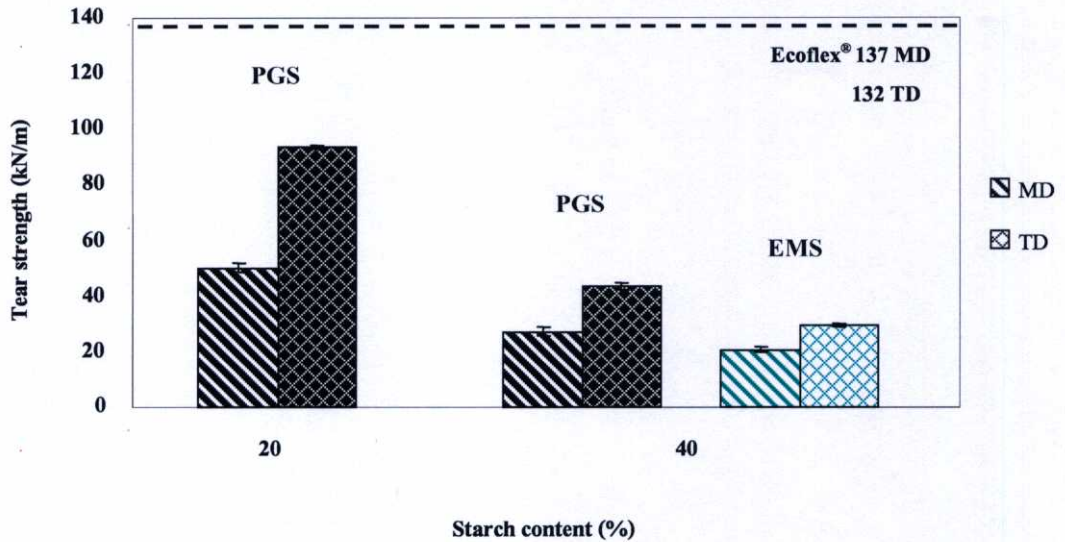
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแป้งสตาร์ชต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง Ecoflex® กับ แป้งสตาร์ชดัดแปร (Modified starch) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของ แป้งสตาร์ช ได้แก่ แป้งสตาร์ชเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) และแป้งสตาร์ชพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เพื่อใช้เป็นฟิล์มสำหรับงาน เกษตรกรรม จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลดำเนินงานวิจัย

##### ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ

1. ค่า MFI ของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตรมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น และ Ecoflex® ที่มีการเติมแป้งสตาร์ชมีค่า MFI สูงกว่า Ecoflex® บริสุทธิ์ เนื่องจาก Ecoflex® ที่เติมแป้ง สตาร์ชมีการไต่กลีเซอรอลลงไป ซึ่งกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้เข้าไปแทรก ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย

2. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าสัณฐานวิทยาของ EMS กับ PGS มีรูปร่างเป็นเม็ด ค่อนข้างกลมและมีลักษณะเป็นแผ่น ตามลำดับ ส่วนสัณฐานวิทยาของ Ecoflex® ผสมกับแป้ง สตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า แป้งสตาร์ชกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (Matrix) Ecoflex® มีช่องว่าง บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) และ Ecoflex® ที่เติม PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า EMS

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เติมแป้งสตาร์ชลงไป ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสของ ยัง และความแข็งแรงฉีกขาดของ Ecoflex® ลดลง เมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติ ด้านทนแรงดึงลดลง โดยสูตร Ecoflex®/PGS สูตร 80:20 (ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณ Ecoflex® มาก ที่สุด) มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงฉีกขาดและมอดูลัสของยังสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น และ Ecoflex®/PGS มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่า Ecoflex®/EMS

4. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่า การเติมแป้งสตาร์ช ลงใน Ecoflex® ไม่ส่งผลต่อค่า  $T_g$ ,  $T_m$  และ  $T_d$  แต่ร้อยละความเป็นผลึกของ Ecoflex® ลดลงเล็กน้อย โดยที่ร้อยละความเป็นผลึกของ Ecoflex®/EMS และ Ecoflex®/PGS มีค่าใกล้เคียงกัน

5. ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่า การเติมแป้งสตาร์ชลงใน Ecoflex® ทำให้ ความสามารถในการดูดน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงแรกของการแช่น้ำชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้อย่าง

รวดเร็วกว่าที่จะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ โดยที่ PGS สามารถดูดซับน้ำมากกว่า EMS

6. ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน พบว่าเมื่อปริมาณการเติมแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดย Ecoflex®/PGS มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า เนื่องจาก Ecoflex®/PGS สามารถผสมเข้ากันได้ดีและมีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคที่น้อยกว่า

7. ความแข็งแรงของรอยขีดของ Ecoflex® ผสมกับแป้งสตาร์ชที่สูตรต่างๆมีค่าลดลงจาก Ecoflex® บริสุทธิ์ โดย Ecoflex®/PGS มีค่าความแข็งแรงของรอยขีดที่ดีกว่า Ecoflex®/EMS

8. จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า การใส่แป้งสตาร์ชลงไป ในพอลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายดีขึ้น โดยที่พอลิเมอร์ผสม Ecoflex® กับ PGS สามารถย่อยสลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสม Ecoflex® กับ EMS

9. การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ พบว่าเมื่อมีการเติมแป้งสตาร์ชลงไป สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ 20-40% (ขึ้นกับปริมาณแป้งสตาร์ชที่ใส่) เมื่อเทียบกับ Ecoflex® บริสุทธิ์ นั่นก็แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์

## ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม

สูตรที่ได้ทำการคัดเลือกมาเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Ecoflex®/PGS (80:20), Ecoflex®/PGS (60:40) และ Ecoflex®/EMS (60:40) โดยสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้บางขึ้น และฟิล์มมีความหนาแน่นน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมในห้องปฏิบัติการซึ่งฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 50-80  $\mu\text{m}$  ใช้อัตราการเป่าฟิล์ม (Blow-up ratio) ประมาณ 3 เท่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบ มอก.711-2530 กับฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ จะเห็นว่ามีความโน้มที่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นทำให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มทางการเกษตรที่มีความหนาในช่วง 50-80 ไมครอน เช่น ถุงเพาะชำ ต้นไม้ ฯลฯ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมแป้งสตาร์ชลงไป ซึ่งโมเลกุลของแป้งสตาร์ชมีลักษณะเป็น Hydrophilic ทำให้พลาสติกที่ผลิตขึ้นมีความว่องไวต่อความชื้น กล่าวคือถ้าเก็บไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง โมเลกุลแป้งสตาร์ชจะมีการดูดซับน้ำจากสิ่งแวดล้อม ทำให้พลาสติกเกิดการเสียดสภาพก่อนเวลาอันควร ในทางกลับกันหากเก็บไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะมีการสูญเสียโมเลกุลน้ำสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้พลาสติกมีลักษณะแห้งกรอบและเปราะ ดังนั้นจึงควร

ปรับปรุงสมบัติการทนน้ำให้ดีขึ้น เช่น ทำการดัดแปร โมเลกุลของแป้งสตาร์ชให้มีสมบัติ Hydrophobic มากขึ้น

2. ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแป้งสตาร์ชไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น Ecovio<sup>®</sup>, PBS เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย และเป็นการเพิ่มโอกาสในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพสู่อุตสาหกรรมด้วย

3. ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D5338-98

4. พัฒนาสูตรและปรับปรุงปัจจัยการผลิตเพื่อให้ได้ฟิล์มหนาที่บางขึ้น และมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม เพื่อสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการใช้ฟิล์มบาง เช่น ถุงหูหิ้ว ฟิล์มคลุมดิน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. ปริมาณขยะ. [Online]. Available : <http://www.pcd.go.th/>. 2006.
- [2] ธนาวดี ลี้จากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอฟเฟคท์ สตุดีโอ. 2549.
- [3] Polymer society (Thailand). Degradable plastics. [Online]. Available : [http://www.thaipolymersociety.org/polymernews\\_5.pdf](http://www.thaipolymersociety.org/polymernews_5.pdf). 2006.
- [4] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. 2550.
- [5] Thai Charoen Thong Karntor Co.,Ltd. Mulch film. [Online]. Available : <http://www.tctthainet.com/products02.htm>. 2007.
- [6] National Innovation Agency. InnoBioPlast 2006. [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/innolinks/200608/innovculture.htm>. 2006.
- [7] วรรณิการ์ ไพโรศรี และ กิ่งกาญจน์ พิษณุลักษณะ. “การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จาก อีโคเพล็กซ์และพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งตัดแปรเอสเทอร์.” โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [8] BASF Corporation Co.,Ltd. Ecoflex®. [Online]. Available : <http://www.basf.de/ecoflex>. 2007.
- [9] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีแป้ง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546.
- [10] Biotopics. Calvin cycle. [Online]. Available : [www.biotopics.co.uk/a2/calmin3.gif](http://www.biotopics.co.uk/a2/calmin3.gif). 2007.
- [11] วรวิทย์ โพนนิกร. “ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [12] Science-projects. Amylase. [Online]. Available : [www.science-projects.com/starch.GIF](http://www.science-projects.com/starch.GIF). 2001.
- [13] กิตติวุฒิ รัตนพัฒกิจ, พชร เทียมธารา และ ราชวัลลภ แจ่มมงคล. “การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูป.” โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

