

การศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จาก  
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปร

STUDY OF DEGRADABLE BIOPLASTIC FILM MADE FROM  
BLENDS OF POLYBUTYLENE SUCCINATE  
(PBS)/MODIFIED STARCH

ดวงพร คล้ายเพชร  
DOUNGPORN CLAYPETCH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-016-046

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จาก  
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปร**

**STUDY OF DEGRADABLE BIOPLASTIC FILM MADE FROM  
BLENDS OF POLYBUTYLENE SUCCINATE  
(PBS)/MODIFIED STARCH**



T117082

**ดวงพร คล้ายเพชร**

**DOUNGORN CLAYPETCH**

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**117082**  
ท.ค.ค.น.ป. **23** ส.ย. **2554**

b.....**12332920**  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-016-046

**STUDY OF DEGRADABLE BIOPLASTIC FILM MADE FROM  
BLENDS OF POLYBUTYLENE SUCCINATE  
(PBS)/MODIFIED STARCH**

**DOUNGORN CLAYPETCH**

**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**

**2010**

**KMITL-2010-SC-M-016-046**

**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF SCIENCE**

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

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งคัดแปร  
(Study of degradable bioplastic film made from blends of polybutylene succinate (PBS)/modified starch)

นักศึกษา นางสาวดวงพร คล้ายเพชร  
รหัสประจำตัว 51067911  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	
ผศ.ดร.ชลลดา อุดวิรุฬห์	
รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เวลา 9.00 – 12.00 น.  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธรรมะบริพัตร)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 20 เดือน 10 พ.ศ. 53

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิบิวทิลีน-ซัคซิเนตผสมแป้งคัดแปร
นักศึกษา	นางสาวดวงพร คล้ายเพชร
รหัสประจำตัว	51067911
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จากพอลิบิวทิลีน-ซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) ผสมกับแป้งมันสำปะหลังคัดแปร (Modified starch) ได้แก่ แป้งคัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch, EMS) แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch, PGS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch, HBS) สามารถเตรียมได้โดยเทคนิคผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการเป่า (Blown film extrusion) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา ดัชนีการหลอมไหล และความสามารถในการย่อยสลายได้ โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติ เช่น อัตราส่วน วัสดุคิบบ (PBS/Starch) ผลของชนิดแป้ง ผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์กลีเซอรอล (20-40% โดยน้ำหนักของแป้งคัดแปร) และผลของการใช้สารช่วยผสม (Compatibilizers) คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (MA-g-PBS) ที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาขณะอัดรีด โดยใช้ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) 0.5-1.5% โดยน้ำหนักของ PBS และใช้ 2, 5-bis(tert-butylperoxy)-2, 5 dimethylhexane (L101) 10% โดยน้ำหนักเทียบกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในระหว่างการอัดรีด จากการทดลองพบว่า อัตราส่วน PBS/Starch ที่เหมาะกับการเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ คือ 70/30 ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือ 40 % (โดยน้ำหนักของแป้ง) แป้งที่เหมาะสมกับการเตรียมฟิล์มพลาสติก PBS ผสมแป้ง คือ แป้งคัดแปรเอสเทอร์ (EMS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (HBS) เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้พอลิเมอร์ผสมนุ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และ modulus ของยังลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ฟิล์ม PBS/HBS มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าฟิล์ม PBS/EMS อนาคตความเป็นผลึกลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งคัดแปรเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง การใช้สารช่วยผสม MA-g-PBS ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก PBS ช่วยปรับปรุงสันฐานวิทยาทำให้เม็ดแป้งยึดติดกับ PBS ดีขึ้น รอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่าง

PBS กับแป้งลดลง การดูดซับน้ำลดลง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม ทำให้องค์ประกอบเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) จากการศึกษาการย่อยสลายในดินในห้องปฏิบัติการ โดยการฝังกลบพบว่า พลาสติกในทุกระยะสามารถที่จะย่อยสลายได้หมดภายใน 3 เดือน สามารถสรุปได้ว่า พลาสติกไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จาก PBS ผสมกับแป้งคัดแปรมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 40-50 ไมครอน มีสมบัติที่ดี และมีต้นทุนการผลิตลดลงได้ถึง 20-40% เทียบกับฟิล์ม PBS บริสุทธิ์

**คำสำคัญ:** ฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้, แป้งคัดแปร, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, มาเลอิกแอนไฮไดรด์

<b>Thesis Title</b>	Study of Degradable Bioplastic Film made from Blends of Polybutylene Succinate (PBS)/Modified Starch
<b>Student</b>	Miss Doungporn Claypetch
<b>Student ID.</b>	51067911
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud

### **ABSTRACT**

In this research work, novel biodegradable plastic films made from blends of polybutylene succinate (PBS) and modified cassava starches, i.e., ester modified starch (EMS), pregelatinized starch (PGS) and hydrophobic starch (HBS) were studied. The blends were compounded by using twin-screw extruder. Film samples were prepared by blown film extrusion technique. The film samples were characterized for mechanical, thermal, physical, morphological properties, melt flow index (MFI) and biodegradability. Some factors affecting the blend properties were studied, i.e., raw material ratios (PBS/Starch), types of modified starches, glycerol plasticizer loading (20-40% by weight of modified starch), and addition of compatibilizer (maleic anhydride grafted polybutylene succinate (MA-g-PBS)). Grafting was carried out by adding maleic anhydride (MA) amount of 0.5-1.5% by weight of PBS and 2, 5-bis(tert-butylperoxy)-2, 5 dimethylhexane (L101) 10% by weight of MA as an initiator during reactive extrusion. It was found that an appropriate ratio of PBS/Starch was 70/30, amount of the plasticizer was 40% by weight of modified starch. Suitable modified starches for preparing biodegradable plastic films were EMS and HBS. Increasing the plasticizer content led to soften polymer blends, decrease in young's modulus and tensile strength, but increase in %elongation at break. PBS/HBS film had higher mechanical properties than PBS/EMS film. Degree of crystallinity decreased as glycerol content was increased. The higher the modified starch loading, the lower the mechanical properties. In particular, adding MA-g-PBS compatibilizer amount of 1% by weight of PBS improved the morphology, good adhesion between starch and PBS, decreased the interface between the PBS and starch. %Water absorption was decreased. Thermal properties studied by DSC and TGA revealed that the compatibilizer increased the degree of

crystallinity. However the melting temperature ( $T_m$ ) and decomposition temperature ( $T_d$ ) were unchanged. Burial test in soil was used to study degradability of the samples. It was found that the film samples in all formulas could be degraded within 3 months. In conclusion, degradable bioplastic films from the PBS/Modified starches showed high potential to be commercially produced. The films had thickness of 40-50  $\mu\text{m}$  with good properties. The material cost was reduced by up to 20-40% compared with that of pure PBS film.

**Keywords:** Degradable bioplastic film, Modified starch, Polybutylene succinate (PBS), Maleic anhydride (MA)

# กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำงานวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็น กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจน ข้อชี้แนะ และได้กรุณาให้ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA)

ขอขอบพระคุณ คุณพิชิต ตรีวิจิตรเกษม บริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนทางด้านทุนวิจัย

ขอขอบคุณสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนแก่งานวิจัยนี้

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

ขอขอบคุณอาจารย์วรรณธรรม อุ่นจิตติชัย กรมป่าไม้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ มุมสัมผัสฟิล์ม

ขอขอบคุณคุณณฤศชัย มหุทธิรัฐ คุณวรรณวิไล กรุณามัยวงศ์ คุณหนานนี่ เปรมจันทร์ คุณธนพร พึ่งวัฒนานนท์ และคุณอำนาจ รวมพล บริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

ขอขอบคุณอัจฉราพร รัตนมณี (พี่ปอย) และคุณวัฒนา คล้ายรัศมี (พี่ดวง) ที่ให้คำแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และบุคลากรภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณพี่ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และคำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้อง และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน คอยลุ้น และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ดวงพร คล้ายเพชร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XII
สารบัญรูป.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	7
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้.....	7
2.1.2 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้.....	11
2.1.3 ระเบียบและนโยบายเพื่อนำไปสู่การใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้.....	12
2.1.4 แนวโน้มการใช้และการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	14
2.2 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS).....	17
2.2.1 ลักษณะทั่วไป.....	17
2.2.2 สมบัติของ PBS.....	17
2.2.3 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต.....	18
2.2.4 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PBS.....	19
2.2.5 การใช้ประโยชน์ของ PBS.....	19
2.3 แป้ง.....	20
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง.....	20
2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	23
2.3.4 สมบัติของแป้ง.....	29
2.3.5 แป้งมันสำปะหลัง.....	29
2.3.6 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	31
2.3.7 แป้งคัดแปร.....	32
2.3.8 การคัดแปรแป้งทางเคมี.....	33
2.3.9 แป้งเอสเทอร์.....	35
2.3.10 แป้งพรีเจล.....	36
2.3.11 แป้งไฮโดรโฟบิก.....	38
2.3.12 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ.....	39
2.4 การย่อยสลายของแป้ง.....	39
2.4.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา.....	39
2.4.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์.....	40
2.5 สารช่วยผสม.....	40
2.6 พลาสติกไซเซอร์.....	44
2.7 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า.....	45
2.8 พลาสติกเพื่อการเกษตร.....	46
2.8.1 นิยามและความหมาย.....	46
2.8.2 สถานภาพปัจจุบัน.....	47
2.8.3 การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร.....	48
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	60
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง.....	64
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มในระดับห้องปฏิบัติการ.....	64
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มในระดับอุตสาหกรรม.....	66
3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่าง.....	67
3.3.3.1 การวัดดัชนีการหักเห.....	67
3.3.3.2 การวัดความหนา.....	67
3.3.3.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา.....	67
3.3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล.....	67
3.3.3.4.1 การทดสอบแรงดึง.....	67
3.3.3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล.....	68
3.3.3.4.3 ศึกษาความแข็งแรงของรอยขีด.....	69
3.3.3.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	69
3.3.3.5.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ.....	69
3.3.3.5.2 ค่ามุมสัมผัส.....	70
3.3.3.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	70
3.3.3.6.1 Differential scanning calorimetry.....	70
3.3.3.6.2 Thermogravimetric analysis.....	70
3.3.3.6.3 Dynamic mechanical thermal analysis.....	70
3.3.3.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์โดยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี.....	71
3.3.3.8 การศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้โดยการฝังดิน.....	71
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	72
ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ.....	73
4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	73
4.2 การศึกษาดัชนีการหักเห.....	77
4.3 การเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม.....	79
4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม.....	89
4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	91
4.6 การศึกษาดัชนีการหักเหของแสง.....	94
4.7 ความหนาของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง.....	95
4.8 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	96
4.8.1 Differential scanning calorimetry.....	96
4.8.2 Thermogravimetric analysis.....	97
4.8.3 Dynamic mechanical thermal analysis.....	98
4.9 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	99
4.10 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	103
4.10.1 การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ.....	103
4.10.2 การวัดค่ามุมสัมผัส.....	105
4.11 การศึกษาสมบัติเชิงกล.....	106
4.12 การศึกษาความแข็งแรงของรอยขีด.....	109
4.13 การทดสอบการฝังดิน.....	111
4.14 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	119
5.1 สรุปผลดำเนินงานวิจัย.....	119
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	121
เอกสารอ้างอิง.....	122
ภาคผนวก ก. Data sheet ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์.....	129
ภาคผนวก ข. การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	130

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. การพิสูจน์เอกลักษณ์.....	141
ภาคผนวก ง การศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	146
ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	147
ภาคผนวก ฉ เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม.....	150
ภาคผนวก ช ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตาม มาตรฐานมอก. 711-2530.....	151
ประวัติผู้เขียน.....	152

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สถาบันที่มีหน้าที่ออกเอกสารรับรองผลิตภัณฑ์และตราสัญลักษณ์สำหรับวัสดุย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์.....	12
2.2 สมบัติของ PBS ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	17
2.3 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน.....	25
2.4 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส.....	26
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป.....	31
2.6 การใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ในการคลุมดิน.....	48
2.7 พลาสติกคลุมดิน.....	49
2.8 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการคลุมดิน.....	50
3.1 สมบัติบางประการของ Bionolle <sup>®</sup> (PBS) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	61
3.2 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดเอสเทอร์.....	61
3.3 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดพีรีเจล.....	61
3.4 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก.....	62
3.5 สมบัติบางประการของกลีเซอรอล.....	62
3.6 สมบัติบางประการของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และ Luperox <sup>®</sup> 101.....	62
3.7 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/PGS อัตราส่วน 70/30 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
3.8 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/PGS อัตราส่วน 60/40 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	65
3.9 สูตรผสมของ PBS/EMS อัตราส่วน 70/30 มีการเติม สารช่วยผสม 0.5-1.5% MA (โดยน้ำหนักของ PBS) และ 10 wt % L101 (MA Basis) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	66
3.10 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/HBS อัตราส่วน 70/30 พลาสติกไซเซออร์ 40% (โดยน้ำหนักของแป้ง) ทั้งที่มีการเติมสารช่วยผสม 1.0% MA และ 10 wt % L101 (MA Basis) และไม่ได้เติมสารช่วยผสม ที่ใช้ในงานวิจัย.....	67
4.1 อักษรย่อแทนสูตรของ PBS และแป้งสตาร์ชที่ใช้ในการทดลอง.....	72
4.2 ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม (ตอนที่ 1).....	78
4.3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม, พลาสติกไซเซออร์ และสารช่วยผสม แสดงผลในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้.....	79
4.4 ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม (ตอนที่ 2).....	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มที่ผลิตได้.....	95
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC.....	96
4.7 การศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DMTA.....	99
4.8 ตำแหน่งของสเปกตรัมของ PBS บริสุทธิ์ แป้งสตาร์ช กลีเซอรอล และ MA.....	100
4.9 ค่ามุมสัมผัส (องศา) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	105
4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มพอลิไบวิทิลินซัคซิเนต ผสมแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ ทั้งที่ใส่สารช่วยผสม และไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	117
4.11 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตฟิล์มพอลิไบวิทิลินซัคซิเนต ผสมแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ ทั้งที่ใส่สารช่วยผสม และไม่ได้ใส่สารช่วยผสม.....	118

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างฟิล์มทางการเกษตร.....	4
2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม.....	10
2.2 วัฏจักรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้.....	11
2.3 แนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลกแบ่งตามประเภทของ วัตถุดิบ.....	14
2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBS.....	17
2.5 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle® .....	18
2.6 กราฟแสดงปริมาณการย่อยสลายของ PBS.....	19
2.7 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) .....	21
2.8 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน.....	23
2.9 ระดับโครงสร้างในเมล็ดแป้งมันฝรั่ง.....	24
2.10 โครงสร้างของอะไมโลส.....	25
2.11 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส.....	27
2.12 โครงสร้างอะไมโลเพกติน.....	27
2.13 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน.....	28
2.14 แบบจำลองสายโซ่ตรงและสายโซ่กิ่งของแป้ง.....	28
2.15 ราคาแป้งมันสำปะหลังในตลาดโลก.....	30
2.16 มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของไทย.....	31
2.17 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	32
2.18 การคัดแปรแป้งแต่ละชนิด.....	35
2.19 การเปลี่ยนแปลงของเมล็ดแป้งขณะให้ความร้อน.....	36
2.20 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดียวและเครื่องอัดรีด.....	38
2.21 กระบวนการผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก.....	39
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมกับอัตราส่วนขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม.....	41
2.23 โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 กลไกปฏิกิริยาเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), แป้ง, ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (L101).....	43
2.25 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	45
2.26 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	46
2.27 ตัวอย่างพลาสติกคลุมดิน.....	50
2.28 ตัวอย่างพลาสติกคลุมโดยตรง.....	51
2.29 ตัวอย่างอุโมงค์หลังคาต่ำ.....	52
2.30 ตัวอย่างโรงเรือนพลาสติก.....	52
2.31 ตัวอย่างแผ่นพลาสติกปูบ่อน้ำ บ่อน้ำบาด และบ่อกึ่ง.....	53
2.32 ตัวอย่างท่อน้ำหยด.....	54
2.33 ตัวอย่างการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน.....	54
2.34 ตัวอย่างดาขายและตะแกรงลดพลังงาน.....	55
3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง.....	68
3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงแรงฉีกขาด (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง MD.....	68
3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยขีด.....	69
4.1 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) PGS ที่กำลังขยาย 100X.....	73
4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) PGS ที่กำลังขยาย 500X.....	74
4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ P7E3G40 (A) กำลังขยาย 500X (B) กำลังขยาย 2000X.....	76
4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ P7P3G40 (A) กำลังขยาย 500X (B) กำลังขยาย 2000X.....	76
4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวาง (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X.....	76
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ.....	82
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ.....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ.....	83
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงนิกษาคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่าง.....	84
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง .....	85
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70:30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง.....	85
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง.....	86
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงนิกษาคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง.....	86
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	87
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	87
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	88
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงนิกษาคของสูตรพอลิเมอร์ผสม.....	88
4.18 ภาพแสดงการขึ้นรูปที่บริษัททานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน).....	90
4.19 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS ที่กำลังขยาย 100X.....	91
4.20 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS ที่กำลังขยาย 500X.....	91
4.21 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X.....	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X.....	92
4.23 SEM แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 100X.....	93
4.24 SEM แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 500X.....	93
4.25 SEM แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 100X.....	93
4.26 SEM แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 500X.....	94
4.27 TGA thermogram ของ PBS, แป้งสตาร์ช และพอลิเมอร์สูตรต่างๆ.....	97
4.28 DMTA thermogram ของ PBS และพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	99
4.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PBS บริสุทธิ์.....	100
4.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS.....	101
4.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) PBS บริสุทธิ์, (B) P7E3G40 และ (C) P7E3G40/MA1....	101
4.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) PBS บริสุทธิ์, (B) P7H3G40 และ (C) P7H3G40/MA1....	102
4.33 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PBS, แป้งสตาร์ช, MA และตัวริเริ่มปฏิกิริยา L101.....	103
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ PBS/แป้งสตาร์ช กับ จำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น.....	104
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ PBS/แป้งสตาร์ช แช่ อยู่ในน้ำกลั่น ในวันที่ 20.....	105
4.36 ภาพถ่ายการเปียกของพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง (A) P7H3G40 และ (B) P7H3G40/MA1.	106
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	107
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตร ต่างๆ.....	108
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	108

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตร ต่างๆ.....	109
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยขีดของพอลิเมอร์ผสมสูตร ต่างๆ.....	110
4.42 แบบจำลองแสดงกลไกการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชัน บริเวณรอยขีด (A) PBS และ (B) PBS ผสมแป้งสตาร์ช.....	110
4.43 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7 (A) PBS, (B) P7E3G40, (C) P7E3G40/MA1, (D) P7H3G40 และ (E) P7H3G40/MA1.....	113
4.44 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ (A) PBS และ (B) แป้งสตาร์ช.....	114
4.45 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน ที่ กำลังขยาย 2000X.....	115
4.46 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ PBS/EMS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X.....	115
4.47 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ PBS/HBS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X.....	115

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้มีการใช้พลาสติกกันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในครัวเรือน ไปจนถึงยานอวกาศ เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่เป็นสิ่งดึงดูดใจในการนำไปใช้งาน ได้แก่

- สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย ทำเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนได้ง่าย
- ทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบา สมบัติจำเพาะสูง
- บางชนิดมีความต้านทานต่อสารเคมี และไม่เป็นสนิม
- ส่วนใหญ่เป็นฉนวนไฟฟ้า และฉนวนความร้อน (บางชนิดสามารถนำไฟฟ้าได้)
- มีสมบัติเชิงกลหลากหลาย ตั้งแต่ทำให้อ่อนนุ่ม เหนียว หรือใส เหมือนแก้วได้ ไปจนถึงทำให้มีความแข็งเทียบเท่าโลหะ

ซึ่งนับว่าสมบัติเหล่านี้มีประโยชน์มาก ดังนั้นคำว่าพลาสติกจึงเป็นที่รู้จักกันทั่วไป เนื่องจากพลาสติกนั้นมีราคาถูก มีน้ำหนักเบา สมบัติจำเพาะ (Specific properties) หรือสมบัติต่อน้ำหนักสูง และมีการประยุกต์การใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ประกอบกับปัจจุบันเราสามารถทำการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกให้มีสมบัติต่างๆ ตามที่เราต้องการได้ไม่ยาก โดยขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบ ปฏิกิริยาเคมี กระบวนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ ได้อย่างมากมาย และนอกจากนี้ ยังสามารถปรุงแต่งสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เป็นต้น ซึ่งสาเหตุดังกล่าวทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในอนาคต แต่เนื่องจากพลาสติกบางชนิดเป็นวัสดุที่ทำลายได้ยาก หรือต้องใช้เวลาอันยาวนานกว่าที่พลาสติกจะเสื่อมสภาพในสภาวะแวดล้อม และพลาสติกมีความเหนียวต่อปฏิกิริยาเคมี ทำให้การกำจัดผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วทำได้ยาก ดังนั้นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมักถูกกล่าวว่าเป็น ขยะพลาสติก ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้จะสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

ถึงแม้อุตสาหกรรมพลาสติกจะพัฒนาขึ้นมา เพื่อนำความสะดวกสบายมาสู่ชีวิตมนุษย์ แต่ปริมาณผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน จึงได้มีการแก้ไขปัญหาสถานะจากขยะพลาสติก ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นหลายแนวทาง [1] คือ

#### 1. การเผาทำลาย (Burning)

เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการกำจัดขยะพลาสติก และมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง เป็นวิธีที่สามารถใช้งานได้ดี ข้อเสียของวิธีการกำจัดขยะพลาสติกโดยการเผาทิ้ง คือ ต้องมีการสร้างเตาเผาอย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นการทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และในการเผาขยะพลาสติกจำพวกที่มี

คลอรีนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หรือพลาสติกที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น พอลิยูรีเทน (PU) พอลิเอไมด์ (PA) เป็นต้น อาจมีก๊าซพิษเกิดขึ้น

## 2. การนำไปถม หรือการฝังกลบ (Burial หรือ Landfill)

เป็นวิธีการกำจัดขยะที่ใช้กันอยู่ทั่วไปเป็นส่วนมาก (ประมาณ 80%) เพราะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และถ้ามีการทำอย่างถูกต้องลักษณะ คือ ใช้แผ่นพลาสติกคลุม และใช้ดินทับอีกชั้นหนึ่ง ข้อเสียของการกำจัดขยะวิธีนี้ คือ พื้นที่ถมมักเกิดปัญหาเรื่องการยุบตัว โดยเฉพาะถ้าเป็นพื้นที่สำหรับการก่อสร้าง แต่ถ้ามีการบดย่อยให้เป็นชิ้นเล็กลงก่อนอาจช่วยลดปัญหาได้บ้าง ซึ่งการทำการบดย่อยนี้จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย การกำจัดขยะโดยการขุดหลุม และฝังกลบเป็นวิธีที่ใช้กันมานานร้อยปี เนื่องจาก

- เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุน และดำเนินการน้อยกว่าวิธีอื่น
- การจัดการไม่สลับซับซ้อนมากนัก
- มีความยืดหยุ่นมากในการรองรับ ทั้งด้านปริมาณ และลักษณะของขยะมูลฝอย
- เป็นระบบกำจัดขยะในขั้นตอนสุดท้าย

แต่หากขาดการจัดการที่ดี ก็อาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมหลายประการ เช่น เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนชุมชนรอบข้าง เกิดการรั่วซึมของฝ้ายางปูพื้น และเป็นแหล่งกักเก็บเชื้อโรคต่างๆ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการฝังกลบให้เป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น เช่น การบีบอัดเพื่อเอาน้ำชะขยะออก การมัดขยะให้เป็นก้อน และหุ้มด้วยพลาสติกก่อนนำไปฝังกลบ เป็นต้น [2]

## 3. การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycling)

เป็นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling) [3]

## 4. เร่งการย่อยสลาย อาจโดยการเติมเป๋งลงในพลาสติกเพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลาย-เป๋งก่อน หรือใช้พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้

วิธีการนี้หมายถึง การทำให้พลาสติกสลายตัวได้เองในธรรมชาติเหมือนขยะประเภทอื่นๆ เช่น ขยะบางประเภทที่มีสารตั้งต้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ เป็นต้น ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ สิ่งที่จะช่วยให้พลาสติกย่อยสลายได้ คือ แสง น้ำ และจุลินทรีย์ ดังนั้นพลาสติกย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อาจทำได้โดยการทำให้เป็น

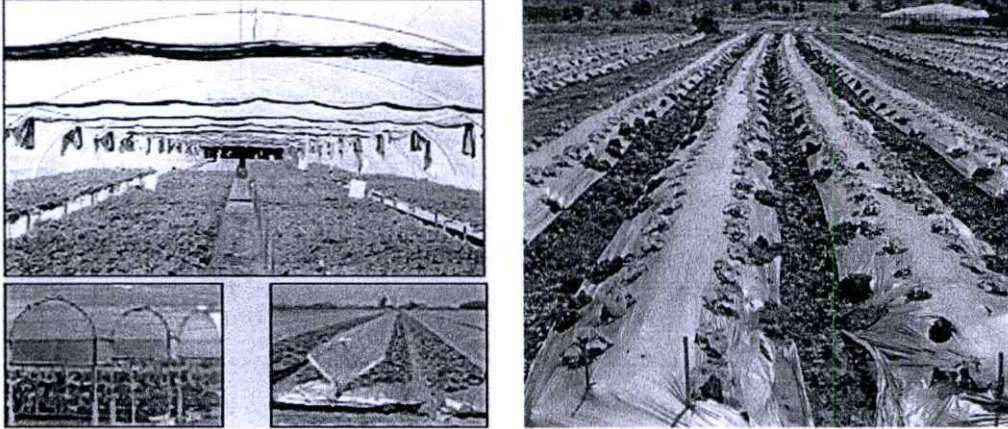
1. พลาสติกย่อยสลายตัวโดยแสง (Photodegradable plastics)
2. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)
3. พลาสติกที่สลายตัวโดยวิธีการอื่นๆ เช่น พลาสติกละลายน้ำ เป็นต้น

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ.1960 (พ.ศ.2503) ด้วยแนวคิดว่าจะเป็นการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางและประมาณ 15% ขยะในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ พลาสติกที่ถูกทิ้งในสิ่งแวดล้อมจะสลายตัวได้จากรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งได้จากดวงอาทิตย์ หรือจุลินทรีย์ในดิน โดยมีความร้อน ออกซิเจน ความชื้นช่วยเร่งการสลายตัว

✧ ปัจจุบันวิธีการแก้ปัญหาขยะพลาสติกวิธีที่ดีที่สุด คือ การส่งเสริมให้ทำการศึกษาพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยังมีข้อจำกัดอยู่คือ มีราคาที่สูงกว่าพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป และมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะกับการใช้งาน <sup>๗๔</sup>

ซึ่งปัจจุบันทั่วโลกมีความต้องการในการใช้พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) อยู่ประมาณ 500,000 เมตริกตันต่อปี [4] โดยพลาสติกชีวภาพที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) อย่างไรก็ตาม กำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดทั่วโลกมีเพียง 200,000 เมตริกตันต่อปี ดังนั้น ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ จึงได้เข้ามามีส่วนแบ่งในตลาดผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ (Degradable bioplastic) มาใช้ในงานวิจัย คือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) เนื่องจาก PBS สามารถนำไปขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป อีกทั้งยังมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด และยังสามารถทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย โดยส่วนมาก พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จะถูกใช้เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ฟิล์มในรูปแบบต่างๆ เพราะสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนาอยู่ในช่วง 30-50 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ได้ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ในการทำฟิล์มเพื่อการเกษตรรูปแบบต่างๆ ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาเม็ดคอมพาวด์พลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตภายในประเทศไทย จะมุ่งเน้นในการนำวัตถุดิบในประเทศไทย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) มาใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ใช้ในการผลิตเม็ดคอมพาวด์ ทั้งนี้โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพลง โดยไม่กระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และการย่อยสลายทางชีวภาพ แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ดังเช่น แป้งดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch, EMS) แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch, PGS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch, HBS) เพื่อการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ฟิล์ม เช่น สำหรับงานเกษตรกรรม ได้แก่ ถุงเพาะชำต้นกล้า และพลาสติกคลุมหน้าดินทางการเกษตร (Mulch film) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถ

กำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุ และสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังสามารถนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ด้วงยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำ สำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุง หรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างฟิล์มทางการเกษตร [5]

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable bioplastic film) จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ผสมกับแป้งคัดแปรชนิดต่างๆ จากมันสำปะหลัง ได้แก่ แป้งคัดแปรเอสเทอร์ แป้งพรีเจล และแป้งไฮโดรโฟบิก ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion)
2. เพื่อศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการขึ้นรูป และศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และความสามารถในการย่อยสลาย

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และแป้ง ที่จะนำมาทำการเป่าฟิล์ม
2. ศึกษาผลของชนิดแป้ง ที่เหมาะกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
3. ศึกษาปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) และสารช่วยผสม (Compatibilizers) ที่เหมาะสม
4. ศึกษาสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ได้แก่
  - สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus), ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความแข็งแรงของรอยซีล (Seal strength)
  - สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC), Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) และ Thermogravimetric analysis (TGA)
  - การพิสูจน์เอกลักษณ์พลาสติก โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)
  - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดน้ำ (Water absorption) และ ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)
  - สัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy, SEM)
  - ความสามารถในการย่อยสลาย โดยการฝังกลบ (Burial test)
5. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์โดยสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งานจริง และสามารถวิเคราะห์ต้นทุนได้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable bioplastic film) ชนิดใหม่จากการผสมพอลิবিวทิลีนซัคซิเนต กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่มีสมบัติที่ดี สามารถใช้งานได้
2. ทราบถึงปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมของ PBS, แป้งสตาร์ช, พลาสติกไซเซอร์ และสารช่วยผสม ที่สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์มได้
3. ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติต่างๆ ที่ดี เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น ฟิล์มทางการเกษตร ได้แก่ งานทางด้านฟิล์มคลุมดิน และงานเกี่ยวกับทางด้านเกษตรกรรมได้
4. สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบให้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ในประเทศ
5. สามารถผลิต และขึ้นรูปได้จริงในประเทศ
6. สามารถช่วยเพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ในช่วงเวลา 100 กว่าปีที่ผ่านมานับตั้งแต่เบกะไลต์ (Bakelite) พลาสติกสังเคราะห์ชนิดแรกถูกสังเคราะห์ขึ้นในปี ค.ศ.1907 (พ.ศ. 2449) [6] พลาสติกได้กลายเป็นวัสดุสำหรับโลกยุคปัจจุบัน และถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่พลาสติกส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงก่อให้เกิดปัญหาเรื่องปริมาณขยะ และของเสียซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาพแวดล้อม จึงทำให้ช่วง ค.ศ. 1960 [6] เริ่มมีการสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้ขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรก ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งการใช้งานมุ่งเน้นสำหรับทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำเทียม ไหมละลาย เป็นต้น ดังนั้นปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำแป้งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป หรือนำมาผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ประเภทอื่นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ และการใช้งานตรงต่อความต้องการเพิ่มขึ้น ทำให้ผลิตได้ในราคาที่ถูกลง ทำให้มีการพัฒนาใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การเกษตร และบรรจุภัณฑ์ตอบสนองความต้องการทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภคที่มีเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมางานวิจัย และพัฒนาด้านพลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก พลาสติกยุคใหม่จึงได้ถูกออกแบบมาให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติก เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว น้ำหนักโมเลกุล หรือมวลลดลง และสลายตัวไปในที่สุด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสภาพแวดล้อม

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกย่อยสลายชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ชีวมวล (Biomass) ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นในการเจริญเติบโต และดำรงชีวิตของพืช ซึ่งรวมถึงมันสำปะหลัง และ ข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้จึงมีรูปแบบ คือ พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมทั่วไป (Commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ [7]

American Society for Testing and Materials (ASTM) [8] ได้ให้ความหมายพลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากการสูญเสียสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

### 1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสาร หรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสต์ (Compost) หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการทาดำด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

### 2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสง และความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO• และ •OH ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินส์เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิลิกัน รู้จักในนามสารประกอบออกซิ (Oxo compound) ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นอนุมูลอิสระ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

### 3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิ-แอนไฮดราต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้

เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ (Enzyme) เช่น Depolymerase, Lipase, Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสถานะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

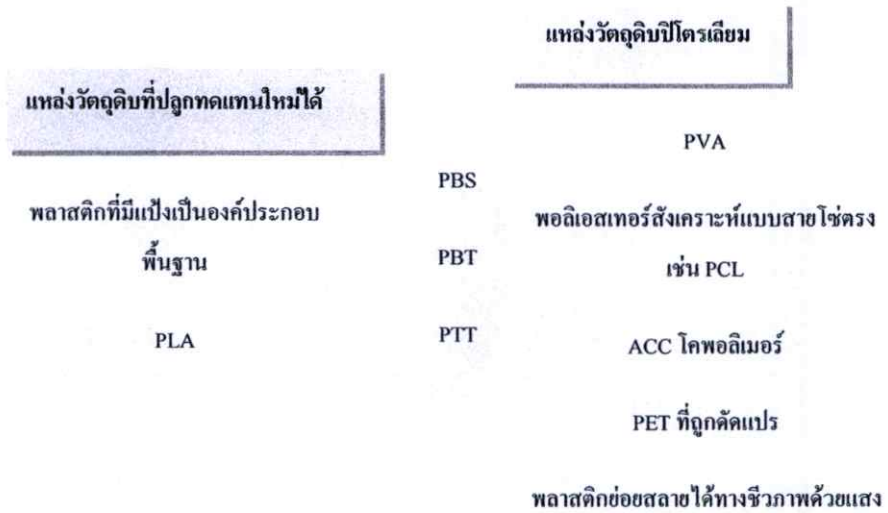
#### 4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และชีวมวล (Biomass)

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความหมาย หรือคำจำกัดความตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 103.2) ระบุไว้ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ โดยที่สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลาย จะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ การคอมโพสท์ (Composting)

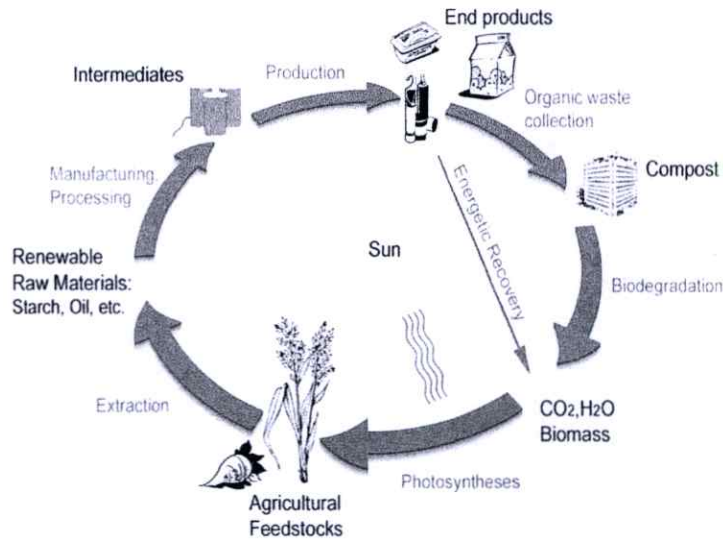
พลาสติกย่อยสลายได้ชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากปิโตรเลียม (Petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-based biodegradable plastics) ซึ่งปัจจุบันเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากผลิตจากพืช หรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้น

ใหม่ได้ (Renewable resources) โดยอาศัยกระบวนการหมัก (Fermentation) ซึ่งใช้พลังงานต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเมื่อฝังกลบภายหลังการใช้งาน



## รูปที่ 2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ และแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม [9]

ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch-based polymers) และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทพอลิเอสเทอร์ (Biodegradable polyester) เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA), พอลิไฮดรอกซีบิวทีเลต (Polyhydroxybutylate, PHB), พอลิไฮดรอกซีเฮกซาโนเอต (Polyhydroxyhexanoate, PHH), พอลิไฮดรอกซีวาเลอริค (Polyhydroxyvalerate, PHV), พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA), พอลิบิวทีลีนซัคซินเนต (Polybutylene succinate, PBS), พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพทาเลต (Polytrimethylene terephthalate, PTT), พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) และ อะลิฟาติก อะโรมาติก โคพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic-Aromatic copolyesters, AAC) นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ย่อยสลายได้อื่นๆ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics) พอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มีสมบัติควบคุมการย่อยสลาย (Controlled degradation additive masterbatches) เพื่อให้พอลิเมอร์มีขนาดโมเลกุลเหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่อไป








รูปที่ 2.2 วงจรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้ [10]

### 2.1.2 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% [8] โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ สารชีวมวล (Biomass) ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และสำหรับพอลิเมอร์ผสมจะต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และจะต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืช และสัตว์ จึงจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ (Compost) เมื่อตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐาน และมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ 2.1 สถาบันที่มีหน้าที่ออกเอกสารรับรองผลิตภัณฑ์และตราสัญลักษณ์สำหรับวัสดุย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ [11]

ประเทศ	ชื่อสถาบัน	ตราสัญลักษณ์
เยอรมัน	DIN CERTCO IBAW	 Compostable
เบลเยียม	AIB Vincotte	 OK compost
ญี่ปุ่น	Biodegradable Plastic Society	 Green Pla
ฟินแลนด์	Jatelaitosyhdistys	 Apple core
สหรัฐอเมริกา	Biodegradable Product Institute/ US Composting Council	 BPI

### 2.1.3 ระเบียบและนโยบายเพื่อนำไปสู่การใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้

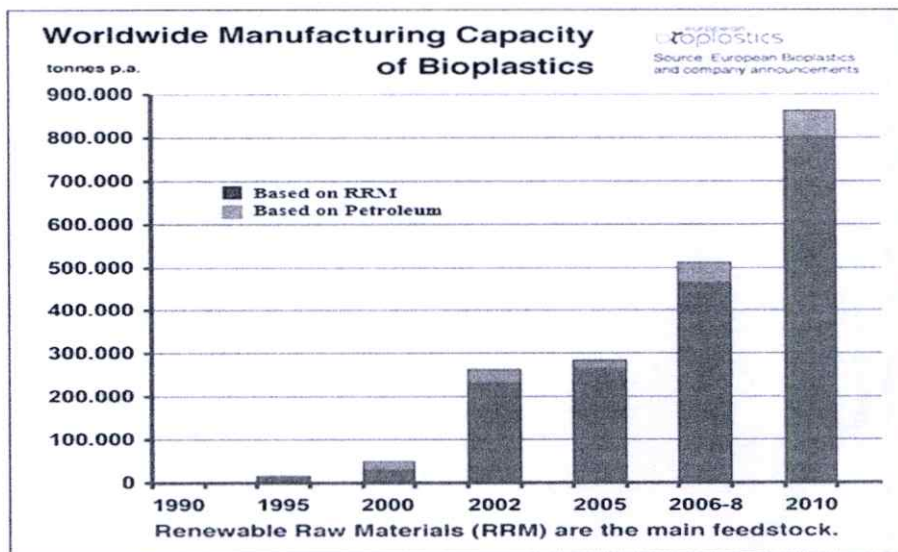
สหภาพยุโรปได้จัดทำแผนด้านการจัดการขยะ (EU Waste Management Strategy (COM (96) 399)) เพื่อช่วยลดปัญหาด้านสภาวะแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะ โดยกำหนดให้มีการปรับสภาพขยะเพื่อไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาวะแวดล้อม และมีข้อกำหนดต่างๆ เป็นเครื่องมือสำหรับควบคุมปริมาณ และการจัดการขยะ เช่น Packaging and Packaging Waste 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 ส่งผลต่อการจัดการ และการ

พัฒนาแบบยั่งยืนของประเทศ โดยส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมหลายด้าน เช่น ลดผลกระทบจากสภาวะก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากขยะย่อยสลายได้ทางชีวภาพหากถูกกำจัดโดยการทิ้งในบ่อฝังกลบอาจเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเกิดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การนำขยะที่ย่อยสลายได้ เช่น ขยะอินทรีย์ และพลาสติกย่อยสลายได้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ผ่านกระบวนการคอมโพสท์ (Composting) สามารถนำคอมโพสท์ที่หมักได้มาใช้ในการผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อใช้ในงานด้านเกษตร ปัจจุบันกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรปได้ให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณขยะอินทรีย์ที่จะถูกส่งไปกำจัดยังบ่อฝังกลบ การเกิดทะเลทราย และการกักต้อนของผิวดิน รวมถึงการควบคุมการใช้สารเคมี และการเพาะปลูกอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลให้มีอินทรีย์สารในดินลดลง ตัวอย่างนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม และมาตรการของประเทศต่างๆ ที่มุ่งลดปริมาณการบริโภคบรรจุภัณฑ์ลง เช่น เมืองฟลอเรนซ์ ประเทศอิตาลี มีการห้ามซื้อขายภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจากพลาสติกที่ไม่ย่อยสลาย ประเทศเดนมาร์กประกาศห้ามใช้ภาชนะบรรจุเครื่องดื่มที่ทำจากพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ประเทศนอร์เวย์ได้มีความพยายามลดปริมาณการใช้พลาสติกโดยให้ร้านค้าต่างๆ เริ่มเก็บเงินค่าถุงพลาสติกจากผู้บริโภค รัฐบาลของแอฟริกาใต้ประกาศให้ผู้ผลิตผลิตถุงพลาสติกที่มีความหนา ทนทาน และมีราคาสูงมากขึ้น เพื่อให้มีการใช้งานที่น้อยลง ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดการใช้งานลงถึง 90% ประเทศไอร์แลนด์ได้จัดให้มีการเรียกเก็บภาษี 15 เซนต์ต่อถุง 1 ใบ เริ่มใช้ในเดือนมีนาคม ค.ศ.2002 ซึ่งทำให้เกิดการลดปริมาณการใช้ถุงลง 95% เมือง Ladakh ประเทศอินเดียประสบความสำเร็จในการรณรงค์การใช้ถุงพลาสติกภายในจังหวัด และได้กำหนดวันที่ 1 พฤษภาคมของทุกปี เป็นวันประกาศห้ามใช้พลาสติก (Plastic ban day) โอลิมปิกเกมส์ที่เมืองซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย ในปี ค.ศ.2000 ได้ใช้ภาชนะ และถุงที่ทำจากพลาสติกย่อยสลายได้ และทำการเก็บรวบรวมขยะอินทรีย์ได้ 75% ของเศษขยะอาหารที่เกิดขึ้นในสถานแข่งขัน และที่พนักงานกีฬาทั้งหมด เพื่อนำมาคอมโพสท์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการคัดแยกขยะที่เป็นบรรจุภัณฑ์ออกก่อนทิ้ง และประกาศห้ามใช้มาตรการจัดการขยะพลาสติกประกอบด้วย ความร่วมมือของผู้บริโภค (ต่อต้านการทิ้งรีไซเคิล) มาตรการของความร่วมมือ และออกกฎหมายเพื่อใช้ในการปรับคนที่ทิ้งขยะรีไซเคิล เป็นจำนวนเงิน 60-4,000 เหรียญออสเตรเลีย นอกจากนี้ร้านค้าต่างๆ เช่น บริษัท IKEA และบริษัท ALDI เริ่มเก็บเงินเพิ่ม (10-15 เซนต์) สำหรับลูกค้าที่ต้องการใช้ถุงพลาสติกของทางร้าน ในประเทศฝรั่งเศส การประชุมสภาสมัชชาได้ข้อสรุปในวันที่ 13 ตุลาคม ค.ศ.2005 อย่างเป็นทางการในการออกร่างกฎหมาย ห้ามการขายในแจกจ่ายถุงพลาสติกทุกประเภท ซึ่งจะเริ่มใช้ในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ.2010 ยกเว้นถ้าผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ปัจจุบันอยู่ในความเห็นชอบของวุฒิสภา มีการเคลื่อนไหวในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำนวนมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ตัวอย่างเช่น รัฐ 11 รัฐ ได้ออกกฎหมายในการสนับสนุนตลาดผลิตภัณฑ์รักษาสิ่งแวดล้อม และหลายรัฐได้ออก Green report 1 และ 2 ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะในการประชาสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีสนธิสัญญา MARPOL ห้ามไม่ให้ทิ้งพลาสติกลง

ในทะเล ทั้งนี้การเคลื่อนไหวยังส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับพลาสติกย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และเริ่มมีการจัดเก็บ Bottle bills ค่าธรรมเนียม 5 เซนต์ สำหรับกระป๋อง และขวดน้ำดื่ม ยกเว้น เครื่องดื่มประเภทนม และค่าธรรมเนียม 17 เซนต์สำหรับถุงใส่ของ และประเทศแคนาดามีการจัด “โครงการถือถุงมาเองที่ร้านค้า” เป็นต้น [11]

#### 2.1.4 แนวโน้มการใช้และการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

จากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติ และความตระหนักต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะปัญหาภาวะโลกร้อนที่ทั่วโลกกำลังเผชิญร่วมกัน ส่งผลให้ความต้องการผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในตลาดโลกมีอัตรา การเติบโตเพิ่มขึ้นมาก โดยมีปริมาณความต้องการใช้ทั่วโลก ในปี ค.ศ.2007-2008 สูงถึง 500,000 ตันต่อปี และมีอัตราการเจริญเติบโตถึงร้อยละ 70 เทียบกับปี ค.ศ.2005 [12] โดยเฉพาะตลาดสำคัญซึ่งมีปริมาณการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้คาดการณ์ว่า ตลาดสหภาพยุโรปมีแนวโน้ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอังกฤษ อิตาลี และเนเธอร์แลนด์ ซึ่งมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการตลาดของพลาสติกชีวภาพอย่าง รุดหน้า ดังเห็นได้จากการที่บรรจุกัญหย่อยสลายได้ โดยมีปริมาณการใช้พลาสติกชีวภาพ 40,000-50,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 20) ส่วนสหรัฐอเมริกาที่มีปริมาณความต้องการใช้ 70,000-80,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 16) และตลาดญี่ปุ่นมีปริมาณความต้องการใช้ 15,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 100)