- [14] Kmutt. **เคมีและสมบัติของแป้ง**. [Online]. Available :  
<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. 2007.
- [15] วราภรณ์ พุทธิสสະ. “การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมด้วยซีโอไลต์โดยกระบวนการเป่าฟิล์ม.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [16] Prabodh C. Bolur. **EXTRUSION OF THERMOPLASTICS**. [Online]. Available :  
<http://in.geocities.com/bolurpc/extrusion1.html>. 1998.
- [17] ชาญณรงค์ ยิ้มแก้ว. “การพัฒนาฟิล์มพลาสติกชนิดเอทิลีนไวน์ลอะซิเตตสำหรับงานด้านเกษตรกรรม.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [18] P. Papaseit, J. Badiola and E. Armengol. **Plastics and Agriculture**. Translated by V. Tangkosakul, P. Choekawong, D. Tongaram, P. Na Songkhla, M. Wongrakpanich and S. Chotiwan. Bangkok: Sirivatana. 2000.
- [19] S. Godbole., S. Gote., M. Latkar and T. Chakrabarti. “Preparation and characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate-starch blend films.” **Bioresource technology**. Vol.86, 2003. pp. 33-37.
- [20] พรวิ สุมิตร. “การศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดรับประทานได้จากไคโตซานกับแป้งคัดแปรเอสเทอร์.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [21] สุกสิทธิ์ ผู้มีโชค. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปรและพอลิพรทิลีน.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [22] P. Matzions., V. Tserki., A. Kontoyiannis and C. Panayiotou. “Processing and characterization of starch/polycaprolactone products.” **Polymer Degradation and Stability**. Vol.77, 2002. pp. 17-24.
- [23] U. Witt., T. Einig., M. Yamamoto., I. Kleeberg and W.-D. Deckwer. “Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyester: evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates.” **Chemosphere**. Vol.44, 2001. pp. 289-299.

- [24] G.S Mugnozza., E. Schettini., G. Vox., M. Malinconico., B. Immirzi and S. Pagliara.  
 “Mechanical properties decay and morphological behaviour of biodegradable films for agricultural mulching in real scale experiment.” **Polymer Degradation and Stability.** Vol.91, 2006. pp. 2801-2808.
- [25] N. Tzankova Dintcheva and F.P. La Mantia. “Durability of a starch-based biodegradable polymer.” **Polymer Degradation and Stability.** 2007. pp. 1-5.
- [26] P. Bergo and P.J.A. Sobral. “Effect of plasticizer on physical properties of pigskin gelatin film.” **Food Hydrocolloids.** Vol.21, 2007. pp. 1285-1289.
- [27] H.J. Park., C.L. Weller and P.J. Vergano. “Permeability and mechanical properties of cellulose-based edible films.” **Food Science.** Vol.58, 1993. pp. 1361-1364.
- [28] กล้าณรงค์ ศรีรอด, ชลธิชา นุ่มหอม และ รังสิมา ชลคุป. “ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้ง/polycaprolactoneเบลนด์.” ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.
- [29] ASTM D 1238 Committee on standard “Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [30] ASTM D 882 Committee on standard “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [31] ASTM D 624 Committee on standard “Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized and Thermoplastic Elastomers.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [32] มอก. 1027-2534 “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร.”, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม., 2534.
- [33] ASTM D 570 Committee on standard “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.”, Philadelphia: American Society for Testing and Material., 1998.
- [34] ISO 15106-1 “Plastic-Film and Sheeting. Determination of Water Vapor Transmission Rate- Part 1: Humidity detection sensor method.”, Geneva: International Organization for Standardization., 2003.
- [35] ASTM D 3985 Committee on standard “Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor.”, Philadelphia: American Society for Testing and Material., 2002.

- [36] ASTM E 794 Committee on standard “Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [37] F. Le Digabel and L. Averous. “Effect of lignin content on the properties of lignocellulose-based biocomposites.” **Carbohydrate Polymers**. Vol.66, 2006. pp. 537-545.
- [38] ASTM E 1131 Committee on standard “Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [39] อธิพิศ แจ่มชัด. **พอลิเมอร์คอมโพสิต**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [40] J.E. Potts. **Aspects of degradation and stabilization of polymers**. New York : Elsevier. pp. 653. 1973.
- [41] Z. Guohua., L. Ya., F. Cuilan., Z. Min., Z. Caiqiong and C. Zongdao. “Water resistance, mechanical properties and biodegradability of methylated-cornstarch/poly (vinyl alcohol) blend film.” **Polymer Degradation and Stability**. Vol.91, 2006. pp. 703-711.
- [42] G. Scott and D. Gilead. **Degradable polymer: principles and applications**. 1995.
- [43] BASF Corporation Co.,Ltd. **Ecoflex**<sup>®</sup>. [Online]. Available : <http://www.basf.com/PLASTICSWEB/displayanyfile?id=0901a5e1801359f9>. 2008.

## ภาคผนวก ก.

## การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดในทิศ MD และ TD (ตอนที่ 1)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (N/mm)
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	MD	7.37±0.43 <sup>a</sup>	532.92±25.27	30.91±0.60	55.85±2.40
	TD	6.01±0.33	588.72±27.13	28.45±0.51	47.77±2.20
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30)	MD	5.86±0.12	515.12±30.57	29.86±1.56	39.92±2.06
	TD	4.15±0.20	558.90±24.91	21.71±0.82	37.81±1.29
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	MD	5.94±0.27	532.08±22.71	28.88±0.58	43.87±0.67
	TD	2.94±0.06	492.57±22.08	26.91±0.47	29.95±1.30
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	MD	11.20±0.74	501.71±11.91	34.39±1.59	70.48±3.49
	TD	8.65±0.47	658.72±14.97	37.90±1.06	60.79±2.78
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30)	MD	7.43±1.19	672.94±23.82	22.51±0.66	43.91±1.19
	TD	5.09±0.48	586.04±22.52	22.62±0.32	41.31±0.48
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	MD	6.11±0.11	663.22±13.82	23.99±0.70	48.00±1.62
	TD	2.99±0.11	365.92±17.04	21.17±0.74	30.26±1.07

a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ก-2 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดในทิศ MD และTD (ตอนที่ 2)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (N/mm)
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	MD	4.95±0.40	311.99±25.36	15.96±1.09	20.86±1.25
	TD	5.46±0.30	435.11±17.00	17.76±0.96	29.76±0.69
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	MD	23.60±0.53	808.42±18.82	44.31±1.48	60.40±1.39
	TD	15±0.57	649.30±17.82	41.43±1.42	93.70±0.58
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	MD	14.54±0.45	991.04±23.01	26.03±0.85	27.07±1.59
	TD	6.65±0.13	413.38±4.89	15.00±0.47	43.58±1.42

a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

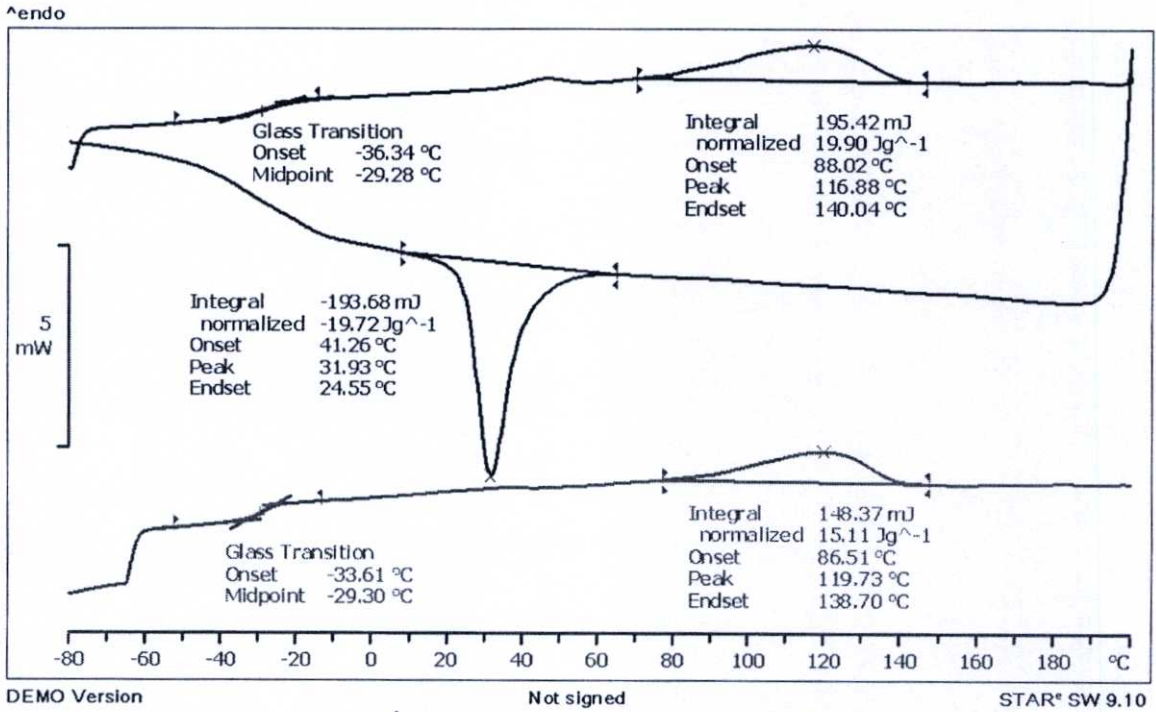
ตารางที่ ก-3 ค่าความแข็งแรงของรอยขีด

สูตร	Maximum force (N)
Ecoflex <sup>®</sup>	6.63±0.10
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	5.56±0.42
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30)	3.37±0.16
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	3.42±0.21
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	6.24±0.25
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30)	4.72±0.42
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	4.94±0.38

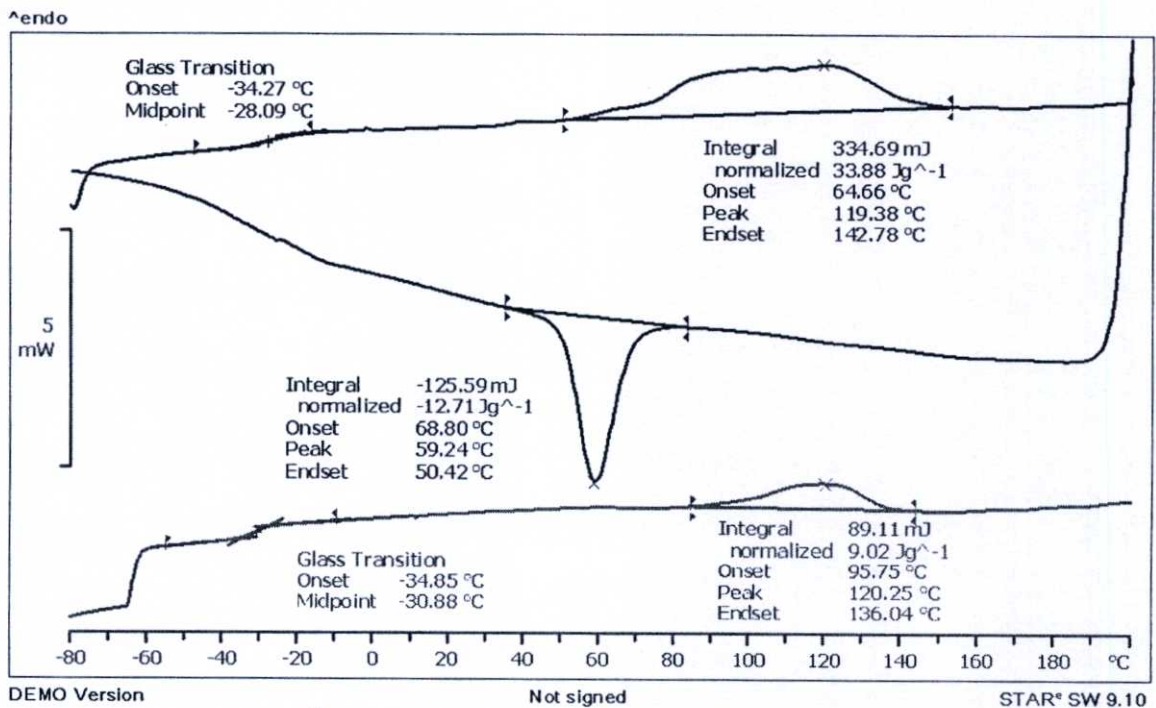
a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ภาคผนวก ข.

## การทดสอบสมบัติทางความร้อน

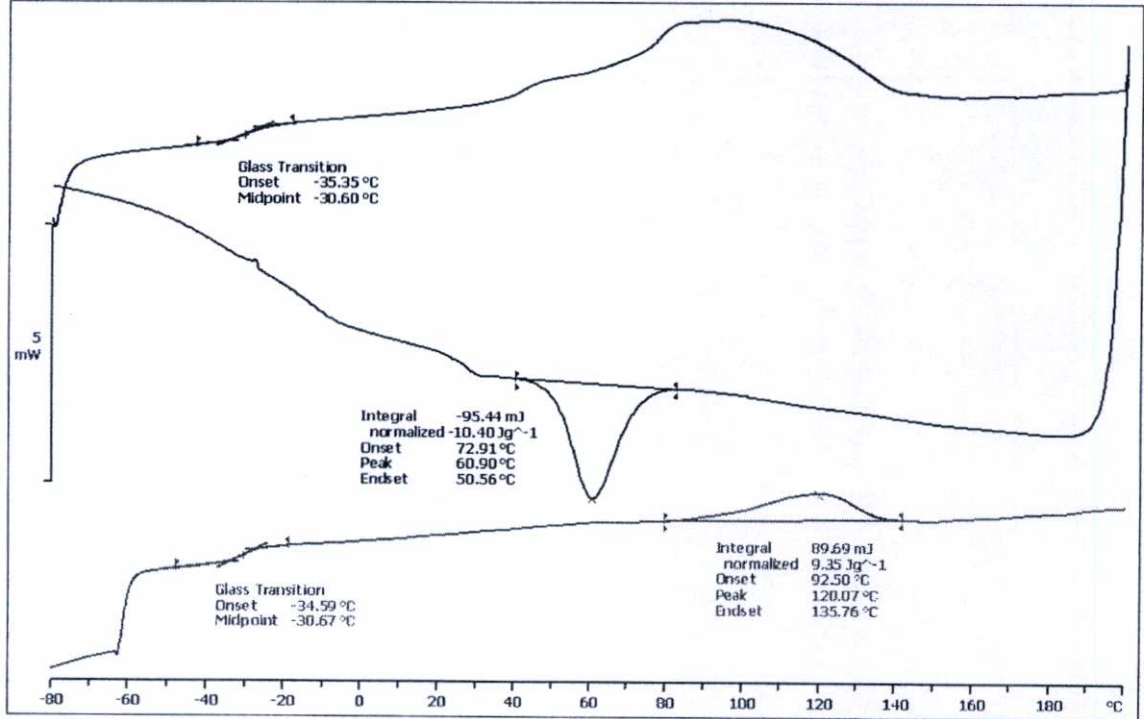


รูปที่ ข-1 DSC thermogram ของ Ecoflex®



รูปที่ ข-2 DSC thermogram ของ Ecoflex®/EMS (80:20)