รูปที่ 2.3 แนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลกแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบ [12]

จะเห็นว่าส่วนแบ่งของการตลาดพลาสติกชีวภาพที่จะไปทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 2.3) โดยกำลังการผลิตในโลกในปี ค.ศ.2005 มีประมาณ 290,000 ตัน คิดเป็นส่วนแบ่งตลาดประมาณร้อยละ 1 ของการใช้พลาสติกทั่วไป โดยในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 นอกจากนี้ยังเห็นได้จากจำนวนหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพ มีการลงทะเบียนเป็นสมาชิกของสมาคมพลาสติกชีวภาพระหว่างประเทศ (IBAW-International Biodegradable Polymers Association) ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจากการประมาณการของ IBAW ในปี ค.ศ.2005 แสดงให้เห็นถึงการบริโภคพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นถึงเกือบสามเท่าจากปี ค.ศ.2000 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ประเภทถุงขยะที่เป็นปุ๋ยหมักได้ และ โฟมกันกระแทกที่ผลิตจากแป้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดที่ใหญ่ที่สุดในยุโรป ซึ่งมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการตลาดของพลาสติกชีวภาพอย่างรวดเร็ว ดังเห็นได้จากการที่บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นพบได้ทั่วไปในหมวดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลาดหลักของบรรจุภัณฑ์ผักผลไม้ ตลอดจนผลิตภัณฑ์อาหารนม โดยสามารถนำมาเป็นกรณีศึกษาถึงความสำเร็จในระยะเริ่มต้น

ประเทศเยอรมันเป็นตัวอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดถึงรูปแบบธุรกิจอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็กด้านพลาสติกชีวภาพอย่างก้าวกระโดด โดยเฉพาะด้านการพัฒนาเทคโนโลยีการผสมเม็ดพลาสติกชีวภาพกับสารเติมแต่งชีวภาพอื่นๆ (Compounding) เพื่อให้เม็ดพลาสติกชีวภาพสามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และมีสมบัติเชิงกล และกายภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ประเทศเยอรมันยังมีการผลักดันโครงสร้างพื้นฐานที่สนับสนุนการใช้พลาสติกชีวภาพโดยการออกมาตรการจากภาครัฐทั้งในระดับท้องถิ่น และระดับชาติ โดยเฉพาะมาตรการด้านภาษี สำหรับพลาสติกที่ไม่ย่อยสลาย เพื่อให้มีราคาที่สูงขึ้น อันเป็นการเอื้อให้พลาสติกชีวภาพอยู่ในราคาที่แข่งขันได้ในตลาด

ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่มีเทคโนโลยีขั้นหน้าที่แข็งแกร่ง ทำให้มีการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพ ประเภทต่างๆ เป็นอันดับหนึ่งของโลก เช่น บริษัท NatureWorks LLC ผลิต PLA ได้ 140,000 ตัน (สถิติ ปี ค.ศ.2003) ซึ่งเมื่อเทียบกับการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ แล้วนับว่าเป็นปริมาณสูงที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 90 ของส่วนแบ่งทางการตลาด สำหรับส่วนที่เหลือเป็นของ PBS PVA และพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ บริษัท Matabolix กำลังอยู่ในระหว่าง การพัฒนาการผลิต PHAs โดยวางแผนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมให้ได้ 50,000 ตัน ภายในปี ค.ศ.2008

ประเทศญี่ปุ่นมีโรงงานนำร่องสำหรับการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพภายในประเทศ เช่น บริษัท Toyota สามารถผลิต PLA ในโรงงานระดับนำร่อง ขนาด 1,000 ตันต่อปี ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปผลิตพลาสติกชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ บริษัท Mitsui Chemicals สามารถผลิต PLA แต่จากราคาที่ไม่สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายใหญ่ได้ โครงการนี้จึงยุติลง อย่างไรก็ตาม ประเทศญี่ปุ่นประสบความสำเร็จเป็นอย่างยิ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพโดยใช้เม็ดพลาสติก PLA ที่นำเข้ามาจากประเทศสหรัฐอเมริกามาต่อ ยอดด้วยเทคโนโลยีการผสมสารเติมแต่ง

หรือคอมพาวด์ โรงงานคอมพาวด์ขนาดใหญ่ของประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ บริษัท Unitika บริษัท Toray บริษัท Mitsui Chemicals บริษัท Mitsubishi Plastics และบริษัท Kuraray ซึ่งเม็ดคอมพาวด์ที่ผลิตได้ทั้งหมดนี้มีจุดประสงค์เพื่อการใช้งานในประเทศ 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 15,000-20,000 ตัน/ปี

ประเทศจีนเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีรูปแบบธุรกิจด้านพลาสติกย่อยสลายได้อย่างก้าวกระโดด บริษัท B&G ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนระหว่างประเทศจีน และเบลเยียมเป็นผู้ผลิตกรดแลคติกที่มีกำลังผลิตเป็นอันดับ 2 ของโลก ซึ่งผลิตได้ 30,000 ตัน/ปี บริษัท Tianan สามารถผลิต PHA ในเชิงพาณิชย์ได้ 1,000 ตัน/ปี

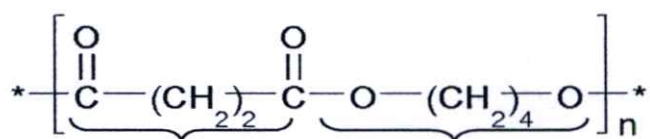
ด้านประเทศไทย สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และองค์การความร่วมมือทางวิชาการแห่งสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน (German Technical Cooperation: GTZ) ได้ร่วมกันพัฒนา “โครงการนวัตกรรมพลาสติกชีวภาพ” หรือ “BIOPLASTICS” โดยมีเป้าหมายเพื่อผลิต “พลาสติกชีวภาพ” จากวัตถุดิบทางธรรมชาติของประเทศ อาทิ “มันสำปะหลัง” หรือ “อ้อย” โดยจะนำเทคโนโลยีชีวภาพระดับสูงมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง หรือน้ำตาล ซึ่งจากข้อมูลของ สนช. พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพพอที่จะทำได้ เนื่องจากมีปริมาณวัตถุดิบที่มากเพียงพอ โดยในปี ค.ศ.2003 ประเทศไทยมีผลผลิตหัวมันสำปะหลังประมาณ 21 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 21,000 ล้านบาท และมีผลผลิตอ้อยประมาณ 60 ล้านตัน คิดเป็นผลผลิตน้ำตาลประมาณ 6 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 50,000 ล้านบาท และสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) ยังได้ประสานความร่วมมือระหว่างบริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) และบริษัท Showa Highpolymer (ประเทศญี่ปุ่น) ซึ่งเป็นผู้ผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ ชนิด PBS รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น เพื่อพัฒนาสูตรการทำคอมพาวด์ (Compounding) พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ชนิด PBS ในประเทศไทย

ในขณะที่บริษัทผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพยังคงพัฒนาเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ หรือพอลิเมอร์ชนิดใหม่ และพอลิเมอร์คอมพาวด์ โดยมีเป้าหมายให้ผลิตได้โดยใช้วัตถุดิบชีวมวลและ/หรือมีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้สารประกอบดังกล่าวอาจถูกพัฒนาโดยการผสมพลาสติกชีวภาพกับเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยจากปอ ลินิน กล้วยง เยื่อไม้จากต้นยาค้า (Sisal) [13, 14]

## 2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS)

### 2.2.1 ลักษณะทั่วไป

PBS เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ผลิตโดยบริษัท Showa Highpolymer ซึ่งอยู่ในเครือของบริษัท Showa Denko Group ประเทศญี่ปุ่น ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Bionolle® โดยผลิต PBS จากวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม



กรดซัคซินิก

1,4-บิวเทนไดออล

รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBS [9]

### 2.2.2. สมบัติของ PBS

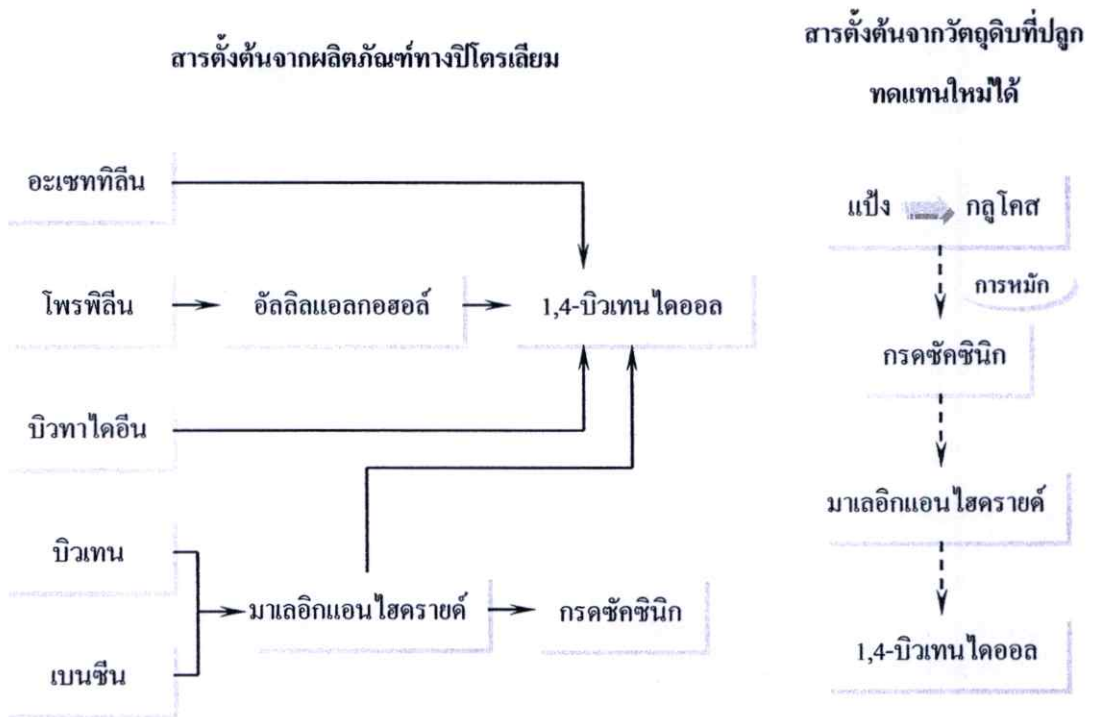
PBS เป็นเทอร์โมพลาสติก มีสีขาว มีความหนาแน่น 1.23-1.26 กรัม/มล. ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA แต่ PBS มีจุดหลอมเหลว ( $T_m$ ) ต่ำกว่า PLA และพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต โคไฮดรอกซีวาเลอริต (Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxy-valerate), PHBV) มาก และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ต่ำมาก โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูง ทนความร้อนได้ถึง 200 °C โดยไม่เสียสภาพ สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ดี และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ PBS ที่ผลิตเพื่อการค้า [15]

สมบัติ	หน่วย	PBS (Film grade)	
		#1001	#3001
ความหนาแน่น (Density)	g/ml	1.26	1.23
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )	°C	-32	-45
จุดหลอมเหลว (Melting point, $T_m$ )	°C	114-115	93-95
ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)	MPa	656	323
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	MPa	57	47
การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	700	900
ครรชนีการไหล (Melt flow rate, MFR) (190 °C, 2.16 kg)	g/10 min	1.5	1.4

### 2.2.3 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต

กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PBS โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม อย่างไรก็ตามวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และยังสามารถต่อไปเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle® [9]

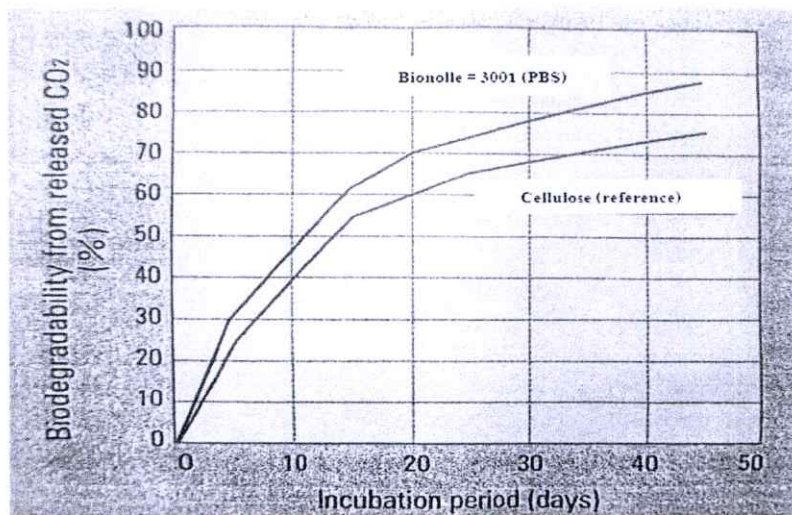
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

- ผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม โดยเริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล
- กรดซัคซินิกสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ โดยผ่านกระบวนการทางชีวภาพ และยังสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน

## 2.2.4 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PBS

PBS เกิดการย่อยสลายโดยผ่านกระบวนการ Hydro-biodegradable โดยเริ่มการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ซึ่งสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป PBS สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวลเป็นผลทำให้พลาสติกย่อยสลายได้จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภายใน 12 อาทิตย์ ซึ่งอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับความชื้น อุณหภูมิ พื้นที่ผิว และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อีกด้วย โดยมีงานวิจัยระบุว่า แผ่นฟิล์ม PBS ที่หนา 40 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) สามารถถูกย่อยสลายถึงร้อยละ 50 ภายในเวลา 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป [4]

จากมาตรฐาน European standard EN 13432 ระบุว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงของวัสดุไปเป็นคาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon) อย่างน้อย 90% ภายใน 180 วัน จากการทดสอบ พบว่า PBS เกิดการสลายตัวและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซ  $\text{CO}_2$  ได้เกือบ 90% ในระยะเวลาเพียง 45 วันเท่านั้น โดยกราฟแสดงปริมาณการย่อยสลายของ PBS แสดงดังรูป 2.6 [15]



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงปริมาณการย่อยสลายของ PBS [15]

## 2.2.5 การใช้ประโยชน์ของ PBS

PBS สามารถนำไปใช้แทนที่ PET และ PP และยังสามารถนำไปใช้แทนที่พอลิโพลีเอทิลีนส์ โดยเฉพาะ LDPE HDPE PS และ PLA เนื่องจากเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดนี้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป อีกทั้งยังมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆ ในการใช้งานบางประเภท PBS ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และอาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะ โฟม

พลาสติกไซเซออร์ แบบ Non-migrating สำหรับ PVC และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่นๆ โดยส่วนมาก PBS จะถูกใช้เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ฟิล์มในรูปแบบต่างๆ เพราะสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนาอยู่ในช่วง 30-50 ไมครอนได้ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ในการทำฟิล์มเพื่อการเกษตร เช่น ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้ม และปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น

## 2.3 แป้ง

### 2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง

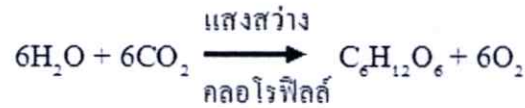
แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ด และหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ หรือกลางจะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย แอฟริกา มีข้าว และมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลี และแป้งมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ องค์ประกอบหลักของอาหารทุกชนชาติส่วนใหญ่จะมีแป้ง เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น

แป้ง ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก แป้งที่มีสิ่งเจือปนอยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวร์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี เป็นต้น ส่วนแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง จะเรียกว่า แป้งสตาร์ช (Starch) แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่า แป้งดิบ (Raw starch หรือ Native starch) ซึ่งจะตรงข้ามกับแป้งที่ถูกตัดแปรหรือแปรรูปแล้ว ที่เรียกว่า แป้งตัดแปร (Modified starch)

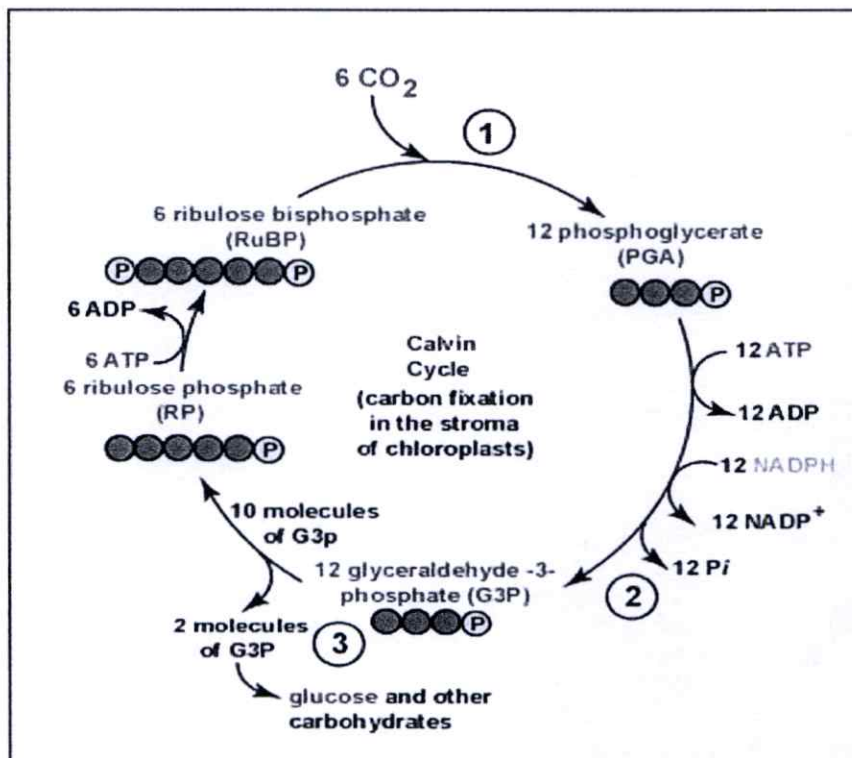
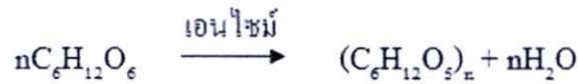
แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เกิดจากโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันจนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ แป้งเป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวได้ดีกับน้ำ แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น แป้งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ หาง่าย ราคาถูก มีเสถียรภาพทางความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน ซึ่งแป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสม หรือวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย [16]

### 2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรพิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ และน้ำในการสร้างกลูโคส และออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้ [16]



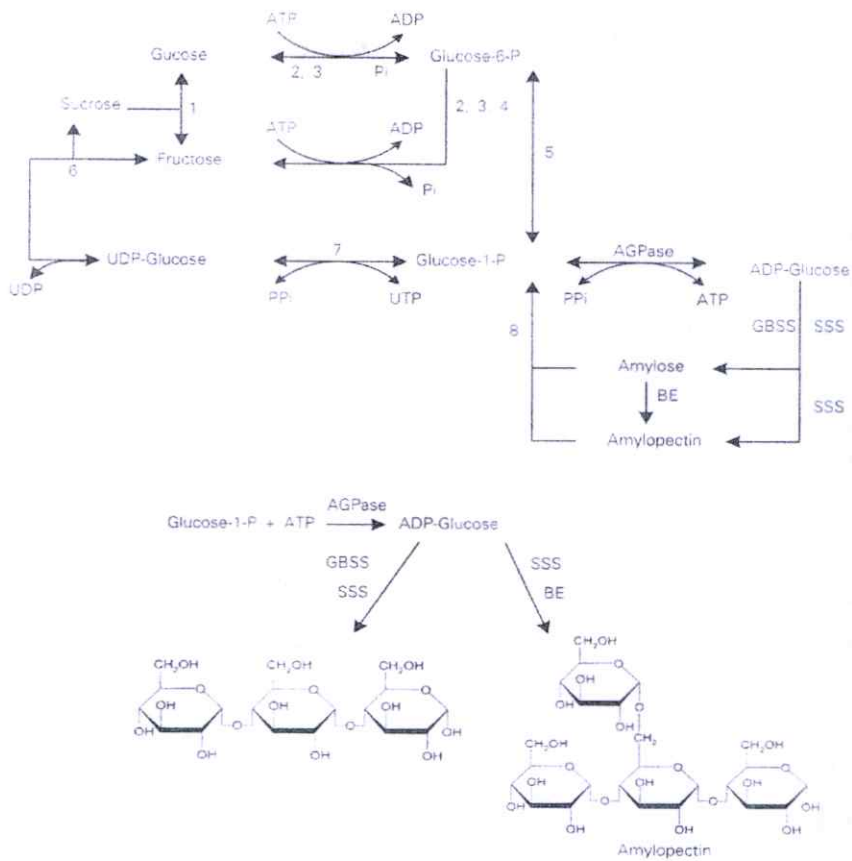
ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ และสร้างกรดฟอสโฟกลีเซอริก (Phosphoglyceric acid; PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม PGA จะผ่านวัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่ายได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) [17]

ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้งขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมอยู่ในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันฝรั่ง มันเทศ ท้าวขย่ม่อม) เก็บไว้ในลำต้น (สาकु สับปะรด)

การสังเคราะห์แป้งโดยเอนไซม์มี 4 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น (Initiation) ขั้นต่อสายยาว (Chain elongation) ขั้นต่อกิ่งก้าน (Branching) และขั้นการสร้างเม็ดแป้ง (Granule formation) การสังเคราะห์แป้งในขั้นเริ่มต้นเป็นการสร้างอะดีโนซีนไดฟอสฟอกูโคส โดยเอนไซม์อะดีโนซีนไดฟอสฟอกูโคสไพโรฟอสฟอริเลส ในขั้นต่อสายยาวเอนไซม์สตาร์ชซินเทส (Starch synthase) ทำหน้าที่เชื่อมหน่วยกลูโคสเข้ากับปลายที่ไม่มีหมูรีดิวซิง (Non-reducing end) ของอะไมโลส หรืออะไมโลเพกติน เมื่อโครงสร้างอะไมโลสมีสายยาวพอสมควร เอนไซม์ที่สร้างพันธะกิ่ง (Branching enzyme) จะตัดพันธะ  $\alpha$ -1,4 และสร้างพันธะ  $\alpha$ -1,6 เกิดเป็นกิ่งก้านของอะไมโลเพกตินในขั้นตอนต่อกิ่งก้าน ช่วงที่เกิดการต่อสายยาวเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และผลึก (Crystallization) ควบคู่กันด้วย และเกิดเป็น โมเลกุลเม็ดแป้งที่สมบูรณ์ในขั้นการสร้างเม็ดแป้ง โดยใช้เอนไซม์สตาร์ชซินเทส และเอนไซม์ที่สร้างพันธะกิ่ง แผนภาพวัฏจักรการสังเคราะห์แป้งแสดงดังรูปที่ 2.8



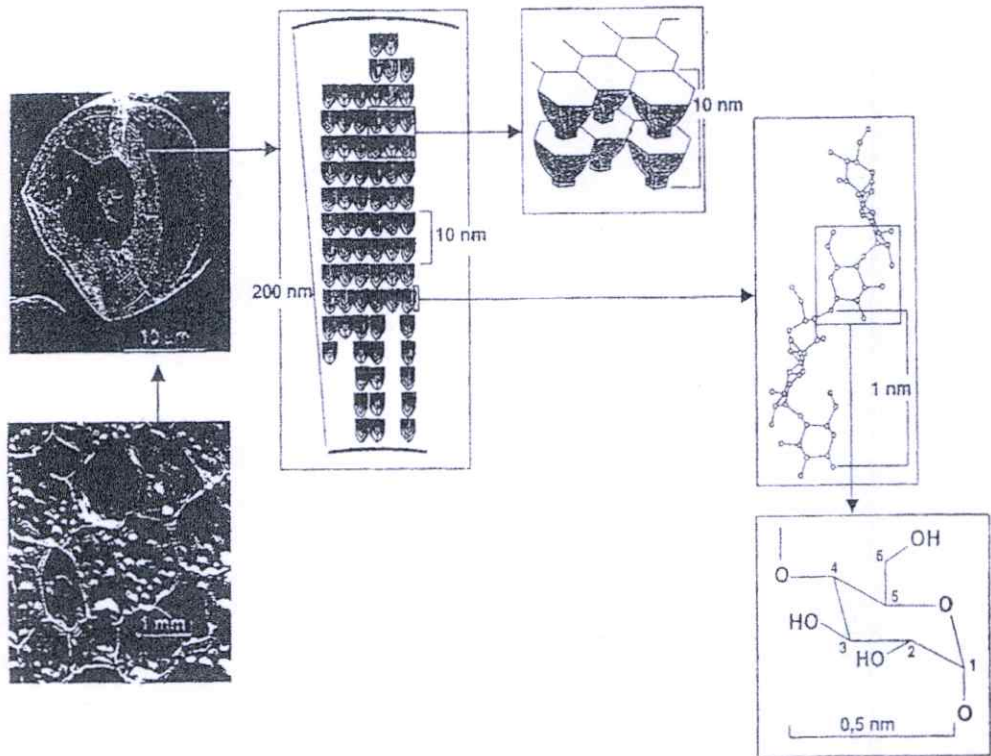
รูปที่ 2.8 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน [16]

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

### 2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายโซ่พอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมีแสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง ดังรูปที่ 2.9

แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพกติน แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.3 ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน [16]



รูปที่ 2.9 ระดับ โครงสร้างในเมล็ดแป้งมันฝรั่ง [16]

องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

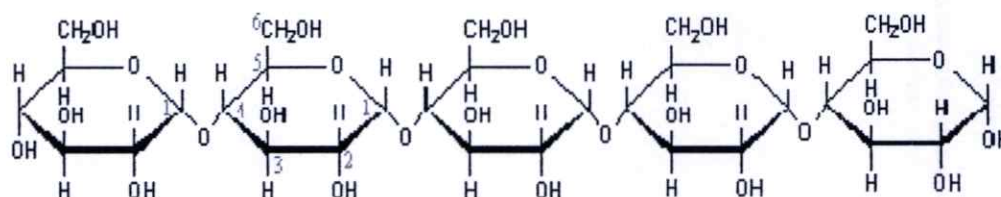
1. อะไมโลส (Amylase)
2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin)
3. สารมัธยันต์ (Intermediate material)

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [16]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่เชื่อมต่อ	$\alpha$ -1,4	$\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

### 2.3.3.1 อะไมโลส (Amylase)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของอะไมโลส [18]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติชอบน้ำ หรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้น และกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากราก และหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาชู มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% Waxy starch ไม่มีอะไมโลสเลย และแป้งจาก Amylomaize มีอะไมโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน (Da) ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพด และแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีองศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization; DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพด และแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะ-

โมลอสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสของแป้งหลายๆ ชนิดดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [16]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโลส (%)	$\beta$ - Amylase Limit (%)	DP เฉลี่ย	จำนวนสาย เฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย เฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
Indica	-	73	1,000	4.0	250	49
Japonica	-	81	1,100	3.4	320	31
แป้งมัน	17	75	2,600	7.6	340	42
สำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	-

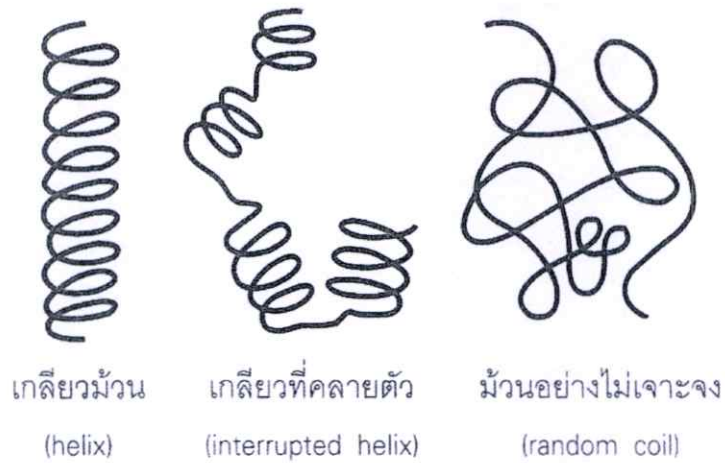
หมายเหตุ  $\beta$ -amylolysis = %การย่อยแป้งโดย  $\beta$ -amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังรูปที่ 2.11 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง อาจจะมีบางส่วนละลายได้

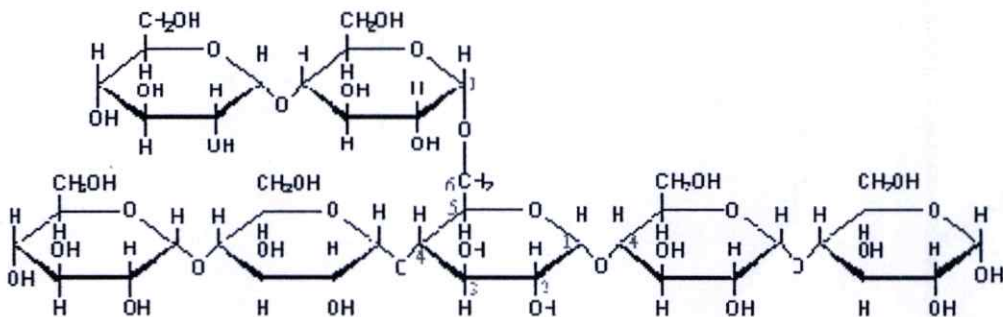


รูปที่ 2.11 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [16]

อะไมโลสมีรูปร่างเป็นเส้นตรงเคลื่อนไหวได้ง่าย เมื่อเติมน้ำลงไปจะรวมตัวกันเป็นเส้นยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ เกิดเป็นสารละลายขุ่นและความสามารถในการละลายน้ำจะลดลง อะไมโลสสามารถทำปฏิกิริยากับไอโอดีนได้ สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลสในแป้งได้ โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีปริมาณอะไมโลสอยู่ประมาณ 15-25%

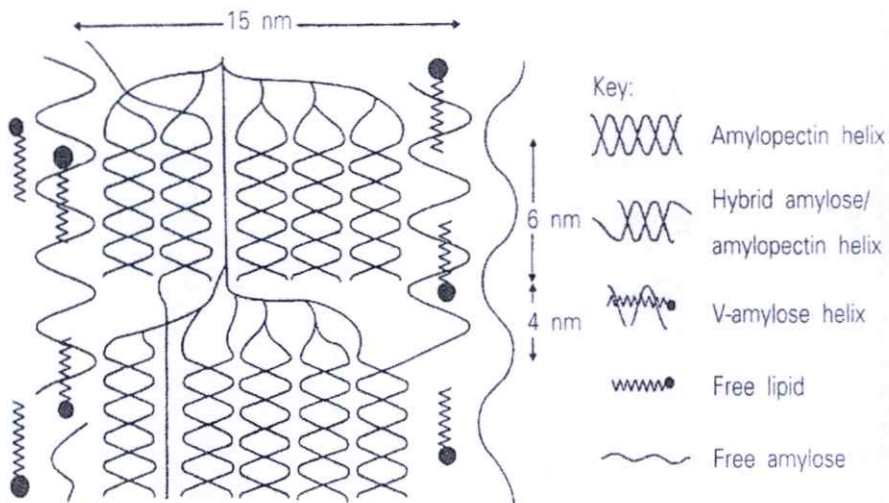
### 2.3.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glucosidic ดังรูปที่ 2.12

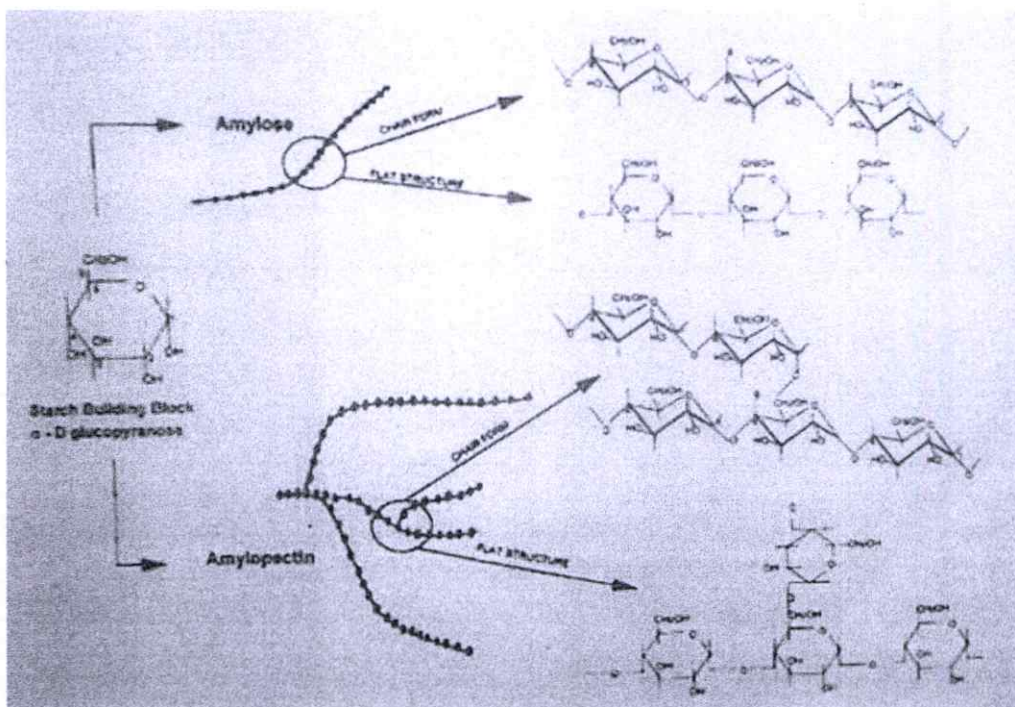


รูปที่ 2.12 โครงสร้างอะไมโลเพกติน [19]

แบบจำลองของโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกติน และไขมัน เช่น Monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.13 อะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาวะอิสระ สภาวะที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (Double helix) [16] และได้มีการจำลองสายโซ่ตรง และสายโซ่กึ่งของแป้ง ในส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน [16]



รูปที่ 2.14 แบบจำลองสายโซ่ตรง และสายโซ่กึ่งของแป้ง [20]

ส่วนสารมัธยันต์ (Intermediate material) มีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิดเท่านั้น องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกติน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส

### 2.3.4 สมบัติของแป้ง

สมบัติของแป้งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ซึ่งสมบัติที่สำคัญของแป้ง ได้แก่ การดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย และความหนืด

การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย คือ เมื่อเติมน้ำลงในแป้ง และตั้งทิ้งไว้ที่ อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุล ระหว่างความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย ได้แก่

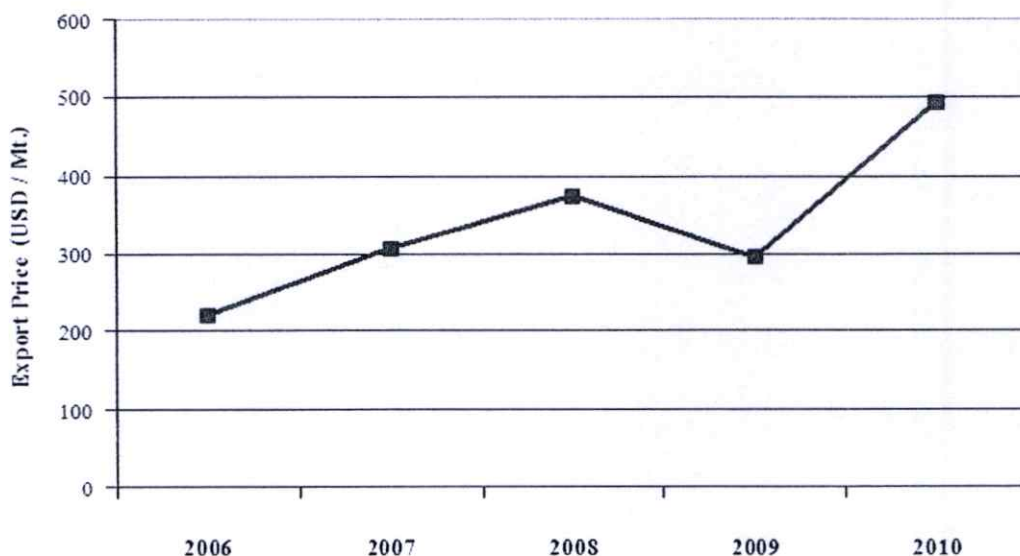
1. ชนิดของแป้ง
2. ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง หรือ จำนวน และชนิดของ พันธะภายในเม็ดแป้ง
3. สิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน เป็นต้น
4. สมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี
5. ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว

ส่วนความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทาง กายภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดแป้ง และการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ

### 2.3.5 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในปี ค.ศ.2007 มีมัน- สำปะหลังออกสู่ตลาดประมาณ 27 ล้านตัน ในจำนวนนี้นำไปใช้ในประเทศ 15% ส่วน อีก 85% เป็นการส่งออก ทั้งนี้เมื่อเทียบตัวเลขส่งออกพบว่าปี ค.ศ.2006 ส่งออกมันเส้น 3.9 ล้านตัน มัน- อัดเม็ด 3.9 แสนตัน และแป้งมัน 2.3 ล้านตัน ทั้งนี้คาดว่า การส่งออกมันสำปะหลัง ในปี ค.ศ.2008 จะมีผลผลิตหัวมันสดประมาณ 27 ล้านตัน แต่จากการวิเคราะห์อุปสงค์มันสำปะหลัง พบว่าตลาดมี ความต้องการถึง 32 ล้านตัน หรือมีความต้องการเพิ่มขึ้น 30-40% ส่วนปี ค.ศ.2009 คาดมีความ ต้องการมากถึง 34 ล้านตัน และคาดว่าในปี ค.ศ.2010 มีความต้องการถึง 37 ล้านตัน [21] ถึงแม้จะมี ความต้องการเพิ่มมากขึ้น แต่มันสำปะหลังยังมีราคาต่ำ และยังขึ้นอยู่กับปัจจัยจากตลาดต่างประเทศ ทั้งในเรื่องราคา และปริมาณความต้องการที่ไม่แน่นอน แต่เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการ แข่งขันด้านราคา และความสามารถในการเพาะปลูกของประเทศไทยแล้ว อาจจัดได้ว่ามัน- สำปะหลังเป็นพืชที่มีความเป็นไปได้ และมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบราคาแป้ง มันสำปะหลังกับปีที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ประเทศไทยสามารถส่งออกผลิตภัณฑ์จากมัน- สำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าจึงควรใช้ประ โยชน์จากมันสำปะหลัง

ในรูปแบบที่เป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังที่สามารถนำมาเป็นนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพได้

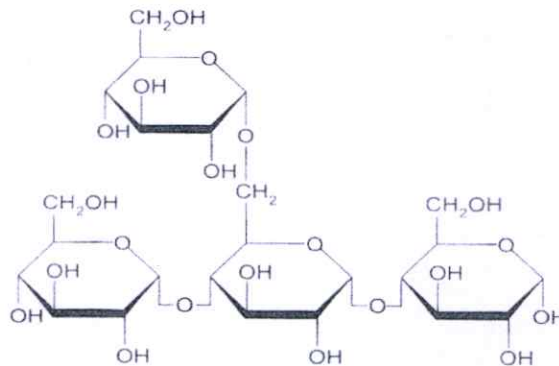


รูปที่ 2.15 ราคาแป้งมันสำปะหลังในตลาดโลก [21]

ในปี ค.ศ.2006 ประเทศไทยผลิตหัวมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 26.41 ล้านตัน และมีปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงปี ค.ศ.2009 มีปริมาณการผลิตลดลงเหลือ 21.94 ล้านตัน และในปี ค.ศ.2010 มีแนวโน้มลดลงเหลือเพียง 20.00 ล้านตัน [21] แต่ราคามันสำปะหลังสดมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ประเทศไทยจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย มันสำปะหลังเป็นสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออกที่สำคัญของไทย ผลผลิตกว่าร้อยละ 80 ถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการส่งออกในรูปของมันอัดเม็ด และมันเส้นสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์ ที่เหลือส่งออกในรูปของแป้งมันสำปะหลัง และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ตลาดส่งออกสำคัญ คือ สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น ใต้หวัน และจีน ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 20 ใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบ และนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน [22] ซึ่งมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของไทยในปี ค.ศ. 2007-2010 แสดงดังรูปที่ 2.16



ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่าบริเวณผลึก (Crystalline regions) หรือ ไมเซลล์ (Micelles) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่าบริเวณอสัณฐาน (Amorphous regions) เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย [24]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [24]

### 2.3.7 แป้งดัดแปร (Modified starch)

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

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิต หรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจล การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลที่ดีขึ้น มีสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งในบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติบางอย่าง แป้งดัดแปรความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่างๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการปนเปื้อนของสารประกอบเคมีอื่นๆ ต่ำ เหมาะต่อการนำมาทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนออสันฐานอะไมโลเพกตินจะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด

### 2.3.8 การดัดแปรแป้งทางเคมี [16]

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้งโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเป็นเจล หรือเจลาติไนเซชัน (45-50 °C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งขึ้นที่พื้นผิวบริเวณทั้งส่วนเปลือก และภายในส่วนออสันฐาน เนื่องจากเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับไอโอดีนที่มีน้ำเป็นตัวกลาง เม็ดแป้งจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดแป้งแห้งกับไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้น ดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่ชุ่มน้ำ หรือเม็ดแป้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยค่าเม็ดแป้งจะพองตัว และสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้

ในระหว่างการดัดแปรแป้งทางเคมีจะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลได้โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต หรือโซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม การดัดแปรแป้งในกระบวนการอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาน้อย ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ทำในน้ำ ให้ค่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution; DS) ต่ำ ประมาณ 0.1-0.2 ใช้วิธีการดัดแปรหลายๆ วิธีร่วมกัน ให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับปรุงได้

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าองศาการแทนที่ (DS) คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยกลูโคส ในโมเลกุลกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ค่าองศาการแทนที่จะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่ระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่ การแสดงค่า DS จะเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของทั้งโมเลกุล

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

แป้งดัดแปรที่ได้จากการเกิดอนุพันธ์ แบ่งชนิดของปฏิกิริยาการดัดแปรออกเป็น 3 ชนิด คือ

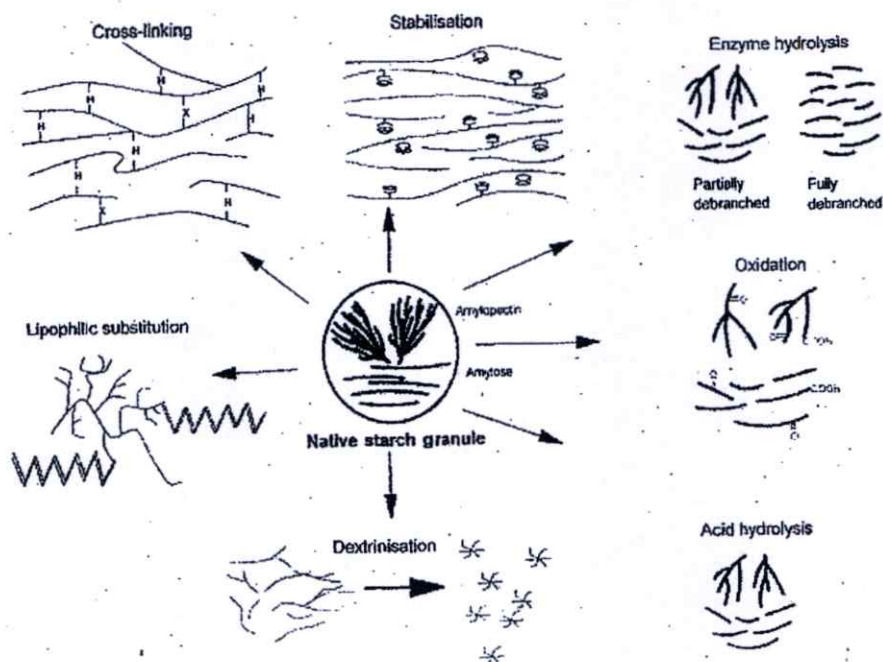
- อีเทอร์ฟิเคชัน (Etherification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของอีเทอร์
- เอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของเอสเทอร์
- การเชื่อมโยง (Crosslinking) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่าทั้งแป้งอีเทอร์ และแป้งเอสเทอร์จัดเป็นแป้งที่ให้ความคงตัว (Stabilized starch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับ Etherifying agent หรือ Esterifying agent ในสถานะต่าง

โดยทั่วไปแป้งอีเทอร์ และแป้งเอสเทอร์ที่ใช้ในทางการค้ามีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 หมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะเข้าแทนที่ภายในกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ส่วนใหญ่แป้งอะซิเตด ไฮดรอกซีอัลคิลสตาร์ช คาร์บอกซีเมทิลสตาร์ช และแคทไอออนิกสตาร์ช จะมีหมู่แทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ส่วนหมู่แทนที่อื่นๆ จะเข้าแทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 สำหรับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะมีหมู่ฟังก์ชันเข้ามาแทนที่น้อยมาก

การแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชัน 1 หมู่ภายในโมเลกุลกลูโคสของแป้งอีเทอร์ หรือแป้งเอสเทอร์ทำให้โมเลกุลอะไมโลส โครงสร้างของเม็ดแป้งดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้การยับยั้งการคืนตัวของเม็ดแป้ง และทำให้มีความหนืดคงตัว แสดงลักษณะเป็นแป้งที่ให้ความคงตัว สำหรับการเข้าแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ของแป้งเชื่อมโยง มีจุดประสงค์เพื่อสร้างพันธะเชื่อมโยงข้ามระหว่างหมู่อะไมโลเพกทิน ทำให้อัตราการพองตัวของแป้งลดลง

แป้งอนุพันธ์จะมีสมบัติดังนี้

1. จะมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ
2. จะมีการพองตัว การละลาย และความขึ้นมากกว่าแป้งดิบ
3. ความหนืดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของสารให้อนุพันธ์ และขนาดโมเลกุลของอนุพันธ์ ทั้งนี้จะไม่แปรผันทางเดียวกัน เช่น เพิ่มการแทนที่ระดับหนึ่ง แป้งอนุพันธ์ให้ความหนืดมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอีกระดับหนึ่ง อาจจะทำให้ความหนืดน้อยลง เป็นต้น
4. จะให้สมบัติเป็นสารให้ความคงตัว (Stabilizing agent) เช่น ทนต่อการคืนตัวหลังแช่แข็ง (Freeze-thaw) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 การดัดแปรแป้งแต่ละชนิด [20]