^endo



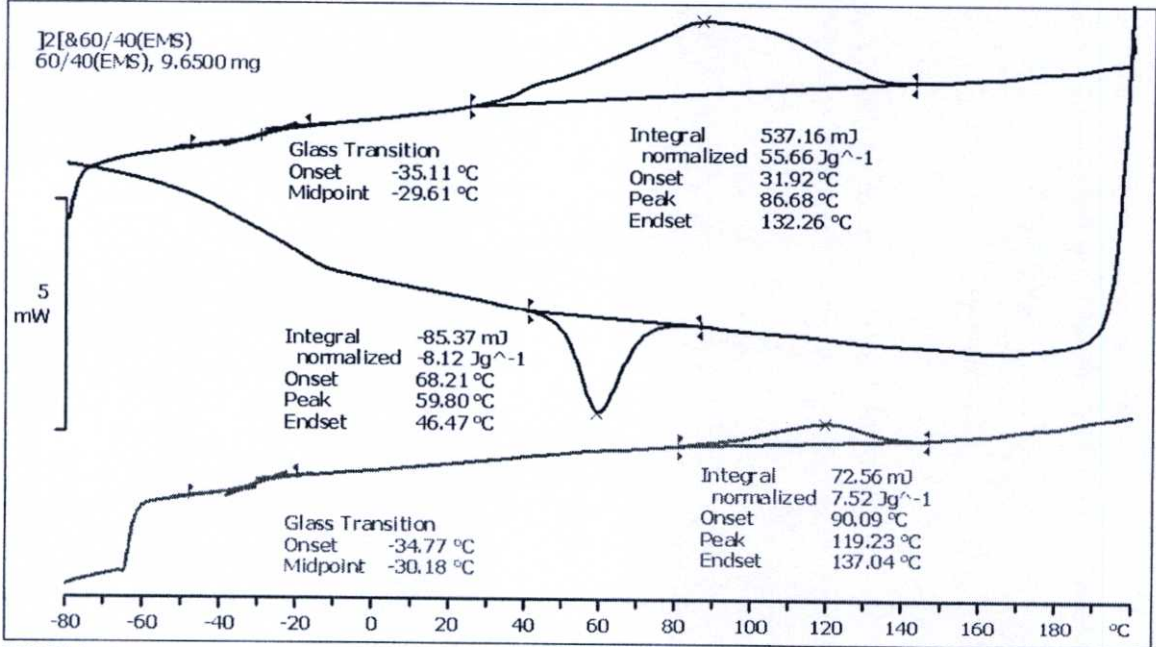
DEMO Version

Not signed

STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-3 DSC thermogram ของ Ecoflex®/EMS (70:30)

^endo

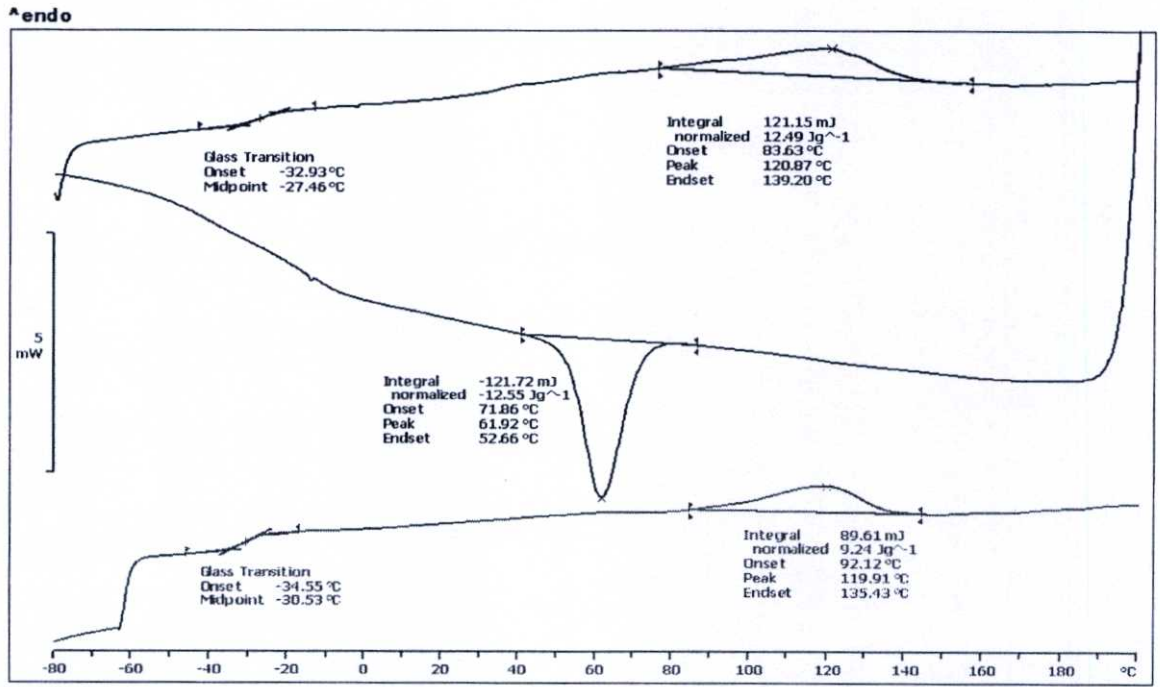


DEMO Version

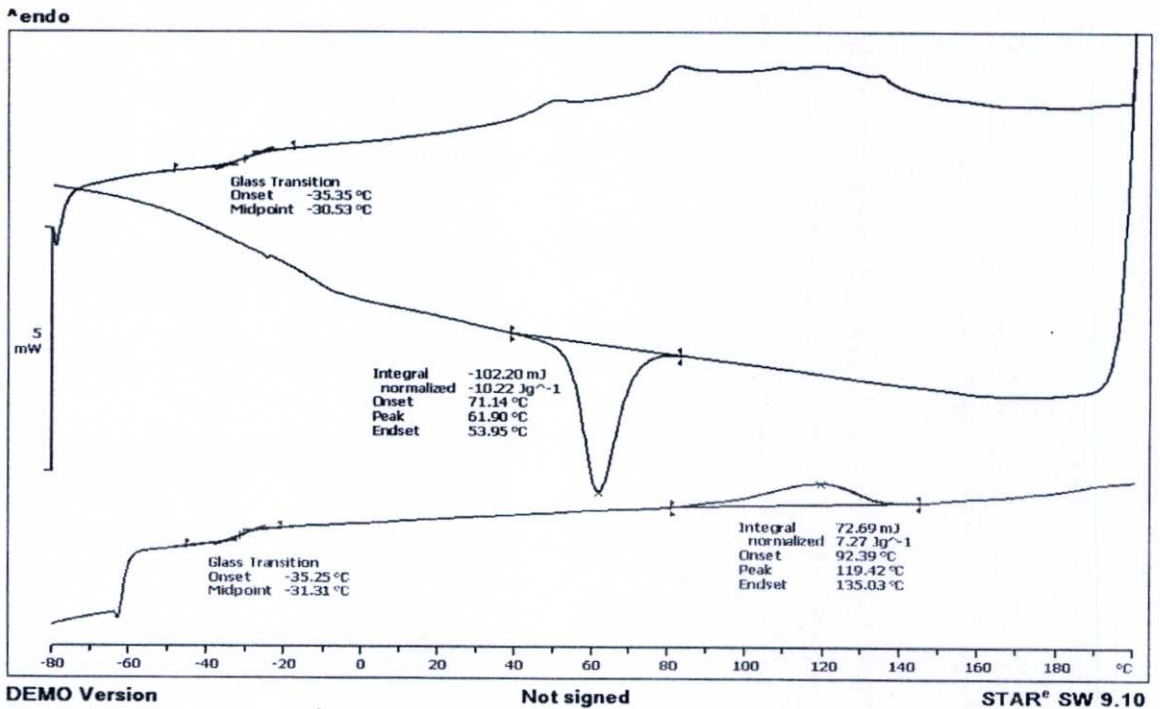
Not signed

STAR® SW 9.10

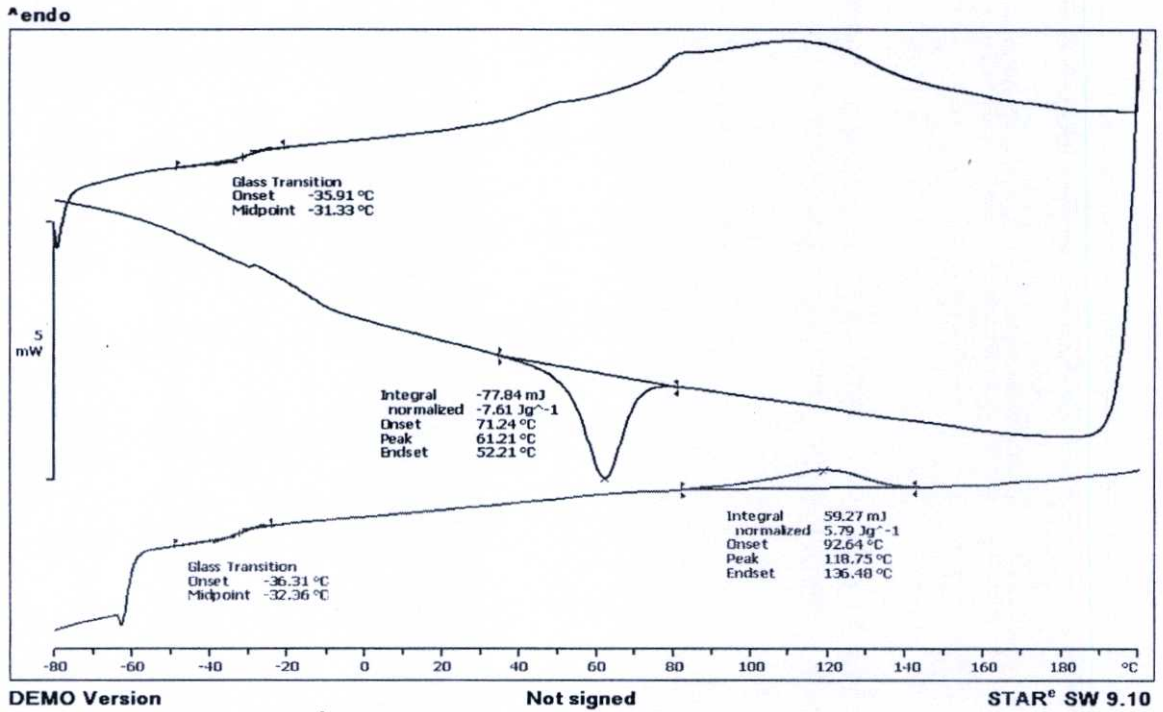
รูปที่ ข-4 DSC thermogram ของ Ecoflex®/EMS (60:40)



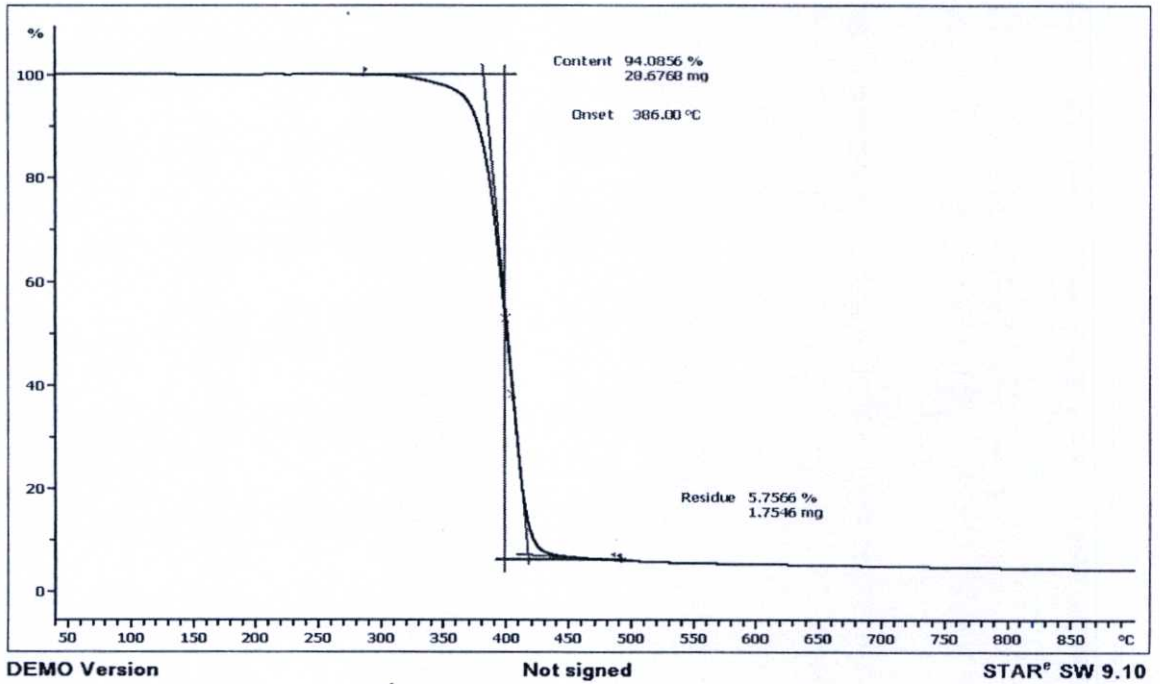
รูปที่ ข-5 DSC thermogram ของ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (80:20)



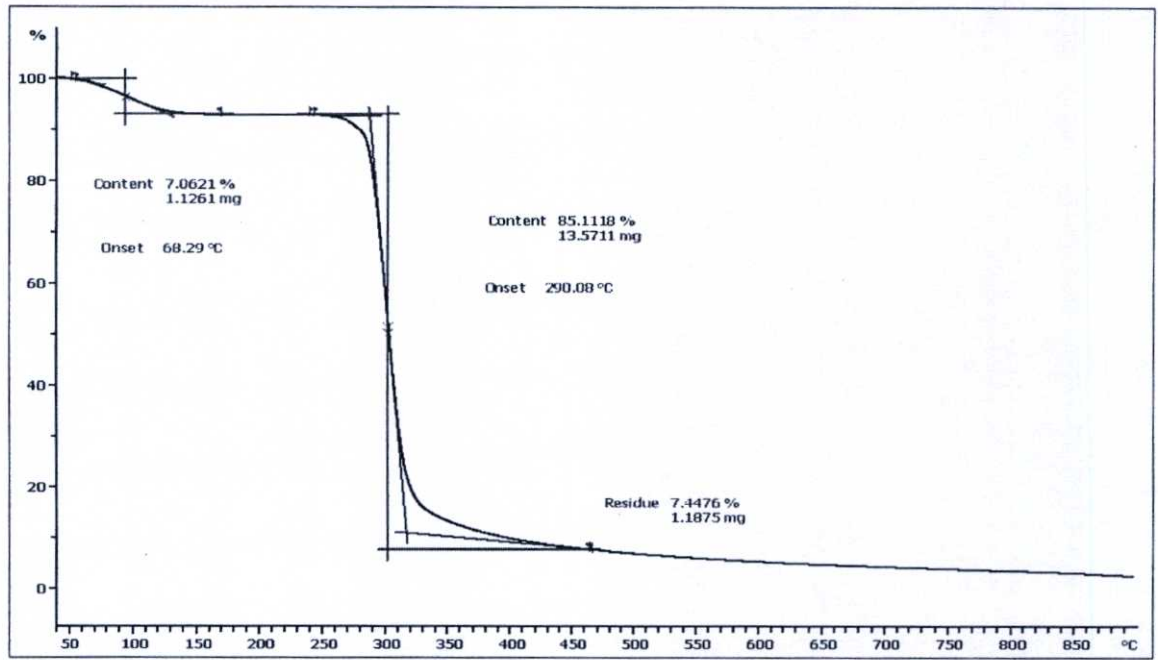
รูปที่ ข-6 DSC thermogram ของ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS (70:30)



รูปที่ ๗-7 DSC thermogram ของ Ecoflex®/PGS (60:40)