### 2.3.9 แป้งเอสเทอร์ [16]

แป้งเอสเทอร์ หรือแป้งดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่เอสเทอร์ของสารเคมี แป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ในทางการค้า ได้แก่ แป้งอะซิเตต และแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ของสารเคมี แป้งดัดแปรทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส มีความอ่อนตัว และยึดเกาะกันเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็ง และการละลาย เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเป็นสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด หมูฟิ่งกัซันที่สามารถเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์แป้งเอสเทอร์ มีดังนี้ อะซิเตต (Acetate) เบนโซเอต (Benzoate) ฟอสเฟต (Phosphate) ซักซิเนต (Succinate) มาลิเนต (Malinate) เป็นต้น

ในการผลิตแป้งเอสเทอร์สามารถแบ่งตามระดับการทำปฏิกิริยาออกเป็น 3 ชนิด คือ

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

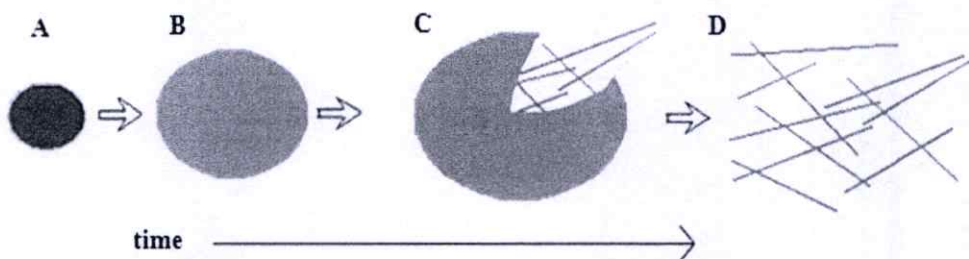
### 3. การทำปฏิกิริยาโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง ให้ระดับการแทนที่ปานกลาง ใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำละลาย

#### 2.3.10 แป้งพรีเจล [16]

แป้งพรีเจล (Pregel starch) หรือ แป้งพรีเจลาทีไนซ์ (Pregelatinized starch; PGS) ทางการค้าเรียกว่า อัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยให้ความร้อนแก่แป้ง ทำให้แป้งสุก หรือเกิดเจลาทีไนซ์ แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องทำแห้งแบบสเปรย์ (Spray dryer) หรือ เครื่องอัดรีด (Extruder) และบดให้ละเอียด ได้แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล

การผลิตแป้งพรีเจลาทีไนซ์สามารถใช้ทั้งแป้งดิบ และแป้งดัดแปรทางเคมีชนิดต่างๆ โดยป้อนแป้งในรูปสารแขวนลอย หรือแป้งเปียก ลงในเครื่องทำแห้ง ซึ่งในสารแขวนลอยจะมีปริมาณของแข็งได้สูงถึง 44% และ 42% นอกจากนี้มีการเติมสารช่วยการเกิดเจลาทีไนซ์ หรือสารช่วยเป็นเจล (Gelatinization aid) เช่น เกลือ หรือเบส เติมสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้แป้งติดกับลูกกลิ้ง (Surface active agent) เติมเกลือ เช่น โซเดียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต เกลืออะลูมิเนียม เพื่อป้องกันแป้งเกาะกันเป็นก้อน เติมสารปรุงแต่งรส หรือส่วนผสมอื่นๆ ในการป้อนแป้งสู่เครื่องทำแห้งต้องมีการควบคุมให้แป้งมีความหนาสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

เมื่อผ่านน้ำแป้งสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้น้ำในน้ำแป้งระเหยออกไป ได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกขูดออกโดยใบมีด หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง และบดให้ละเอียด แผ่นแป้งที่ฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้งที่บางเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ และถ้าแผ่นแป้งหนาเกินไปจะทำให้ใบมีดทำงานไม่สะดวก



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [25]

จากรูปที่ 2.19 ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

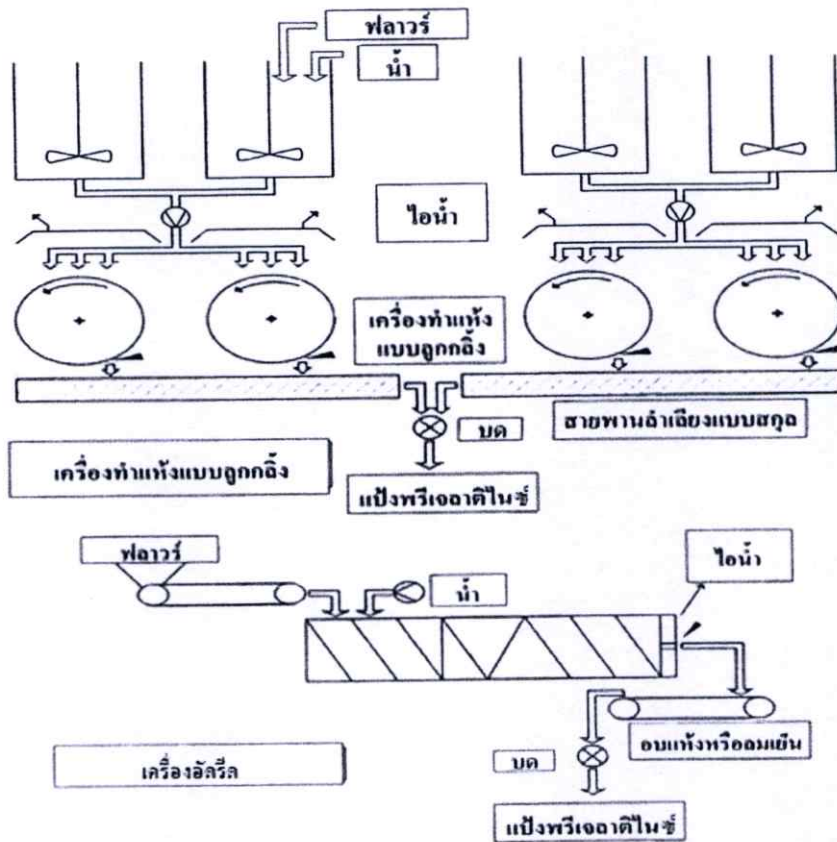
1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุด คือในส่วนอสัณฐาน (Amorphous)
2. การพองตัวจะทำให้เกิดแรงดึง (Tension) ต่อผลึก (Crystallites) ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิดคลายเกลียว (Uncoiling) หรือการแตกตัวของบริเวณผลึกเกลียวคู่ (Double helical region) เกิดการแตกของโครงสร้างผลึกสายโซ่กิ่ง (Side chain) ของอะไมโลเพกตินที่แยกตัวออกมาจะถูกบวมน้ำ (Hydrate) และมี การพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิดแรงเค้น (Stress) ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิดบวมน้ำ (Hydration) ต่อไปจะเพิ่มการเคลื่อนไหว (Mobility) ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจากเม็ดแป้งบวม (Swollen granule)
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้ง (Granule) แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย [25]

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการผลิตแป้งพรีเจลมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบสเปรย์ และเครื่องอัดรีด ซึ่งเครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถมีอัตราการผลิต (ผลิตภัณฑ์/เวลา) สูง ส่วนการใช้เครื่องมืออัดรีดแรงสูงอย่างเอ็กทรูดเดอร์ หรือเครื่องอัดรีด (Extruder) มีอัตราการผลิตต่ำแต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะอาด การควบคุมคุณภาพ

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีทั้งแบบเดี่ยว (Single) และแบบคู่ (Double) โดยต้องมีการปรับอุณหภูมิของผิวลูกกลิ้ง และอัตราการหมุน ให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้น และความสามารถในการเกิดเจลที่ในซ์ของแป้งแต่ละชนิด สำหรับแบบลูกกลิ้งคู่จะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เท่ากันตลอดแนวความยาวของลูกกลิ้ง และให้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในลูกกลิ้ง อัตราการหมุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของโลหะที่ใช้ทำลูกกลิ้ง

แป้งบางชนิดที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว เมื่อนำมาผลิตแป้งพรีเจลจะทำให้เกิดกลิ่นหืน (Rancidity) เนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลาย สามารถแก้ไขกลิ่นหืนนี้โดยการเติมเกลือออร์โทฟอสเฟต หรือทำการสกัดกรดไขมันด้วยเมทานอล และแอม โมเนียเพื่อปรับปรุงกลิ่นรสของแป้ง

แป้งพรีเจลสามารถละลาย และกระจายตัวในน้ำเย็น หรือที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีการเกิดเจล หรือมีแนวโน้มในการเกิดเจลลดลง และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ

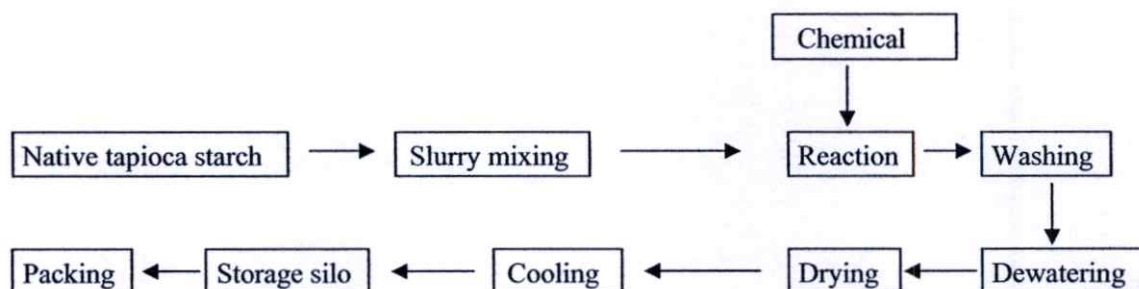


รูปที่ 2.20 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวและเครื่องอัดรีด [16]

### 2.3.11 แป้งไฮโดรโฟบิก [26]

แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) หรือ Octenyl succinate starch หรือ OSA starch เป็นแป้งที่มีการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแป้งให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น (Hydrophobic) หรือมีขั้วลดลง โดยใช้ Octenyl succinic anhydride เป็นสารเคมีในการทำปฏิกิริยา

การผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก จะเตรียมในระบบของผสมน้ำ โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 33 °C, pH ของระบบปฏิกิริยา 8.4, กระบวนการในการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.21 เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของแป้งสตาร์ช พบว่าเมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ซอส, พุดดิ้ง และอาหารทารก เป็นต้น



รูปที่ 2.21 กระบวนการผลิตแป้งไฮโดรโฟบิก [26]

### 2.3.12 การนำแป้งไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสม และใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างมากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ขาร์กษาโรค และวัสดุก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น การที่สามารถนำแป้งไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากสมบัติของแป้งในด้านความเหนียวข้น การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดเป็นฟิล์ม แล้วยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย นอกจากนั้นแป้งยังสามารถใช้ผสมในพลาสติกเป็นสารตัวเติม เพื่อให้มีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพ และยังมีประโยชน์ในการใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อด้วย โดยปัจจุบันได้มีการทำโพลีพลาสติกจากแป้งเพื่อทำภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น [16]

## 2.4 การย่อยสลายของแป้ง [23]

### 2.4.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ

#### 1. การทำลายทางเชิงกล (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โคยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนัง และผนังเซลล์ได้

#### 2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลัก หรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของราไมโคทอกซิน (Mycotoxin) โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น อัลฟาทอกซิน (Alfatoxin) ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยด่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

### 3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้าย คือการเกิดรอยดำดำ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อรา และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยดำดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยดำดำของเครื่องมือทางไฟฟ้า หรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้ง และน้ำตาลมีดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน
- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่ non-reducing และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,6 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้ง และเดกทรินไปเป็นกลูโคส
- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลาย non-reducing

#### 2.4.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์

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

## 2.5 สารช่วยผสม

จากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน คือพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมกัน Thermodynamic miscibility เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม ซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ผสมนี้จะถูกกำหนดโดยสมมูลของเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) โดยความสามารถในการเข้ากันได้หมายถึง ความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาขณะทำการผสม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่า-

พลังงานอิสระในการผสมสาร โมเลกุลเล็ก ๆ นั้น เอนโทรปีจะมีค่าสูงพอที่จะเกิดความเข้ากันได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ เอนโทรปีจะมีค่าต่ำจนเกือบเป็นศูนย์ จึงทำให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ถูกกำหนดโดยเอนทัลปีเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการผสม เป็นดังสมการ [27]

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

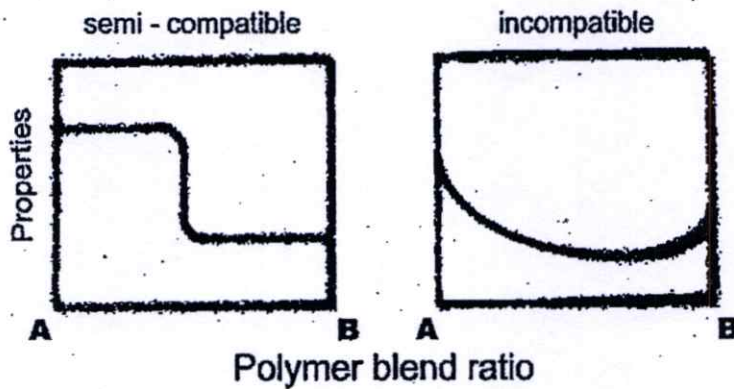
โดย	$\Delta G$	=	ผลต่างของพลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing)
	$\Delta H$	=	ผลต่างของเอนทัลปี (Enthalpy)
	$\Delta S$	=	ผลต่างของเอนโทรปี (Entropy)
	T	=	อุณหภูมิ (Temperature)

การที่พอลิเมอร์จะผสมเข้ากันได้ พลังงานอิสระในการผสมของระบบจะต้องมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$G < 0$$

$$\partial^2(G/\partial^2)_{P,T} < 0$$

เมื่อเป็นเศษส่วนโมล (Molar fraction) ของพอลิเมอร์หนึ่งองค์ประกอบ เมื่อนำสมบัติและอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟในลักษณะรูปตัวเอส ในกรณีที่สามารถเข้ากันได้บ้าง และได้กราฟรูปตัวยู ในกรณีที่ไม่สามารถเข้ากันได้ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมกับอัตราส่วนขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม [28]

โครงสร้างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ เรียกว่า “Heterogeneous blend” ซึ่งจะมีลักษณะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) ของพอลิเมอร์หลักชนิดหนึ่ง แล้วมีวัฏภาค

กระจาย (Dispersed phase) ของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งอยู่ภายใน ซึ่งแยกกันอยู่อย่างชัดเจน โดยมีลักษณะเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Phase boundary) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ นั้น จะมีข้อบกพร่องหลายประการดังนี้ [28]

1. สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) คือ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันส่วนของวัฏภาคกระจายตัวไม่สามารถที่จะยึดติดกับวัฏภาคต่อเนื่องได้

2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค (Interfacial tension) คือ ความแตกต่างระหว่างค่าความตึงผิวของส่วนที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง กับส่วนที่เป็นวัฏภาคกระจายตัว เนื่องจากส่วนที่เป็นวัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเม็ดเล็กใหญ่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าแรงตึงผิวต่างกัน โดยขนาดเม็ดใหญ่จะมีพลังงานสูง และมีเสถียรภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่าย รับแรงได้น้อย

3. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

4. สมบัติเชิงกลต่ำ

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยมีการนำเสนอสารช่วยผสม มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ และให้ผลในการช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายตัว ที่มีขนาดเล็กแล้วทำให้สมบัติยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. Non-reactive blending คือการเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสู่ตรงทางโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมแบบโคบอล็อก แบบไตรบล็อก แบบกราฟท์ หรือแบบส้อม

2. Reactive blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะผสม หรืออาจเกิดการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้หมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

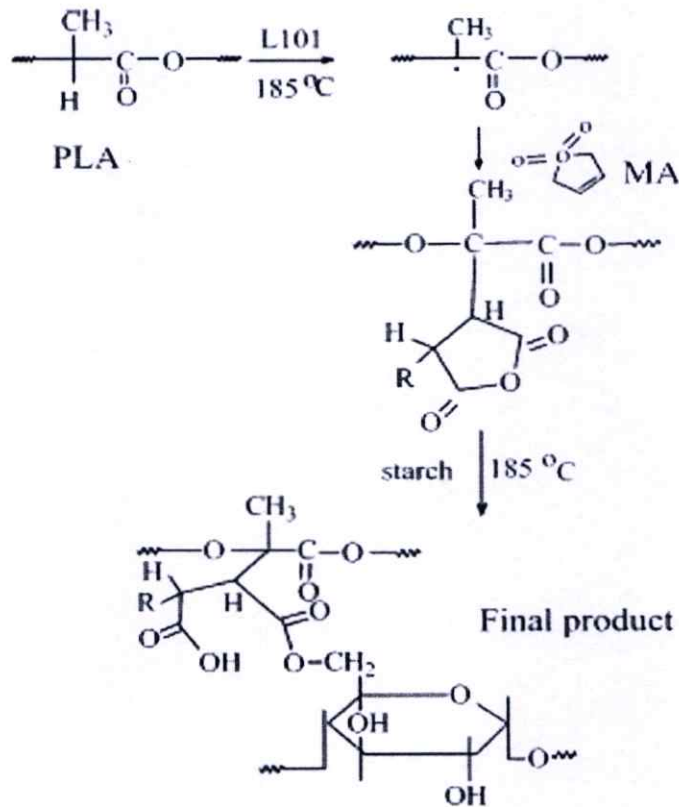
ในงานวิจัยนี้สารช่วยผสมที่นำมาใช้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และแป้งคัดแปร คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์ PBS (MA-g-PBS) ซึ่งสารช่วยผสมที่ดัดแปรนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และแป้งคัดแปร

ในรูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตร โมเลกุล  $C_4H_2O_3$  น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 98.06 กรัมต่อโมล เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน หรือใช้บิวเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน มาเลอิกแอนไฮไดรด์มักใช้พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์ ทำปฏิกิริยาได้ดีกับอนุพลอิสระของพอลิเมอร์ โดยมีตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (Luperox<sup>®</sup> 101 หรือ L101) หมู่แอนไฮไดรด์ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ ดังตัวอย่างการทำ

ปฏิกิริยากันระหว่างหมู่แอนไฮดรายด์ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้ง ซึ่งแสดงดังรูป 2.24



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮดรายด์ [29]



รูปที่ 2.24 กลไกปฏิกิริยาเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), แป้ง, ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (L101) [30]

## 2.6 พลาสติกไซเซออร์ [31]

พลาสติกไซเซออร์เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อทำให้วัสดุอ่อนตัว และโค้งงอได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ควรมีสสมบัติดังนี้

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกับพลาสติกที่ต้องการผสม
3. พลาสติกไซเซออร์ไม่ควรตกผลึกที่อุณหภูมิใช้งาน เว้นเสียแต่จะเกิดแรงดึงโดยเฉพาะกับพอลิเมอร์ได้

หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติกไซเซออร์ คือ ช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ (Bond rotation) ลดลง ทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ทั้งนี้เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับพอลิเมอร์จะ ไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงเท่ากับเป็นการลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลง

หน้าที่สำคัญของพลาสติกไซเซออร์ คือ

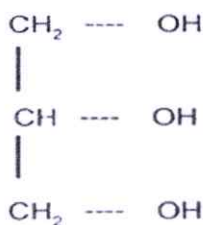
1. ลดความหนืด โดยจะทำตัวคล้ายตัวทำละลาย และสารหล่อลื่น เพื่อลดแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ แต่แตกต่างจากตัวทำละลายตรงที่ว่าต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากพลาสติกระหว่างการใช้งาน
2. ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวในการโค้งงอ (Flexibility) โดยทำการลด  $T_g$  ของพอลิเมอร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซออร์มากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง แต่ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น

พลาสติกไซเซออร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอ ไค และโอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิแอลกอฮอล์หรืออนุพันธ์ของลิพิด

พอลิแอลกอฮอล์ (Polyols) พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิแอลกอฮอล์ชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น ซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเคมีไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (Hydrogenation) พอลิแอลกอฮอล์มีสมบัติคงทนต่อสารเคมี และความร้อน ได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากถูกดูดซับน้ำได้ช้ามาก จึงสามารถใช้กับผู้ที่เป็โรคนเบาหวานได้

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือ กลีเซอริน (Glycerin) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโมเลกุล  $C_3H_8O_3$  โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.25 มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่ และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล

สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ และแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำมัน ได้ดีพอสมควร  
 ুদ্ধความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง

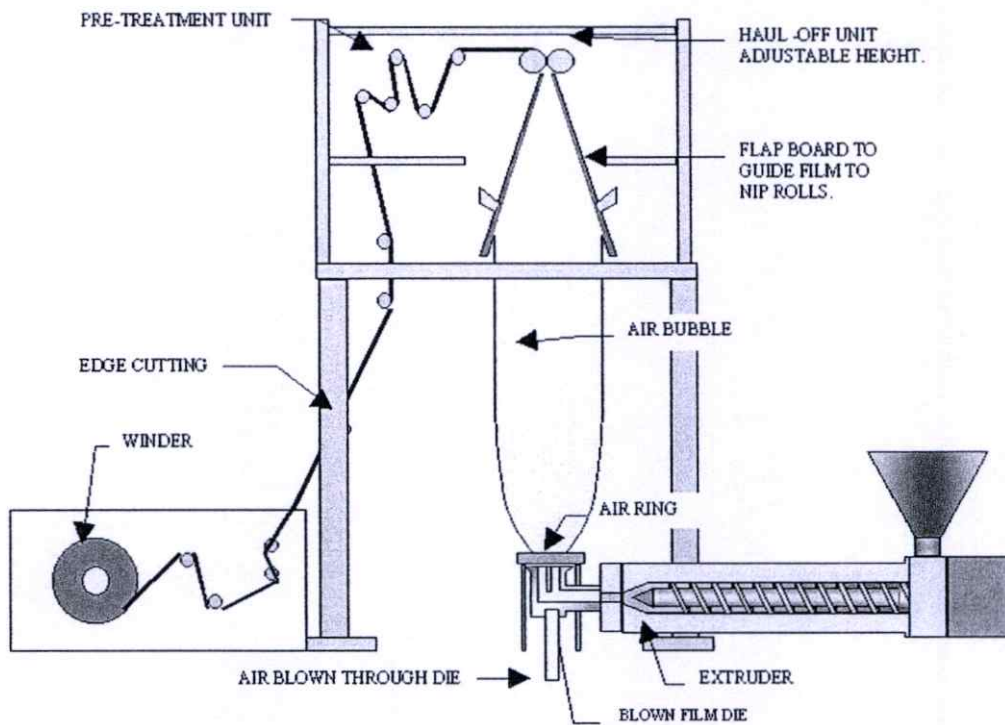


รูปที่ 2.25 โครงสร้างของกลีเซอรอล [31]

## 2.7 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า [32]

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเครื่องอัดรีด (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวคาย (Die head) รูปวงแหวนไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้นี้จะถูกบังคับให้อยู่ในขอบแกนหมุนที่อยู่ในคาย และไหลออกผ่านคายเปิดรูปวงกลม ในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัว และพองออก ซึ่งหัวคาย หรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขบนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบหัวไขว้ (Cross head) คือ อยู่ในแนวตั้งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อไม่ให้ผิวฟิล์มติดกัน และลดแรงตึงภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอก และผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับท่อพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บเพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบวนการใส่สกรูและคาย รวมทั้งปริมาณ และทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดคาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในคายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วย เพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่พองถูกทำให้เย็นจัดว่ามีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกัน (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up roll) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุม และทิศทางของอากาศจัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา



รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [33]

## 2.8 พลาสติกเพื่อการเกษตร

### 2.8.1 นิยามและความหมาย [34]

พลาสติกเพื่อการเกษตรหรือ *Plasticulture* มาจากการรวมคำว่า *Plastic* กับ *Agriculture* เข้าไว้ด้วยกัน หมายถึง การใช้พลาสติกในงานทางด้านเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มพลาสติกคลุมดิน (*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*) รวมทั้งถาดถุง หรือ กระถางที่ใช้ในการปลูก และย้ายต้นกล้า เป็นต้น ซึ่งการใช้พลาสติกเพื่อการเกษตรดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น ผัก ผลไม้ รวมทั้งดอกไม้ และไม้ประดับนั้นกำลังได้รับความนิยมอย่างยิ่งในช่วงสิบปีที่ผ่านมา เพราะพลาสติกเพื่อการเกษตรช่วยลดปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอากาศทั้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และลมตามธรรมชาติ ซึ่งบางครั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่รุนแรงดังกล่าวสามารถทำให้พืชที่ปลูกไว้ตายเสียหาย หรือผลผลิตน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

## 2.8.2 สถานภาพปัจจุบัน [35]

การนำพลาสติกไปใช้งานของบรรดาประเทศที่มั่งคั่งในช่วง 35 ปีที่ผ่านมา ได้ทำให้ประสิทธิภาพ และศักยภาพในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมการเกษตรเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงเวลาไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา ได้มีการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ทางเทคโนโลยีมากมาย หนึ่งในนวัตกรรมเหล่านั้นที่สมควรกล่าวถึงเป็นพิเศษคือ แนวทางใหม่ในการนำพลาสติกไปใช้งานด้านเกษตร ซึ่งนอกจากจะต้องอาศัยโครงสร้างของการผลิตที่ทันสมัยแล้ว นวัตกรรมใหม่ๆ เหล่านั้นอาจไม่สามารถประสบผลสำเร็จได้เลย ถ้าไม่ได้รับความร่วมมือจากวงการอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

การขยายตัวอย่างต่อเนื่อง รวดเร็วของตลาดโลก และเศรษฐกิจยุคโลกาภิวัตน์ได้เป็นตัวเร่งการพัฒนาไปสู่สมดุลใหม่ในโลกของการเกษตร ขณะนี้จะพบเห็นการผสมผสานพลาสติกเข้ากับกลยุทธ์การผลิตใหม่ๆ ที่ดีกว่า ทำให้สามารถคาดหวังได้ว่าจะสามารถนำกลยุทธ์ดังกล่าวไปถ่ายทอดให้กับประเทศต่างๆ ที่กำลังปรับปรุงศักยภาพในการผลิต และพัฒนาด้านอุตสาหกรรมการเกษตร ตัวอย่างอันหลากหลายที่แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีของพลาสติกเมื่อนำมาใช้กับการเกษตร สามารถช่วยยกระดับเศรษฐกิจของคนส่วนใหญ่อย่างเห็นได้ชัด ที่มีการยกมาอ้างอิงบ่อยๆ ได้แก่ ที่เอลอีจิโด (El Ejido) ในแอลเมริเรีย (Almeria) ของประเทศสเปน ที่ซึ่งการขยายตัวของพื้นที่เพาะปลูกโดยใช้พลาสติก ยังคงเป็นดัชนีหลักในการชี้วัดสภาพทางเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของประชากร ในปี ค.ศ.1950 เอลอีจิโดมีประชากรเพียง 7,100 คน ปัจจุบันจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นเป็น 60,000 คน และเป็นเมืองที่มีอัตราการพัฒนาสูงที่สุดของประเทศ

ในปี ค.ศ.1987 ทวีปยุโรปมีพื้นที่เพาะปลูกโดยใช้พลาสติก 25,000 เฮกเตอร์ ในขณะที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน และใช้พลาสติกเป็นวัสดุหลัก มีพื้นที่ 3,000 เฮกเตอร์ ปัจจุบันนี้พื้นที่ดังกล่าวได้ขยายออกตัวไปอีกมาก

การใช้พลาสติกในการเกษตรยังคงเพิ่มขึ้น ในประเทศอังกฤษมีการใช้พลาสติกห่อฟ่อนหญ้าแห้ง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเก็บรักษาอาหารสัตว์ไว้ในทุ่งถึงปีละ 15,000 ตัน

ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา มีการนำเข้า และส่งออกผักผลไม้จำนวนมากทั่วโลก การค้าขายผลผลิตทางการเกษตร เช่น แอปเปิ้ล และสาลี่จากซีกโลกใต้ ก็วิจากนิวซีแลนด์ มะเขือเทศจากแอฟริกา หน่อไม้ฝรั่งจากเปรู และโบลิวีเชีย เห็ดจากไต้หวัน ลูกพลัมจากอเมริกาเหนือ และมะนาวจากจีน เป็นผลที่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงที่ต้องจดจำของการขยายตัวของการใช้พลาสติกเหนือพื้นที่เพาะปลูก และจากการจัดสรรน้ำ การบังคับให้ไม้ผลติดผลเร็วขึ้น และได้ทั้งผลผลิตและคุณภาพสูง แต่การใช้พลาสติกในทางการเกษตรเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาขยะ และของเสียที่ส่งผลกระทบต่อภาวะแวดล้อม การใช้ฟิล์มคลุมดินที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้จะช่วยลดขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นงาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาฟิล์มทางการเกษตรที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้

### 2.8.3 การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร [35]

การใช้งานพลาสติกชนิดต่างๆในทางการเกษตรมีมากมาย ได้แก่

#### 1. พลาสติกคลุมดิน (Mulch films)

เกษตรกรใช้เทคนิคของการคลุมดินเพื่อประหยัดน้ำ และทำให้ผลผลิตออกก่อนฤดู ได้ผลผลิตสูงขึ้น ตลอดจนทำให้ผลผลิตที่ได้มีผิวสวยขึ้น การคลุมดินมีประโยชน์ต่อดิน และสิ่งแวดล้อม ซึ่งรวมถึงการควบคุมความชื้น รักษาโครงสร้างของดิน ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยได้มากขึ้น ปกป้องพืชที่ปลูก และตัดปัญหาการกำจัดวัชพืช ถ้าใช้พลาสติกทึบแสง

การคลุมดินในสมัยก่อนใช้ฟางข้าว ปัจจุบันถูกทดแทน โดยพลาสติก วิธีคลุมดินมี 2 วิธี คือ คลุมทั้งหมด และคลุมบางส่วน ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวมีความแตกต่างกันอยู่ในตัวเอง

การติดตั้งแผ่นพลาสติกมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้อาจจะปูโดยการกลบทับด้านข้าง และหว่านด้วยดิน การเกษตรกรรมอื่นๆ สามารถดำเนินการไปพร้อมๆ กับการปูแผ่นพลาสติก ดินจะได้รับการไถพรวนใส่ปุ๋ย และปลูกไปพร้อมกันเลยทีเดียว ดังนั้นผลกระทบที่เครื่องจักรจะทำให้ดินชั้นล่างแน่นจะลดน้อยลง การใช้พลาสติกทุกชนิดในการคลุมดิน จะเพิ่มอุณหภูมิของดินในเวลากลางวัน นอกจากพลาสติกสีขาว และสีเงินซึ่งจะสะท้อนแสง พลาสติกสีดำ จะป้องกันการงอกของวัชพืชได้ดีที่สุด ภายในโรงเรือนพลาสติกคลุมดินสีขาวถูกใช้ในการสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มปริมาณแสงให้กับพืช

#### ตารางที่ 2.6 การใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ในการคลุมดิน [35]

โปร่งใส	สีดำ	สีเทา/เขียวอ่อน/น้ำตาล	สีดำและสีขาว
- พืชล้มลุก - ชนิดบาง: แดง, ฝ้าย	- พืชอายุ 1-3 ปี	- พืชตามฤดูกาล อายุ 1-2 ปี	- พืชล้มลุก - พืชยืนต้น
- ดินที่ไม่มีวัชพืช	- ดินที่มีวัชพืช	- ดินที่มีวัชพืชบ้าง	- ดินที่มีวัชพืช
- ในเขตที่มีอากาศหนาวที่มีโอกาสเกิดน้ำค้างแข็ง	- ในเขตร้อนที่ปราศจากน้ำค้างแข็ง	- ในเขตร้อนหรือหนาวที่ปราศจากน้ำค้างแข็ง	- ในเขตร้อนที่ปราศจากน้ำค้างแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปลูกในฤดูร้อน
- เพื่อเร่งให้ผลผลิตสุกเร็วกว่าการเพิ่มผลผลิต	- เพื่อเพิ่มผลผลิตมากกว่าการเร่งให้ผลผลิตสุกเร็ว	- เพื่อเพิ่มผลผลิตและการเร่งให้ผลผลิตสุกเร็ว	- เมื่อต้องการแสงสว่างมาก

ตารางที่ 2.7 พลาสติกคลุมดิน [35]

ชนิดของแผ่นฟิล์มพลาสติก	วัตถุประสงค์หลัก
โปร่งใส	-เพิ่มอุณหภูมิของดินในช่วงกลางวัน -เร่งการเจริญเติบโต -จัดการน้ำ
สีดำ	-ป้องกันวัชพืช -เพิ่มผลผลิต -จัดการน้ำ
ทึบแสงและกักความร้อน	-กักความร้อนไว้ในช่วงกลางคืน -ป้องกันวัชพืช -จัดการน้ำ
2 สี ดำ-ขาว	-ป้องกันวัชพืช -เพิ่มผลผลิต -จัดการน้ำ
เสื่อมสลายได้	-เพิ่มอุณหภูมิของดิน -ทำให้สามารถใช้เครื่องจักรในการเก็บเกี่ยวได้

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการคลุมดิน [35]

ชนิด	โปร่งใส	สีดำ	สีเทา	สีเขียว/สีน้ำตาล	สีดำและสีขาว
%ของแสงที่ผ่าน	80%	-	35%	65%	-
การเจริญเติบโตของวัชพืช	สูง	-	น้อย	น้อยกว่าชนิดใส	-
การดูดซับความร้อน	ต่ำ	สูง	ปกติ	ต่ำ	ปกติ
อายุการใช้งาน	สั้น	นาน	ปกติ	สั้นแต่ดีกว่าชนิดใส	ค่อนข้างนาน
การป้องกันอากาศเย็น	ดี	ปกติ	ปานกลาง	ปกติ	น้อย
ปริมาณผลผลิต	น้อยกว่าชนิดดำ	สูง	ดีกว่าชนิดดำ	เหมือนชนิดใส	สูงกว่าชนิดดำ
ผลสุกและเก็บเกี่ยวได้ก่อน	สูง	ปานกลาง	ปกติ	สูง	สูง

การพัฒนาพลาสติกขึ้นอยู่กับสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีนสีฟ้าสามารถให้ทั้งความร้อน และควบคุมวัชพืชได้ ด้วยความหนาเพียง 50 ไมครอน แผ่นฟิล์มจึงไม่ทำให้ผลผลิตเสียหาย

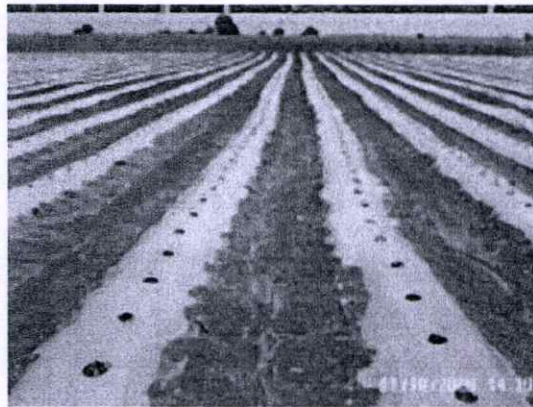
การคลุมดินมีประโยชน์อย่างยิ่งในเขตแห้งแล้ง ซึ่งช่วยให้การทำเกษตรยั่งยืน การคลุมดินไม่ได้จำกัดเฉพาะพืชที่ปลูกใหม่เท่านั้น ในพืชยืนต้นก็สามารถใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างพลาสติกคลุมดิน [36]

## 2. พลาสติกคลุมโดยตรง (Direct covers)

พลาสติกที่ใช้คลุมโดยตรงจะใช้คลุมดินหลังจากหยอดเมล็ดหรือปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะถูกพองไว้โดยต้นพืช และจะยกสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช การใช้พลาสติกคลุมโดยตรงซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพลาสติกคลุมโปง (Thermic blankets) สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืช ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีขนาดใหญ่ขึ้น และแก้ก่อนกำหนดประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ และสามารถลดการใช้สารเคมีในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช การใช้พลาสติกคลุมโปงเป็นเทคนิคการจัดการ ป้องกัน และบังคับพืชที่ง่าย และมีต้นทุนต่ำ เหมาะที่นำไปใช้กับพืชสวนได้หลายชนิด ไม่ว่าจะปลูกในที่โล่ง หรือภายในโรงเรือน และไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักร หรือแรงคน



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างพลาสติกคลุมโดยตรง [37]

## 3. อุโมงค์หลังคาค้ำ (Low tunnels)

การใช้พลาสติกสร้างอุโมงค์หลังคาค้ำ และใช้คลุมดินเพื่อการปลูกพืชเป็นเทคนิคที่รู้จักกันทั่ว เนื่องจากราคาถูก และใช้ง่าย ความยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติก เป็นสิ่งที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ในการสร้างโรงเรือนรูปโค้งครึ่งวงกลมแบบง่ายๆ แต่สามารถใช้งานตามวัตถุประสงค์ได้เป็นอย่างดี อุโมงค์หลังคาค้ำ ส่วนใหญ่มักใช้เพื่อช่วยในการผลิตพืชเพื่อต้องการให้สุกแก่เร็วขึ้น นอกจากนี้สามารถช่วยป้องกันความหนาว ลม หิมะ และสิ่งที่มาทำลายพืช ช่วยให้การใช้ปุ๋ย และน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ค่าลงทุนในการติดตั้งพลาสติกคลุมลงบนโครงสร้างของอุโมงค์ขึ้นกับชนิดเครื่องจักรกลที่ใช้ และรูปแบบของอุโมงค์ อุโมงค์หลังคาค้ำสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบตามตัวแปรต่างๆ และระบบการให้น้ำ (ระบบหยด หรือให้น้ำแบบปล่อยท่วมบนผิวดิน)



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างอุโมงค์หลังคาต่ำ [38]

#### 4. โรงเรือนพลาสติก (Greenhouses)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีพลาสติกได้นำไปสู่การใช้งานใหม่ๆ ในอุตสาหกรรมเรือนเพาะชำ โรงเรือนแบบอุโมงค์จัดว่าเป็นต้นแบบเริ่มต้นที่นำไปสู่การพัฒนาโรงเรือนพลาสติกที่ทันสมัย โครงสร้างที่มีลักษณะโค้งสามารถสร้างขึ้นมาได้เพราะพลาสติก ด้วยการใช้ประโยชน์จากสมบัติของแผ่นฟิล์ม และพลาสติกกึ่งคงรูป รูปแบบโรงเรือนพลาสติกถูกกำหนดโดยสภาพภูมิอากาศที่พืชต้องการในเขตอบอุ่น สภาพเศรษฐกิจ และความต้องการทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อการผลิตไม้ดอก ไม้ผล และผัก ปัจจุบันนี้การออกแบบโรงเรือนพลาสติกได้ก้าวหน้าไปมาก และการประมาณค่าใช้จ่ายไม่เพียงแต่คิดราคาต่อตารางเมตรเท่านั้น แต่รวมไปถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์จากดิน โปรแกรมการปลูกพืชหลายๆ ชนิด และวัสดุที่ใช้คลุมโรงเรือน

การใช้ประโยชน์จากโรงเรือนสมัยใหม่มักใช้ในการผลิตเมล็ดพันธุ์ การเพาะกล้าผัก ไม้ดอก ไม้ประดับ ไม้ผล และไม้ป่า พืชที่ยังเล็กจะเสียหายได้ง่ายจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ การงอก และความสามารถในการอยู่รอดและเจริญเติบโตจะเป็นไปได้ดีเมื่ออยู่ภายในโรงเรือน



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างโรงเรือนพลาสติก [39]

### 5. การใช้พลาสติกในฟาร์ม (Farming applications)

พลาสติกถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เช่น นำไปมุงหลังคา ทำรั้วสำหรับเลี้ยงโค กระบือ และใช้ในการเก็บหญ้าอาหารสัตว์ ซึ่งในการใช้งานเฉพาะด้านนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องจักรกลเข้ามาใช้ในการห่มห่อฟ่อนหญ้าแห้งแบบสุญญากาศ ตั้งแต่ ค.ศ.1950 เป็นต้นมา พลาสติกถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร และระบบการทำฟาร์ม เช่น ทำหญ้าแห้ง (หลายๆ วิธีการ) ในฟาร์ม และทำรั้วในฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และคอกปลูสัตว์ การใช้งานเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดทึบแสง และกันน้ำ (ก๊าซ และของเหลวผ่านได้เล็กน้อย) ที่มีราคาถูก เทคนิคในการนำพลาสติกไปใช้งานในฟาร์มส่วนใหญ่ ได้มาจากการพัฒนาคุณภาพ และคุณลักษณะเฉพาะของพลาสติกเหล่านั้น



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างแผ่นพลาสติกปูบ่อน้ำ บ่อบำบัด และบ่อกัก [40]

### 6. การให้น้ำหรือระบบชลประทาน (Irrigation)

การจัดการน้ำในการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับการพัฒนาระบบชลประทานให้ทันสมัย ในปัจจุบันนี้การพัฒนาระบบชลประทานจะไม่สามารถทำได้เลย ถ้ามิได้นำเอาวัสดุที่ทำจากพลาสติกมาใช้งานอย่างกว้างขวาง การนำพลาสติกมาใช้งานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงการเกษตรอย่างมาก โดยเฉพาะในการชลประทาน วัสดุที่ทำจากพลาสติกถูกนำมาใช้กันแพร่หลาย ในการขนส่งน้ำไปให้ต้นพืช ผ่านท่อประธาน ท่อแขนง และท่อน้ำหยด

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



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างท่อน้ำหยด [41]

### 7. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponics)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตพืชสวน ซึ่งพัฒนาขึ้นมาเพื่อปลูกพืชผักต่างๆ ให้กับทหารที่ไปสู้รบในสมรภูมิที่ไม่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกพืชให้สามารถผลิตผักเพื่อเป็นอาหารได้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการผลิตพืชได้ดีแต่ต้องการความรู้ และทักษะในการจัดการที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้ได้พัฒนาอย่างกว้างขวางในช่วงปี ค.ศ.1980 พร้อมทั้ง การพัฒนาพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยวิธีอัดรีดร่วม (Co-extrusion)



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน [42]

### 8. พลาสติกคาดแหล่งน้ำ (Waterproof sheeting)

พลาสติกช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากระบบการเก็บกัก การลำเลียง และการจัดสรรน้ำ ช่วยให้การจัดการแหล่งน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในปัจจุบันนี้ การขาดแคลนน้ำในหลายพื้นที่ของโลกเป็นข้อจำกัดหลักในการปรับปรุงสภาพความเป็นอยู่ของประชากร การขาดแคลนน้ำเป็น

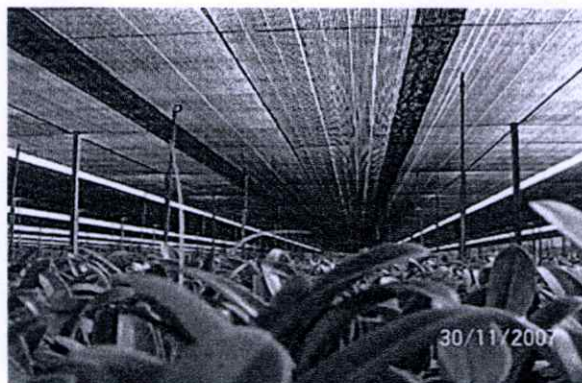
เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่แน่นอน ขณะเดียวกันฤดูกาลที่มีความต้องการสูงสุด มักจะตรงกับช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำมีน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเหตุให้ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ลดลง ดังนั้นการสร้างอ่างเก็บน้ำช่วยลดปัญหาเหล่านี้ลงได้ เกษตรกรแต่ละรายมักจะไม่มีความสามารถทางเศรษฐกิจที่จะสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ และคลองส่งน้ำคาดด้วยคอนกรีตของตนเองได้ ดังนั้นการใช้แผ่นพลาสติกคาดแหล่งน้ำซึ่งมีราคาถูกกว่าจึงเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหา

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

ลมเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการทำเกษตร นับตั้งแต่ในอดีตเป็นต้นมาเกษตรกรได้พัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องลมมาโดยตลอด ด้วยการสร้างกำแพงกัน ซึ่งสามารถให้ลมที่มาปะทะทะลุผ่านไปได้นาน้อยแตกต่างกัน การใช้ตาข่ายพลาสติกเป็นแนวกันลมทำให้สามารถลดความหนาวของกำแพงลงได้ จึงเหลือพื้นที่เพาะปลูกกว้างมากขึ้น แนวกันลมที่ใช้ตาข่ายพลาสติกกำลังเข้ามาแทนที่การปลูกต้นไม้เป็นแนวกันลม เพราะต้นไม้ที่ใช้เป็นแนวกันลมนั้นนอกจากจะแย่งน้ำ และอาหารของพืชที่ปลูกแล้ว 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)



รูปที่ 2.34 ตัวอย่างตาข่ายและตะแกรงลดพลังงาน [43]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**J.A. Ratto และคณะ [44]** ศึกษาขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูป และการสลายตัวได้ทางชีวภาพของระบบเทอร์โมพลาสติก อะซิฟาคิก พอลิเอสเทอร์ผสมกับแป้ง (ไม่ระบุชนิด) โดยการเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะซิเลต (PBSA) ผสมกับแป้ง ปริมาณ 5-30% โดยน้ำหนัก และทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Blown film extrusion) ผลการทดลองพบว่า ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความเหนียวลดลง ส่วนอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งที่เพิ่มขึ้น จนถึง 20% และเมื่อให้ถูกแสงจะเห็นได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PBSA มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายเกิดขึ้นสรุปได้ว่า PBSA ที่มีการเติมแป้ง จะย่อยสลายได้เร็ว เมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น แต่กระบวนการขึ้นรูปจะทำให้ยากเมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้น

**S. Mali และคณะ [45]** ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และความสัมพันธ์ถึงผลของการใช้พลาสติกไซเซอร 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล (Glycerol) และซอร์บิทอล (Sorbitol) 3 ระดับ คือ 0, 20 และ 40 กรัมต่อแป้ง 100 กรัม พบว่าพลาสติกไซเซอรส่งผลกระทบต่อสมบัติของฟิล์ม เมื่อใช้ปริมาณของพลาสติกไซเซอรเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความเครียด (Strain) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) สูงขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอรถึง 40 กรัมต่อแป้ง 100 กรัม ให้สมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่าง และฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลจะมีการดูดซับน้ำที่เร็วกว่า และมากกว่าฟิล์มที่เติมซอร์บิทอล จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการเลือกชนิด และปริมาณของพลาสติกไซเซอรจะมีผลต่อสมบัติเชิงกล ปริมาณความชื้น และอัตราการดูดซับความชื้นของฟิล์ม จะทำให้ฟิล์มคงตัวภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity; RH) ที่หลากหลาย

**P. Bergo และ P.J.A. Sobral [46]** ได้ศึกษาผลกระทบของพลาสติกไซเซอรต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเจลาติน (Gelatin) ที่ทำมาจากหนังหมู ซึ่งการเติมพลาสติกไซเซอรเป็นการปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น ความยืดหยุ่น ความว่องไวต่อความชื้น เป็นต้น โดยวัตถุประสงค์ของการทำ การวิจัยนี้สนใจผลกระทบของกลีเซอรอลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ จากผลการทดลองพบว่า พลาสติกไซเซอรมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ โดยพลาสติกไซเซอรไปลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่ที่อยู่ใกล้กัน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นซึ่งส่งผลให้ไปเพิ่มความว่องไวต่อความชื้นและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์

**วรวิทย์ โพนนิกร [19]** ศึกษาผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสถานะฝัองกลบ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม ผลการทดลองพบว่า เมื่อพอลิเมอร์มีปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาลี 30% หลังการฝัองกลบมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนสมบัติทางความร้อน พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทน

ความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และพอลิเมอร์ทุกสูตรมีค่า  $T_m$  และอุณหภูมิตกผลึก (Crystallization temperature;  $T_c$ ) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึก โดย X-ray Diffraction (XRD) พบว่า พอลิเมอร์ทุกสูตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึก และผลจากการศึกษาโดย SEM หลังการฝั่งกลบ สรุปได้ว่าพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสาธิตเกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด

**J-F. Zhang และ X. Sun [30]** ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) กับแป้งสาธิต ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารช่วยผสมมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) และใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา งานวิจัยนี้พบว่า แรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PLA กับแป้งเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้สารช่วยผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราส่วนผสม PLA กับแป้ง ที่ 55/45 ที่ประกอบด้วย 1%MA โดยน้ำหนักของ PLA และ 10% L101 โดยน้ำหนักของ MA ให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) สูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์

**W.Y. Jang และคณะ [47]** ศึกษาสมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) และแป้ง (ไม่ระบุชนิด) โดยใช้สารช่วยผสม MA และแป้งมาลิกแอตเทอร์โมพลาสติก (Maleated thermoplastic starch; MATPS) เพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PLA และแป้ง ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยดีเอสซี (Differential scanning calorimetry; DSC) จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ MA เป็นสารช่วยผสม ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมธรรมดาที่ไม่ใช่ MA เป็นสารช่วยผสม

**ศุภสิทธิ์ ผู้มีโชค [48]** ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปร และไม่คัดแปรกับพอลิโพรพิลีน (PP) โดยผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50% แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จนไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ และเมื่อปริมาณแป้งเป็น 0-50% พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังคัดแปรมีสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติด้านความทนการคัดโค้ง การดูดซึมความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการคัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

**G.S. Mugnozza และคณะ [49]** ศึกษาสมบัติเชิงกลที่ลดลง และสัณฐานวิทยาของฟิล์มย่อยสลายได้ของฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร โดยงานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มคลุมดินที่ทำมาจาก Mater-Bi<sup>®</sup> ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกผสมกับแป้ง และใช้ดินสตรอเบอร์รี่ในการทดสอบ หาสมบัติเชิงกลต่างๆ

โดยใช้เทคนิค SEM, FTIR-ATR และ Tensile test พบว่า พลาสติกคลุมดินเกิดการย่อยสลายในส่วนที่เป็นแป้งก่อน บริเวณของฟิล์มที่ถูกดินฝังจะเกิดการย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่ไม่ได้ถูกฝัง รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดก็ลดลงมากกว่าด้วย และเมื่อทำการทดลองไปประมาณ 10 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาด จะมีค่าลดลงประมาณ 300%

**H.J. Park และคณะ [50]** ศึกษาผลของชนิด และความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรต์ต่อฟิล์มเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose) และฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose) โดยใช้พลาสติกไซเซอรต์ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอล และกลีเซอริน ที่มีความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 0.17, 0.33, 0.50 และ 0.66 มิลลิลิตรพลาสติกไซเซอรต์ต่อกรัมเซลลูโลส และควบคุมความหนาของฟิล์ม พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นพลาสติกไซเซอรต์เพิ่มมากขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มทั้งสองจะลดลง แต่การยึดตัวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเอทิลีนไกลคอลมีผลต่อการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มมากกว่าพลาสติกไซเซอรต์อีก 2 ชนิด สมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรต์ โดยในกรณีของกลีเซอรอลค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มทั้งสองชนิดจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่า 0.33 มิลลิลิตรพลาสติกไซเซอรต์ต่อกรัมเซลลูโลส

**S. Godbole และคณะ [51]** ศึกษาการเตรียม และสมบัติของฟิล์มผสมย่อยสลายได้ของพอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทีเรต (Poly-3-hydroxybutyrate; PHB) ผสมแป้งมันฝรั่ง เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติ และลดต้นทุน โดยศึกษาสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ PHB:แป้ง คือ 70:30 (w/w) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ ส่วนค่าอุณหภูมิในการหลอมผลึก ( $T_m$ ) และ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมแป้งลงไป โดยวัสดุนี้อาจประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบบนแผ่นกระดาษ หรือกระดาษแข็ง เพื่อใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

**กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ [52]** ศึกษาผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ผสมแป้ง/Polycaprolactone (PCL) จากการศึกษาการใช้แป้งผสมกับ PCL ในเครื่องอัดรีด พบว่าที่ปริมาณแป้ง 25% โดยน้ำหนัก ให้ค่า Tensile strength 12.21 MPa และ %Elongation at break 295 และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งจะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง การย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งที่ใช้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อปริมาณแป้งที่ 75% จะมีการย่อยสลายให้ค่า Total Organic Carbon (TOC) ถึง 1728 ppm และจากภาพถ่ายของ SEM ยืนยันว่าเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น แป้งจะกระจายอยู่ใน PCL เมตริกซ์ ซึ่งเมื่อแป้งถูกย่อยสลายไปด้วยเอนไซม์ โครงสร้างของวัสดุจะเป็นรูพรุนทำให้การย่อยสลายของ PCL ง่ายขึ้น การย่อยสลายของแป้งผสม PCL โดยการฝังดิน (Burial test) เกิดได้เร็วกว่า PCL อย่างเดียว การเติมแป้งปริมาณ 75 % สามารถย่อยสลายได้ในดินภายใน 4 เดือน

พรรวี สุมิตร [53] ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ชนิดรับประทานได้จากไคโตซานกับแป้งคัดแปรเอสเทอร์ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 (w/w) มีค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสสูงสุด ฟิล์มที่เตรียมจากแป้งคัดแปรที่มีองค์การแทนที่ 0.02 มีสมบัติเชิงกล และสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ และออกซิเจนที่ดีกว่าแป้งคัดแปรที่มีองค์การแทนที่ 0.06 ส่วนผลของปริมาณกลีเซอรอลพบว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลปริมาณ 5% ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้มี อุณหภูมิลดลง

อัจฉราพร รัตนมณี [54] ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex<sup>®</sup>) ผสม แป้งคัดแปรเอสเทอร์ (EMS) และแป้งพรีเจล (PGS) สำหรับงานเกษตรกรรม โดยนำแป้ง EMS และ แป้ง PGS มาผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ คือ Ecoflex<sup>®</sup> โดยผสมอัตราส่วนระหว่าง Ecoflex<sup>®</sup> และ แป้งสตาร์ช 80:20, 70:30 และ 60:40 (โดยน้ำหนัก) และใช้ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ คือ กลีเซอรอลเป็น 50% ของปริมาณแป้งสตาร์ช ทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่ได้มีความหนา ประมาณ 50-80 ไมครอน และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล Ecoflex<sup>®</sup>/PGS จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS โดยสูตร Ecoflex<sup>®</sup>/PGS สูตร 80:20 มีค่าความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงฉีกขาด และมอดูลัสสูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น สมบัติทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของ Ecoflex<sup>®</sup> ลดลง ส่วนค่าการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ค่าการซึมผ่านออกซิเจน (Oxygen permeability, OP) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Ecoflex<sup>®</sup>/PGS มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า เนื่องจากสามารถผสมเข้ากันได้ดี และมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่น้อยกว่า และ Ecoflex<sup>®</sup>/PGS ดูดซับน้ำและย่อยสลายได้ดีกว่า Ecoflex<sup>®</sup>/EMS

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งจะเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่าง PBS กับ แป้งคัดแปร กล่าวคือ จะทำการศึกษาที่อัตราส่วน PBS/แป้งคัดแปร เท่ากับ 70/30 และ 60/40 โดยเติมแป้งคัดแปร 3 ชนิด คือ EMS, PGS และ HBS เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณมากในประเทศไทย และสามารถนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงนำแป้งคัดแปรมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลาย และเลือกใช้กลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ดีกับแป้ง โดยศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม คือ 20-40% ของแป้ง แต่อย่างไรก็ดี PBS กับแป้งคัดแปร มีความสามารถในการเข้ากันได้ไม่ค่อยดีนักจึงมีการเติมสารช่วยผสม เพื่อช่วยในเรื่องความเข้ากันได้ระหว่าง PBS และแป้งคัดแปร โดยทำการศึกษาปริมาณสารช่วยผสมที่ 0.5-1.5% โดยน้ำหนักของ PBS และใช้ L101 10% โดยน้ำหนักของ MA เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS) Bionolle<sup>®</sup> (เกรด 3001G) บริษัท Showa Highpolymer Co., Ltd. สมบัติบางประการของ PBS สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1
2. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) องศาการแทนที่ (Degree of substitution; DS 0.02) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. สมบัติบางประการของ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรเอสเทอร์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2
3. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรพรีเจล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3
4. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไฮโดรโฟบิก สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4
5. กลีเซอรอล (เกรดการค้า) บริษัท Lab System Co., Ltd.
6. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) เกรดการค้า บริษัท Aldrich Chemical Co., Inc.
7. 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (Luperox<sup>®</sup> 101 หรือ L101) เกรดการค้า บริษัท Aldrich Chemical Co., Inc.
8. Phenolic antioxidant (Anox<sup>®</sup> 20) เกรดการค้า บริษัท Great Lakes Chemical Corporation Co., Ltd.
9. Phosphite antioxidant (Alkanox<sup>®</sup> 240) เกรดการค้า บริษัท Great Lakes Chemical Corporation Co., Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ Bionolle® (PBS) ที่ใช้ในงานวิจัย\*

สมบัติ	หน่วย	PBS
ความหนาแน่น (Density)	g/ml	1.23-1.26
องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)	%	20-35
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting point, $T_m$ )	°C	93-95
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )	°C	-45
อุณหภูมิตกผลึก (Crystallization temperature, $T_c$ )	°C	50
ดรชนีการไหล (Melt flow rate, MFR) (190 °C, 2.16 kg)	g/10 min	1.4

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรเอสเทอร์\*

สมบัติ	
ลักษณะทางกายภาพ (Appearance)	ผงสีขาว
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	13.0% max
ความเป็นกรดค่า (pH)	5.0-7.0
องศาการแทนที่ (DS)	0.02
ความหนืด (Peak viscosity)	600 BU min
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Sieve analysis)	1.5% max on 250 micron

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรพีรีเจล\*

สมบัติ	
ลักษณะทางกายภาพ (Appearance)	ผงสีขาว
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	7.0% max
ความเป็นกรดค่า (pH)	5.0-7.0
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Sieve analysis)	80% through 150 micron

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรไฮโดรโฟบิก\*

สมบัติ	
ลักษณะทางกายภาพ (Appearance)	ผงสีขาว
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	13.0% max
ความหนืด (Peak viscosity 6%, 700 cmg)	1000 BU min
ความเป็นกรดด่าง (pH)	4.5-6.5
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Sieve analysis)	1.5% max on 250 micron

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของกลีเซอรอล\*

สมบัติ	หน่วย	กลีเซอรอล
ความหนาแน่น	g/ml	1.26
จุดเดือด	°C	290
จุดหลอมเหลว	°C	18
ความหนืดที่ 20 °C	mPs	1400

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.6 สมบัติบางประการของมาเลอิกแอนไฮไดรยด์\* และ Luperox<sup>®</sup> 101\*

สมบัติ	มาเลอิกแอนไฮไดรยด์	Luperox <sup>®</sup> 101
ความหนาแน่น	-	0.877 g/ml at 25 °C (lit)
ครึ่งชีวิต (t <sub>1/2</sub> )	-	10 hr (108 °C)
จุดเดือด	202 °C	55-57 °C /7 mmHg(lit)
จุดหลอมเหลว	52.8 °C	≥80 °C

\* ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บริษัทเครื่องแก้ว
2. คู่มือ
3. เติชคเคเตอร์ (Desiccator)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. เครื่องวัดความหนา (Thickness meter) ความละเอียด 3 ตำแหน่ง บริษัท Teclock Corporation
6. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น PL-200 บริษัท Intro Engineering Co., Ltd.
7. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Plastic grinder) รุ่น Bosco A600 บริษัท Bosco Engineering Co., Ltd.
8. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น Model 3000 บริษัท Lab Tech Engineering Co., Ltd.
9. เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt flow indexer) รุ่น 6841 บริษัท Ceast Co., Ltd.
10. เครื่องอัดรีดแบบฟิล์มเป่า (Blown-film extruder) รุ่น Type LF 400 บริษัท Lab Tech Engineering Co., Ltd. ที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว รุ่น Polydrive with Rheomex R252 บริษัท HAAKE Co., Ltd.
11. เครื่องอัดรีดแบบฟิล์มเป่า (Blown-film extruder) ของบริษัททานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) แสดงสมบัติของเครื่องเป่าขึ้นรูปดังกล่าวผนวก จ. (ตารางที่ ฉ-1)
12. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น LR 5 K บริษัท Lloyd Instrument Ltd.
13. เครื่องซีลถุงแบบมือกด (Hand sealing machine) รุ่น PCS-200 บริษัท Hamco Brand Hand Pressing Sealer
14. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential scanning calorimeter) รุ่น DSC 204 F1 Phoenix<sup>®</sup> ASC บริษัท Netzsch Co., Ltd.
15. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer) รุ่น TG 209 F3 Tarsus<sup>®</sup> บริษัท Netzsch Co., Ltd.
16. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic mechanical thermal analyzer) รุ่น DMTA V, Rheometric Scientific บริษัท TA Instruments Co., Ltd.
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM (Scanning electron microscope) รุ่น JEM-6400 scanning microscope บริษัท Jeol Co., Ltd.

18. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) รุ่น NICOLET 6700 บริษัท Thermo Scientific Co., Ltd.
19. เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle) Drop shape analyzer รุ่น DSA 100 บริษัท Kruss Co., Ltd.

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มในระดับห้องปฏิบัติการ

1. อบ PBS และแป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิดเอสเทอร์ ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่
2. นำแป้งมันสำปะหลังคัดแปรเอสเทอร์ เติมปริมาณกลีเซอรอลเป็น 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนักของแป้ง และเติม Antioxidant-Anox-20 กับ Antioxidant-Alkanox-240 เป็นปริมาณ 0.05 php (Part per hundred part of polymer)
3. ทำการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่อง High speed mixer ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 1-2 นาที แล้วนำไปผ่านด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยตั้งอุณหภูมิที่ Feed zone, Compression zone, Metering zone และ Die zone ที่ 135, 140, 145 และ 155 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบสกรู 40 รอบต่อนาที
4. นำพอลิเมอร์ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
5. นำพอลิเมอร์ที่บดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
6. นำพอลิเมอร์ผสมใส่ลงในส่วนป้อนสาร (Hopper) ของเครื่องอัดรีดแบบฟิล์มเป่า โดยตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิหัวคาย เท่ากับ 150 °C และความเร็วรอบสกรูของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเท่ากับ 40 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณส่วนท่อโค้งที่ต่อเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวกับเครื่องเป่าฟิล์ม บริเวณส่วนท่อตรงด้านล่าง และท่อตรงด้านบน เท่ากับ 150 °C และใช้ความเร็วในการดึงฟิล์ม (Take-off speed) 1.1 เมตรต่อนาที อัตราการเป่า (Blow up ratio) 1:1 และ 1.5:1
7. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดของแป้ง จากแป้งมันสำปะหลังคัดแปรเอสเทอร์ เป็นแป้งมันสำปะหลังคัดแปรฟรีเจล

หมายเหตุ \* เมื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมได้แล้วจะมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ PBS กับ ชนิดของแป้งสตาร์ช เป็น 70/30 และ 60/40 ตามลำดับ ทำการเลือกอัตราส่วน และชนิดแป้งที่เหมาะสมเพื่อมาเติมสารช่วยผสม Maleic anhydride (MA) ในอัตราส่วน 0.5-1.5% โดยน้ำหนักของ

PBS ใช้ร่วมกับ 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) 10% โดยน้ำหนักของ Maleic anhydride (MA) [30]

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/PGS อัตราส่วน 70/30 ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	PBS (g)	EMS (g)	PGS (g)	%Glycerol (base on starch)	Antioxidant (ph)	
					Anox-20	Alkanox-240
PBS	100	-	-	-	-	-
P7E3G20	70	30	-	20	0.05	0.05
P7E3G30	70	30	-	30	0.05	0.05
P7E3G40	70	30	-	40	0.05	0.05
P7P3G20	70	-	30	20	0.05	0.05
P7P3G30	70	-	30	30	0.05	0.05
P7P3G40	70	-	30	40	0.05	0.05

ตารางที่ 3.8 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/PGS อัตราส่วน 60/40 ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	PBS (g)	EMS (g)	PGS (g)	%Glycerol (base on starch)	Antioxidant (ph)	
					Anox-20	Alkanox-240
P6E4G20	60	40	-	20	0.05	0.05
P6E4G30	60	40	-	30	0.05	0.05
P6E4G40	60	40	-	40	0.05	0.05
P6P4G20	60	-	40	20	0.05	0.05
P6P4G30	60	-	40	30	0.05	0.05
P6P4G40	60	-	40	40	0.05	0.05

ตารางที่ 3.9 สูตรผสมของ PBS/EMS อัตราส่วน 70/30 มีการเติม สารช่วยผสม 0.5-1.5% MA (โดย น้ำหนักของ PBS) และ 10 wt % L101 (MA Basis) ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	PBS (g)	EMS (g)	MA% of PBS	%Glycerol (base on starch)	Antioxidant (php)	
					Anox-20	Alkanox-240
P7E3G40/MA0.5	70	30	0.5	40	0.05	0.05
P7E3G40/MA1.0	70	30	1.0	40	0.05	0.05
P7E3G40/MA1.5	70	30	1.5	40	0.05	0.05

### 3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มในระดับอุตสาหกรรม

1. ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สภาวะตาม ข้อ 3.31 (1-5) แต่ใช้แป้งสตาร์ช 2 ชนิด คือ แป้งเอสเทอร์ และแป้งไฮโดรโฟบิก ที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์/แป้งสตาร์ช เท่ากับ 70/30 เติมปริมาณกลีเซอรอลเป็น 40% ของแป้ง และเติม Antioxidant-Anox-20 กับ Antioxidant-Alkanox-240 เป็นปริมาณ 0.05 php
2. ทำการศึกษาทั้งสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม และสูตรที่เติมสารช่วยผสม โดยสูตรที่เติมสารช่วยผสมใช้ Maleic anhydride (MA) ในอัตราส่วน 1.0% โดยน้ำหนักของ PBS และ 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) 10% โดยน้ำหนักของ Maleic anhydride (MA) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา
3. ทำการขึ้นรูปเป่าเป็นฟิล์มโดยใช้เครื่องในระดับอุตสาหกรรม  
สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม
  - อุณหภูมิเครื่องอัดรีด เท่ากับ 132-142 °C
  - อุณหภูมิหัวคาย เท่ากับ 135-140 °C
  - ความเร็วรอบสกรู 5-8 รอบต่อนาที
  - ความเร็วในการดึงฟิล์ม (Take-off speed) 6-9 เมตรต่อนาที
  - อัตราการเป่า (Blow up ratio) 2.5:1

ตารางที่ 3.10 สูตรผสมของ PBS/EMS และ PBS/HBS อัตราส่วน 70/30 พลาสติกไซเซออร์ 40% (โดยน้ำหนักของแป้ง) ทั้งที่มีการเติมสารช่วยผสม 1.0% MA และ 10 wt % L101 (MA Basis) และไม่ได้เติมสารช่วยผสม ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	PBS (g)	EMS (g)	HBS (g)	MA% of PBS	%Glycerol (base on starch)	Antioxidant (php)	
						Anox-20	Alkanox-240
P7E3G40	70	30	-	-	40	0.05	0.05
P7E3G40/MA1	70	30	-	1.0	40	0.05	0.05
P7H3G40	70	-	30	-	40	0.05	0.05
P7H3G40/MA1	70	-	30	1.0	40	0.05	0.05

### 3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของตัวอย่าง

#### 3.3.3.1 การวัดดัชนีการหลอมไหล

ทำการวัดความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Melt flow indexer โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม รายงานผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 [55]

#### 3.3.3.2 การวัดความหนา

โดยนำฟิล์มตัวอย่างทำการวัดความหนาด้วยเครื่อง Thickness meter ความละเอียด 3 ตำแหน่ง ทำการวัดความหนาประมาณ 20 จุด รายงานผลในหน่วย ไมครอน ( $\mu\text{m}$ )

#### 3.3.3.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา

นำฟิล์มตัวอย่างแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการหักอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบผิวที่จะศึกษาด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูที่ผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

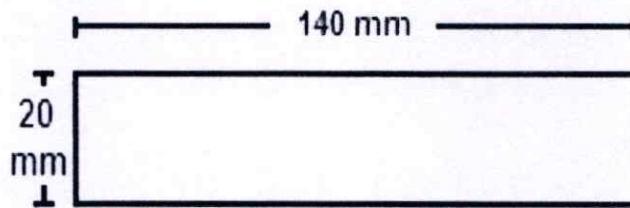
#### 3.3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล

##### 3.3.3.4.1 การทดสอบแรงดึง

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine วัดค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยัง โดยตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 mm  $\times$  140 mm วัด

ตัวอย่างทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) มาตรฐาน ASTM D 882 [56] ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50 มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 นิวตัน

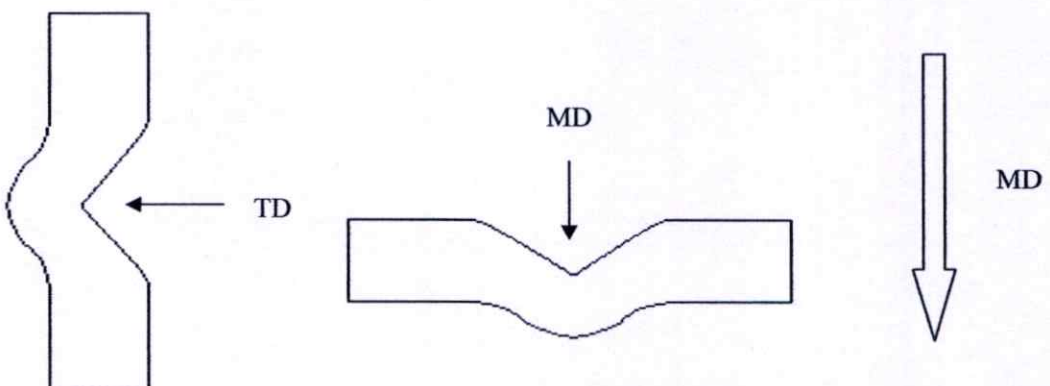


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง

#### 3.3.3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนก แบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 1004 [57] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ทดสอบตามแนว MD และแนว TD โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน กล่าวคือ ฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน ตามทิศทาง TD จะพิจารณาเป็นค่าความแข็งแรงฉีกขาดในทิศทาง TD ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50 มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 นิวตัน



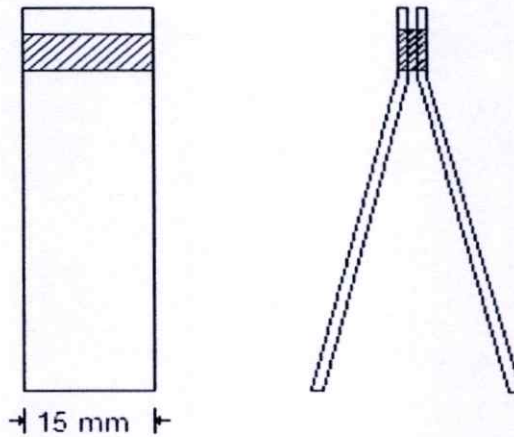
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง

MD

### 3.3.3.4.3 ศึกษาความแข็งแรงของรอยซึล

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัด และเชื่อมติด (Seal) ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C ประมาณ 2-3 วินาที ตัดเป็นชิ้นงานให้มีความกว้าง 15 mm±0.1 mm และมีความยาว 100 mm±0.1 mm ดังรูปที่ 3.3 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน มอก. 1027-2534 [58] ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500 มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length)	50 มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 นิวตัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยซึล

### 3.3.3.5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

#### 3.3.3.5.1 ปริมาณการดูดซับน้ำ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 [59] นำฟิล์มตัวอย่าง โดยกำหนดขนาดของชิ้นงาน 6×4 cm<sup>2</sup> อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ทุกๆ 2 วัน ทำการซับฟิล์มให้แห้งก่อนทำการชั่งน้ำหนัก ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

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

เมื่อ	$M_t$	คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
	$W_d$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ
	$W_w$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

### 3.3.3.5.2 ค่ามุมสัมผัส

เป็นการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวฟิล์มพลาสติก กับหยดน้ำ ด้วยเครื่อง Contact angle meter โดยนำฟิล์มตัวอย่างตัดให้ได้ขนาด  $8 \times 8 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำฟิล์มวางบนแผ่นกระจกสไลด์ แล้วทำการหยดน้ำลงบนผิวฟิล์มพลาสติก ประมาณ 50 มิลลิลิตร โดยทำการบันทึกค่ามุมสัมผัส 2 วินาทีต่อครั้ง โดยในการวัด 1 ครั้งจะใช้เวลา 1 นาที แล้วอ่านค่ามุมสัมผัสของผิวฟิล์ม ตามมาตรฐาน ASTM D 5946-09 [60]

### 3.3.3.6. ศึกษาสมบัติทางความร้อน

#### 3.3.3.6.1 Differential scanning calorimetry

ชั่งน้ำหนักฟิล์มตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม ให้มีน้ำหนักที่แน่นอน 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 [61] ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ได้จากสมการที่ 3.4

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

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

$\Delta H_f^\circ$  คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PBS ที่มี

เป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $200 \text{ J/g}$  [62]

#### 3.3.3.6.2 Thermogravimetric analysis

ชั่งน้ำหนักฟิล์มตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิกรัม แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิ  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ถึง  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131 [63]

#### 3.3.3.6.3 Dynamic mechanical thermal analysis

ตัดตัวอย่างชิ้นงานขนาด  $5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ หนา 50–100 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA โดยใช้อุณหภูมิจาก  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  ถึง  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ  $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  และใช้ความถี่ (Frequency) เท่ากับ  $1 \text{ Hz}$  ภายใต้สภาวะบรรยากาศของ

ไนโตรเจน ตามคู่มือของเครื่อง DMTA

### 3.3.3.7. การพิสูจน์เอกลักษณ์ โดยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี

เป็นการวิเคราะห์ ตรวจสอบ และศึกษาโครงสร้างของสารประกอบของฟิล์มตัวอย่าง โดยทำการตัดฟิล์มตัวอย่าง ขนาด  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เป็น Attenuated total reflectance (ATR) เป็นการวัดการสะท้อนผ่านตัวกลางที่เป็นเพชร ด้วยจำนวนสะท้อนเพียงครั้งเดียว โดยวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น  $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$

### 3.3.3.8. การศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้โดยการฝังดิน

เป็นการทดสอบความสามารถการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในดิน โดยการนำชิ้นงานตัวอย่าง (ฟิล์ม) ขนาด  $20 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  ฝังในกระบอกที่มีฝาปิด ทำที่อุณหภูมิห้อง ใต้ดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร และขุดชิ้นงานตัวอย่างขึ้นมาถ่ายรูปเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงทุก 2 อาทิตย์ โดยมีการกำหนดความชื้น 30% และค่าความเป็นกรดด่างของดิน (pH) 7 [64, 65] ซึ่งสามารถคำนวณความชื้นในดิน และ %ความชื้นที่ต้องการ ได้จากสมการ 3.5 และสมการ 3.6 ตามลำดับ

$$\text{ความชื้นในดิน} = \frac{(\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ})}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\% \text{ ความชื้นที่ต้องการ} \\ (\text{เท่ากับ } 30\%) = \frac{30\% \times (\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ})}{\text{ความชื้นในดิน}} \times 100 \quad (3.6)$$

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับ แป้งสตาร์ชดัดแปร ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเป็นการศึกษาชนิด และปริมาณของแป้งสตาร์ช ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS), แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ มีการเติมปริมาณพลาสติกไซเซอร์ใน ปริมาณต่างๆ และเติมสารช่วยผสม จึงนำเสนอโดยใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรของ PBS และแป้งสตาร์ชที่ใช้ในการทดลอง

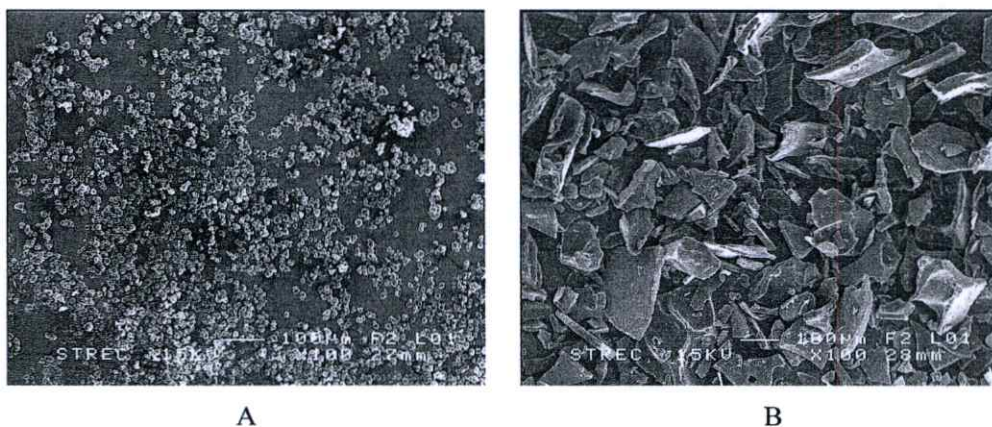
อักษรย่อที่ใช้แทน	สูตรที่ใช้ในการทดสอบ
PBS	PBS 100 part
P7E3G20	P = PBS 70 part, E = EMS 30 part, G = Glycerol 20% of starch
P7E3G30	P = PBS 70 part, E = EMS 30 part, G = Glycerol 30% of starch
P7E3G40	P = PBS 70 part, E = EMS 30 part, G = Glycerol 40% of starch
P7P3G20	P = PBS 70 part, P = PGS 30 part, G = Glycerol 20% of starch
P7P3G30	P = PBS 70 part, P = PGS 30 part, G = Glycerol 30% of starch
P7P3G40	P = PBS 70 part, P = PGS 30 part, G = Glycerol 40% of starch
P6E4G20	P = PBS 60 part, E = EMS 40 part, G = Glycerol 20% of starch
P6E4G30	P = PBS 60 part, E = EMS 40 part, G = Glycerol 30% of starch
P6E4G40	P = PBS 60 part, E = EMS 40 part, G = Glycerol 40% of starch
P6P4G20	P = PBS 60 part, P = PGS 40 part, G = Glycerol 20% of starch
P6P4G30	P = PBS 60 part, P = PGS 40 part, G = Glycerol 30% of starch
P6P4G40	P = PBS 60 part, P = PGS 40 part, G = Glycerol 40% of starch
P7H3G40	P = PBS 70 part, H = HBS 30 part, G = Glycerol 40% of starch
P7E3G40/MA1	P = PBS 70 part, E = EMS 30 part, G = Glycerol 40% of starch, Maleic anhydride 1% of PBS, L101 10% of MA
P7H3G40/MA1	P = PBS 70 part, H = HBS 30 part, G = Glycerol 40% of starch, Maleic anhydride 1% of PBS, L101 10% of MA

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 จะศึกษาการเตรียมฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนตอนที่ 2 เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม โดยเลือกบางสูตรจากตอนที่ 1 นำไปเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องผลิตระดับอุตสาหกรรม

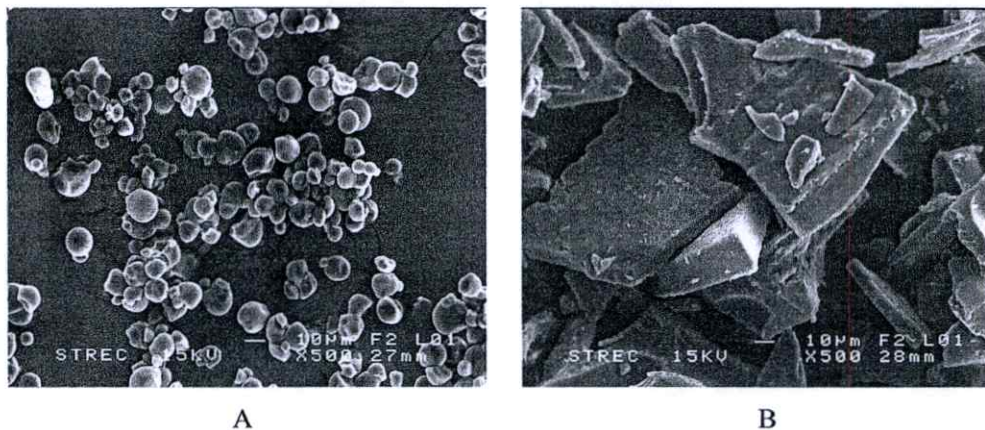
## ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ

### 4.1 การศึกษาพื้นฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาสามารถศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการคัดเลือกสูตร PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ปริมาณกลีเซอรอล 40% ของแป้ง สูตรที่เติมสารช่วยผสม MA 1% ของ PBS และลักษณะพื้นฐานวิทยาของแป้งสาลีชนิดต่างๆ คือ EMS และ PGS จากรูปที่ 4.1-4.2 เป็นลักษณะพื้นฐานวิทยาของ EMS กับ PGS จะเห็นได้ว่า EMS มีรูปร่างเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีอนุภาคขนาดเฉลี่ย  $11 \pm 3$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ส่วน PGS มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดประมาณ  $40 \pm 30$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) เนื่องจาก PGS เป็นแป้งสาลีที่ผ่านการบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า กระบวนการพรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization) (ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20) โดยป้อนแป้งในรูปสารแขวนลอย หรือแป้งเปียก ลงในเครื่องทำแห้งเมื่อน้ำแป้งเข้าสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้น้ำในน้ำแป้งระเหยออกไป ได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกขูดออกโดยใบมีด หลังจากนั้นนำไปอบแห้งและบดให้ละเอียด [16] ดังนั้นทำให้เวลานำ EMS และ PGS ลงไปผสมใน PBS จึงเห็นลักษณะพื้นฐานวิทยาที่ไม่เหมือนกัน



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



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

จากรูปที่ 4.3-4.4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ PBS ผสมกับแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ ได้แก่ EMS และ PGS พบว่า EMS เม็ดแป้งสตาร์ช มีโครงสร้างมหภาคเป็นเม็ด (Starch granule) กระจายตัวอยู่ใน PBS แป้งสตาร์ชซึ่งมีลักษณะคล้ายสารตัวเติม (Fillers) กระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ต่อเนื่อง คือ PBS ส่วนกรณี PGS เม็ดแป้งถูกเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพจากเป็นเม็ดกลายเป็นแผ่นในกระบวนการผลิต ทำให้ผนังเม็ดแป้งแตกออกกลายเป็นสายโซ่อะไมโลส และสายโซ่อะไมโลเพกติน ดังนั้นเมื่อเติม PGS ลงใน PBS แป้งพรีเจลจะทำหน้าที่คล้ายพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

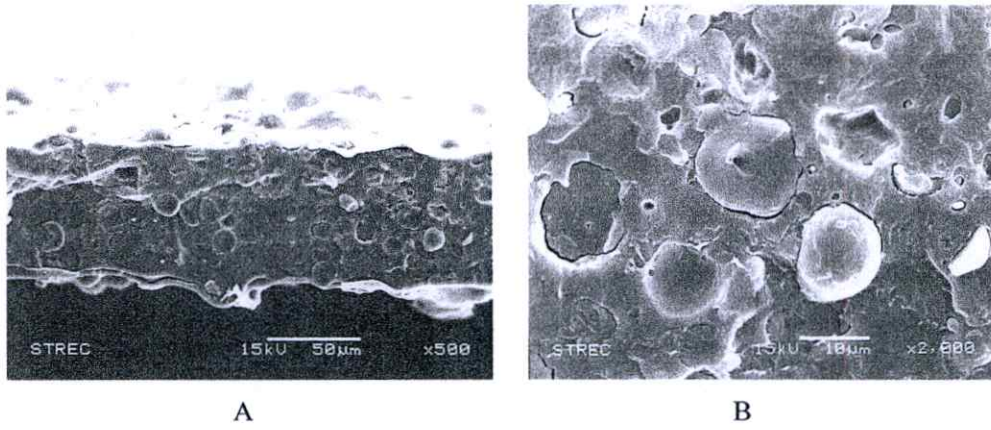
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBS/EMS (รูปที่ 4.3) และ PBS/PGS (รูปที่ 4.4) จะเห็นว่า PBS/EMS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า โดยพบช่องว่างเพียงเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่าง PBS กับ EMS สามารถอธิบายได้จากธรรมชาติ และสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ชแต่ละชนิด เนื่องจาก EMS เป็นแป้งสตาร์ชที่ตัดแปรทางเคมีพื้นผิวของอนุภาคเม็ดแป้งสตาร์ช EMS ยังคงมีสัณฐานวิทยาเหมือนเดิม โดย EMS ยังเป็นเม็ดแป้งจะทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติม (Filler) ส่งผลให้กระจายตัวค่อนข้างดีอยู่ในเมทริกซ์ ในขณะที่ PGS เป็นแป้งสตาร์ชตัดแปรทางกายภาพ โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า กระบวนการพรีเจลลาตินในเซชัน (Pregelatinization) ซึ่งเม็ดแป้งสตาร์ชบวมตัวแตกออก หรือถูกทำลาย ทำให้ผนังแข็งของเม็ดแป้งสตาร์ชแตกออก กลายเป็นสายโซ่พอลิเมอร์อะไมโลส และอะไมโลเพกติน แต่ผลที่ได้พบว่าเกิดการแยกวัฏภาคระหว่าง PBS กับ PGS อย่างเห็นได้ชัดเจน อาจเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเป็นอะไมโลส และอะไมโลเพกติน เมื่อเกิดการแตกออกในขั้นตอนกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ช ส่งผลให้ในการผลิตฟิล์มเกิดการรวมตัวของอะไมโลส และอะไมโลเพกติน และแยกเป็นกลุ่มก้อนอย่างชัดเจนออกมาจากพอลิเมอร์ เนื่องจากเกิดเป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดไม่เข้ากัน (Immiscible blend) เกิดการแยกวัฏภาคเป็นกลุ่มก้อนของแป้งขนาดใหญ่ (ประมาณ 50 ไมครอน) ที่ยึดเกาะไม่ดีกับ PBS พบช่องว่างระหว่างรอยต่อวัฏภาค (Interface) และเกิดการหลุดออกของแป้งเกิดเป็นหลุมที่

ชัดเจน อีกทั้งพบว่าแป้งพรีเจลมีลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งเปลี่ยนไปจากเม็ดที่ค่อนข้างกลมไปเป็นแผ่นซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตแป้ง (จากรูป 4.1 (B) และ 4.2 (B)) ดังนั้นคาดว่าในกระบวนการขึ้นรูปเมื่อมีการให้ความร้อน และมีการให้แรงเฉือน อาจทำให้เม็ดแป้งพยายามที่จะกลับมาอยู่ในสภาพเดิม คือเป็นทรงกลม หรือค่อนข้างกลม เลยเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของสายโซ่อะไมโลส และอะไมโลเพกตินกลายเป็นเม็ดแป้งแยกวัฏภาคออกมาจากพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามก็ดี จากงานวิจัยก่อนหน้า [54] ได้ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex<sup>®</sup>) ผสมแป้งคัดแปรเอสเทอร์ และแป้งพรีเจล จากผลสัมฤทธิ์พบว่าในกรณีของอีโคเฟล็กซ์ผสมแป้งเอสเทอร์พบว่าแป้งเอสเทอร์เม็ดแป้งยังมีลักษณะเป็นของแข็งจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม เมื่อเติมลงไปแล้วลักษณะของเม็ดแป้งไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว แต่ในกรณีของอีโคเฟล็กซ์ผสมแป้งพรีเจล พบว่าแป้งพรีเจล จะทำหน้าที่เหมือนพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วนำไปสู่สถานวิทยาพบว่าเม็ดแป้งหายไป สามารถกลืนเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ คือเข้ากันได้ดีกับอีโคเฟล็กซ์ เนื่องจากเม็ดแป้งแตกออกในกระบวนการผลิตแป้งกลายเป็นสายโซ่อะไมโลส และอะไมโลเพกติน ดังนั้น โมเลกุลของแป้งสามารถที่จะแพร่ได้ดีกว่าสายโซ่ที่สามารถที่จะเกี่ยวพันได้ดี ซึ่งจากงานวิจัยนี้สามารถที่จะยืนยันได้ว่าแป้งเอสเทอร์เมื่อเติมลงไปแล้วจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม และแป้งพรีเจลจะทำหน้าที่เหมือนพอลิเมอร์ผสม

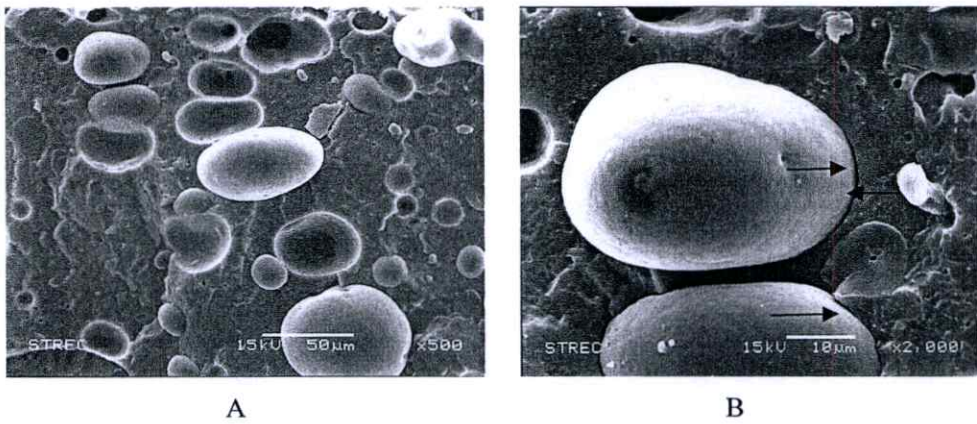
จากรูปที่ 4.5 (A และ B) แสดงสถานวิทยาภาคตัดขวางของ PBS/EMS ที่อัตราส่วน 70/30 ปริมาณกลีเซอรอล 40 % ของแป้ง เมื่อเติมสารช่วยผสม MA 1% ของ PBS และ L101 10% ของ MA พบว่าการเติมสารช่วยผสมส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PBS กับ EMS ดีขึ้น และมียึดติระหว่างเม็ดแป้งกับพอลิเมอร์ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม เนื่องมาจากการเติมสารช่วยผสม เป็นตัวกลางในการยึดติระหว่างพอลิเมอร์กับแป้ง ให้ความเข้ากันได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดแรงดึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสถานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และสามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของพอลิเมอร์ ไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน

จากผลสัมฤทธิ์พบว่าเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่าง PBS กับเม็ดแป้ง เกิดขึ้นในบางสูตร ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดจาก

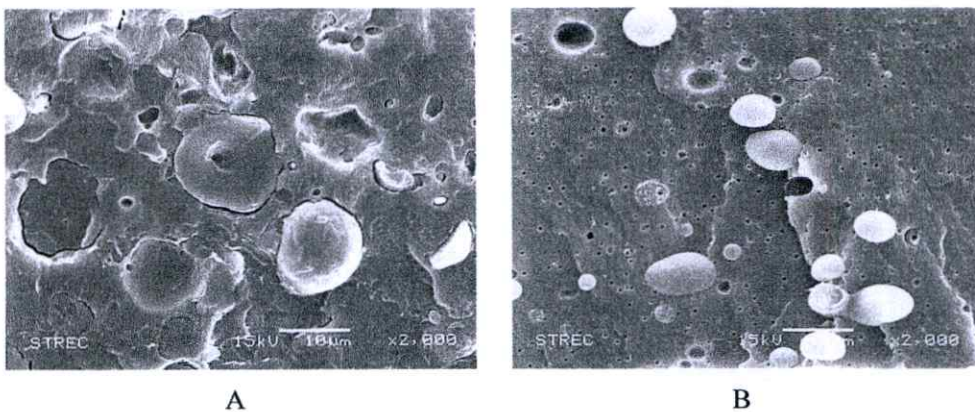
1. ความสามารถในการยึดตัวไม่เท่ากันในขณะเป่าขึ้นรูป โดยพอลิเมอร์สามารถยึดตัวได้มากกว่าแป้งสตาร์ช
2. จากการเตรียมตัวอย่างโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งพอลิเมอร์ และแป้งสตาร์ช มีสัมประสิทธิ์การขยายตัว และหดตัวไม่เท่ากัน เมื่อวัสดุผสมถูกแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำมากอาจทำให้เกิดการหดตัวไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่าง PBS กับเม็ดแป้งได้