รูปที่ ๗-8 TGA thermogram ของ Ecoflex®

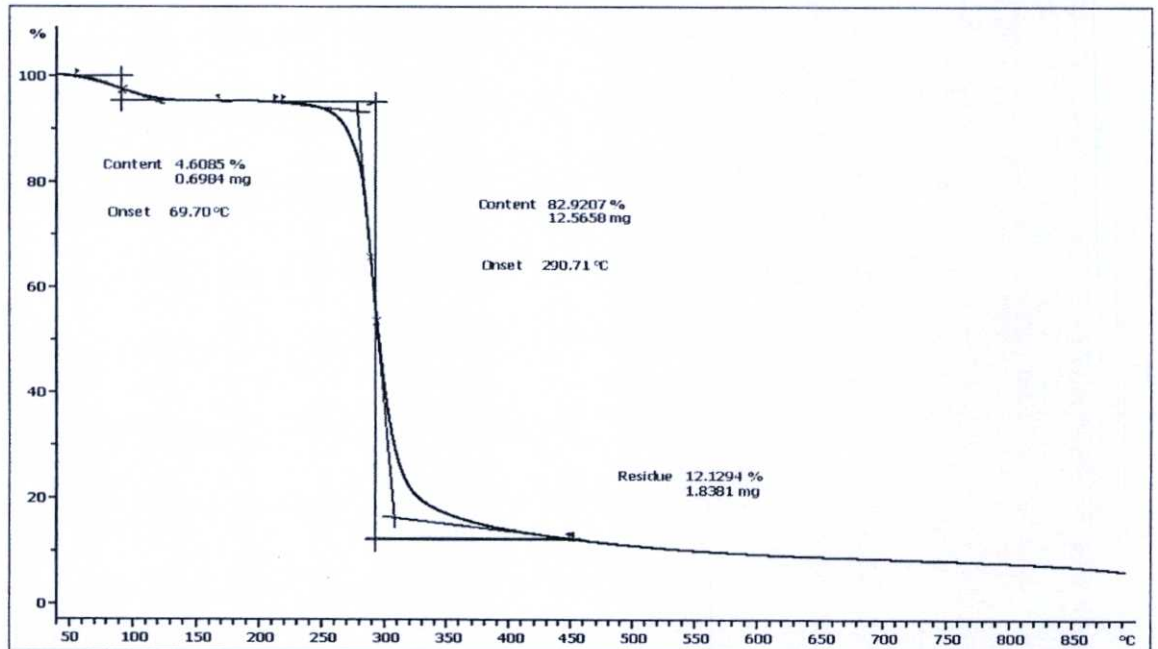


DEMO Version

Not signed

STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-9 TGA thermogram ของ EMS

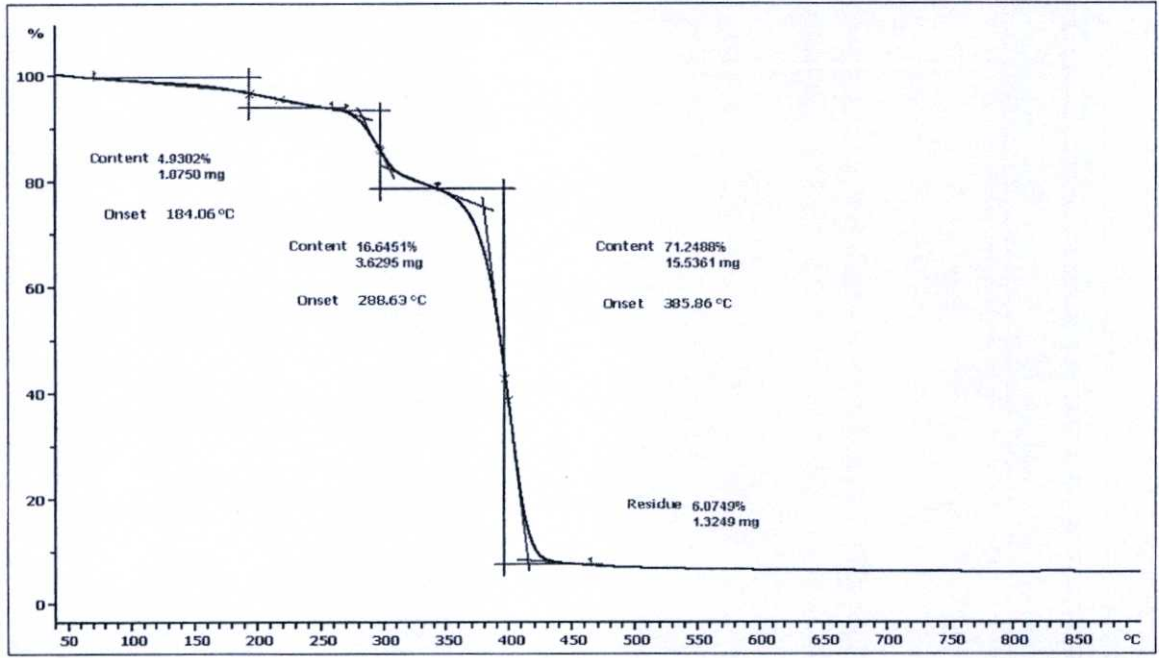


DEMO Version

Not signed

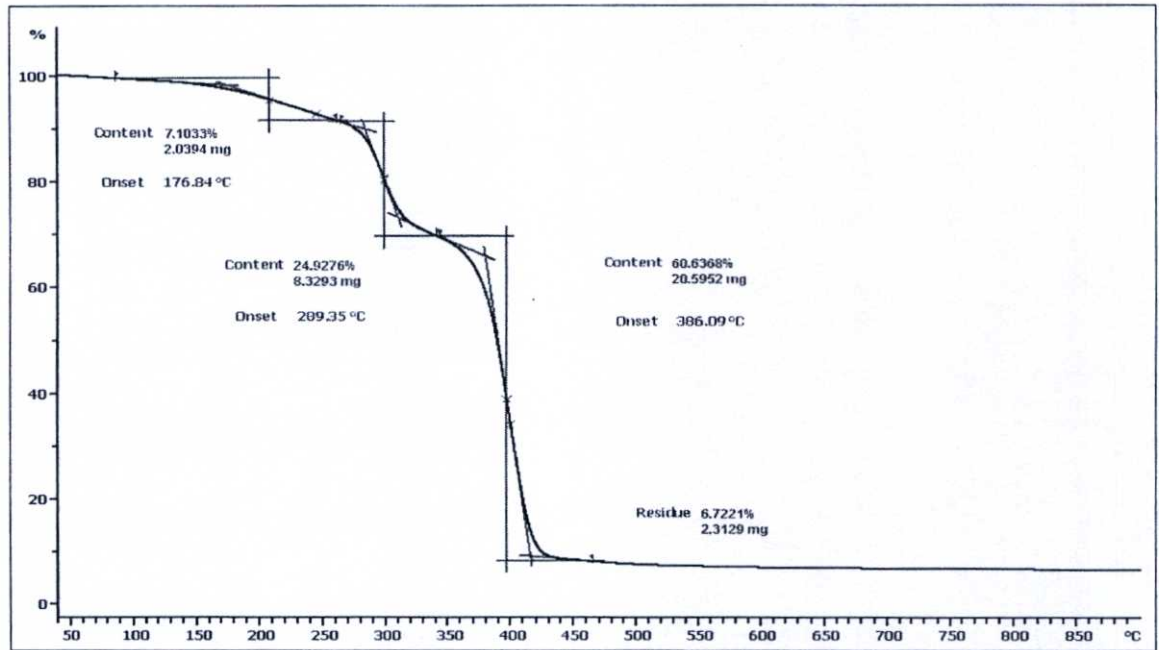
STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-10 TGA thermogram ของ PGS



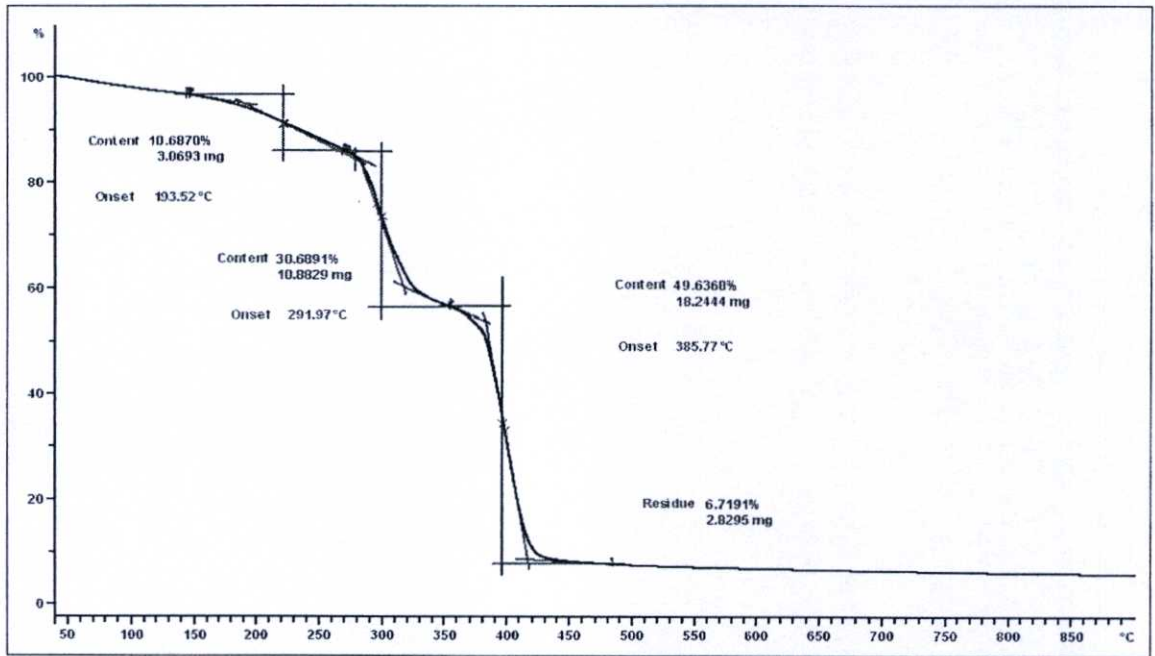
DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-11 TGA thermogram ของ Ecoflex®/EMS (80:20)