รูปที่ 4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ P7E3G40 (A) กำลังขยาย 500X (B) กำลังขยาย 2000X



รูปที่ 4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของ P7P3G40 (A) กำลังขยาย 500X (B) กำลังขยาย 2000X



รูปที่ 4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาภาคตัดขวาง (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X

## 4.2 การศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล

จากการวัดดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ พบว่า PBS บริสุทธิ์ มีค่าดัชนีการหลอมไหลอยู่ที่ 1.5 g/10 min (ที่ 190 °C, น้ำหนักกด 2.16 kg) และเมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง PBS/Starch จาก 70/30 เป็น 60/40 กล่าวคือ เมื่อเติมปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลลดลง เนื่องจากแป้งเป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่มีการเคลื่อนที่ได้ช้าลง หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความหนืดสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีส่วนที่เป็นแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย พอลิเมอร์ผสมไหลได้ยาก ในกรณีแป้งสตาร์ชต่างชนิดกัน พบว่า PGS มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่สูงกว่า EMS เนื่องจาก PGS โครงสร้างของแป้งเปลี่ยน ซึ่งมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก เมื่อเติมลงไป ใน PBS จะเหมือน Immiscible blend เป็นวัฏภาคกระจายตัว (Dispersed phase) กระจายอยู่ใน PBS ทำให้มีการขัดขวางน้อย ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมไหลได้ง่ายขึ้น แต่สำหรับ EMS เป็นแป้งที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เมื่อเติมลงไป ใน PBS จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ ทำให้เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดสูงกว่า PGS

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณกลีเซอรอล (20-40% โดยน้ำหนักเทียบกับแป้ง) พบว่าค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าพลาสติกไซเซอรอลเป็นสาร โมเลกุลเล็กแทรกตามระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ปริมาตรอิสระในโครงสร้างเพิ่มขึ้น  $T_g$  ลดลง การเกี่ยวพันกันของสายโซ่น้อยลง ส่งผลให้ความหนืดของวัสดุลดลง นอกจากนี้กลีเซอรอลสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอรอลสำหรับ PBS ได้ด้วย ส่งผลให้ความหนืดของของผสมลดลง MFI เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ดี PBS มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) มีความสามารถในการดูดความชื้นสูง เมื่อทำการให้ความร้อนขณะขึ้นรูปอาจเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolytic degradation) [4, 12] ทำให้สายโซ่สั้นลง น้ำหนักโมเลกุลลดลง ในการทดสอบหาค่า MFI มีการให้ความร้อนตัวอย่างที่ 190 °C ตามมาตรฐานการทดสอบ อาจส่งผลให้เกิดการ Hydrolytic degradation ส่งผลให้ได้ค่า MFI สูงขึ้น ทั้งนี้ได้ทำการหลีกเลี่ยงโดยการอบตัวอย่างก่อนการทดสอบก็ยังไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลายได้ ทั้งนี้ในการทำการทดลองเบื้องต้น โดยผ่าน PBS บริสุทธิ์ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ที่สภาวะ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมคอมพาวด์ (ที่อุณหภูมิ 135-155 °C และความเร็วรอบสกรู 40 rpm) พบว่า PBS หลังผ่านสกรู 1 รอบ มีค่า MFI เพิ่มขึ้น จาก  $1.5 \pm 0.5$  เป็น  $3.4 \pm 0.2$  g/10 min เป็นการยืนยันสมมุติฐานการสลายตัวจริง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของ PBS ผสมแป้งดัดแปร สูตรต่างๆ ในแนวเปรียบเทียบซึ่งค่าที่ได้ไม่ได้ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปเท่าใดนัก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำการวัดค่าดัชนีการหลอมไหล ดังนั้นความสามารถในการไหลก็จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ ยิ่งอุณหภูมิสูง

พอลิเมอร์จะหลอมเหลวมากขึ้น และไหลได้มากตามไปด้วย ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ ผลของกลีเซอรอล ผลของการเกิด Hydrolytic degradation และผลของปริมาณแป้ง โดยพบว่า PBS ที่เติมแป้งสตาร์ชมีค่า MFI ที่สูงกว่า PBS บริสุทธิ์ ซึ่งคาดว่าเนื่องจาก 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหลอมไหล คือ ผลของกลีเซอรอล และการเกิด Hydrolytic degradation ของ PBS มากกว่าผลของปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเติมสารช่วยผสม ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้น เนื่องจากตัวริเริ่มที่ใช้เป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) สามารถเกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง เมื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาโมเลกุลนั้นๆ จะสูญเสียอิเล็กตรอนของมันเอง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กลายเป็น Free radical ตัวใหม่ กลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) เป็นผลให้เกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) เป็นหลัก ทำให้ตัวพอลิเมอร์มีความหนืดลดลง [47]

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่าง	ดัชนีการหลอมไหล (MFI) (g/10 min) (190 °C, 2.16 kg)
PBS	1.5±0.5
PBS <sub>ผ่านสกรู 1 รอบ</sub>	3.4±0.2
P7E3G20	7.1±0.5
P7E3G30	8.3±0.3
P7E3G40	9.9±0.3
P7P3G20	15.3±0.2
P7P3G30	18.2±0.2
P7P3G40	23.4±0.2
P6E4G20	5.4±0.5
P6E4G30	6.1±0.3
P6E4G40	8.5±0.3
P6P4G20	11.5±0.2
P6P4G30	14.0±0.2
P6P4G40	15.9±0.2
P7E3G40/MA1	18.2±0.2

### 4.3 การเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

จากการทดลองผสมสูตรโดยใช้อัตราส่วนดังตารางที่ 4.1 แล้วนำไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม สามารถแสดงอัตราส่วนต่างๆ ที่เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม, พลาสติกไซเซออร์ และสารช่วยผสม แสดงผลในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้

สูตร	PBS (g)	EMS (g)	PGS (g)	%Glycerol (base on starch	MA % of PBS	เป่าขึ้นรูป		ความ หนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
						ได้	ไม่ได้	
PBS	100	-	-	-	-	/		30-35
P7E3G20	70	30	-	20	-	/		170-190
P7E3G30	70	30	-	30	-	/		160-170
P7E3G40	70	30	-	40	-	/		150-160
P7P3G20	70	-	30	20	-		/	-
P7P3G30	70	-	30	30	-	/		290-300
P7P3G40	70	-	30	40	-	/		270-280
P6E4G20	60	40	-	20	-		/	-
P6E4G30	60	40	-	30	-	/		190-200
P6E4G40	60	40	-	40	-	/		170-180
P6P4G20	60	-	40	20	-		/	-
P6P4G30	60	-	40	30	-		/	-
P6P4G40	60	-	40	40	-	/		320-350
P7E3G40/MA0.5	70	30	-	40	0.5		/	-
P7E3G40/MA1	70	30	-	40	1.0	/		110-120
P7E3G40/MA1.5	70	30	-	40	1.5		/	-

จากตารางที่ 4.3 สามารถสรุปอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ คือ PBS/EMS ที่อัตราส่วน 70/30 โดยเติมกลีเซอรอลเป็น 20, 30 และ 40% ของปริมาณแป้ง โดยพบว่า ถ้าใส่กลีเซอรอลที่ 20% ของปริมาณแป้ง เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่ไม่คีนึก เนื่องจากมีอนุภาคของแป้งกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนบนผิวฟิล์มอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ฟิล์มเป็นรู และขาดได้ แต่ถ้าใส่มากเกินไป

กว่า 40% ของปริมาณแข็ง จากผลค้ำชันการหลอมไหล พบว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าค้ำชันการหลอมไหลที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) ทำให้พอลิเมอร์ผสมไหลได้มากขึ้น เหลวมากกว่าที่กลีเซอรอล 40% ของปริมาณแข็ง ส่งผลให้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มไม่ได้ หรืออาจจะขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่ฟิล์มที่ได้อาจมีลักษณะอ่อนนุ่ม พื้นผิวมีลักษณะเหนียวติด (Sticky) มีสีเหลืองเข้มกว่าปกติ คาดว่าเกิดจากการใช้กลีเซอรอลมากเกินไปทำให้มีกลีเซอรอลอิสระแพร่ออกจากวัสดุ (Bleeding) และที่อัตราส่วนของ PBS/PGS ที่ 70/30 โดยเติมกลีเซอรอลเป็น 30 และ 40% ของปริมาณแข็ง สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่พบว่าฟิล์มที่ได้มีเม็ดแข็งกระจุกตัวอย่างชัดเจนที่ผิวของฟิล์ม ซึ่งขนาดของเม็ดแข็ง PGS ที่ปรากฏที่ผิวของฟิล์มมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเม็ดแข็ง EMS ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลสัณฐานวิทยา ส่วนที่อัตราส่วน 60/40 สามารถขึ้นรูปได้ในบางสูตร คาดว่าเนื่องจากใช้แข็งสตาร์ชปริมาณมาก ทำให้ส่วนเมทริกซ์ (Matrix) คือ PBS มีสัดส่วนที่น้อยลงเทียบกับสัดส่วนแข็งสตาร์ช ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคกระจาย (Dispersed phase) ทำให้แข็งกระจายตัวได้ไม่ดีนัก เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หรืออาจเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ PBS กับแข็งสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การยึดเกาะระหว่าง PBS และแข็งสตาร์ชลดลง ซึ่งจาก 2 สาเหตุที่กล่าวมาล้วนส่งผลให้มีตำหนิ (Defect) ในฟิล์ม ซึ่งสามารถดูได้จากผลสมบัติเชิงกล อีกทั้งค่าค้ำชันการหลอมไหลยังมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปเนื่องมาจากถ้ามีค่าค้ำชันการหลอมไหลที่สูง พอลิเมอร์ผสมก็จะไหลได้ง่าย และเร็ว ทำให้เกิดการหดตัวที่หัวคาย ไม่สามารถที่ฟอร์มตัวเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แต่ถ้ามีค่าค้ำชันการหลอมไหลที่ต่ำ ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูง เคลื่อนที่ได้ยาก อีกทั้งพบว่าแข็งสตาร์ชจะกระจายตัวไม่ดีนัก เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแข็งสตาร์ช เมื่อให้แรงตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ฟิล์มที่ได้จะเป็นรู และแตก ซึ่งเป็นผลมาจากเม็ดแข็ง ส่งผลให้ไม่สามารถที่จะเป่าฟิล์ม และไม่สามารถที่จะเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะควบคุมอัตราส่วนของ PBS กับ แข็งสตาร์ช ที่ 70:30 ปริมาณกลีเซอรอลคงที่ที่ 40% ของปริมาณแข็ง

เมื่อทำการเติมสารช่วยผสมที่ 0.5 และ 1.5% ของพอลิเมอร์ ไม่สามารถที่จะเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมหลอมเหลวมาก เมื่อนำไปขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมเกิดการหดตัวที่หัวคายส่งผลให้ไม่สามารถฟอร์มตัว และขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณสารช่วยผสม 1% ของพอลิเมอร์ สามารถที่จะเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ และผลการทดลองที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัย [30, 47] ดังนั้นในงานวิจัยนี้การศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมจะเติมสารช่วยผสมในปริมาณ 1% ของพอลิเมอร์

อีกทั้งความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ พบว่า PBS/EMS มีความหนาน้อยกว่า PBS/PGS เนื่องมาจาก PBS สามารถที่จะผสมเข้ากันได้ดีกับ EMS ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลสัณฐานวิทยา อีกทั้งเมื่อเติมปริมาณพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล 20-40% โดยน้ำหนักเทียบกับแข็ง) สูงขึ้น พบว่า

ฟิล์มที่มีความหนาลดลง หรือบางมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการเติมพลาสติกไซเซออร์ จะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยมีการในแรงทั้งในแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัว ทั้ง 2 ทิศทาง ได้ดี ส่งผลให้สามารถแบ่งฟิล์มได้มากขึ้นจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้บางขึ้น แต่เมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากอนุภาคของเม็ดแป้งกระจายตัวไม่ดี เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน อีกทั้งความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่าง PBS และแป้งสตาร์ช ส่งผลให้ผิวของฟิล์มที่ได้มีความขรุขระ อย่างไรก็ตามก็ตีความในการเป่าขึ้นรูปที่แตกต่างกันไปจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มที่ได้ คือ PBS/PGS ต้องใช้อัตราเร็วในการดึง (Take-off speed) ที่ต่ำ เพื่อจะค่อยๆ คึงฟิล์มให้สามารถฟอร์มตัวขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ อีกทั้งอัตราการเบ่ง (Blow-up ratio) ต่ำ ดังนั้นฟิล์มที่ได้จะมีความหนาที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณี PBS/EMS จะใช้อัตราเร็วในการดึงที่สูงกว่า และสามารถเบ่ง (Blow-up ratio) มากกว่าจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาน้อยกว่า

#### 4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกล

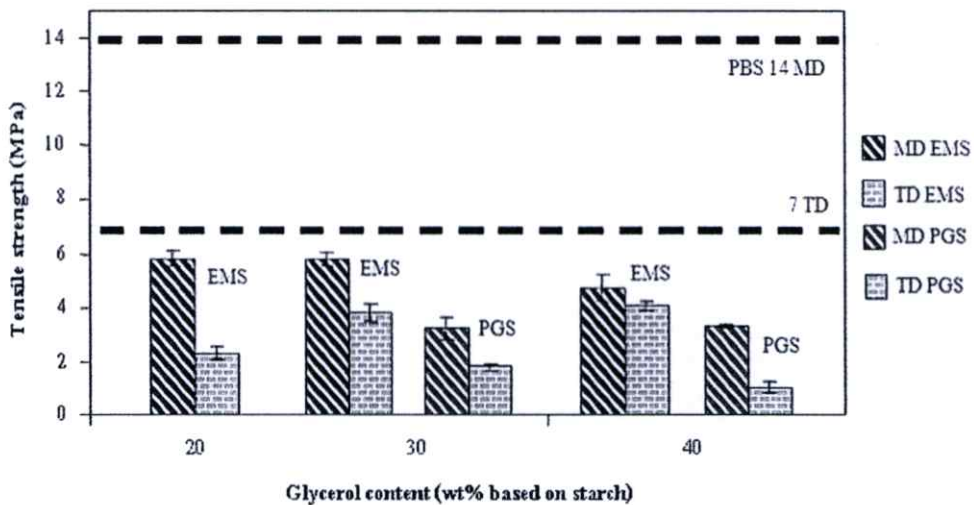
การศึกษาสมบัติเชิงกล โดยเครื่อง Universal testing machine เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ ได้แก่ EMS และ PGS โดยใช้ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ คือ กลีเซอรอลเป็น 20, 30 และ 40% ของแป้งสตาร์ช

จากรูปที่ 4.6-4.9 เมื่อมีการผสมแป้งสตาร์ชลงไปใน PBS ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจากอนุภาคแป้งสตาร์ชจะแทรกตัวอยู่ระหว่าง PBS เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียหาย นอกจากนี้ การที่เติมแป้งสตาร์ชผสมพลาสติกไซเซออร์อาจทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึก PBS ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (ซึ่งแสดงดังภาคผนวก ข. ตาราง ข-20)

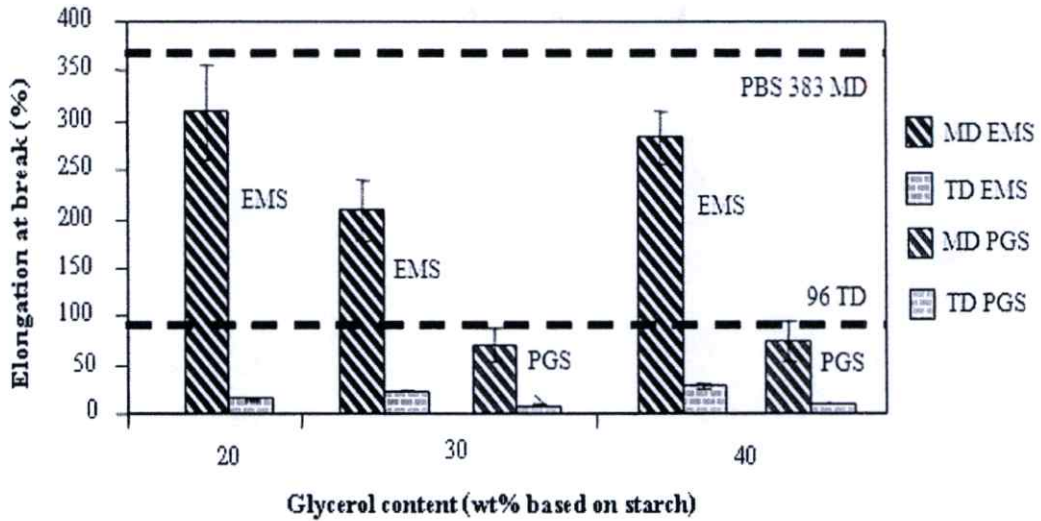
การเติมกลีเซอรอลลงไป พบว่าทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องมาจากผลของ Plasticizing effect ที่ทำให้ความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังลดลง เพราะสายโซ่พอลิเมอร์หลุดออกจากกันได้ง่ายมากขึ้น (Disentanglement) เนื่องมาจากพลาสติกไซเซออร์ไปแทรกกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โดยค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จะแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการเติมกลีเซอรอลยังทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ได้ดีกับแป้ง รวมทั้ง PBS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความนิ่มเพิ่มมากขึ้น โดย PBS/EMS สูตร

70/30 กลีเซอรอล 40% ของแป้งสาร์ช มีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียง หรือน้อยลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ แต่ที่กลีเซอรอล 40% นี้ สามารถที่จะขึ้นรูปได้ง่ายกว่า

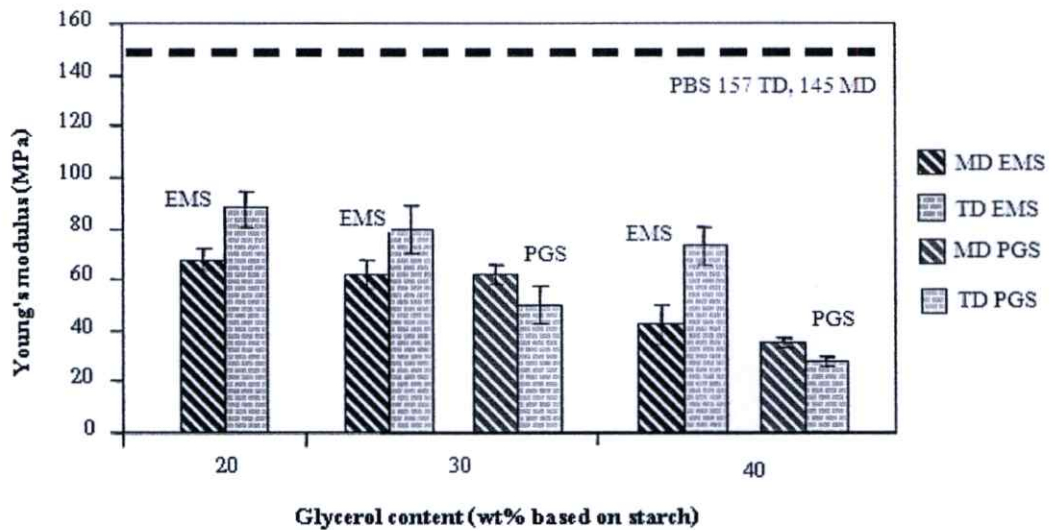
เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสาร์ช คือ EMS กับ PGS ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว EMS มีค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด โมดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดที่ดีกว่า ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยา เนื่องจาก EMS เป็นแป้งสาร์ชที่มีลักษณะเป็นเม็ดแป้งเมื่อเติมลงไปจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นสารตัวเติม (Filler) สามารถเข้ากับ PBS ได้ดี ส่วน PGS เป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการพรีเจลาตินในเซชัน (Pregelatinization) ทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเม็ดแป้งแตกออกในกระบวนการผลิตแป้ง ดังรูปที่ 2.19 ผนังเม็ดแป้งหายไป เหลือแต่สายโซ่อะไมโลส และอะไมโลเพกติน เมื่อทำการผสม PBS กับ PGS จึงเกิดสัณฐานวิทยาคล้ายพอลิเมอร์ผสม (Blends) คาดว่า เนื่องจากการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ต่ำ เป็นของผสมแบบเข้ากันไม่ได้ (Immiscible blend) ส่งผลทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินออกจาก PBS อย่างชัดเจน เป็นจุดเริ่มต้นของการเสียดสภาพ และจากผลการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) จะเห็นว่า PBS ที่ผสม EMS (รูปที่ 4.3 (A) และ (B)) มีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคน้อยกว่า PBS ที่ผสม PGS (รูปที่ 4.4 (A) และ (B))



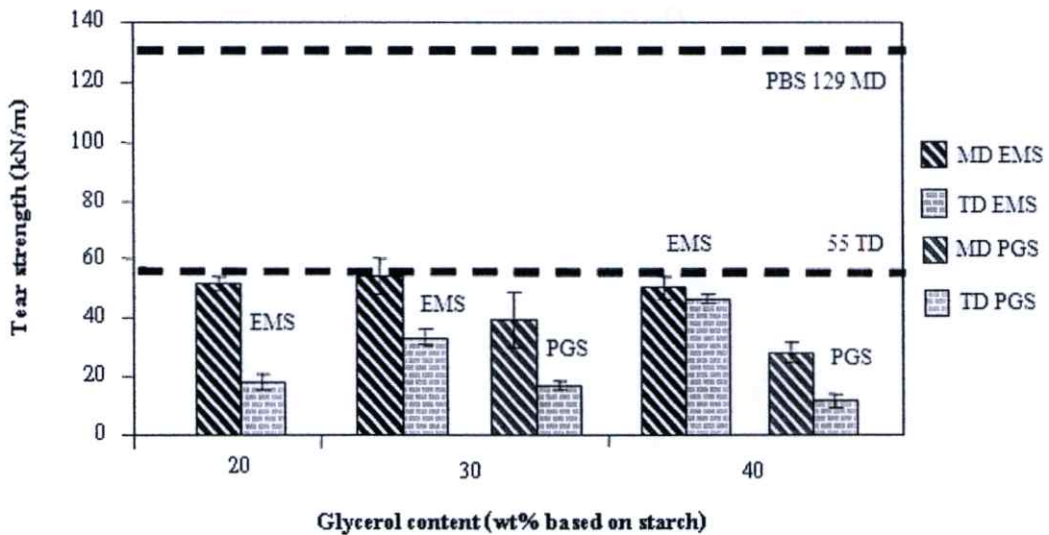
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ

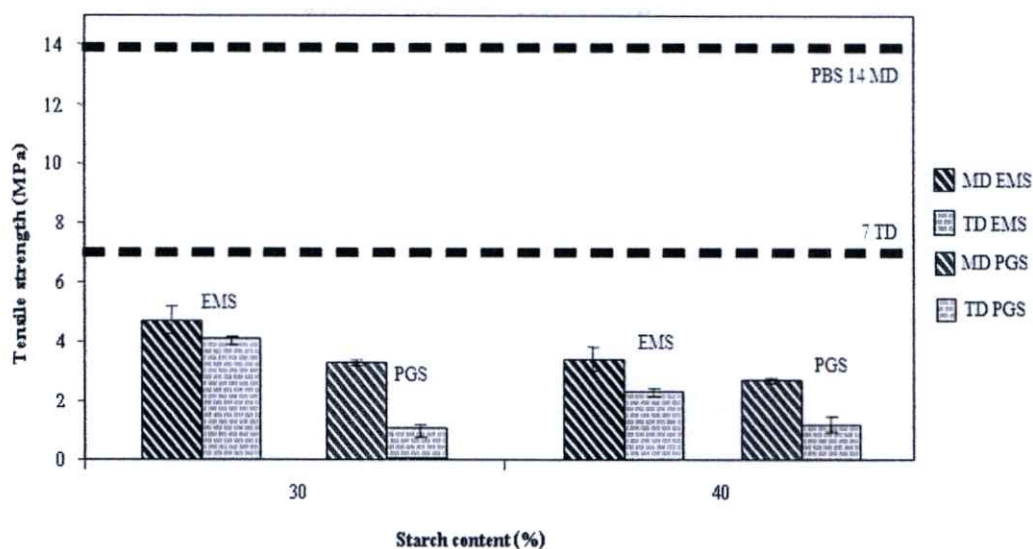


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของแข็งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ

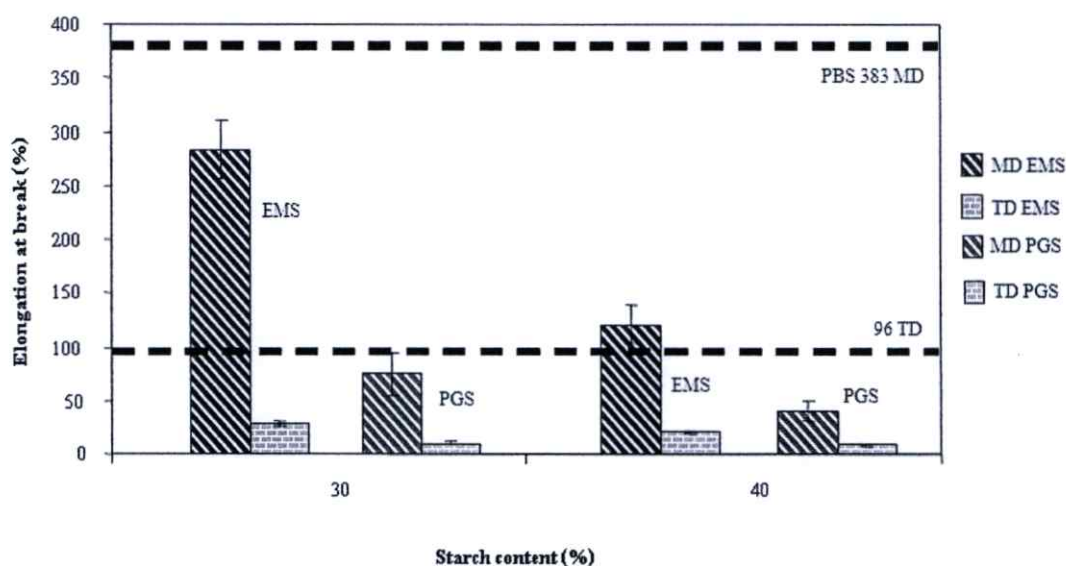


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ

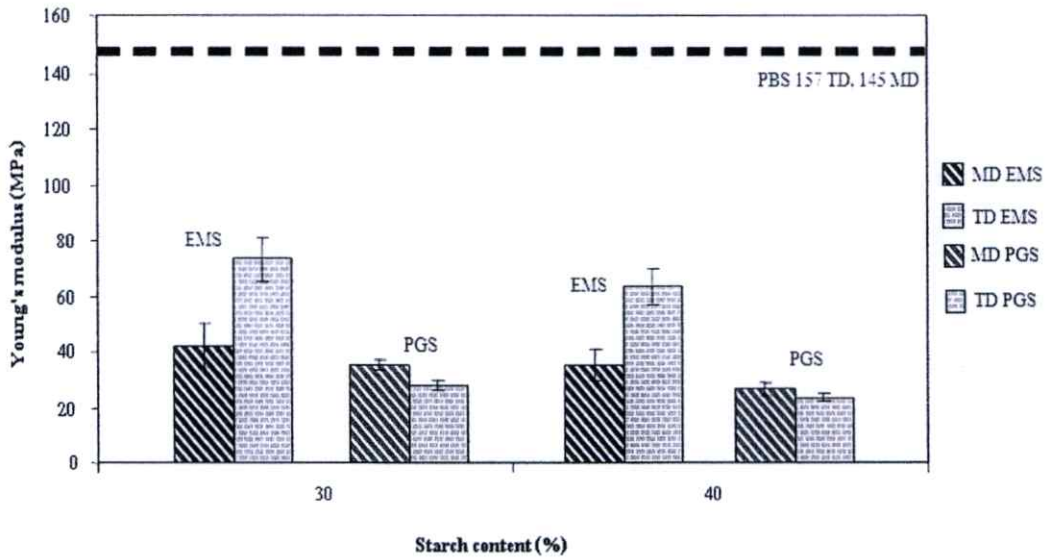
จากรูปที่ 4.10-4.13 เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ชลงไป ใน PBS ค่าความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด ค่ามอดูลัสของยัง และความแข็งแรงลักษณะลดลง เนื่องจากอนุภาคแป้งสตาร์ชจะแทรกตัวอยู่ระหว่าง PBS เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค ผลคือ ถ้าปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น รอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์กับแป้งสตาร์ชก็มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียหาย นอกจากนี้ การที่เติมแป้งสตาร์ชลงไปอาจทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณแป้งสตาร์ช ยังเป็นการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) เนื่องจากในการวิจัยนี้ทำการควบคุมปริมาณกลีเซอรอล เป็นสัดส่วน โดยน้ำหนักเทียบกับแป้ง ดังนั้นเมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มขึ้น ก็ต้องเติมปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถ้าเติมปริมาณกลีเซอรอลที่น้อยเกินไป ไม่เหมาะสมกับปริมาณของแป้งสตาร์ช ก็จะส่งผลให้แป้งสตาร์ชมีการกระจายตัวที่ไม่ดี รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน สมบัติเชิงกลจึงมีค่าที่ลดลง



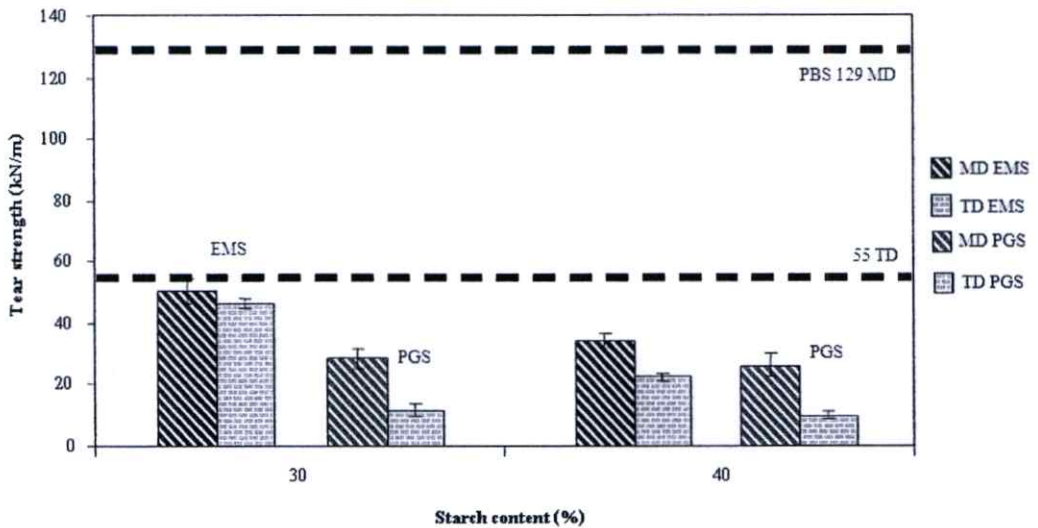
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง



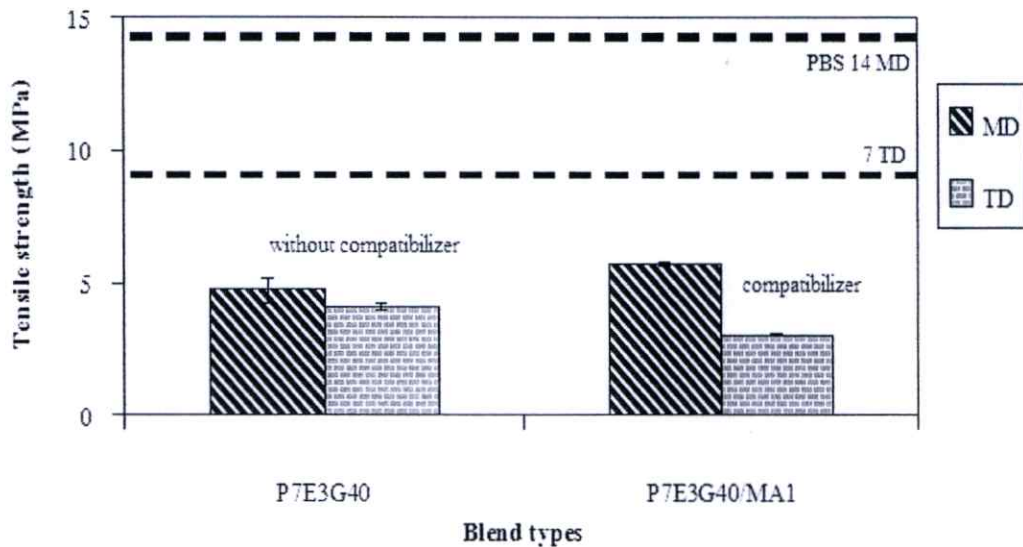
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง



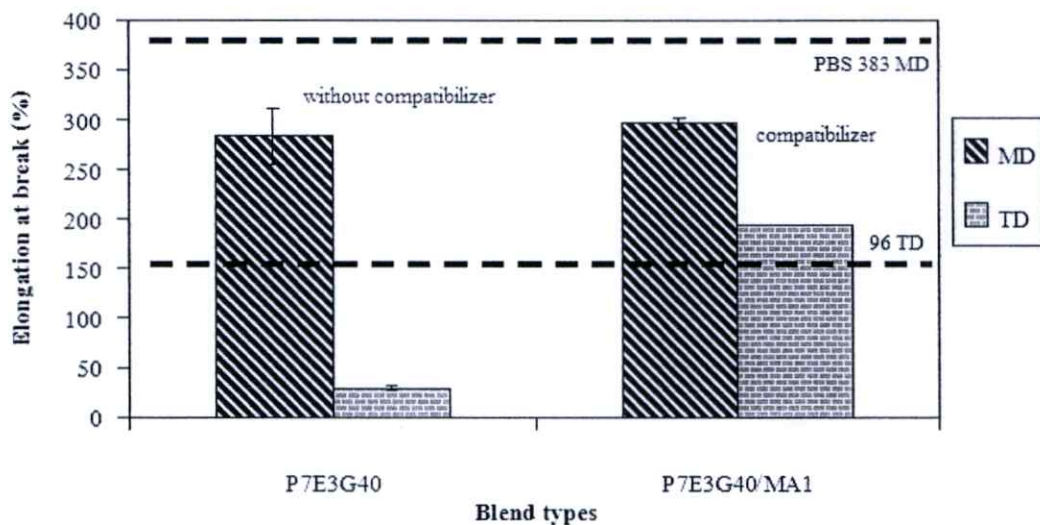
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/EMS และ PBS/PGS ที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 40% ของแป้ง

จากรูปที่ 4.14-4.17 เมื่อมีการเติมสารช่วยผสม (MA-g-PBS) ลงไปในพอลิเมอร์ผสม PBS/EMS ที่ 70/30 ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซนต์การยืด ฉุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการเติมสารช่วยผสมลงไปทำให้การยึดเกาะ ระหว่างวัฏภาคดีขึ้น เข้ากันได้ดี จึงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีค่ามอดุลัสของยังลดลง อาจเนื่องมาจากการเติม

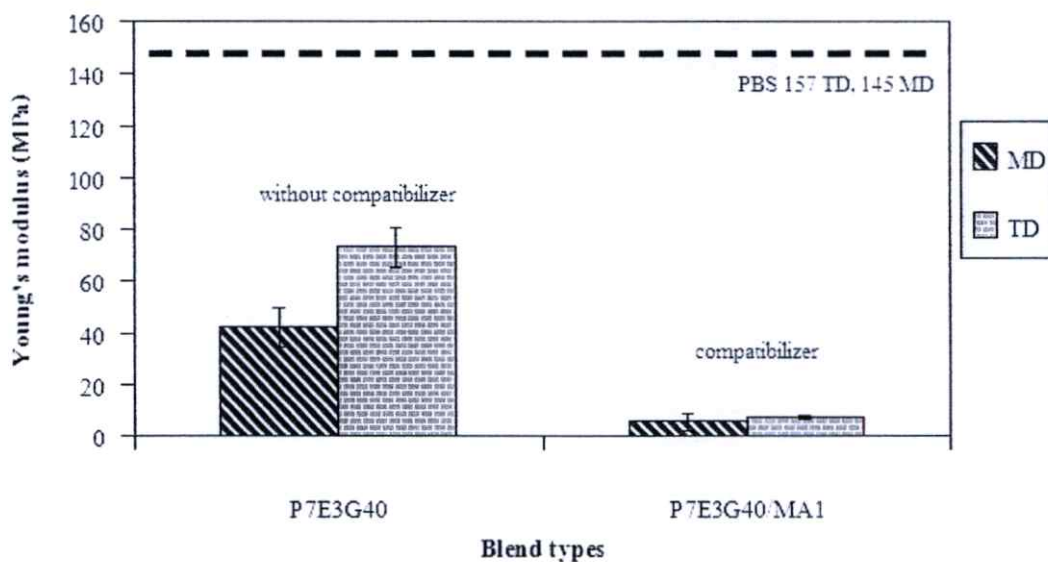
สารช่วยผสม ใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์ ทำให้แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งอาจเกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาการขาดออกของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) ทำให้เกิดการแตกหัก ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง [47] หรือคาดว่าอาจเกิดเนื่องมาจาก PBS ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดความชื้นได้ดี ก็อาจเกิดการเสื่อมสลาย (Hydrolytic degradation) จึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความนิ่ม ซึ่งตรงจุดนี้สามารถอาจส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง



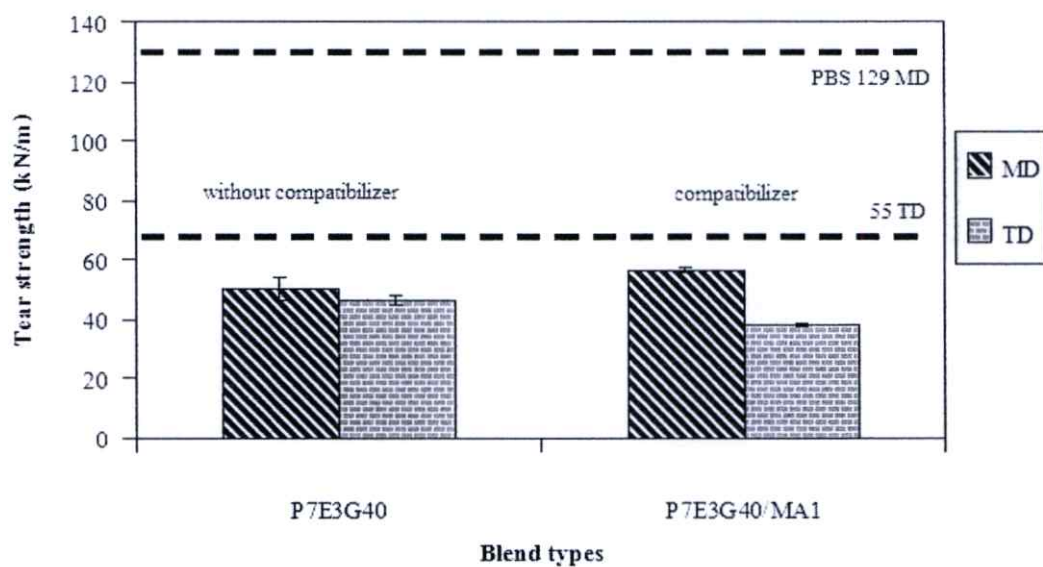
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของสูตรพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของสูตรพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของสูตรพอลิเมอร์ผสม

## ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม

จากตอนที่ 1 เป็นการเตรียมตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS ผสมแป้งสตาร์ชดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) และแป้งดัดแปรพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) โดยใช้เครื่องในห้องปฏิบัติการขนาดเล็ก (เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) รุ่น Polydrive with Rheomex R252 บริษัท Hakke Co., Ltd. ต่อกับเครื่องเป่า (Blown-film unit) บริษัท Lab Tech Engineering Co., Ltd. ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวคาย (Die diameter) 50 mm มีอัตราส่วนเป่าฟิล์ม (Blow-up ratio) ค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 2 เท่า) ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาค่อนข้างมาก คือ PBS/EMS ประมาณ 150-200 ไมครอน และ PBS/PGS ประมาณ 270-350 ไมครอน และความแข็งแรงในแนว TD ต่ำกว่าที่ควรเป็นในการผลิตจริง

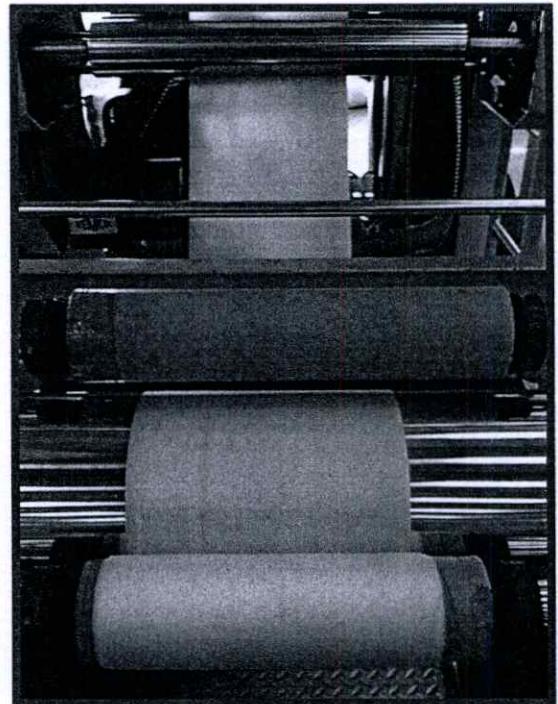
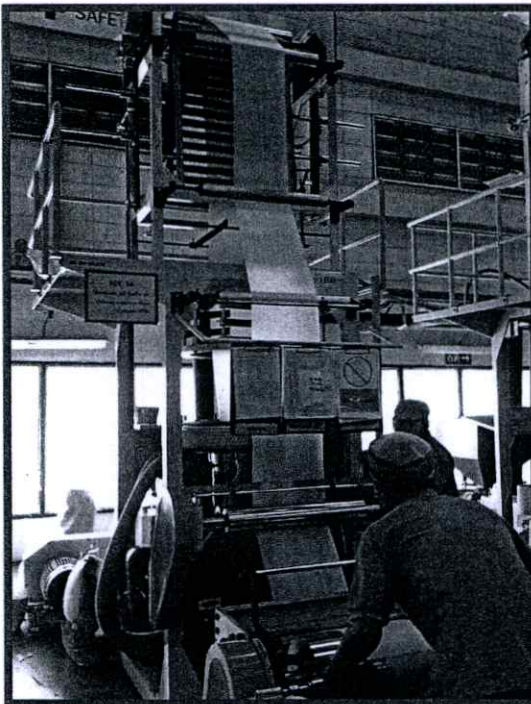
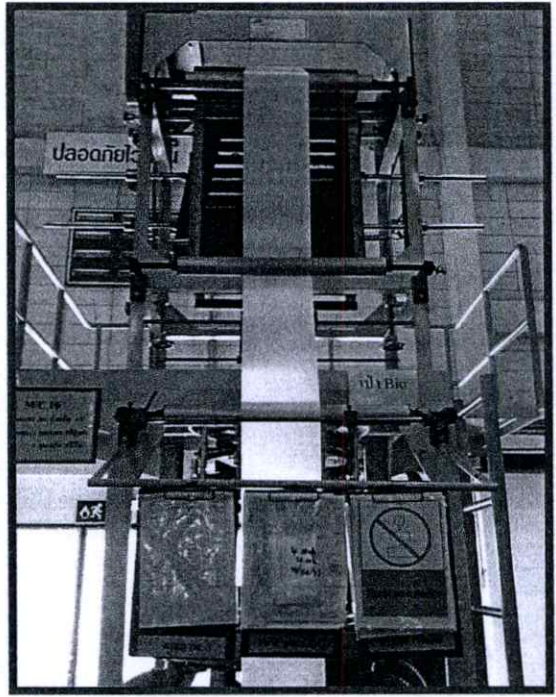
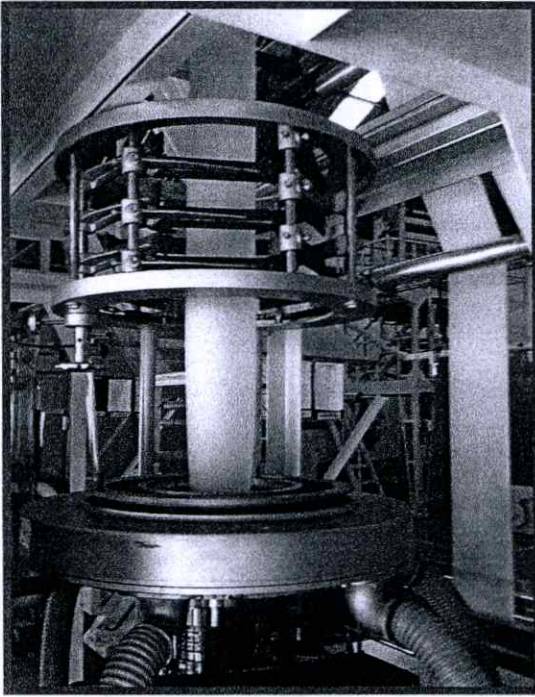
ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 นี้ จึงทำการคัดเลือกสูตรผสม โดยดูจากสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล ซึ่งได้ทำการคัดเลือกมา 2 สูตร ได้แก่ P7E3G40, P7E3G40/MA1 และทำการศึกษาแป้งอีกหนึ่งชนิด คือ แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) ซึ่งสาเหตุที่เลือกแป้งชนิดนี้เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมา และสมมุติฐานที่ว่า แป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้โครงสร้างมีขั้วสูง (High polarity) และมีความสามารถในการดูดซับน้ำ (Hydrophilicity) อย่างมาก ซึ่งเป็นอุปสรรคในการขึ้นรูปวัสดุผสมที่อุณหภูมิสูง และทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติไม่ดี เช่น

1. น้ำที่กำจัดไม่หมดก่อนการขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มที่อุณหภูมิสูง จะกลายเป็นฟองอากาศปกคลุมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เหลว ขณะเป่าขึ้นรูปฟิล์มทำให้ไม่สามารถเบ่งเพื่อเพิ่มขนาด (Bubble) ฟิล์มได้เกิดเป็นรอยตำหนิ (Defect) ซึ่งรอยตำหนิทำให้ฟิล์มที่เป่าได้มีสมบัติเชิงกลของฟิล์มต่ำ การซึมผ่านน้ำและก๊าซสูง

2. ฟิล์มที่เตรียมได้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงมาก อาจเป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน เช่น ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงเพาะชำ ฟิล์มห่อผัก และผลไม้ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อน้ำหรือชอบน้ำ

3. การดูดซับน้ำมากจะช่วยเร่งการย่อยสลายของฟิล์มที่เตรียมได้ ทำให้เกิดการสลายตัวเร็วเกินไปในการใช้งานบางประเภท เช่น ถุงเพาะชำ ฟิล์มคลุมดิน ฯลฯ

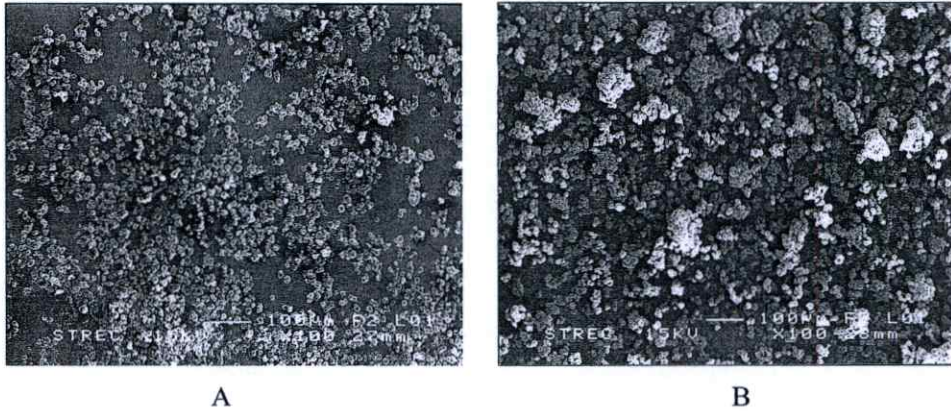
จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงได้เลือกแป้งไฮโดรโฟบิก เนื่องจากเป็นแป้งที่มีการปรับปรุงสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น หรือมีความมีขั้วลดลง ทั้งนี้คาดหวังว่าแป้งไฮโดรโฟบิกจะสามารถเข้ากันได้ดีกับ PBS มากกว่าแป้งสตาร์ชที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1 โดยเลือกสูตรผสมมา 2 สูตร ได้แก่ P7H3G40 และ P7H3G40/MA1 แล้วนำมาเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวคาย (Die diameter) 120 mm ที่บริษัททานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) ดังรูปที่ 4.18



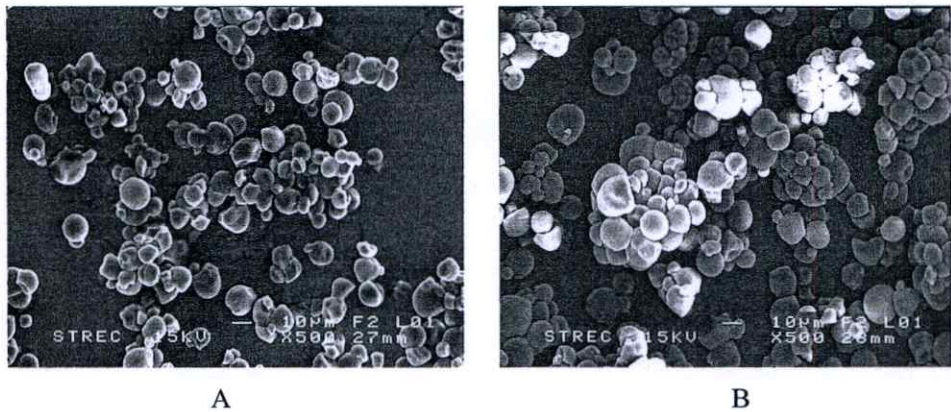
รูปที่ 4.18 ภาพแสดงการขึ้นรูปที่บริษัททวนตะวันออกอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน)

#### 4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของ PBS กับแป้งสตาร์ชชนิดต่างๆ คือ EMS และ HBS สามารถศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.19-4.20 เป็นสัณฐานวิทยาของ EMS กับ HBS จะเห็นได้ว่าแป้งทั้งสองชนิดมีรูปร่างเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีอนุภาคขนาดเล็ก  $11 \pm 3$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) และ  $12 \pm 4$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS ที่กำลังขยาย 100X

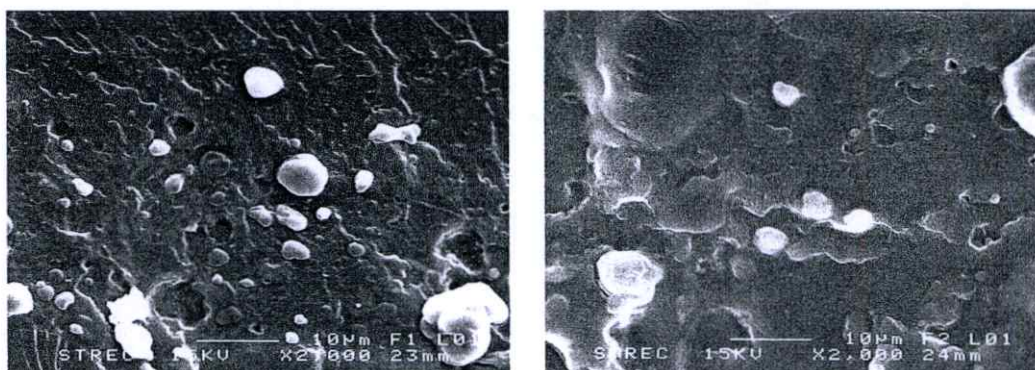


รูปที่ 4.20 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS ที่กำลังขยาย 500X

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBS ที่เติม EMS และ HBS ในส่วนภาคตัดขวางฟิล์ม ผ่านการหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ดังรูปที่ 4.21 (A) และ 4.22 (A) จะเห็นว่า PBS/HBS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า โดยพบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่าง PBS กับ HBS ลดลง และมีการยึดเกาะ (Interfacial adhesion) ระหว่างเม็ดแป้งสตาร์ช กับ PBS ที่ดีกว่า PBS/EMS ส่วนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.23 (A)-4.26 (A) เมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวฟิล์มที่ผสม EMS กับ HBS ที่อัตราส่วนเท่ากัน พบว่า PBS/HBS มีพื้นผิวฟิล์มเรียบกว่า PBS/EMS เนื่องจากกระบวนการผลิต HBS มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำ

หรือลดความมีความมีขั้วลง ทำให้สามารถเข้ากับ PBS ได้ดีมากกว่า ส่วน EMS เป็นแป้งที่ดัดแปรทางเคมี พื้นผิวของอนุภาคเม็ดแป้ง EMS ยังคงมีลักษณะวิทยาเหมือนเดิม จึงทำให้เข้ากันได้ไม่ดัดแปลงผลให้เห็นเป็นเม็ดแป้งได้ชัดเจนกว่า

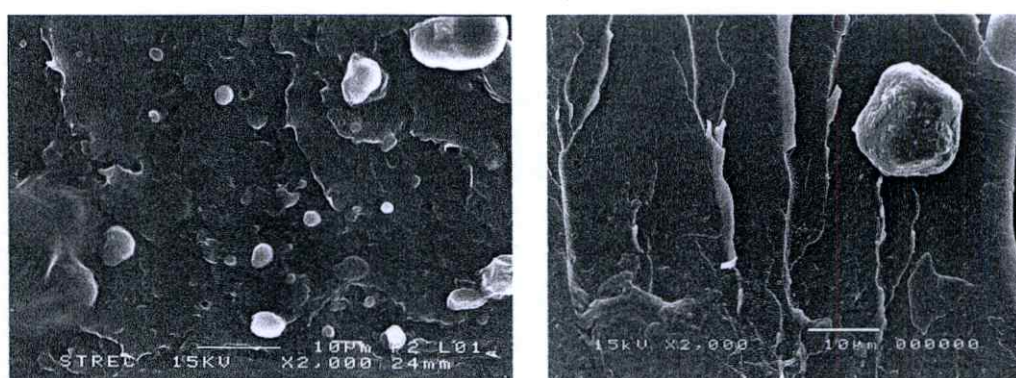
เมื่อเติมสารช่วยผสมที่อัตราส่วนเท่ากันของทั้งสองแป้ง ในส่วนภาคตัดขวางฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.21-4.22 พบว่ามีรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชทั้งสองชนิดลดลง และมีการยึดเกาะระหว่างเม็ดแป้งสตาร์ชกับ PBS ที่ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม เพราะการเติมสารช่วยผสม จะช่วยให้แป้ง และ PBS สามารถเข้ากันได้มากขึ้น ส่วนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.23-4.26 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่ามีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้น และไม่พบเม็ดแป้งออกมาที่ผิว



A

B

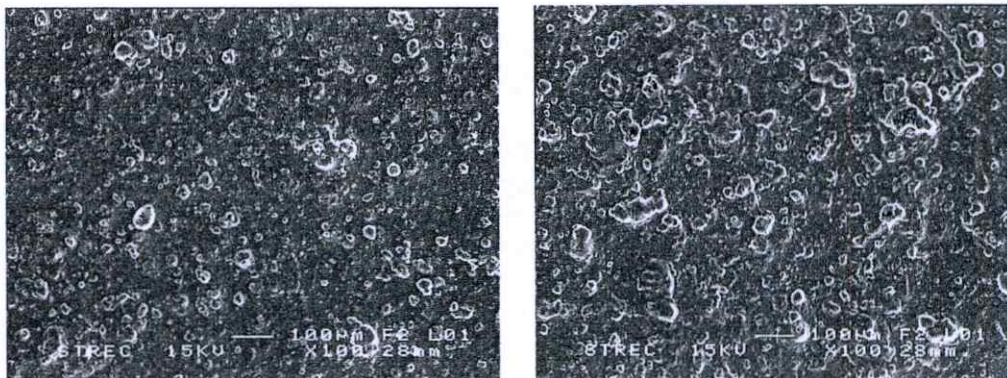
รูปที่ 4.21 SEM แสดงลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X



A

B

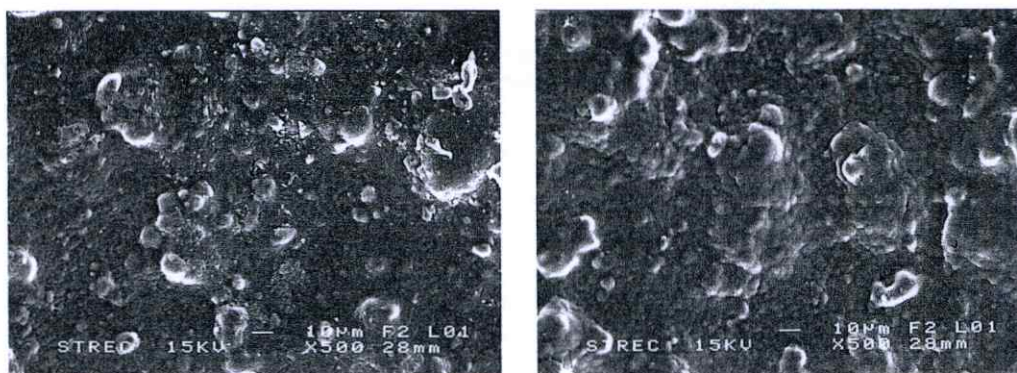
รูปที่ 4.22 SEM แสดงลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X



A

B

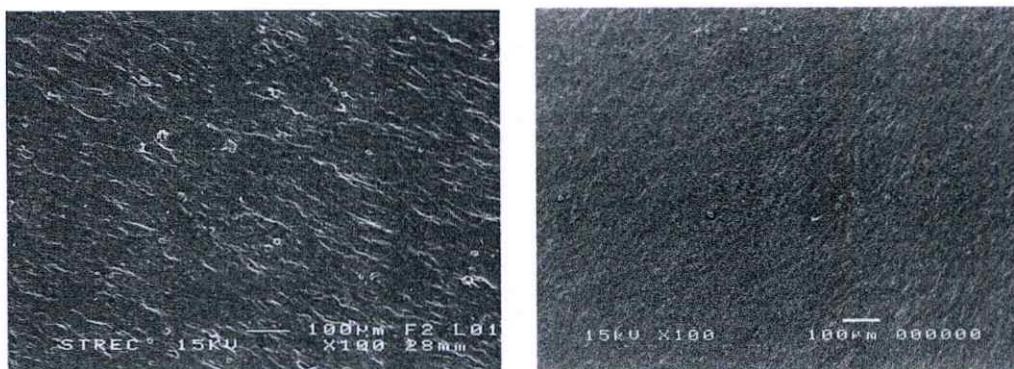
รูปที่ 4.23 SEM แสดงลักษณะวิทยาพื้นผิวของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 100X



A

B

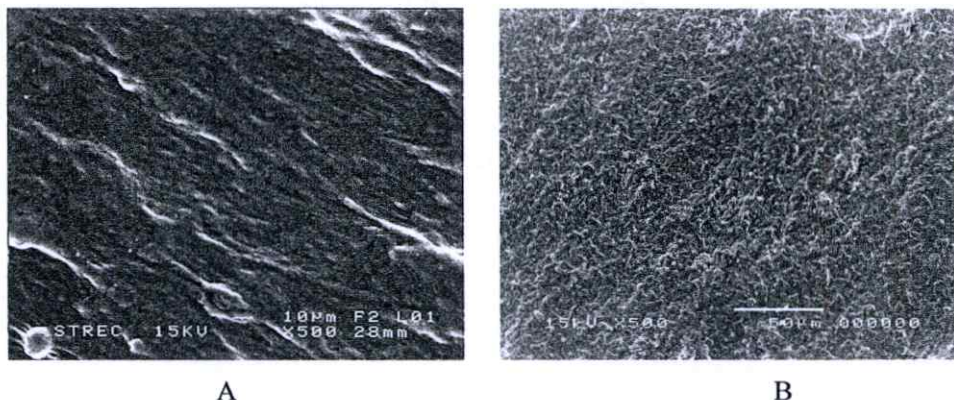
รูปที่ 4.24 SEM แสดงลักษณะวิทยาพื้นผิวของ PBS/EMS สูตร 70/30 (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 500X



A

B

รูปที่ 4.25 SEM แสดงลักษณะวิทยาพื้นผิวของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.26 SEM แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ PBS/HBS สูตร 70/30 (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 500X

#### 4.6 การศึกษาดัชนีการหลอมไหล

จากการวัดดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 4 สูตร พบว่า PBS ที่เติมแป้งสตาร์ชลงไป ส่งผลให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมากขึ้น เนื่องจากแป้งสตาร์ชที่เติมมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้มีความชอบน้ำ ส่งผลให้ดูความชื้น เมื่อโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลจะไปตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ให้สั้นลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลได้ง่าย อีกทั้งอาจเกิดเนื่องมาจากการเกิดไฮโดรไลซิสของ PBS เมื่อผ่านสกรู จึงเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่สูงขึ้น เมื่อเติมสารช่วยผสมลงไปส่งผลให้ดัชนีการหลอมไหลเพิ่มมากขึ้น อาจเพราะตัวริเริ่มที่ใช้เป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) สามารถเกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ได้ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ (Scission) ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สั้นลง พอลิเมอร์มีความหนืดลดลง จึงสามารถไหลได้ง่ายขึ้น [47] อย่างไรก็ตามค่าดัชนีการหลอมไหลที่ได้จากตอนที่ 2 มีค่ามากกว่าตอนที่ 1 อาจเนื่องมาจากผลของเครื่องผสม ซึ่งได้ทำการผสมในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นขนาด และความยาวของสกรูจึงแตกต่างกัน ทำให้ระยะเวลาที่พอลิเมอร์ผสมอยู่ในสกรูนานกว่า มีอัตราการเฉือน (Shear rate) ที่สูงกว่า ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มากขึ้น สามารถไหล และเคลื่อนที่ได้ดี

ตารางที่ 4.4 ค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่าง	ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min) (190 °C, 2.16 kg)
P7E4G40	18.5±0.3
P7E3G40/MA1	31.6±0.2
P7H3G40	28.4±0.2
P7H3G40/MA1	30.2±0.2

#### 4.7 ความหนาของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

จากการวัดความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้ พบว่าเมื่อทำการเติมแป้งใน PBS ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคของแป้งจะไปแทรกกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โดยความหนาของฟิล์มที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ระหว่าง PBS และแป้งสตาร์ช ซึ่งพบว่า PBS/HBS มีความหนาลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PBS/EMS เนื่องมาจาก PBS สามารถที่จะผสมเข้ากันได้ดีกับ HBS สามารถเพิ่มการเป่า (เบ่ง) ให้ฟิล์มมีความบางโดยไม่ขาด จึงส่งผลให้แป้งกระจายตัวได้ดี เมื่อเติมสารช่วยผสม พบว่ามีความหนาลดลง โดยสูตร P7H3G40/MA1 จะมีความหนาน้อยที่สุด เนื่องจากสารช่วยผสมที่เติมลงไป ทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่าง PBS กับแป้ง ทำให้ PBS กับแป้ง มีความเข้ากันได้ แป้งสตาร์ชการกระจายตัวได้ดีใน PBS ดังนั้นเวลาทำการเป่าขึ้นรูปส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลสัณฐานวิทยา) เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้บางมากขึ้น

สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปในแต่ละสูตรจะแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มที่ได้ด้วยกัน กล่าวคือ PBS/HBS สามารถที่จะเป่าเป็นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า เนื่องจากการเบ่งและอัตราเร็วในการดึงที่มากกว่าจึงทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น โดยเปรียบเทียบกับ PBS/EMS ซึ่งจะเบ่งได้น้อยกว่า และอัตราเร็วในการดึงจะต่ำกว่า ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนามากกว่า

ตารางที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มที่ผลิตได้

ตัวอย่าง	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
PBS	16-18
P7E4G40	115-120
P7E3G40/MA1	100-115
P7H3G40	50-60
P7H3G40/MA1	40-50

## 4.8 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

### 4.8.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า  $T_m$  ของ PBS ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแป้งสตาร์ชทั้งสองชนิดลงไป แสดงว่าแป้งสตาร์ชไม่มีผลต่อคุณสมบัติ และขนาดผลึกของพอลิเมอร์ นอกจากนี้พบว่า PBS ที่เติมแป้งสตาร์ชมีค่าองศาความเป็นผลึกน้อยกว่า PBS ที่ไม่ได้เติมแป้ง เนื่องจากเม็ดแป้งที่เติมเข้าไปเป็นสารตัวเติม (Filler) ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูป (Conformation) เป็นโครงผลึกได้ยากขึ้น อีกทั้งอนุภาคแป้งจะไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งอนุภาคของแป้งนั้นจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมแป้งลดลง ซึ่งพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS มีค่าองศาความเป็นผลึกมากกว่าพอลิเมอร์ผสม PBS/EMS เนื่องจากอนุภาคของแป้งสตาร์ชไฮโดรโฟบิก มีความเข้ากันกับ PBS ได้มากกว่า จึงสามารถผลิตเป็นฟิล์มโดยการเป่าด้วยการเบ่ง หรือเพิ่มขนาดของฟิล์มที่ออกจากหัวคายให้มีขนาดใหญ่โดยไม่แตก (สังเกตได้จากฟิล์ม PBS/HBS มีความหนาน้อยกว่าฟิล์ม PBS/EMS) ทำให้ได้ฟิล์มที่มีการเรียงตัวที่มากกว่าเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกมากกว่า แป้งสตาร์ชไฮโดรโฟบิกมีการกระจายตัวในวัฏภาคของพอลิเมอร์ได้ดี

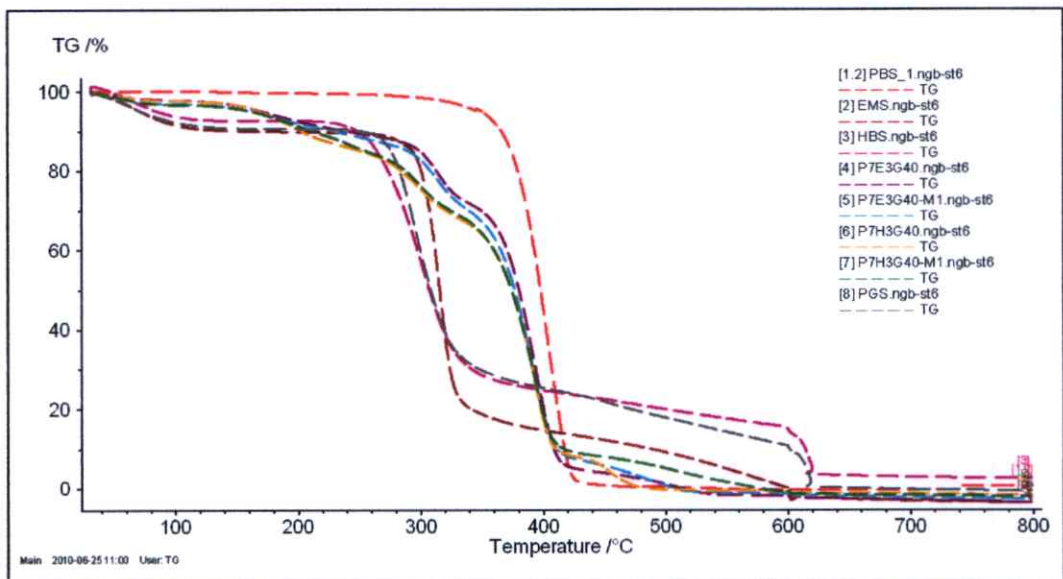
อย่างไรก็ตามค่า %Crystallinity ของ PBS เพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสมที่เติมลงไปทำให้ PBS กับแป้งสตาร์ชเข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ความเป็นผลึกจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC

ตัวอย่าง	$T_m$ (°C)	%Crystallinity
PBS	93.1	18.8
P7E4G40	92.0	21.7
P7E3G40/MA1	93.4	24.9
P7H3G40	93.4	23.4
P7H3G40/MA1	93.6	26.5

#### 4.8.2 Thermogravimetric analysis (TGA)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Decomposition temperature ; $T_d$ ) ของพอลิเมอร์ผสม แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ PBS, EMS และ HBS คือ 375, 301 และ 260 °C ตามลำดับ จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของ PBS/แป้งสตาร์ช เมื่อได้รับความร้อนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 3 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของน้ำในช่วงอุณหภูมิก่อน 100 °C พบว่าแป้งสตาร์ชมีปริมาณความชื้นประมาณ 7-10% ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของแป้งสตาร์ชในช่วงอุณหภูมิประมาณ 260-301 °C และช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ PBS ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 368-371 °C จากเทอร์โมแกรม แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ PBS/แป้งสตาร์ช เนื่องจาก PBS กับแป้งสตาร์ชไม่ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) และทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.27 TGA thermogram ของ PBS, แป้งสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

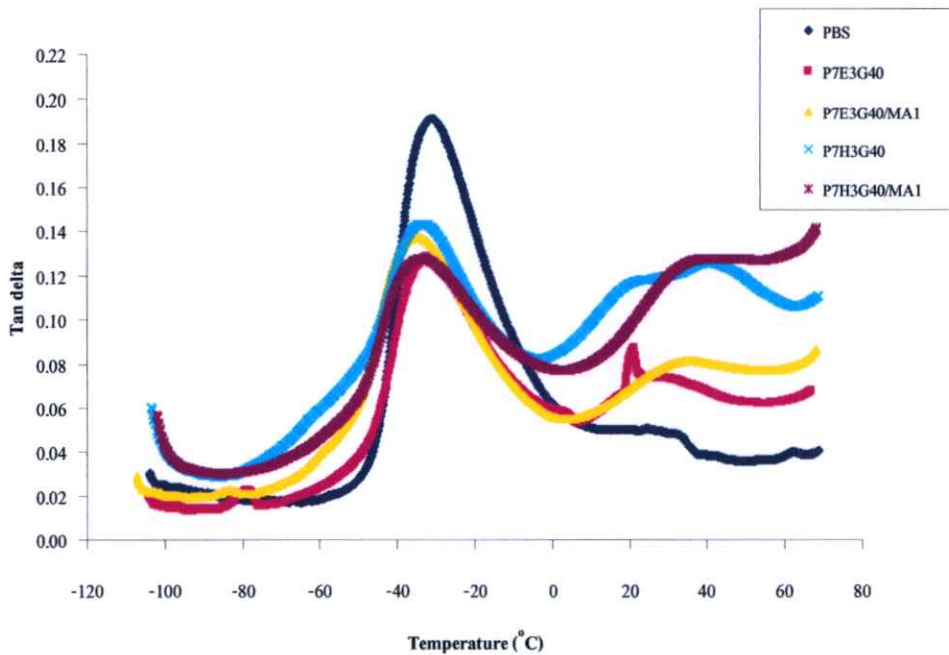
### 4.8.3 Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (DMTA) เพื่อหาค่าของ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ (ตารางที่ 4.7) พบว่า ส่วนที่เป็นออสซิลฐานของ PBS เกิดการสั่นเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ปรากฏพีก  $T_g$  เกิดขึ้นที่  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเมื่อเติมแป้งสาลีลงใน PBS ปรากฏพีก  $T_g$  ของแป้งสาลีที่  $21\text{-}41\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยพบว่าค่า  $T_g$  ของ PBS ไม่แตกต่างกันในทุกสูตร ซึ่งจากทฤษฎีกรรมวิธีของผสมที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ลงในพอลิเมอร์จะทำให้เกิด Plasticizing effect ส่งผลให้ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ลดลง อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยไม่เป็นไปตามคาดการณ์ซึ่งสามารถอธิบายเนื่องมาจาก 2 ปัจจัย คือ

1. กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ตีกับแป้ง ซึ่งทำให้กลีเซอรอลสามารถแพร่อยู่ในวิภาคของแป้ง มีส่วนน้อยที่แพร่มาอยู่ในวิภาคออสซิลฐานของ PBS ทำให้  $T_g$  ของ PBS มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

2. เกิดจากการหักล้างของ 2 ปรากฏการณ์ กล่าวคือ การใส่กลีเซอรอลส่งผลให้  $T_g$  ของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งเป็นผล Plasticizing effect แต่การใส่แป้งทำให้สายโซ่ขยับตัวได้ยาก ซึ่งคาดว่า บางส่วนของสายโซ่โมเลกุล หรือหมู่ปลายของสายโซ่ไปเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับก้อนของแป้ง (แป้ง) ส่งผลให้ค่า  $T_g$  สูงขึ้น ดังนั้นจาก 2 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหักล้างกันจึงส่งผลให้ค่า  $T_g$  ของ PBS ไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ดีค่า  $T_g$  ของแป้งมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละสูตร ดังรูปที่ 4.28 พบว่า PBS/EMS และ PBS/HBS มีช่วงอุณหภูมิที่สายโซ่เริ่มขยับตัวในช่วงเดียวกัน คือ  $21\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเมื่อทำการเติมสารช่วยผสม พบว่าพีกที่ได้มีช่วงของ  $T_g$  แคบลง สายโซ่เริ่มขยับได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งในการเติมสารช่วยผสมทำให้เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ และแป้ง ส่งผลให้แป้งยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น (ดังรูปที่ 4.21 (B) และ 4.22 (B)) ทำให้สายโซ่ขยับตัวได้ยาก ค่า  $T_g$  จึงมีค่าสูงขึ้นจากสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม



รูปที่ 4.28 DMTA thermogram ของ PBS และพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ตารางที่ 4.7 การศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DMTA

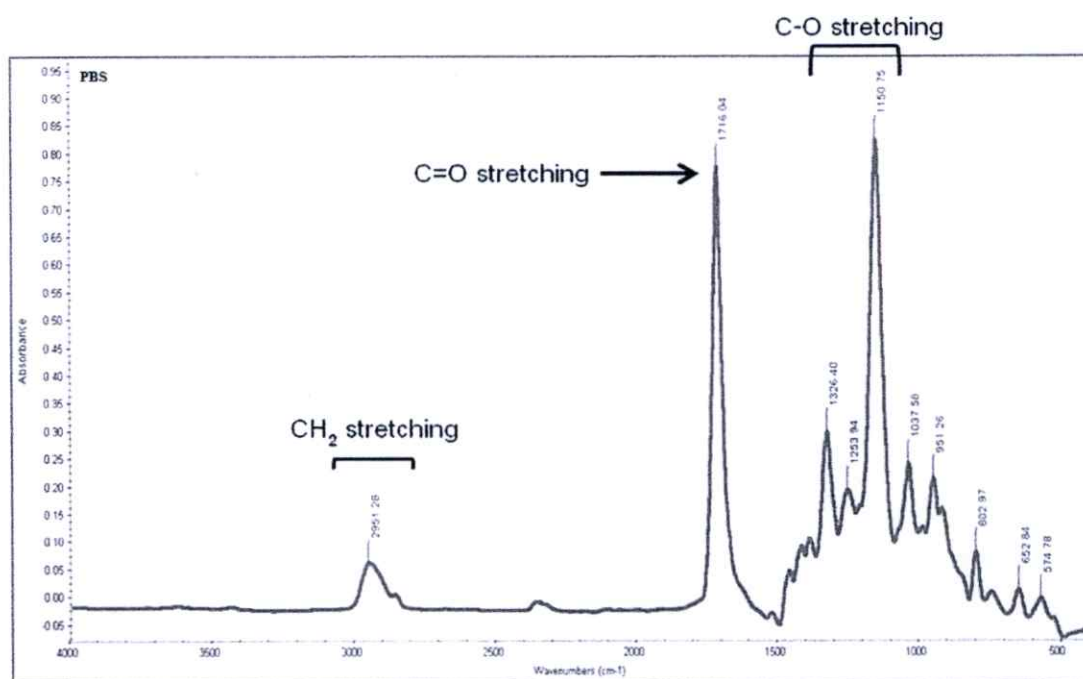
ตัวอย่าง	$T_g$ (°C)	
	PBS	Starch
PBS	-31	-
P7E4G40	-32	21-40
P7E3G40/MA1	-33	35
P7H3G40	-33	21-38
P7H3G40/MA1	-33	41

#### 4.9 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์

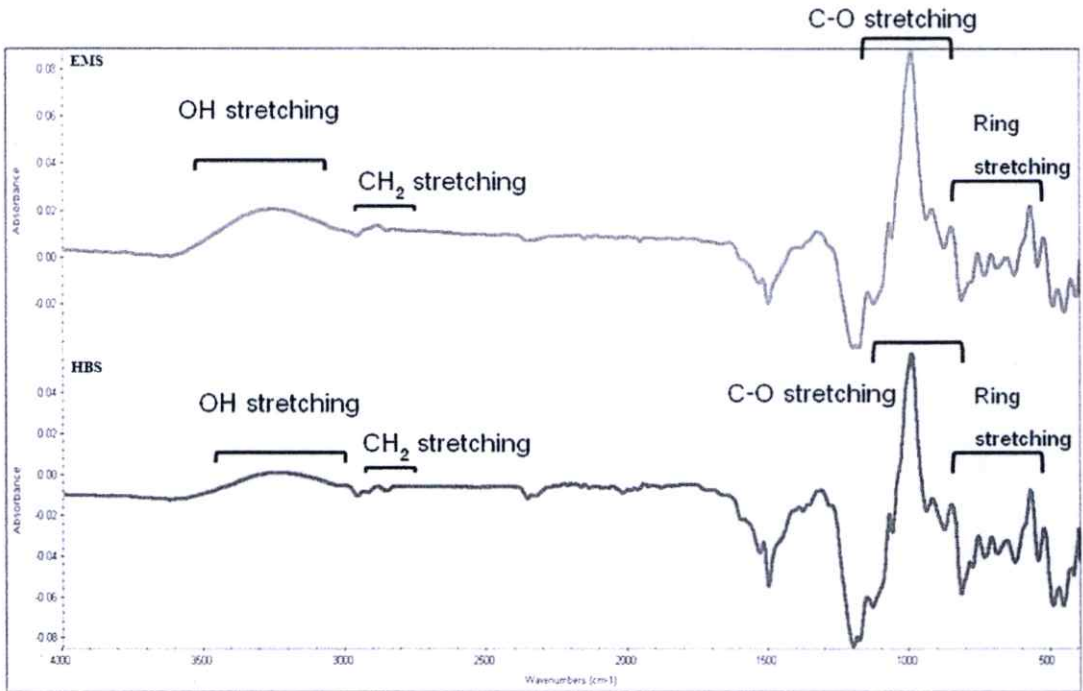
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของ PBS/Starch ที่เติม และไม่เติมสารช่วยผสม ด้วยเทคนิค FTIR-ATR โดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer ในช่วงเลขคลื่น  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.29-4.32 โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของ PBS แป้งสตาร์ช และ MA (แสดงดังรูปที่ 4.33)

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งของสเปกตรัมของ PBS บริสุทธิ์ แป้งสตาร์ช กลีเซอรอล และ MA [47, 67-74]

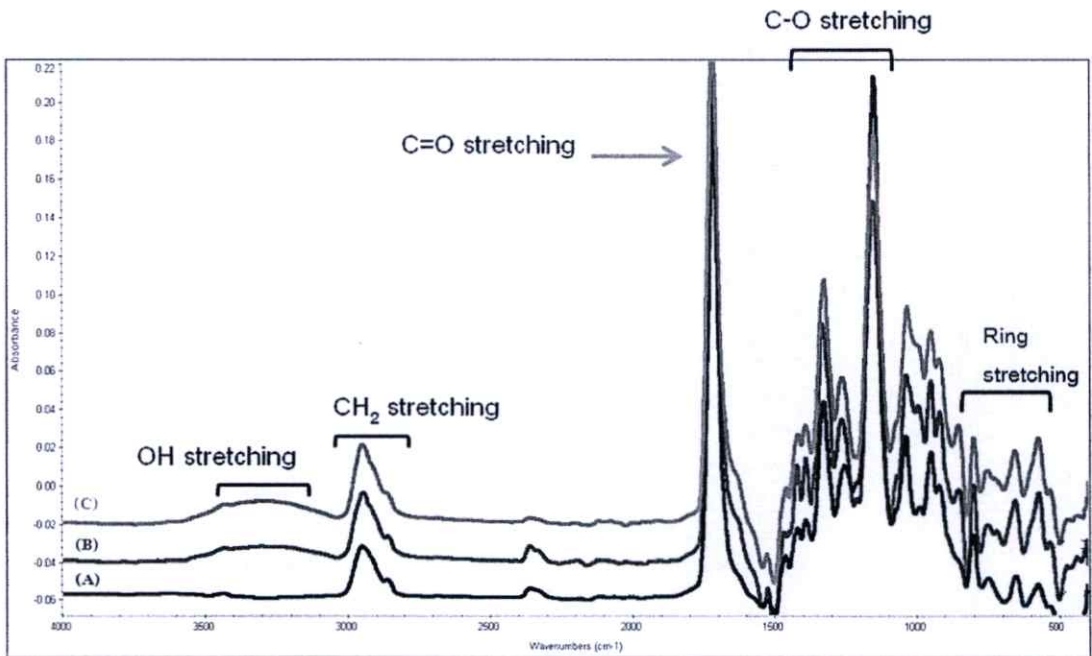
เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )				ช่วงการดูดกลืนของ
PBS บริสุทธิ์	แป้งสตาร์ช	กลีเซอรอล	MA	
-	3232, 3260	3273	-	-OH stretching
2950	2932	2931	-	CH <sub>2</sub> stretching
-	-	-	1770, 1850	C=O anhydride
1716	-	-	-	C=O ester
-	-	-	1590	C=C stretching
1332	1080-995	1106	1275	C-O stretching
1150	-	-	-	O-C=O ester bond
-	854-573	-	-	Anhydroglucose ring stretching



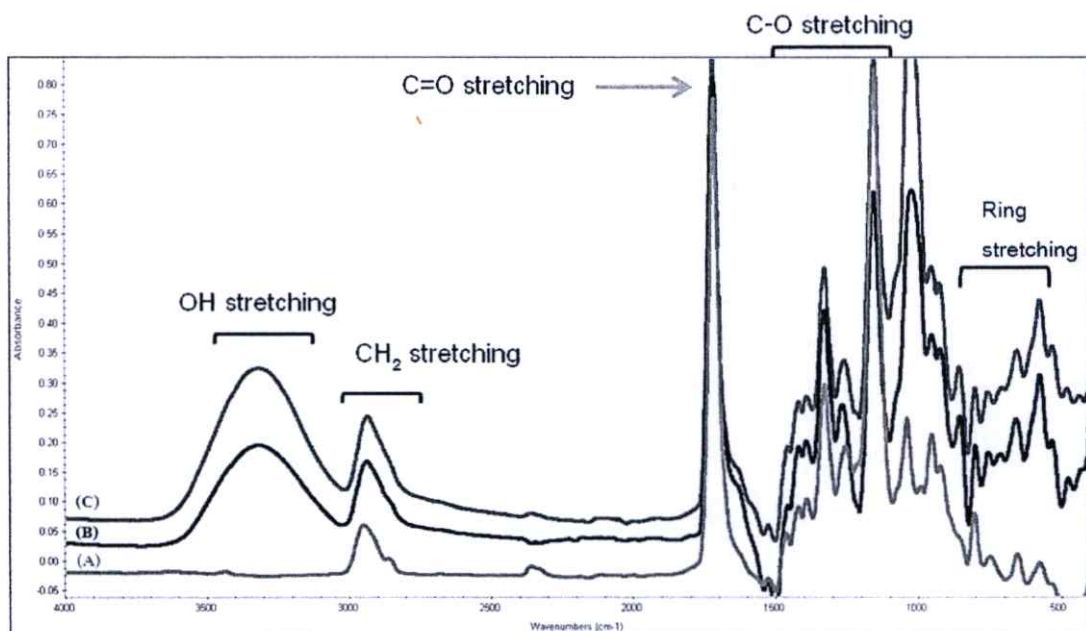
รูปที่ 4.29 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PBS



รูปที่ 4.30 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งสตาร์ช (A) EMS (B) HBS



รูปที่ 4.31 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) PBS บริสุทธิ์, (B) P7E3G40 และ (C) P7E3G40/MA1

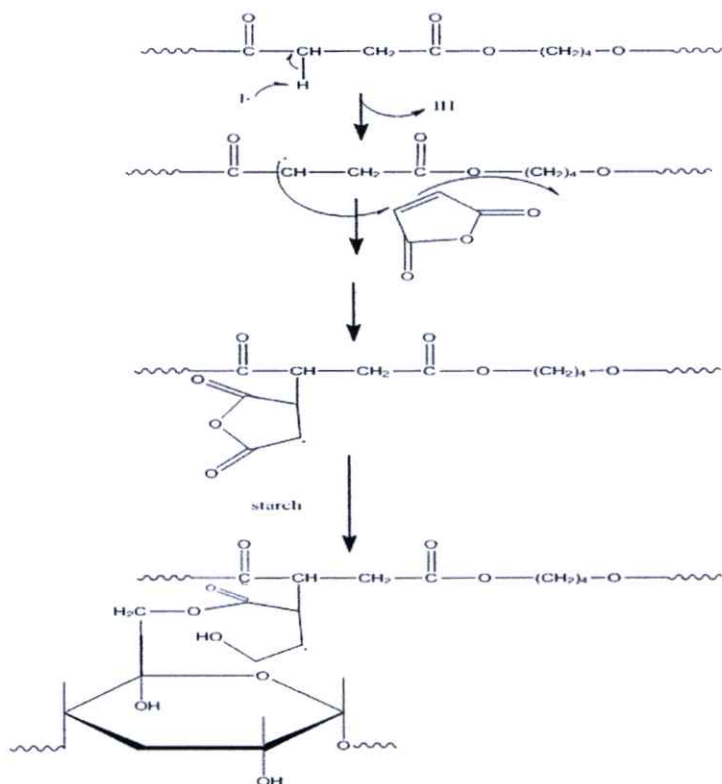


รูปที่ 4.32 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) PBS บริสุทธิ์, (B) P7H3G40 และ (C) P7H3G40/MA1

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 PBS สเปกตรัมแสดง C=O stretching ที่  $1716\text{ cm}^{-1}$  และ O=C=O stretching ที่  $1332\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$  แสดงเป็นพันธะเอสเทอร์ ส่วนสเปกตรัมของแป้งสตาร์ช แสดง OH stretching ที่  $3232\text{--}3260\text{ cm}^{-1}$ ,  $\text{CH}_2$  stretching ที่  $2932\text{ cm}^{-1}$ , C-O stretching ที่  $1108\text{--}995\text{ cm}^{-1}$  และ Anhydroglucose ring stretching ที่  $854\text{--}573\text{ cm}^{-1}$

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 เป็นการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมระหว่าง PBS บริสุทธิ์ PBS/Starch และ PBS/Starch ที่เติมสารช่วยผสม (MA-g-PBS) พบว่า PBS บริสุทธิ์ ให้เลขคลื่นสำคัญที่ตำแหน่ง  $1716\text{ cm}^{-1}$  เป็น C=O stretching กับเลขคลื่น  $1332\text{ cm}^{-1}$  เป็น C-O stretching ของหมู่เอสเทอร์ และเลขคลื่น  $1150\text{ cm}^{-1}$  เป็นพันธะเอสเทอร์ (Ester linkage) เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ PBS ที่ทำการต่อกิ่งด้วย MA-g-PBS พบว่าที่ตำแหน่ง  $1340\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$  เป็น C-O stretching มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากการที่ใส่แป้งสตาร์ช และกลีเซอรอล ทำให้การดูดกลืนของ C-O stretching มีการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (Absorbance) โดยเป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ช (รูปที่ 4.31 (B) และ 4.32 (B)) และเมื่อเติม MA 1% โดยน้ำหนักเทียบกับ PBS ทำให้การดูดกลืนของ C-O stretching เพิ่มขึ้นเป็นผลจากพันธะไฮโดรเจนของ MA (รูปที่ 4.31 (C) และ 4.32 (C)) ทำให้พีคเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เลขคลื่นสูงขึ้น เพราะทำให้โครงสร้างสั่น (Vibration) ได้ยากขึ้น MA และแป้งที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะหลุดออกขณะทำการผสมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จะแสดงเฉพาะส่วนที่เกิดปฏิกิริยากันของ MA-g-PBS/Starch ดังนั้นตำแหน่งเลขคลื่น  $1716\text{ cm}^{-1}$ ,  $1770\text{ cm}^{-1}$  เป็น C=O stretching โดยมีลักษณะของแถบสเปกตรัมที่ซ้อนทับกัน (Overlap) ของหมู่คาร์บอนิล ของ PBS และ MA เป็นไปได้ว่าขอบเขตของการรับสัญญาณต่ำเกินไป

และ เทคนิค FTIR ไม่ได้เป็นเทคนิคที่จะระบุการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ จึงทำให้ไม่สามารถพิสูจน์ได้  
ว่ามีการต่อกิ่ง (Grafting) ระหว่าง PBS แป้งสตาร์ช และ MA



รูปที่ 4.33 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PBS, แป้งสตาร์ช, MA และตัวริเริ่มปฏิกิริยา L101

[30]

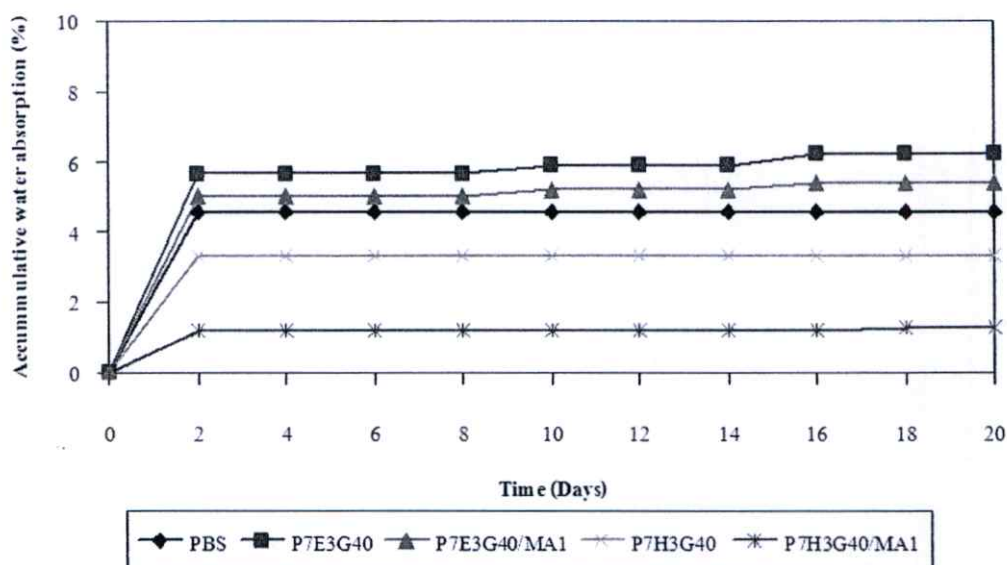
## 4.10 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