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-12 TGA thermogram ของ Ecoflex®/EMS (70:30)

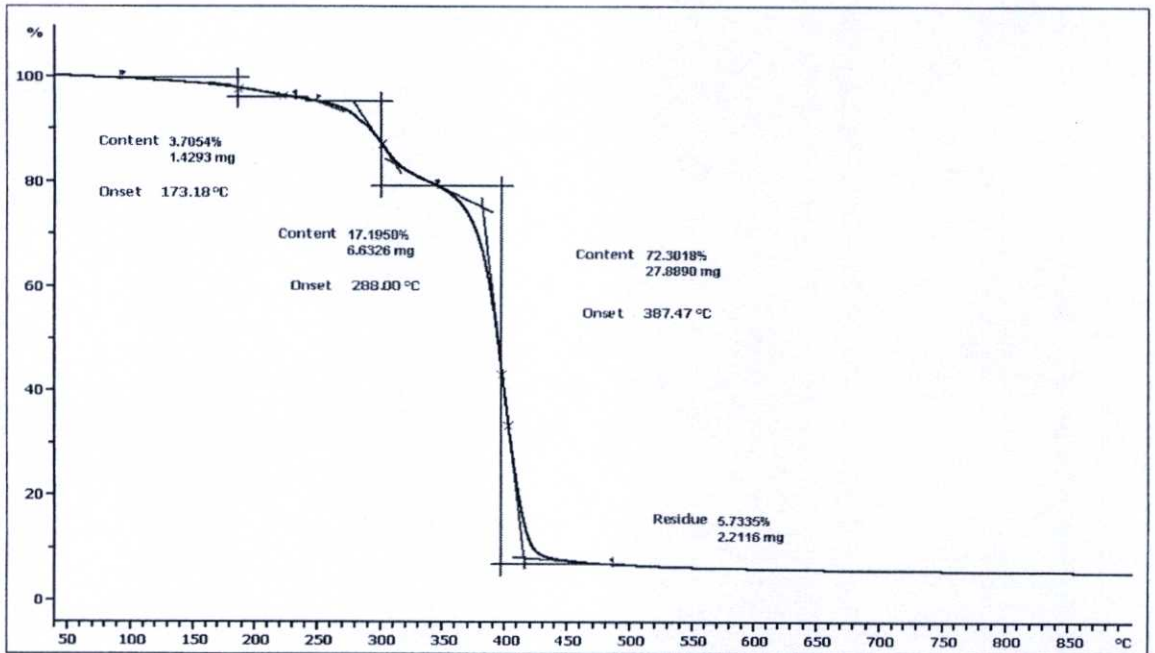


DEMO Version

Not signed

STAR® SW 9.10

รูปที่ ข-13 TGA thermogram ของ Ecoflex®/EMS (60:40)

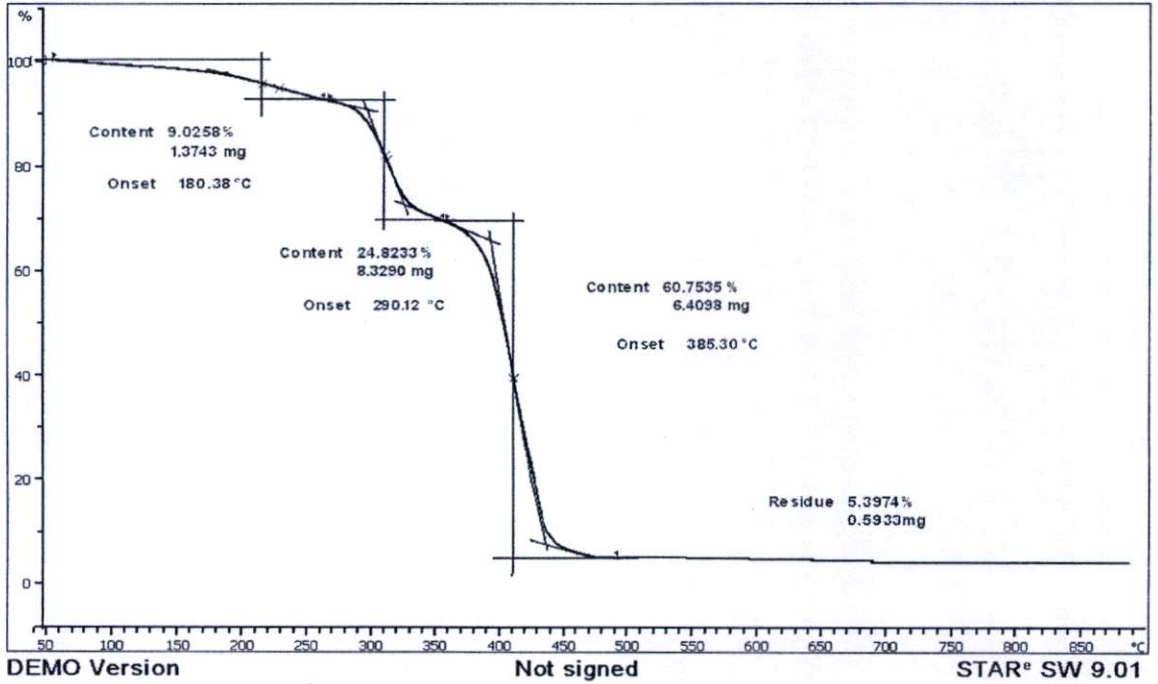


DEMO Version

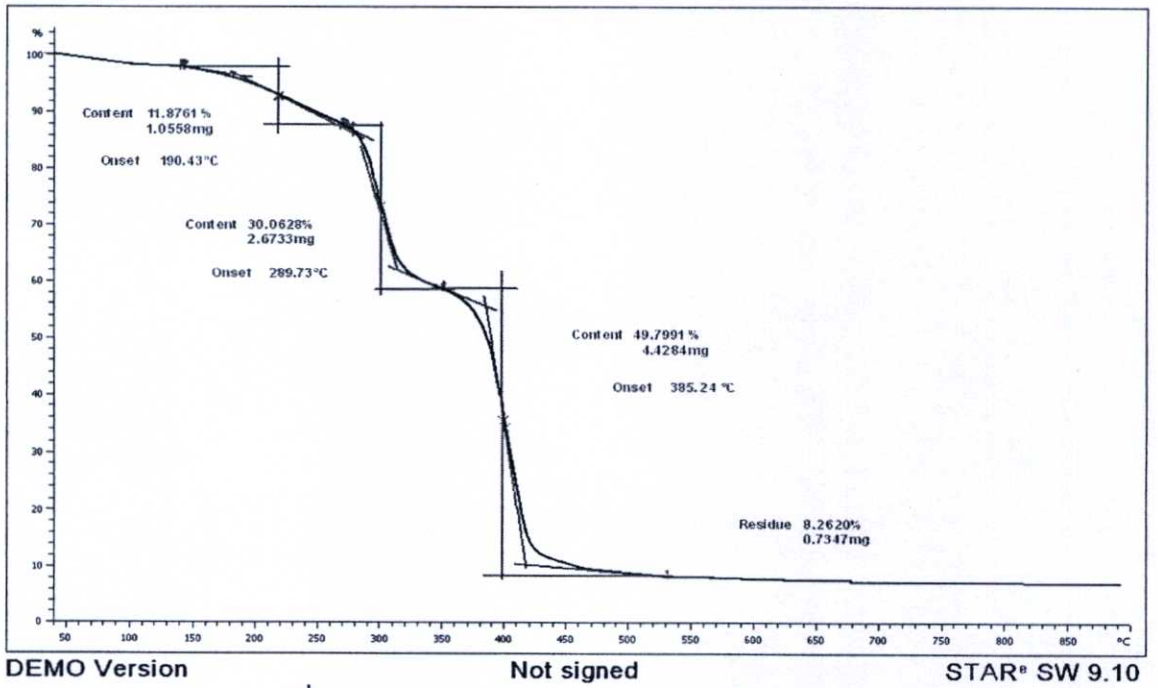
Not signed

STAR® SW 9.10

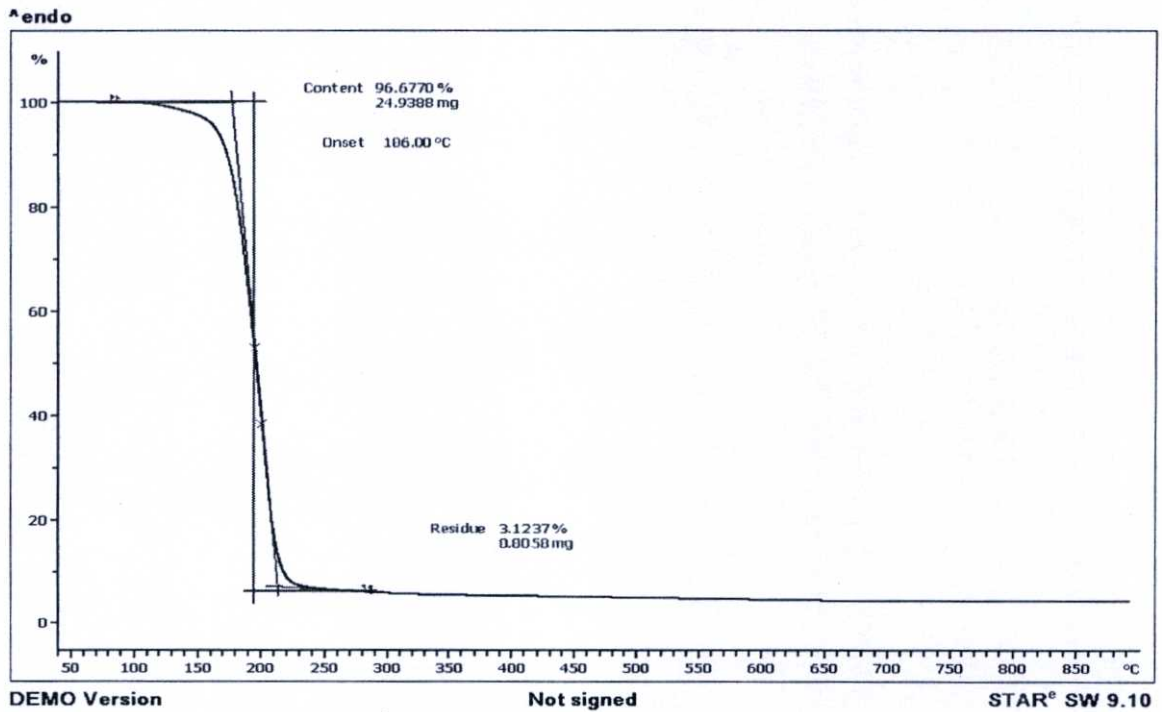
รูปที่ ข-14 TGA thermogram ของ Ecoflex®/PGS (80:20)



รูปที่ ข-15 TGA thermogram ของ Ecoflex®/PGS (70:30)



รูปที่ ข-16 TGA thermogram ของ Ecoflex®/PGS (60:40)



รูปที่ ข-17 TGA thermogram ของกดีเซอรอล

ตารางที่ ข-1 ปริมาณแป้งสตาร์ชที่แน่นอนในพอลิเมอร์สูตรต่างๆ

สูตร		ปริมาณแป้ง สตาร์ชที่กำหนด (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแป้ง สตาร์ชที่ แน่นอน (%โดยน้ำหนัก)
Ecoflex®/EMS/Glycerol	80/20/10	18	16.65
	70/30/15	26	24.93
	60/40/20	33	30.69
Ecoflex®/PGS/Glycerol	80/20/10	18	17.20
	70/30/15	26	24.82
	60/40/20	33	30.06

**ภาคผนวก ค.**  
**การศึกษาสมบัติทางกายภาพ**

**ตารางที่ ค-1 ปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ Ecoflex<sup>®</sup> /แป้งสตาร์ช**

สูตร \ วันที่	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Ecoflex <sup>®</sup>	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	16.48	17.76	17.71	18.18	19.69	19.80	19.99	23.82	24.49	24.49
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30)	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	38.34	38.34	38.34	38.34	39.00	39.00	40.52	42.25	42.25	42.25
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	20.83	20.83	20.83	20.83	20.83	20.83	20.83	25.00	25.00	25.00
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30)	33.33	33.33	33.33	33.33	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	54.29	50.29	47.14	47.14	47.14	47.14	45.14	45.14	45.14	45.14

**ตารางที่ ค-2 การค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม**

ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	WVTR ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ )	WVP ( $\text{g} \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$ )
Ecoflex <sup>®</sup>	35	230 $\pm$ 1.45	8050 $\pm$ 35
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	128	254 $\pm$ 0.95	32512 $\pm$ 64
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	112	561 $\pm$ 5.09	62800 $\pm$ 5787
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	62	363 $\pm$ 2.00	22506 $\pm$ 310
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	114	373 $\pm$ 1.84	42522 $\pm$ 57

ตารางที่ ค-3 การค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

ตัวอย่าง	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	OTR ( $\text{cc}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ )	OP ( $\text{cc} \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{day}$ )
Ecoflex <sup>®</sup>	35	1717 $\pm$ 9.19	60095 $\pm$ 752.50
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	113	638 $\pm$ 3.18	72094 $\pm$ 2712.00
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	117	763 $\pm$ 0.32	89240 $\pm$ 210.60
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	62	1072 $\pm$ 0.71	66492 $\pm$ 1725.70
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	112	716 $\pm$ 0.71	80216 $\pm$ 280.00

ภาคผนวก ง.

ตารางที่ ๓ ราคาค่าต้นทุนวัตถุดิบ

สารเคมี	ราคา (บาท/กก.)	อัตราส่วนผสม													
		Pure Ecoflex®				Ecoflex®/EMS				Ecoflex®/PGS					
		ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)		
Ecoflex®	270	100	270	80	216	70	189	60	162	80	216	70	189	60	162
EMS	18	-	-	20	3.6	30	5.4	40	7.2	-	-	-	-	-	-
PGS	28	-	-	-	-	-	-	-	-	20	5.6	30	8.4	40	11.2
Glycerol	90	-	-	10	9	15	13.5	20	18	10	9	15	13.5	20	18
Anox® 20	430	-	-	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215
Alkanox® 240	370	-	-	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185
		รวม	270	รวม	229	รวม	208.3	รวม	187.6	รวม	231	รวม	211.3	รวม	191.6
				ราคาต่อ 1 kg	208.0	ราคาต่อ 1 kg	181.0	ราคาต่อ 1 kg	156.3	ราคาต่อ 1 kg	209.8	ราคาต่อ 1 kg	183.6	ราคาต่อ 1 kg	159.5
				ประหยัด (%)	23.0	ประหยัด (%)	33.0	ประหยัด (%)	42.1	ประหยัด (%)	22.3	ประหยัด (%)	32.0	ประหยัด (%)	40.9

หมายเหตุ ราคานี้ยังไม่ได้รวมค่า Compounding

## ภาคผนวก จ.

ตารางที่ จ ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติก โพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน มอก.

711-2530

คุณลักษณะ	ความหนา มิลลิเมตร						
	0.02	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15	0.2
แรงดึงขาด ในแต่ละแนว นิวตันต่อ ความกว้าง 10 มิลลิเมตร ไม่น้อยกว่า	2.0	3.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0
ความยืดที่จุดขาด ในแต่ละแนว ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	150	150	250	250	250	400	400
แรงฉีกขาด ในแต่ละแนว นิวตัน ไม่น้อยกว่า	1.0	1.5	2.5	3.5	5.0	7.5	10.0

ภาคผนวก ฉ.

## สมบัติเบื้องต้นบางประการของการคอมพาวด์ก่อนการขึ้นรูป

ตารางที่ ฉ สมบัติ MFI ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร (w/w)	MFI (g/10 min) (190 °C/2.16 kg)
Ecoflex <sup>®</sup>	9.6±0.1
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (80:20)	16.5±0.3
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (70:30)	11.3±0.2
Ecoflex <sup>®</sup> /EMS (60:40)	10.4±0.2
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (80:20)	16.9±0.2
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (70:30)	12.3±0.2
Ecoflex <sup>®</sup> /PGS (60:40)	11.6±0.4

หมายเหตุ ทุกสูตรที่ผสมแป้งสตาร์ชใช้พลาสติกไซเซอร์ 50% โดยหนักของแป้งสตาร์ช

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	อัจฉราพร รัตนมณี
ที่อยู่	346/3 หมู่7 ต.ชัยสมรทอด อ.บึงสามพัน จ.เพชรบูรณ์ 67160
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ประสบการณ์ทำงาน	นักเคมี แผนกห้องปฏิบัติการ บริษัทน้ำมันอพลโล (ไทย) จำกัด