### 4.10.1 การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ

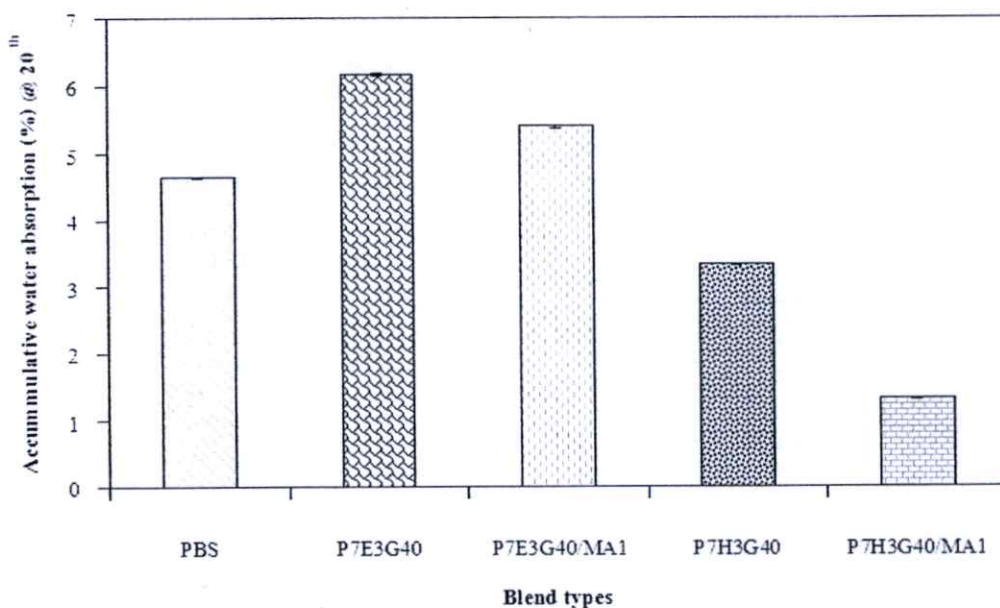
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ PBS/แป้งสตาร์ช กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่า PBS มีค่าการดูดซับน้ำประมาณ 4.6% แต่เมื่อเติม EMS ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่า แป้งสตาร์ชมีความสามารถในการดูดซับน้ำเป็นอย่างมาก แต่ในกรณีของ PBS/HBS ส่งผลให้ ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง เนื่องจาก HBS เป็นแป้งที่ปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบ-น้ำ ส่งผลให้ดูดซับน้ำได้ลดลง ซึ่งมีค่าการดูดซับน้ำประมาณ 3.3% ซึ่งมีค่าการดูดซับน้ำน้อยกว่า PBS บริสุทธิ์ และ PBS/EMS ตามลำดับ จากกราฟพบว่าในช่วงแรกของการแช่น้ำ ฟิล์มสามารถดูด-ซับน้ำได้อย่างรวดเร็วใน 2 วันแรก ต่อมาจะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ ซึ่งเป็น สาเหตุมาจากอนุภาคของแป้งสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาก เมื่อเม็ดแป้งสตาร์ชเกิดการบวมตัว

(Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งสตาร์ชเกิดการอิมตัวไปด้วยน้ำ จึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก และเมื่อเติมสารช่วยผสมลงไป พบว่าค่าดูดซับน้ำมีค่าลดลงจากสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม เนื่องจากการเติมสารช่วยผสมทำให้ช่องว่างระหว่างวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์กับแป้งสตาร์ชลดลง จึงทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถไปแทรกอยู่ได้

จากรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่า PBS/EMS มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากกว่า PBS/HBS อาจเนื่องมาจาก สมบัติการชอบน้ำ และลักษณะสัณฐานวิทยาของ EMS และเมื่อเติมสารช่วยผสมในสูตร P7H3G40/MA1 พบว่ามีค่าการดูดซับน้ำที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากชนิดของแป้งและสารช่วยผสมที่เติมลงไป ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาค PBS กับแป้งสตาร์ชลดลง จึงทำให้ไม่มีช่องว่างให้อนุภาคของน้ำแทรกเข้าไปได้ โดยยืนยันผลได้จากสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.22 (B)) อย่างไรก็ตามก็คิดบริเวณที่สามารถที่จะดูดซับน้ำได้อีกปัจจัยคือ บริเวณอสัณฐาน เนื่องจากบริเวณนี้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีช่องว่างระหว่างสายโซ่ จึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถที่จะแทรกเข้าไปได้ ดังนั้นจากค่าองค์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จะเห็นว่า PBS/HBS มีค่าองค์ความเป็นผลึกที่มากกว่า จึงกล่าวได้ว่ามีส่วนที่เป็นอสัณฐานน้อยกว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงลดลง และเมื่อเติมสารช่วยผสมลงไป พบว่าไปช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ช รอยต่อระหว่างวัฏภาคลดลง ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำที่ได้จึงลดลง ซึ่งเป็นไปตามเหตุผลที่กล่าวข้างต้น



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ PBS/แป้งสตาร์ช กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของ PBS/แป้งสตาร์ช แช่อยู่ในน้ำกลั่น ในวันที่ 20

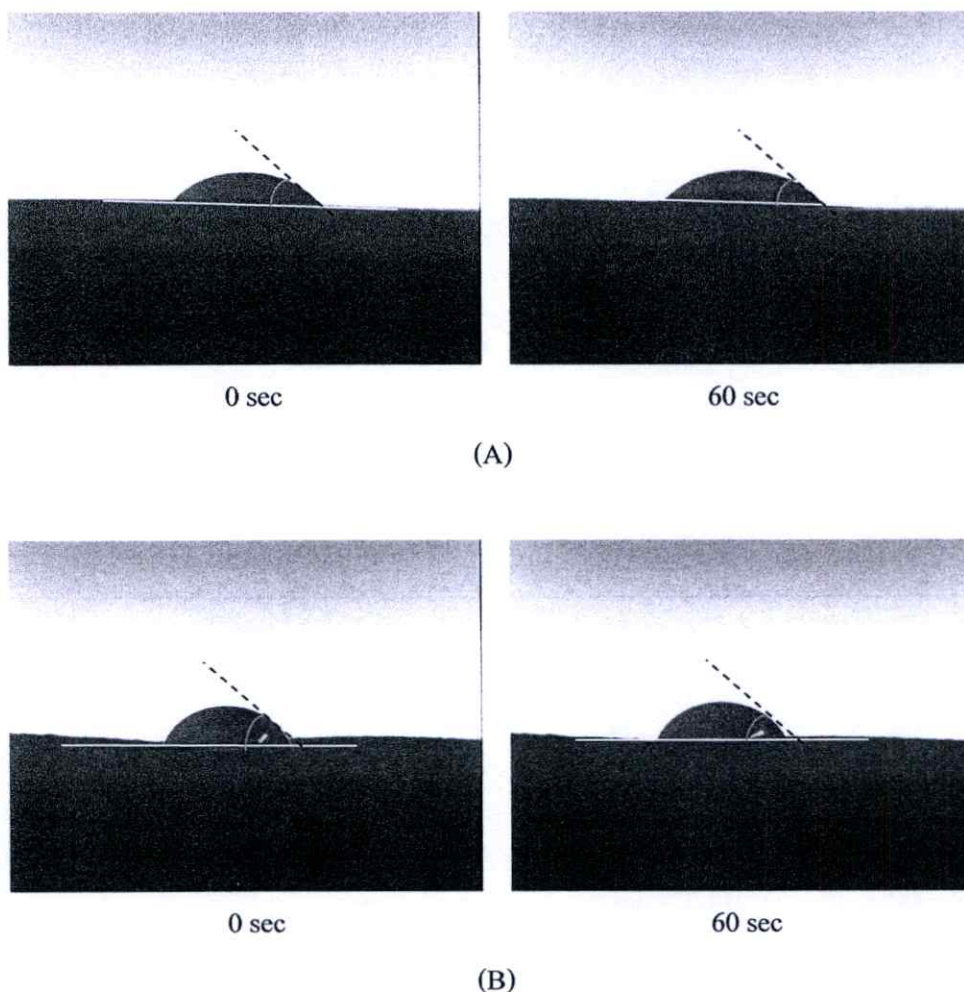
#### 4.10.2 การวัดค่ามุมสัมผัส

ผลการทดสอบวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวฟิล์มของ PBS, P7E3G40, P7E3G40/MA1, P7H3G40 และ P7H3G40/MA1 แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าฟิล์ม PBS/EMS มีมุมสัมผัสที่ใกล้เคียงกับฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ เนื่องมาจากการวัดมุมสัมผัสของฟิล์มเป็นการวัดความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิวฟิล์ม อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์ม PBS/HBS มีมุมสัมผัสสูงกว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ แสดงถึงความไม่ชอบน้ำ ลักษณะหยดน้ำเป็นหยดอย่างชัดเจน มุมสัมผัสมีค่ามาก เนื่องจาก HBS เป็นแป้งดัดแปรที่เพิ่มความไม่มีขั้ว คือ ค่า Hydrophilicity ลดลง

การเติมสารช่วยผสม ทำให้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชลดลง และมีความเข้ากันได้มากขึ้น ดังนั้นมุมสัมผัสที่ได้จึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม

ตารางที่ 4.9 ค่ามุมสัมผัส (องศา) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	มุมสัมผัส (องศา)
PBS	52.4
P7E4G40	56.7
P7E3G40/MA1	67.4
P7H3G40	62.8
P7H3G40/MA1	71.5



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายการเบี่ยงของพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่าง (A) P7H3G40 และ (B) P7H3G40/MA1 ในระยะเวลา 1 นาที

#### 4.11 การศึกษาสมบัติเชิงกล

จากสมบัติเชิงกลของตอนที่ 1 ใช้เครื่องเป่าฟิล์มขนาดเล็ก อาจผสมเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร แต่ตอนที่ 2 ได้ทำการเลือกสูตรมาทำการศึกษา 4 สูตร คือ P7E3G40, P7E3G40/MA1, P7H3G40 และ P7H3G40/MA1 โดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม มีสกรูที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น นอกจากนี้ การเป่ายังมีแรงเบ่งมากกว่า ตารางเปรียบเทียบเครื่องเป่าฟิล์มแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ-1

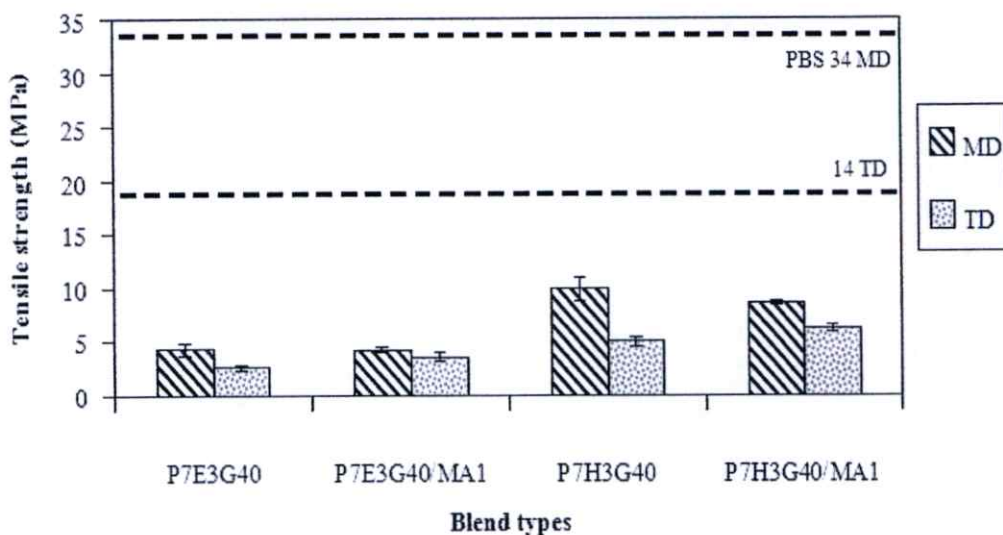
การศึกษาสมบัติเชิงกล โดยเครื่อง Universal testing machine เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD)

รูปที่ 4.37-4.40 เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ PBS/EMS กับ PBS/HBS ที่อัตราส่วนเดียวกัน (PBS/Starch เท่ากับ 70/30, กลิเซอรอล 40% โดยน้ำหนักของแป้ง-

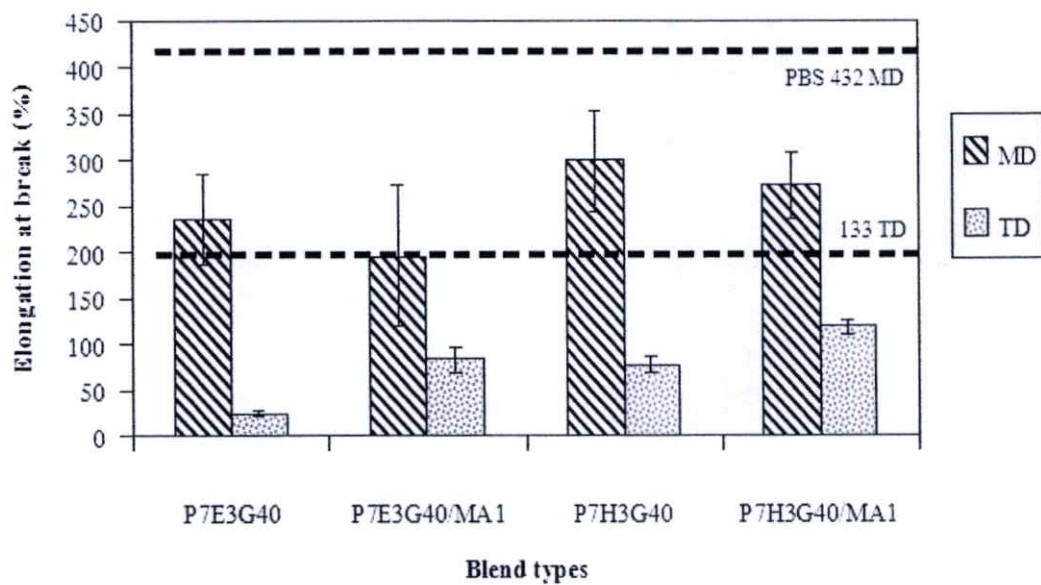
สตาร์ช) พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว PBS/HBS มีค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดูลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดที่ดีกว่า เนื่องจาก HBS เป็นแป้งสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำ หรือความมีขั้วลดลง จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับ PBS ทำให้สามารถรับแรงกระทำ และถ่ายเทแรงได้มากกว่า และจากผลการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) จะเห็นว่า PBS/HBS (รูปที่ 4.22 (A)) มีบริเวณช่องว่างระหว่างวัฏภาคน้อยกว่า PBS/EMS (รูปที่ 4.21 (A))

เมื่อเติมสารช่วยผสม MA-g-PBS พบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนมอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องมาจากการเติมสารช่วยผสมส่งผลให้มีแป้งสตาร์ชมีการกระจายตัวในส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) มากขึ้น จึงมีสมรรถนะที่จะรับแรงได้ดี ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

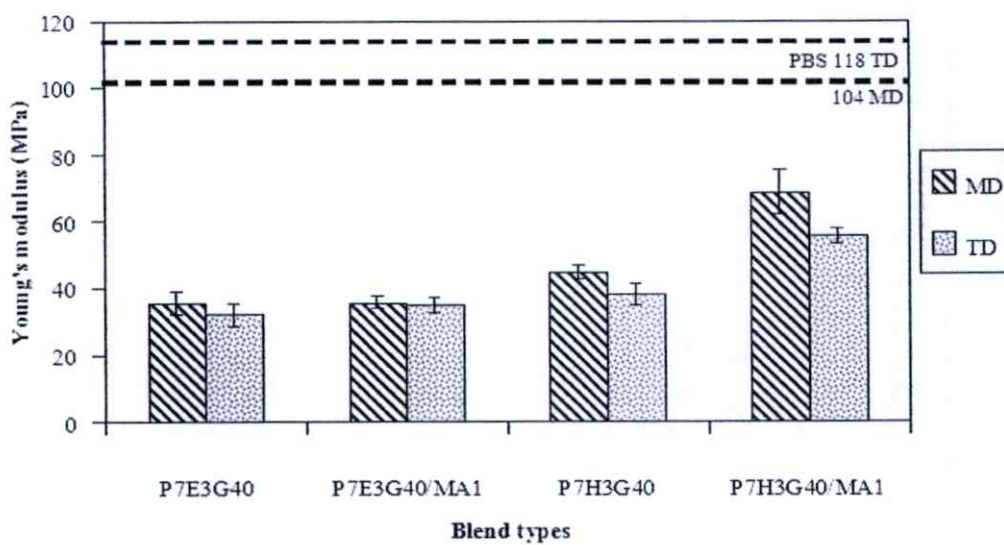
จากการทดสอบฟิล์มใน 2 ทิศทาง คือ แนว MD และ TD พบว่า สมบัติเชิงกลในทิศทาง MD มีสมบัติโดยรวมมากกว่าในทิศทาง TD เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนว MD และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนว TD ทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ PBS ทั้งสองทิศทาง เป็นที่ทราบกันดีว่าแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนว MD มีมากกว่าแรงที่ใช้ในการเป่าขยายในแนว TD จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD ได้มากกว่าแนว TD



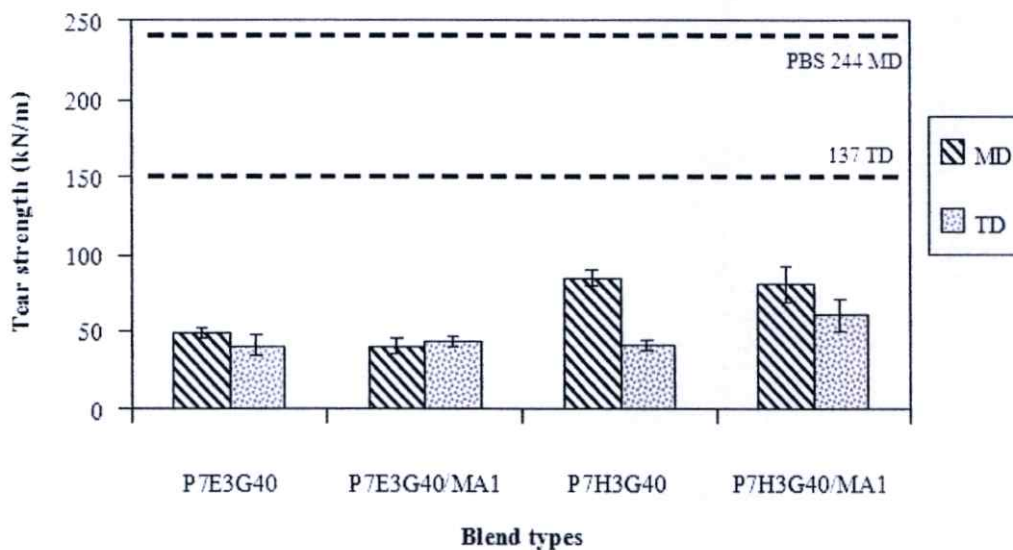
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

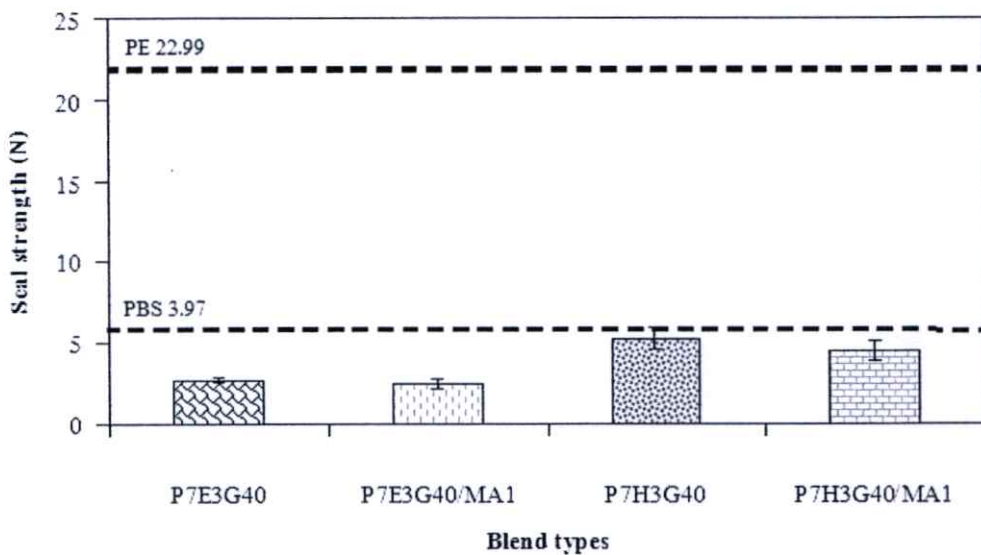
#### 4.12 การศึกษาความแข็งแรงของรอยซิด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความแข็งแรงของรอยซิด หรือรอยเชื่อมต่อ (Seal strength) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มชนิดนี้ไปใช้เป็นฟิล์มที่ต้องมีการเชื่อมต่อกับความร้อน เช่น ถุงใส่ของ (Shopping bag) ถุงซิป (Zip lock bag) ถุงเพาะชำ และถุงห่อผลไม้ขณะปลูก ฯลฯ

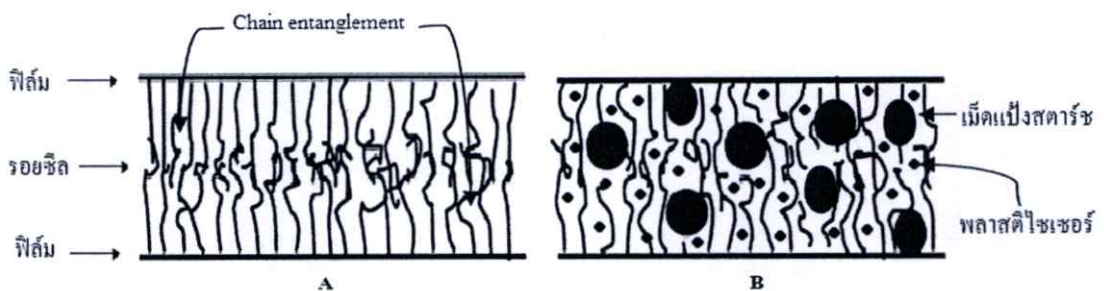
ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยซิด (Seal strength) ของ PBS และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชในอัตราที่เท่ากัน (PBS/Starch เท่ากับ 70/30, กลีเซอรอล 40% โดยน้ำหนักของแป้ง) ทั้งที่มีการเติมสารช่วยผสม และไม่เติมสารช่วยผสม แสดงดังรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของรอยซิดของ PBS/EMS มีค่าต่ำกว่า PBS บริสุทธิ์ เนื่องจากแป้งเอสเทอร์ เมื่อเติมลงไปจะทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติม (Filler) จึงไปแทรกตัวอยู่ระหว่าง PBS เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียสภาพได้ และ PBS/HBS มีค่าความแข็งแรงรอยซิดที่มากที่สุด อาจเนื่องมาจากแป้งไฮโดรโฟบิกมีการยึดเกาะ และมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ตึกว่า และฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวที่เรียบ ทำให้ในการ Seal มีความแน่นอนหนา อีกปัจจัยหนึ่งคือ อาจเกิดเนื่องมาจากพื้นผิวของฟิล์ม PBS/HBS มีความเรียบมากกว่าพื้นผิวฟิล์ม PBS/EMS ดังนั้นความเรียบของผิวฟิล์มอาจส่งผลต่อการยึดติดเมื่อทำการเชื่อมต่อกับความร้อน กล่าวคือ ถ้าผิวฟิล์มเรียบกว่า คาดว่าค่าความแข็งแรงรอยซิดจะมากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการยึดติดดีกว่า เพราะในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มฟิล์มที่สามารถที่จะแบ่งได้มากกว่า ฟิล์มก็จะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความบางมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็คิดผลของพลาสติกไซเซอร์น่าจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงรอยซิดด้วย ซึ่งคาดว่าพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปส่งผลให้ฟิล์มมีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันมาก

ขึ้น ดังนั้นการเชื่อมต่อด้วยความร้อน (Seal) ส่งผลให้ยึดติดกันได้ดีขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงรอยซึลในกรณีของ PBS/HBS มีค่าความแข็งแรงรอยซึลที่สูงกว่า PBS บริสุทธิ์ แต่การเติมสารช่วยผสมไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงซึล

เป็นที่ทราบกันดีว่าการยึดติดที่รอยซึลเกิดเนื่องจากกลไกอินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) กล่าวคือ โมเลกุลสายโซ่ที่เคลื่อนไหวทั้งสองพื้นผิวเกิดการพันกัน (Chain entanglement) ความแข็งแรงรอยต่อจะขึ้นอยู่กับจำนวนสายโซ่ที่พันกัน และระดับการพันกัน (Degree of entanglement) [66] การใส่ก้อนของแข็ง เช่น เม็ดแป้ง จะขัดขวางการพันกันของสายโซ่ (แสดงดังรูปที่ 4.42)



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยซึลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.42 แบบจำลองแสดงกลไกการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชัน บริเวณรอยซึล (A) PBS และ (B) PBS ผสมแป้งสตาร์ช [66]

จากรูป 4.42 จะเห็นได้ว่า เม็ดแป้งในวัสดุผสม PBS/Starch จะขัดขวางการพันกันของสายโซ่บริเวณรอยขีด ทำให้ Seal strength มีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ในพอลิเมอร์ผสม PBS/Starch มีการใส่พลาสติกไซเซอร์กลีเซอรอล 40% ของปริมาณแป้ง พลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) หรือช่องว่างระหว่างโมเลกุล และทำให้สายโซ่หลุดออกจากกัน (Disentanglement) ขณะคั่งรอยขีดได้ง่ายขึ้น

#### 4.13 การทดสอบการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์มีมาตรฐานของการทดสอบที่ได้รับความนิยมเป็นที่ยอมรับในระดับชาติ โดยทั่วไปมีหลายมาตรฐาน แต่เนื่องจากการทดสอบมาตรฐานข้างต้นต้องเสียเวลาในการเตรียมค่อนข้างนาน และมีค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบแนวเปรียบเทียบโดยการฝังดิน (Burial test) เพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่สภาวะเดียวกันในระดับเบื้องต้น กล่าวคือทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง กำหนดความชื้นสัมพัทธ์ 30% และค่าความเป็นกรด่างของดิน (pH) 7

โดยได้ทำการทดสอบสมบัติการย่อยสลายของ PBS และพอลิเมอร์ผสม PBS กับแป้ง-สตาร์ชทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.43 จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในการเติมแป้งสตาร์ชลงไปพอลิเมอร์ สามารถที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย ทั้งนี้เป็นผลมาจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งสตาร์ชมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, -OH) จำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง ชักเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) [65] ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ลดลง สายโซ่สั้นลง จากนั้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ของจุลินทรีย์ในดิน จากกลไกการย่อยสลายจะเห็นได้ว่าต้องอาศัยความชื้น ดังนั้นการเติมแป้งสตาร์ชจึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ย่อยสลายได้เร็วกว่า PBS ที่เติมแป้งสตาร์ช อาจเนื่องมาจากฟิล์มที่ทำการเป่าขึ้นรูปได้ในแต่ละสูตรมีความหนาไม่เท่ากัน กล่าวคือ ฟิล์มที่มีความหนาน้อย หรือมีความบางมาก ก็จะมีความสามารถในการย่อยสลายได้ง่ายกว่าฟิล์มที่มีความหนามากกว่า ดังนั้นเลยไม่เห็นการย่อยสลายที่ชัดเจน

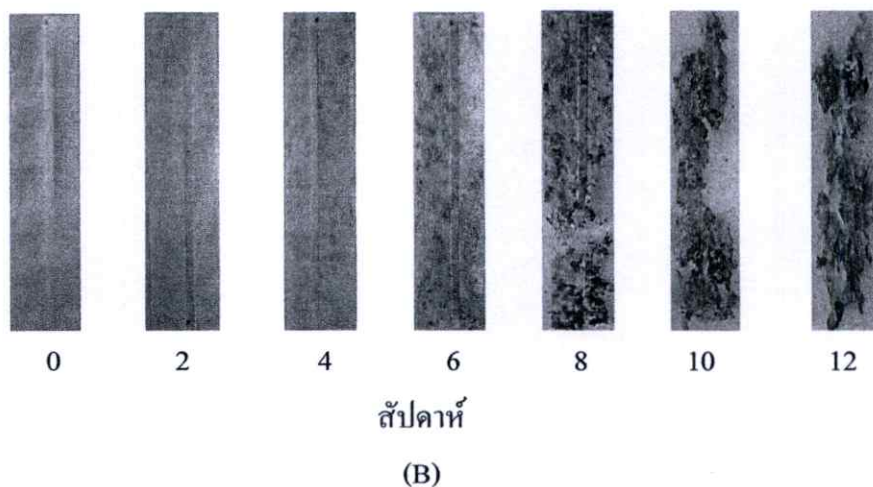
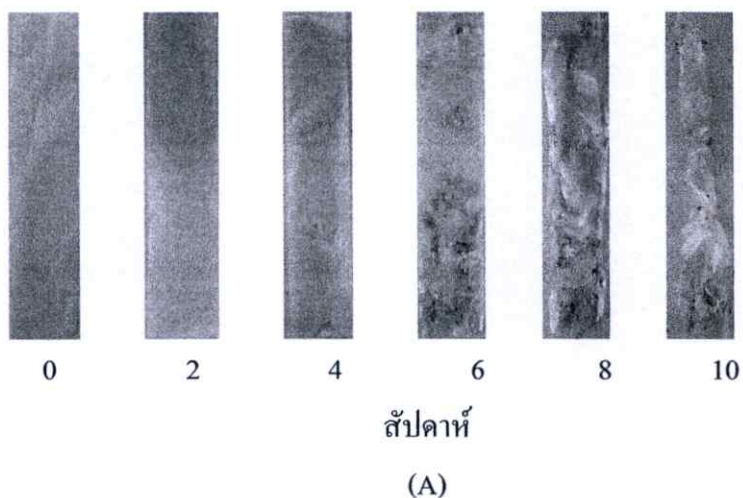
ซึ่งกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของพอลิเมอร์มี 2 ขั้นตอน โดย

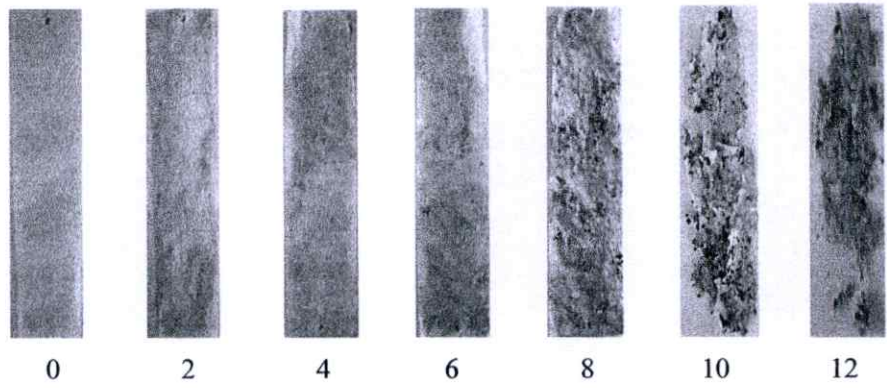
- ขั้นที่ 1 น้ำจะแพร่เข้าไป เป็นผลให้ฟิล์มเกิดการบวม และเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นบนฟิล์ม
- ขั้นที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ [64]

โดยเราสามารถสรุปกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของ PBS และแป้งสตาร์ช ได้ดังรูปที่ 4.44 (A และ B) เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งสตาร์ช คือ EMS กับ HBS ที่อัตราส่วน

เท่ากัน พบว่า PBS ผสมแป้งสาลีแต่ละชนิดจะให้อัตราการย่อยสลายที่ต่างกัน กล่าวคือ PBS ที่ผสม HBS สามารถย่อยสลายได้ช้ากว่าเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากเป็นแป้งที่มีการปรับปรุงสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำ มีความมีขั้วลดลง จึงทำให้น้ำสัมผัสกับแป้งสาลีน้อยลง ดูดความชื้นได้น้อย จุลินทรีย์จึงเติบโตได้น้อยกว่า

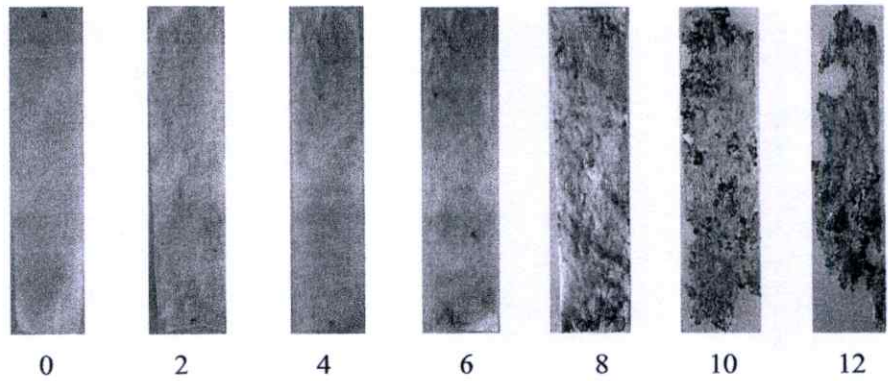
เมื่อเติมสารช่วยผสม สารช่วยผสมนี้จะทำหน้าที่ปรับปรุงรอยต่อระหว่างวัสดุ ทำให้น้ำ หรือจุลินทรีย์เข้าไปในรอยต่อวัสดุได้ยากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราการย่อยสลายได้ของฟิล์มในทุกสูตรยังคงอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน คือประมาณ 3 เดือน จึงย่อยสลายหมด





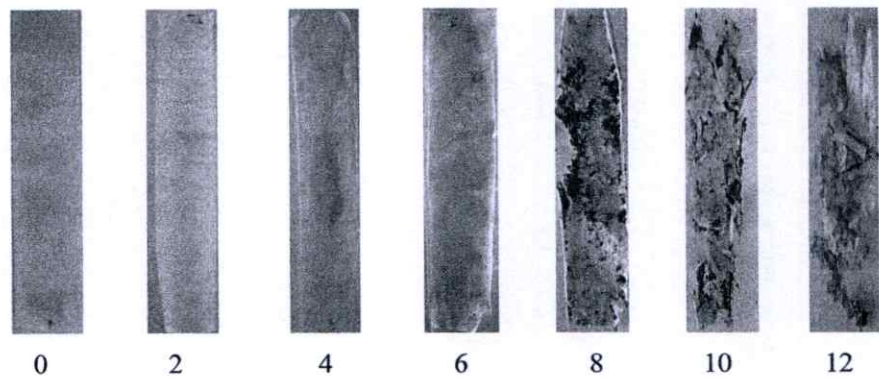
สัปดาห์

(C)



สัปดาห์

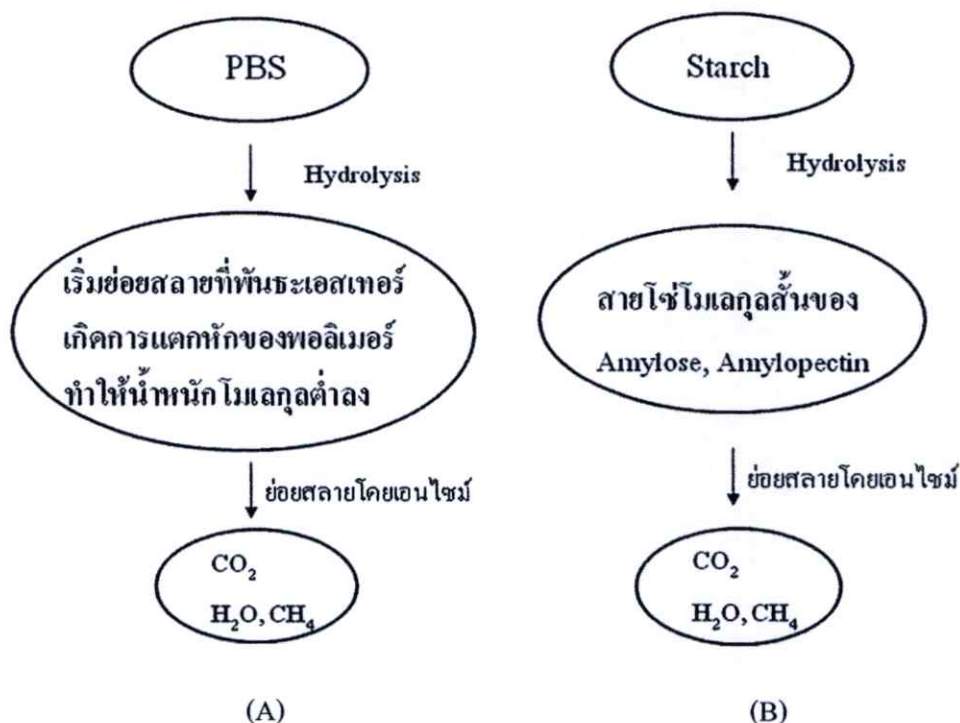
(D)



สัปดาห์

(E)

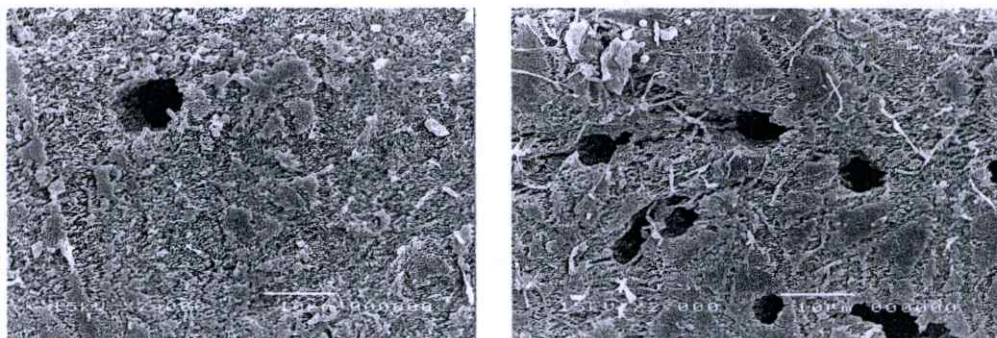
**รูปที่ 4.43** ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7  
 (A) PBS, (B) P7E3G40, (C) P7E3G40/MA1, (D) P7H3G40 และ (E) P7H3G40/MA1



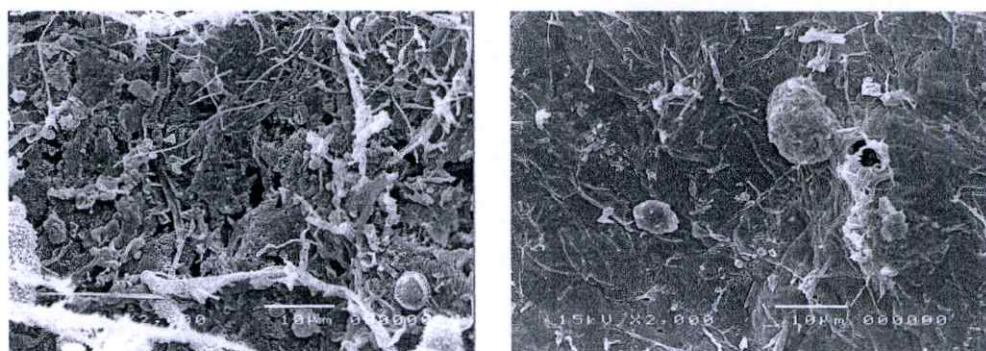
รูปที่ 4.44 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ (A) PBS และ (B) แป้งสตาร์ช [75]

จากรูป 4.44 พบว่า การย่อยสลายในขั้นตอนแรกนั้นต้องอาศัยน้ำในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เพื่อตัดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นลง โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสในพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) นั้นจะเกิดปฏิกิริยาบริเวณของส่วนอสัณฐาน (Amorphous) จนสมบูรณ์ก่อนเพราะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าส่วนของผลึก (Crystalline) จากนั้นจึงเริ่มเกิดปฏิกิริยาในส่วนของผลึกต่อไป [75]

เมื่อพิจารณาพื้นผิวของชิ้นงานของ PBS ผสมแป้งสตาร์ชที่ผ่านการฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน (รูปที่ 4.45-4.47) พบว่ามีการย่อยสลาย โดยสังเกตได้จากเกิดรอยแยกที่พื้นผิว (Crack) นอกจากนี้จากภาพถ่าย SEM จะสังเกตเห็นตำหนิบนผิวที่เป็นรูเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของแป้งสตาร์ชโดยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนั่นเอง เพราะลักษณะของรูที่เกิดขึ้น มีขนาดเท่ากับขนาดของเม็ดแป้งสตาร์ช ซึ่งเม็ดแป้งสตาร์ชเอสเทอร์มีขนาดประมาณ  $11 \pm 3$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) และแป้งสตาร์ชไฮโดรฟอบิกมีขนาดประมาณ  $12 \pm 4$  ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) อย่างไรก็ตามในภาพ SEM อาจมีเศษดินและเศษรากไม้ปรากฏมาด้วย



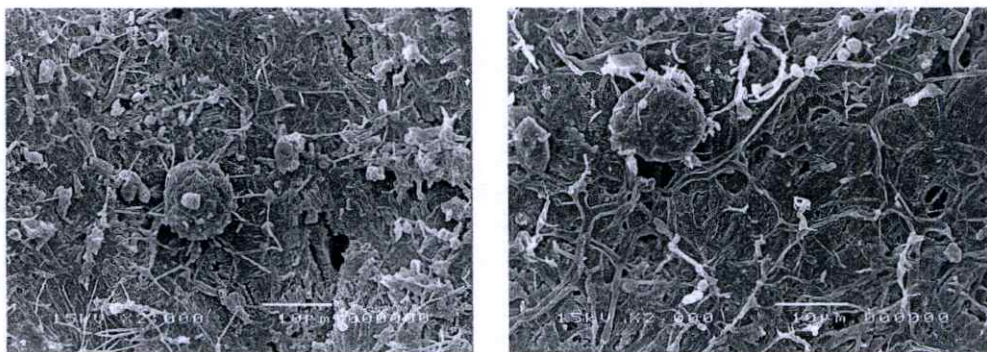
รูปที่ 4.45 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน ที่กำลังขยาย 2000X



(A)

(B)

รูปที่ 4.46 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ PBS/EMS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน (A) P7E3G40 (B) P7E3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X



(A)

(B)

รูปที่ 4.47 SEM แสดงสภาพพื้นผิวของ PBS/HBS หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน (A) P7H3G40 (B) P7H3G40/MA1 ที่กำลังขยาย 2000X

#### 4.14 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

จากการที่พลาสติกย่อยสลายได้มีราคาค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้ได้พยายามคิดค้นที่จะลดต้นทุนในการผลิตโดยนำเอาวัตถุดิบที่หาง่าย ราคากถูก และมีคุณภาพดีนำมาผสม โดยงานวิจัยนี้ นำเอาแป้งสตาร์ชที่ทำจากมันสำปะหลังซึ่งมีราคากถูก และมีปริมาณมากในประเทศไทย โดยนำมาใช้เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบ จากตารางที่ 4.10 เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ และตารางที่ 4.11 เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตฟิล์ม ในสูตรต่างๆ ซึ่งได้แก่ PBS บริสุทธิ์, P7E3G40, P7E3G40/MA1, P7H3G40 และ P7H3G40/MA1 จะเห็นได้ว่า PBS มีราคาค่อนข้างสูง คือ กิโลกรัม ละ 200 บาท (เป็นราคา ณ เดือนตุลาคม 2553) ส่วน EMS และ HBS มีราคากิโลกรัมละ 22 และ 24 บาท ตามลำดับ (เป็นราคา ณ ตุลาคม 2553) ซึ่งมีราคากถูก โดยเมื่อนำไปผสม ทำให้พอลิเมอร์สูตรต่างๆ มีราคาลดลง จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมสตาร์ชลงไป สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ถึง 20-30% (ขึ้นกับปริมาณแป้งสตาร์ช และชนิดของแป้งสตาร์ชที่ใส่) เมื่อเทียบกับ PBS บริสุทธิ์ ก็แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ แต่อย่างไรก็ดีในการที่จะผลิตฟิล์มชนิดนี้ให้มีความเป็นไปได้จริง ฟิล์มที่ผลิตต้องมีความหนาเพิ่มขึ้น จึงเป็นการเพิ่มเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลต่อราคาในการผลิต เพราะต้องใส่วัตถุดิบเพิ่มเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ และให้ได้สมบัติที่ใกล้เคียงกับฟิล์ม PBS นอกจากนี้การนำแป้งสตาร์ชมาผสมกับพลาสติกย่อยสลายได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตรงกับความต้องการในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น สามารถนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การเกษตร และบรรจุภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมของผู้บริโภคที่มีเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มพอลิไวนิลพีวีดีชนิดต่างๆ ที่ใช้สารช่วยผสม และไม่ใช้สารช่วยผสม

สารเคมี	ราคา (บาท /กก.)	อัตราส่วนผสม											
		Pure PBS		PBS/EMS		PBS/EMS/MAI		PBS/HBS		PBS/HBS/MAI			
		ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท /กก.)	ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท /กก.)	ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท /กก.)	ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท /กก.)	ปริมาณที่ใช้ (% โดย น้ำหนัก)	ราคา (บาท /กก.)		
PBS	200	100	200	70	140	70	140	70	140	70	140	70	140
EMS	22	-	-	30	6.6	30	6.6	-	-	-	-	-	-
HBS	24	-	-	-	-	-	-	30	7.2	30	7.2	30	7.2
Glycerol	90	-	-	9	8.1	9	8.1	9	8.1	9	8.1	9	8.1
Anox® 20	430	-	-	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
MA	1700	-	-	-	-	1	17	-	-	-	-	1	17
L101	2550	-	-	-	-	0.01	0.255	-	-	-	-	0.01	0.255
		รวม	200	รวม	155.1	รวม	172.3	รวม	155.7	รวม	172.9	รวม	172.9
				ราคาต่อ 1 kg	142.2	ราคาต่อ 1 kg	156.5	ราคาต่อ 1 kg	142.7	ราคาต่อ 1 kg	157.1	ราคาต่อ 1 kg	157.1
				ประหยัด (%)	28.90	ประหยัด (%)	21.75	ประหยัด (%)	28.65	ประหยัด (%)	21.46	ประหยัด (%)	21.46

\*หมายเหตุ ราคานี้ยังไม่รวมค่า Compounding

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตฟิล์มพอลิเอทิลีนซัคซิเนต ผสมแม่เปียงสตาร์ชนิดต่างๆ ทั้งที่ใส่สารช่วยผสม และไม่ใส่สารช่วยผสม

รายการ	ปริมาณที่ใช้	PBS/EMS		PBS/EMS/MAI		PBS/HBS		PBS/HBS/MAI	
		ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน	ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน	ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน	ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน
วัตถุดิบ	1 กิโลกรัม	142.2 บาท/กก.	142.2	156.5 บาท/กก.	156.5	142.7 บาท/กก.	142.7	157.1 บาท/กก.	157.1
ค่าแรง	20 นาที	194 บาท/วัน <sup>b</sup>	8.08	194 บาท/วัน <sup>b</sup>	8.08	194 บาท/วัน <sup>b</sup>	8.08	194 บาท/วัน <sup>b</sup>	8.08
ค่าไฟฟ้า	3 หน่วย	2 บาท/หน่วย	6.00	2 บาท/หน่วย	6.00	2 บาท/หน่วย	6.00	2 บาท/หน่วย	6.00
ราคาต้นทุนการผลิต ฟิล์มไปโอพลาสติก 1 กิโลกรัม			156.28		170.58		156.78		171.18

หมายเหตุ : a เป็นราคาโดยประมาณเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ.2553

b ค่าแรงขั้นต่ำในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล

c ราคาที่ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคา

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากวัสดุผสมระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชดัดแปร (Modified starch) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งสตาร์ช ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) ที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เพื่อใช้เป็นฟิล์มสำหรับงานเกษตรกรรม จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลดำเนินงานวิจัย

##### ตอนที่ 1 การเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ในห้องปฏิบัติการ

1. ค่า MFI ของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตร PBS ที่เติมแป้งสตาร์ช จะมีค่า MFI สูงกว่า PBS บริสุทธิ์ แต่ MFI มีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งสตาร์ชเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล พบว่า ค่า MFI เพิ่มขึ้น
2. จากการศึกษาลักษณะวิทยา PBS ผสมกับแป้งสตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า แป้งสตาร์ชกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (Matrix) PBS และมีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) PBS/EMS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า PBS/PGS
3. การเติมพลาสติกไฮเซอรอลลงไป ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อย โดย PBS/EMS สูตร 70/30 พลาสติกไฮเซอรอล 40% of starch มีสมบัติเชิงกลที่อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ซึ่งไม่ต่างจากพลาสติกไฮเซอรอลที่ปริมาณอื่นๆ แต่ที่พลาสติกไฮเซอรอล 40% นี้ สามารถที่จะขึ้นรูปเป่าเป็นฟิล์มได้ง่ายกว่า
4. การเติมแป้งสตาร์ชลงไป ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง และ PBS/EMS มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่า PBS/PGS
5. การเติมสารช่วยผสมที่ MA 1% (โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์) และใช้ L101 10% (MA basis) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นเล็กน้อย แต่มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคลดลง และมีความเข้ากันได้ระหว่าง PBS กับแป้งสตาร์ชมากขึ้น

## ตอนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตฟิล์มเชิงอุตสาหกรรม

สูตรที่ได้ทำการคัดเลือกมาเป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ ได้แก่ P7E3G40, P7E3G40/MA1, P7H3G40 และ P7H3G40/MA1 โดยสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้บางขึ้น และฟิล์มมีความหนาแน่นกว่าฟิล์มที่เตรียมในห้องปฏิบัติการซึ่งฟิล์มที่ได้ที่มีความหนาแน่นสุดประมาณ 40-50 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ใช้อัตราการเป่าฟิล์ม (Blow-up ratio) ประมาณ 2-3 เท่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบมอก.711-2530 กับฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มเชิงพาณิชย์ จะเห็นว่ามีความหนาแน่นที่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นทำให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มทางการเกษตรที่มีความหนาแน่นในช่วง 50-80 ไมครอน เช่น ฟิล์มทางการเกษตร อาทิ ถุงเพาะชำต้นไม้ ฯลฯ

1. การเติม HBS ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่า EMS และการเติมสารช่วยผสมที่ MA1% ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม แต่จะมีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น
2. ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เติม HBS สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่า EMS และเมื่อเติมสารช่วยผสมทำให้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาค และการยึดติดของ PBS กับแป้งสตาร์ชที่ดีขึ้น
3. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่า การเติมแป้งสตาร์ช ลงใน PBS ไม่ส่งผลต่อค่า  $T_m$  และ  $T_d$  แต่ส่งผลต่อองค์ประกอบผลึกของ PBS โดยที่องค์ประกอบผลึกของ PBS/HBS มากกว่า PBS/EMS
4. ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่า การเติมแป้งสตาร์ช ชนิด EMS ลงใน PBS ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมแป้งสตาร์ชชนิด HBS ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำลดลงน้อยกว่า PBS บริสุทธิ์ เมื่อเติมสารช่วยผสมส่งผลให้ความสามารถในการดูดน้ำลดลงเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม
5. ค่ามุมสัมผัสของ PBS/HBS มีมุมสัมผัสมากกว่า PBS/EMS และเมื่อเติมสารช่วยผสมส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม
6. ความแข็งแรงของรอยฉีกของ PBS/HBS มีค่าความแข็งแรงของรอยฉีกที่ดีกว่า PBS บริสุทธิ์ และ PBS/EMS ตามลำดับ ส่วนการเติมสารช่วยผสมไม่ได้ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยฉีกเปลี่ยนแปลงมากนัก
7. จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า การย่อยสลายในแต่ละสูตรมีอัตราการย่อยสลายอยู่ในระยะเวลา 3 เดือน โดยพอลิเมอร์ผสม PBS/EMS สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS อย่างไรก็ตามการเติมสารช่วยผสมไม่ได้ส่งผลต่อการย่อยสลายเท่าใดนัก

8. การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ พบว่าเมื่อมีการเติมแป้งสตาร์ชลงไป สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ 20-40% (ขึ้นกับชนิด และปริมาณแป้งสตาร์ชที่ใส่) เมื่อเทียบกับ PBS บริสุทธิ์ แสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ และสารช่วยผสมชนิดอื่นๆ ที่เหมาะสมกับพอลิวิวิตลินซักซิเนตมากขึ้น เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีมากขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพสู่อุตสาหกรรมด้วย
2. ควรศึกษาแป้งชนิดอื่นที่มีการปรับปรุงสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น หรือมีความมีขั้วลดลงกว่านี้ เพื่อลดการดูดซับน้ำ หรือความชื้นจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้พลาสติกเสียสภาพได้ง่าย
3. ควรศึกษาเชิงวิเคราะห์ให้หลากหลายมากขึ้น
4. พัฒนาสูตร และปรับปรุงปัจจัยการผลิตเพื่อให้ได้ฟิล์มหนาที่บางขึ้น และมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม เพื่อสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการใช้ฟิล์มบาง เช่น ถุงหูหิ้ว ฟิล์มคลุมดิน
5. ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D5338-98

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. **เคมีพอลิเมอร์**. 2546. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Energy for Environment Foundation. **Landfill**. 2010. [Online]. Available: [http://www.efe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=QaThskHyxen7t4fl &d oc=jU1BXatCvnxgDk9q](http://www.efe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=QaThskHyxen7t4fl&d oc=jU1BXatCvnxgDk9q)
- [3] National Metal and Materials Technology Center. **Plastic recycle**. 2009. [Online]. Available: [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/plastic\\_recycle.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/plastic_recycle.html)
- [4] **Polybutylene succinate** . 2009. [Online]. Available: <http://www.nia.or.th/innolinks/page.php?issue=200903&section=6>
- [5] Thai Charoen Thong Karntor Co., Ltd. **Mulch film**. 2009. [Online]. Available: <http://www.tctthainet.com/image/products/thaicharoen. 2007>.
- [6] **Degradable plastic**. 2009. [Online]. Available: <http://www.sema.go.th/.2009/node 3440>
- [7] National Innovation Agency. **InnoBioPlast**. 2009. [Online]. Available: <http://www.nia.or.th/innolinks/200608/innovculture.htm. 2006>.
- [8] Polymer Society (Thailand). **Degradable plastics**. 2009. [Online]. Available: [http://www.thaipolymersociety.org/polymernews\\_5.pdf. 2006](http://www.thaipolymersociety.org/polymernews_5.pdf. 2006).
- [9] เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. 2009. [Online]. Available: <http://www.nia.or.th/download/document/chapter3.pdf>
- [10] **Biocycle**. 2009. [Online]. Available: [www.biocycle.com/br. 2009](http://www.biocycle.com/br. 2009).
- [11] ธนาวดี ถีจากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. 2549. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ.
- [12] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. **แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ**. 2550. กรุงเทพฯ: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ.
- [13] **Thaiplastics**. 2009. [Online]. Available : <http://www/thai-plastic/ptness.php. 2009>
- [14] วารสารบรรจักษ์ณ์ไทย “**พลาสติกชีวภาพ**” นวัตกรรมวัสดุใหม่ของโลก. Vol.18, April-June 2008. pp. 37.
- [15] Showa Highpolymer Co., Ltd. **Biodegradable aliphatic polyester technical data sheet**.

- [16] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีแป้ง. 2546. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [17] Calvin cycle. 2009. [Online]. Available: <http://student.ccbcmd.edu/~gkaiser/biotutorials/photosyn/images/u4fg46.jpg>. 2001
- [18] Science-project. Amylase. 2009. [Online]. Available: [www.science-projects.com/starch.GIF](http://www.science-projects.com/starch.GIF). 2001.
- [19] วรวิทย์ โพนิกกร. “ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสถานะฝัองกลบ.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [20] ณีฎธิดา สุขอัจจะสกุล ชีรพล วงศ์วัฒนอนันต์ และพัทธมน เรียงชัยนาม ผลของชนิดแป้งตัดแปรและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติก-แอซิดผสมแป้งตัดแปร. โครงการพิเศษ. ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [21] Thai Tapioca Starch Association. Tapioca starch price. 2010. [Online]. Available: <http://www.thaitapiocastarch.org/price.asp>
- [22] Thai Environment Website. จับตาอนาคต "มันสำปะหลัง" จากพิษเกษตรสู่พลังงานทดแทน. 2010. [Online]. Available: <http://www.thaienv.com/content/view/697/40/>
- [23] นายสุภ โชคจิ จินดาวุฒิกุล “การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง” 2009. [Online]. Available: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/ct\\_5\\_2545\\_manioc.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/ct_5_2545_manioc.pdf)
- [24] กิตติวุฒิ รัตนพัฒนกิจ, พชร เทียมธารา และ ราชวัลลภ แจ่มมงคล. “การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการถักขึ้นรูป” โครงการพิเศษ ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [25] Kmutt. เคมีและสมบัติของแป้ง. 2010. [Online]. Available: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. 2007
- [26] X-Y.Song., Q-H. Chen., H. Ruan., G-Q. He. and Q. Xu. Synthesis and paste properties of octenyl succinic anhydride modified early indica rice starch. Journal of Zhejiang University Science, Vol. 7(10), 2006. pp 800–805.
- [27] M.J. Folkes and P.S. Hope. Polymer Blends and Alloys. 1993. Great Britain at the University Press, Cambridge.

- [28] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. 2547. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด.
- [29] **Maleic anhydride**. 2010. [Online]. Available:  
<http://www.msds.ped.go.th/searchName/asp?VID=159>
- [30] J-F. Zhang and X. Sun. **Mechanical properties of poly(lactic acid)/starch composites compatibilized by maleic anhydride**. *Biomacromolecules*. Vol.5, 2004. pp. 1446-1451
- [31] The Board of Regents of the University of Wisconsin System Last Modified. **Glycerol**. 2010. [Online]. Available:  
[http://www.bmrwisc.edu/metabolomics/mol\\_summary/?molName=glycerol](http://www.bmrwisc.edu/metabolomics/mol_summary/?molName=glycerol)
- [32] บรรณสร นิล. **เทคโนโลยีพลาสติก (ฉบับปรับปรุง)**. 2546. พิมพ์ครั้งที่ 20. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [33] **Blown film extrusion**. 2010. [Online]. Available:  
<http://www.pitfallsinmolding.com/extrusion1.html>
- [34] **พลาสติกเพื่อการเกษตร**. 2010. [Online]. Available:  
<http://library.dip.go.th/multim6/edoc/16263.pdf>
- [35] P. Papaseit, J. Badiola and E. Armengol. **Plastics and agriculture**. Translated by V. Tangkosakul, P. Choeakawong, D. Tongaram, P. Na Songkhla, M. Wongrakpanich and S. Chotiwan. Bangkok: Sirivatana. 2000.
- [36] Thai-plastic. **พลาสติกคลุมดิน**. 2009. [Online]. Available:  
[http://www.thai-plastic.com/images/products/wandee\\_20061122\\_111833.gif](http://www.thai-plastic.com/images/products/wandee_20061122_111833.gif)
- [37] บ้านสวนพอเพียง. **Direct covers**. 2009. [Online]. Available:  
<http://www.bansuanporpeang.com/node/101>
- [38] Dubois Agrinovation **Low tunnels**. 2010. [Online]. Available:  
[http://www.duboisag.com/catalog.php?lang=en&product\\_id=66](http://www.duboisag.com/catalog.php?lang=en&product_id=66)
- [39] **Greenhouses**. 2009. [Online]. Available:  
[http://mrgreenhouse.co.uk/index.php5?title=Main\\_Page](http://mrgreenhouse.co.uk/index.php5?title=Main_Page)
- [40] Thai-plastic. **แผ่นพลาสติกปูบ่อน้ำ บ่อน้ำบาด และบ่อกึ่ง**. 2009. [Online]. Available:  
[http://www.thai-plastic.com/images/products/wandee\\_20061212\\_112550.gif](http://www.thai-plastic.com/images/products/wandee_20061212_112550.gif)
- [41] Trinog-xs (Xiamen) Greenhouse Tech Co., Ltd. **Irrigation**. 2010. [Online]. Available:  
<http://xsgh6688.en.made-in-china.com/product/doJxZNYTHiE/China-Drip-Irrigation.html>

- [42] **Hydroponics**. 2010. [Online]. Available:  
[http://www.billboardmama.com/index.php?main\\_page=popup\\_image&pID=993](http://www.billboardmama.com/index.php?main_page=popup_image&pID=993)
- [43] Polynet Trading Aust P/L. **Nets and energy screens**. 2009. [Online]. Available:  
<http://www.polynet.com.au/products/aluminet/prdalum.html>
- [44] J.A. Ratto., P.J.Stenhouse., M. Auerbach., J. Mitchell. and R. Farrell. **“Processing, performance and biodegradability of a thermoplastic aliphatic polyester/starch system”** Polymer. Vol.40, 1999. pp. 6777–6788
- [45] S. Mali., L.S. Sakanaka., F. Yamathita. and M.V.E. Grossman. **“Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect”** Carbohydrate Polymers . Vol.60, 2005. pp. 283–289
- [46] 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.
- [47] W.Y. Jang., B. Y. Shin., T. J. Lee. and R. Narayun. **“Thermal properties and morphology of biodegradable PLA/starch compatibilized blend”** Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Vol.13, 2007. pp. 457-465
- [48] ศุภสิทธิ์ ผู้มีโชค. **“การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปรและพอลิพรพิลีน.”**วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ และเทคโนโลยีสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] กล้าณรงค์ ศรีรอด, ชลธิชา นุ่มหอม และ รังสิมา ชลคุป. **“ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการย่อยสลายได้ของแป้ง/polycaprolactoneblend.”** ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541.

- [53] พรวิ สุมิตร. “การศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดรับประทานได้จากโคโคซานกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [54] อัจฉราพร รัตนมณี. “ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กซ์ผสมแป้งดัดแปรเอสเทอร์ และแป้งพรีเจิลสำหรับงานเกษตร.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [55] 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.
- [56] ASTM D 882 Committee on Standard “**Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting.**”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [57] ASTM D 1004 Committee on Standard “**Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting.**”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [58] มอก. 1027-2534 “**ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร.**”, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม., 2534.
- [59] ASTM D 570 Committee on Standard “**Standard test method for water absorption of Plastics.**”, Philadelphia: American Society for Testing and Material., 1998.
- [60] ASTM D5946-09 Committee on Standard “**Standard test method for corona-treated polymer films using water contact angle measurements.**”, Philadelphia: American Society for Testing and Material., 2003.
- [61] 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.
- [62] Z. Qiu., T. Ikeharab. and T. Nishi. “**Miscibility and crystallization in crystalline/crystalline blends of poly(butylene succinate)/poly(ethylene oxide)**” Polymer Vol.44, 2003. pp. 2799–2806
- [63] ASTM E 1131 Committee on Standard “**Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry.**”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.

- [64] Z. Guohua., L. ya., F Cuilan., Z. Min., Z Caiqiong. and C. Zongdao. **“Water resistance, mechanical properties and biodegradability of methylated-corn starch/poly(vinyl alcohol) blend film”** Polymer Degradation and Stability. Vol.91, 2006. pp. 703-711
- [65] J.E. Potts. **Aspects of degradation and stabilization of polymers.** 1973. New York: Elsevier. pp. 653
- [66] D. Hull. **An Introduction to Composite Materials.** 1981.: Great Britain at the University Press, Cambridge.
- [67] V.H. Orozco., W Brostow., W Chonkaew. and B.L.Lo’pez. **“Preparation and characterization of poly(lactic acid)-g-maleic anhydride starch blends”** Macromolecular Symposia. Vol.277, 2009. pp. 69–80
- [68] W. Pochanikorn and J. Prachayawarakorn **“Rice husk-filled polypropylene: effect of maleic anhydride treatment”** Proceeding of the 1st KMITL International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development Bangkok, Thailand. Vol.1, 25-26 August 2004, pp. 145-148
- [69] วชิรพล โพชนิกอร์. **“การบำบัดพื้นผิวของแกลบเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิพรอพิลีนคอมพาวด์.”** วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [70] นีรชา เข้มบุญยั้ง. **“การนำแกลบมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีนคอมพาวด์.”** วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [71] H-S Kim and H-J Kim **“Enhanced hydrolysis resistance of biodegradable polymers and bio-composites”** Polymer Degradation and Stability. Vol.93, 2008. pp. 1544-1553
- [72] H-S. Kim., B-H. Lee., S-W. Choi., S. Kim. and H-J. Kim **“The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites”** Composites: Part A Vol.38, 2007. pp. 1473–1482
- [73] วิชัย รวีตระกูลด โกศลย์ คุสุสาราญ พิเศษฐ์ วิริยะจิตรา สุรัชย์ นิมจิรววัฒน์ และ อภิชาติ สุขสำราญ. **การประยุกต์สเปคโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์.** 2527. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด. นำอักษรการพิมพ์
- [74] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** 2552. กรุงเทพฯ: บริษัทชวนพิมพ์ 50 จำกัด.

- [75] G. Scott and D. Gilead. **Degradable polymer: principles and applications**. 1995.: Great Britain at the University Press, Cambridge.

ภาคผนวก ก.

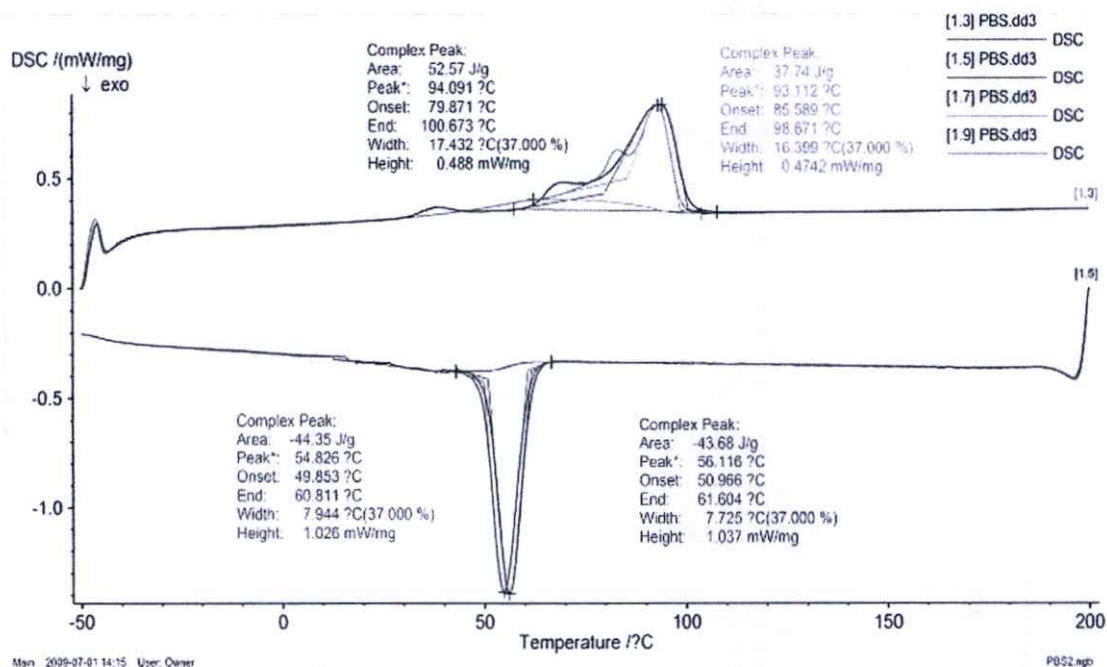
Data sheet ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ตารางที่ ก-1 Data sheet ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

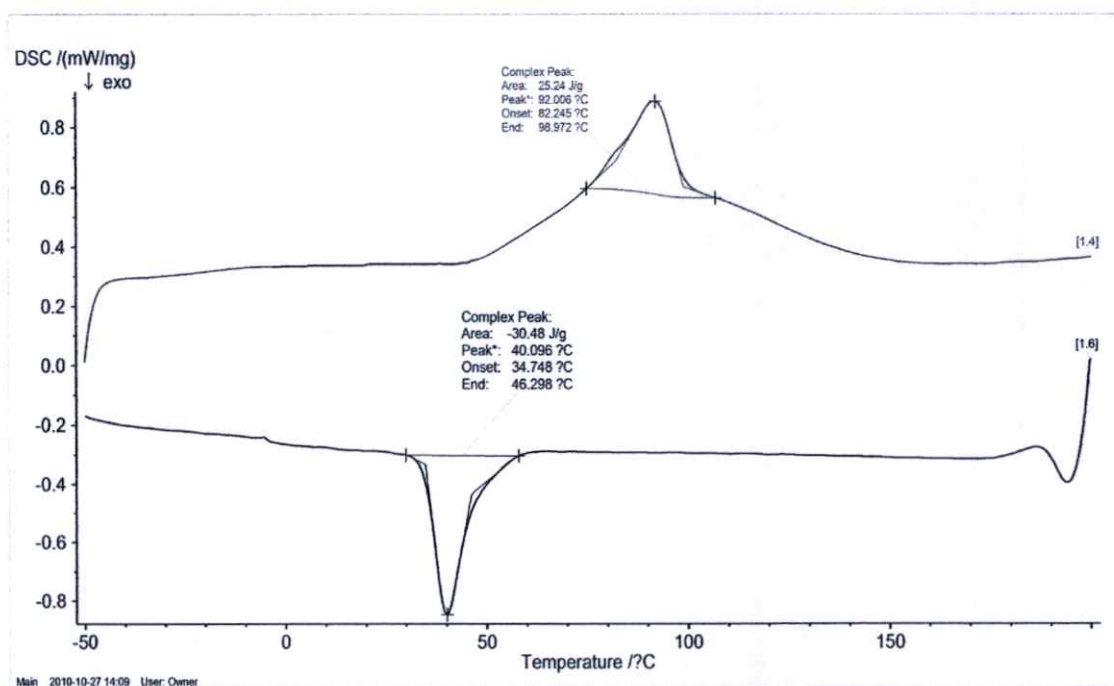
Product Data										
Biodegradable Plastic										
Bionolle										
Items	Units	PBS					PP	HDPE	LDPE	
Density	g/l	1260			1230		900	950	920	
Heat of combustion	k J/g	23.6			23.9		43.9	46.0		
H.D.T.(at 0.45 MPa)	°C	97			69		145	110	88	
Degree of crystallinity	%	35 - 45			20 - 35		56	69	49	
Melting point (Tm)	°C	114 - 115			93 - 95		164	130	108	
Glass transition temperature	°C	-32			-45		+5	-120	-120	
Grade		#1001	#1020	#1903*	#3001	#3020				
MFR (190 °C)	g/10 min.	1.5	25	4.5	1.4	25	4(230°C)	2	2	
Crystallization temp.	°C	75	76	88	50	53	120	104	80	
Flexural modulus	MPa	656	580	690	323	340	1370	1070	176	
Tensile yield strength	MPa	32	34	39	19	19	31	27	12	
Tensile break strength	MPa	57	21	35	47	34	44	39	35	
Tensile elongation	%	700	320	50	900	400	800	650	400	
Structure	-	Linear		LCB*	Linear		Linear		LCB	
<p>* CB means a long chain branched molecule. #1903 of LCB has a higher melt strength and crystallizing temperature than those of other linear-type grades.</p>										
<p>COPYRIGHT (C) 2009 SHOWA HIGHPOLYMER CO., LTD. ALL RIGHTS RESERVED.</p>										

## ภาคผนวก ข.

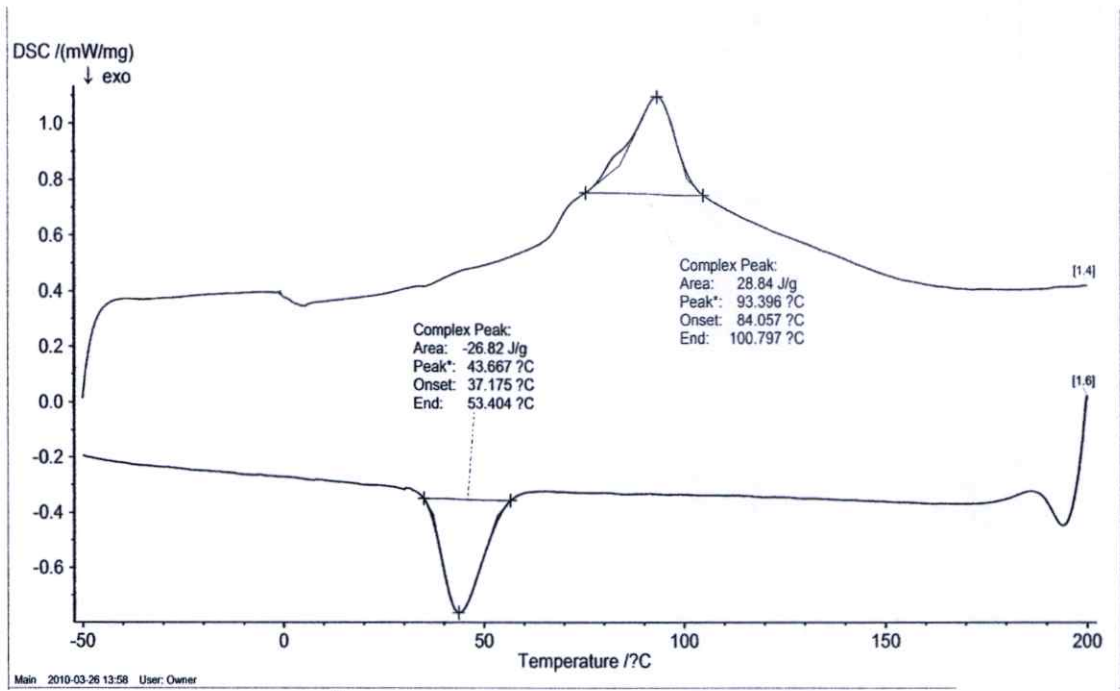
## การทดสอบสมบัติทางความร้อน



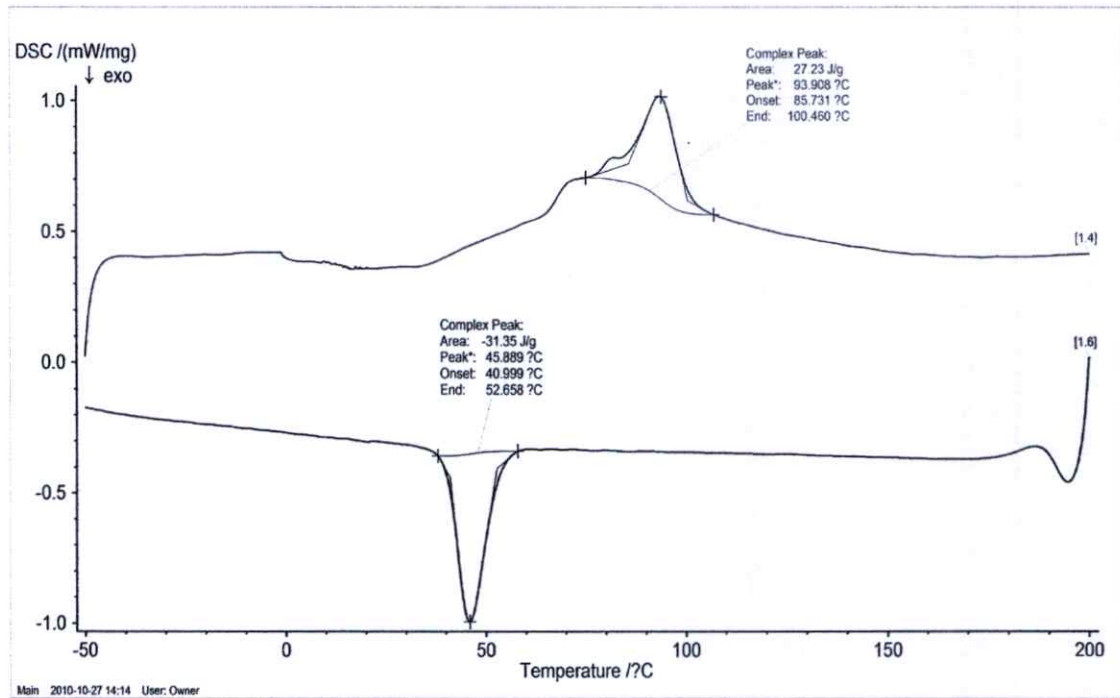
รูปที่ ข-1 DSC thermogram ของ PBS



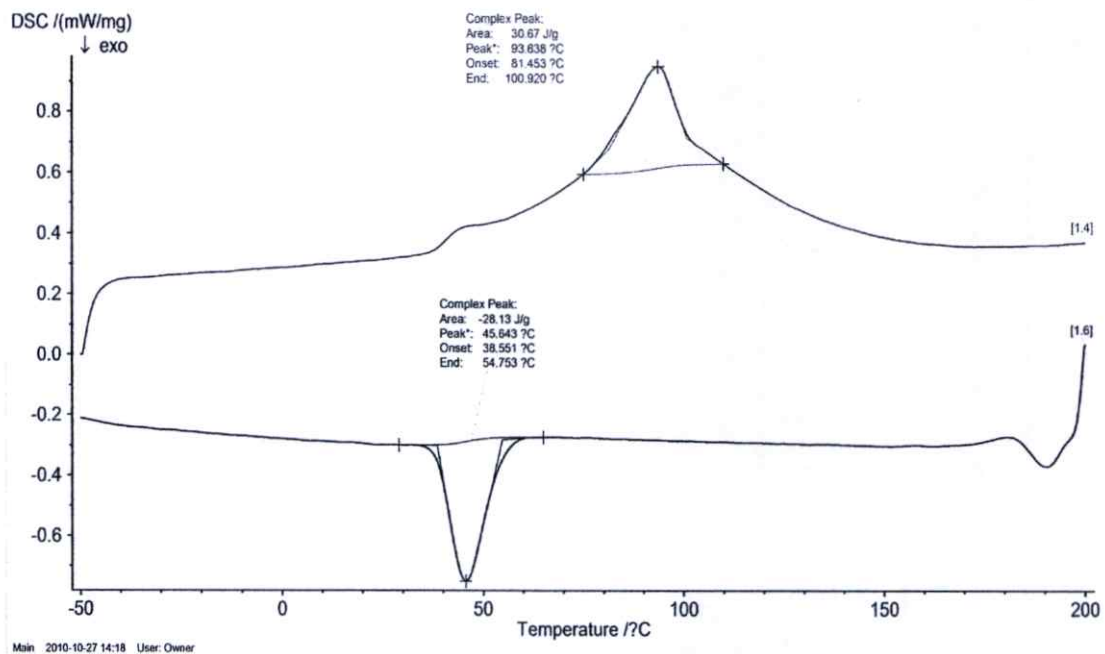
รูปที่ ข-2 DSC thermogram ของ P7E3G40



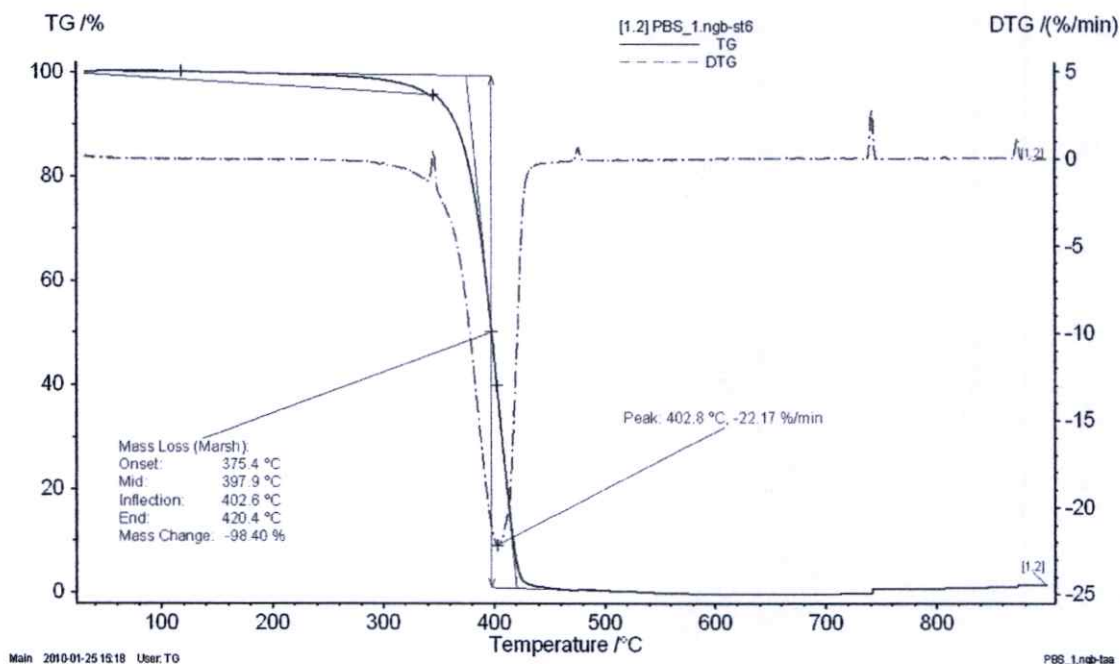
รูปที่ ข-3 DSC thermogram ของ P7E3G40/MA1



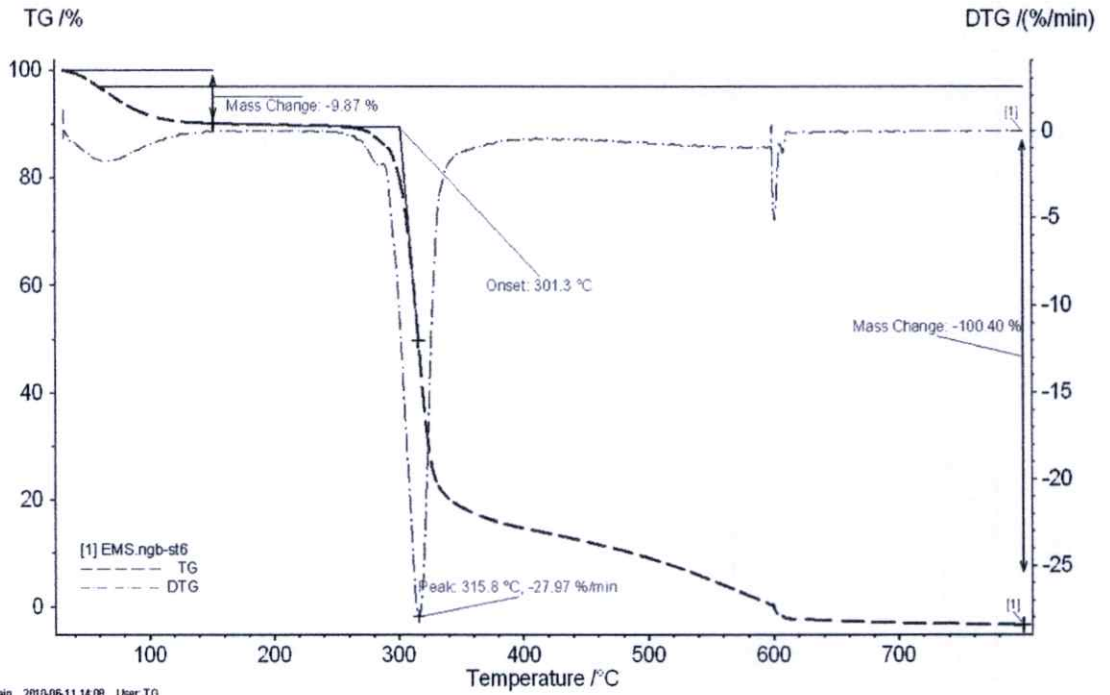
รูปที่ ข-4 DSC thermogram ของ P7H3G40



รูปที่ ข-5 DSC thermogram ของ P7H3G40/MA1

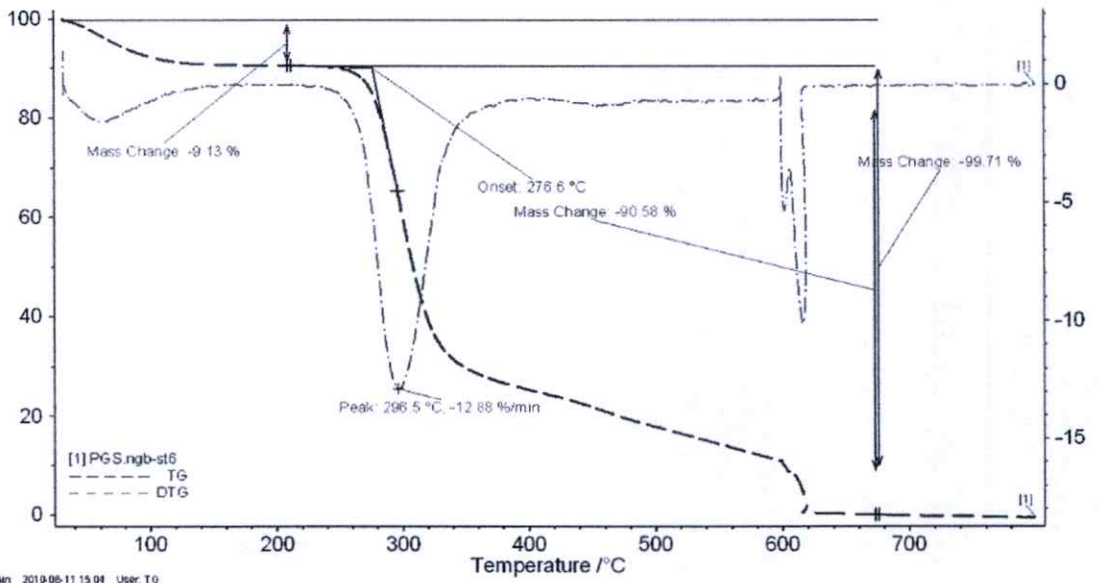


รูปที่ ข-6 TGA thermogram ของ PBS



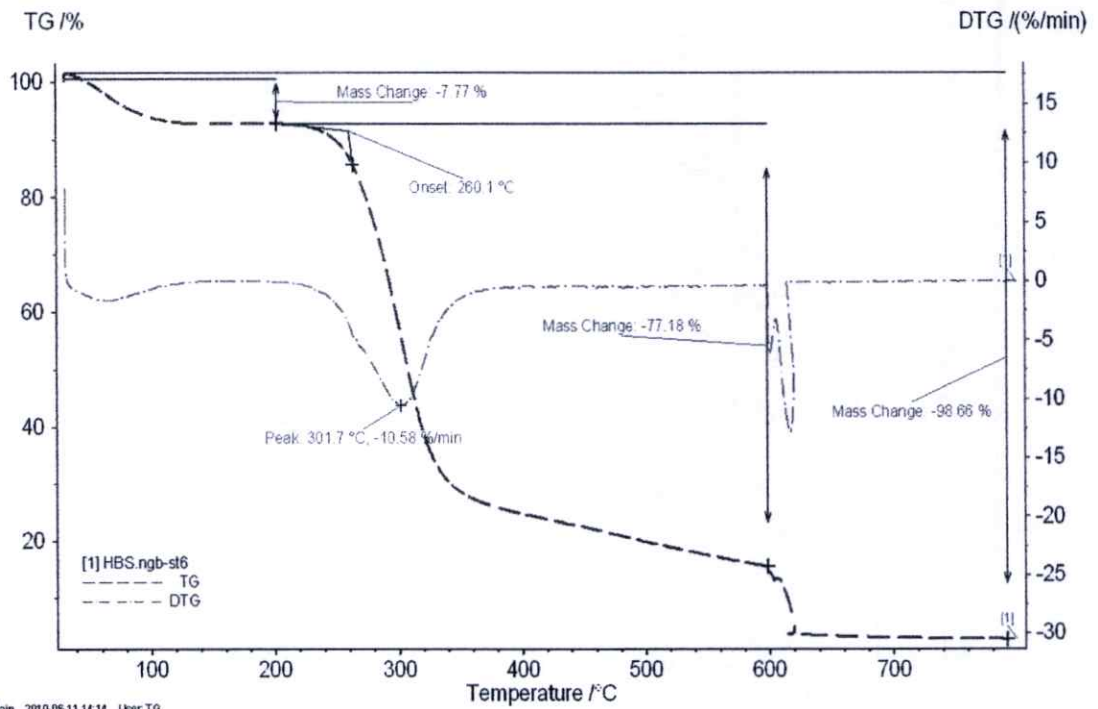
Main 2010-06-11 14:08 User: TO

รูปที่ ข-7 TGA thermogram ของ EMS

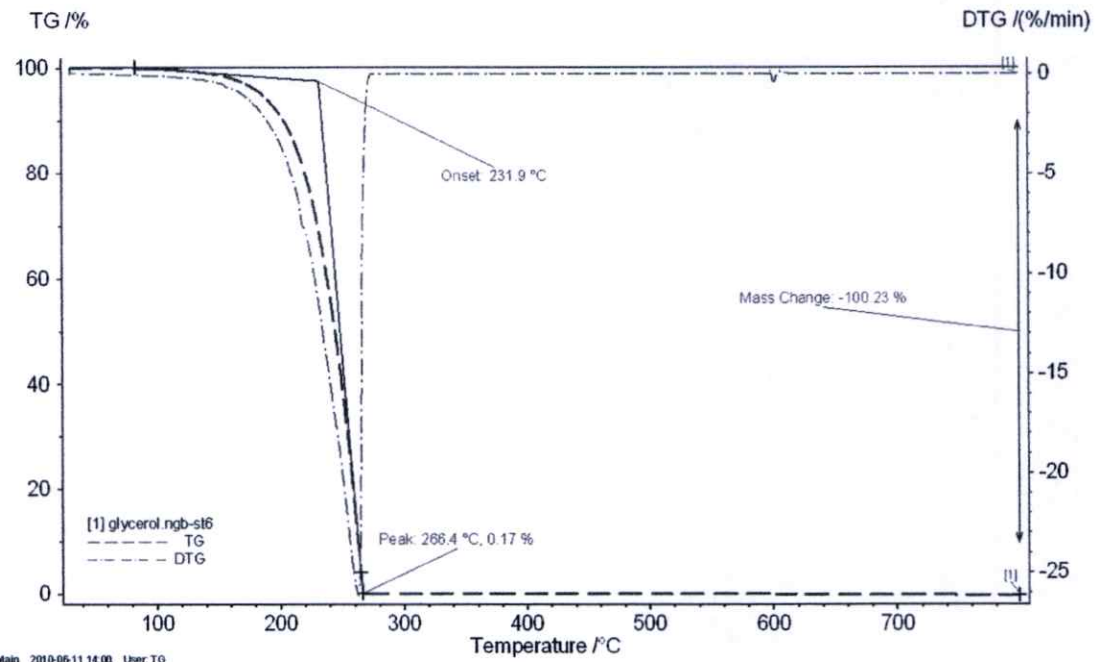


Main 2010-06-11 15:04 User: TO

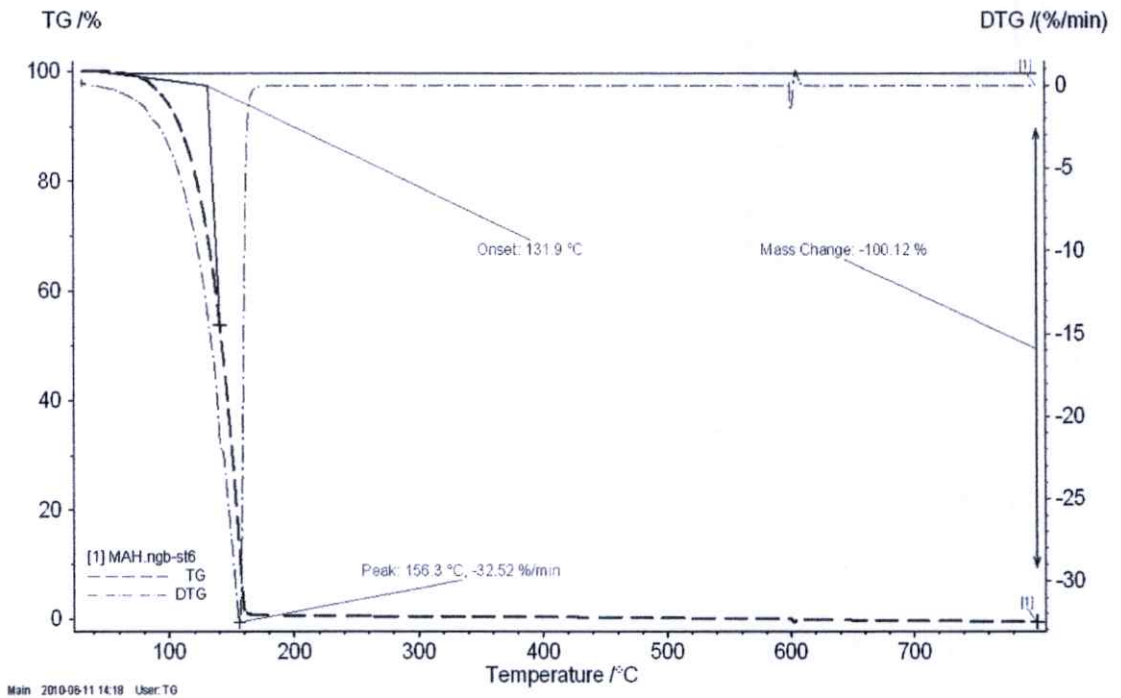
รูปที่ ข-8 TGA thermogram ของ PGS



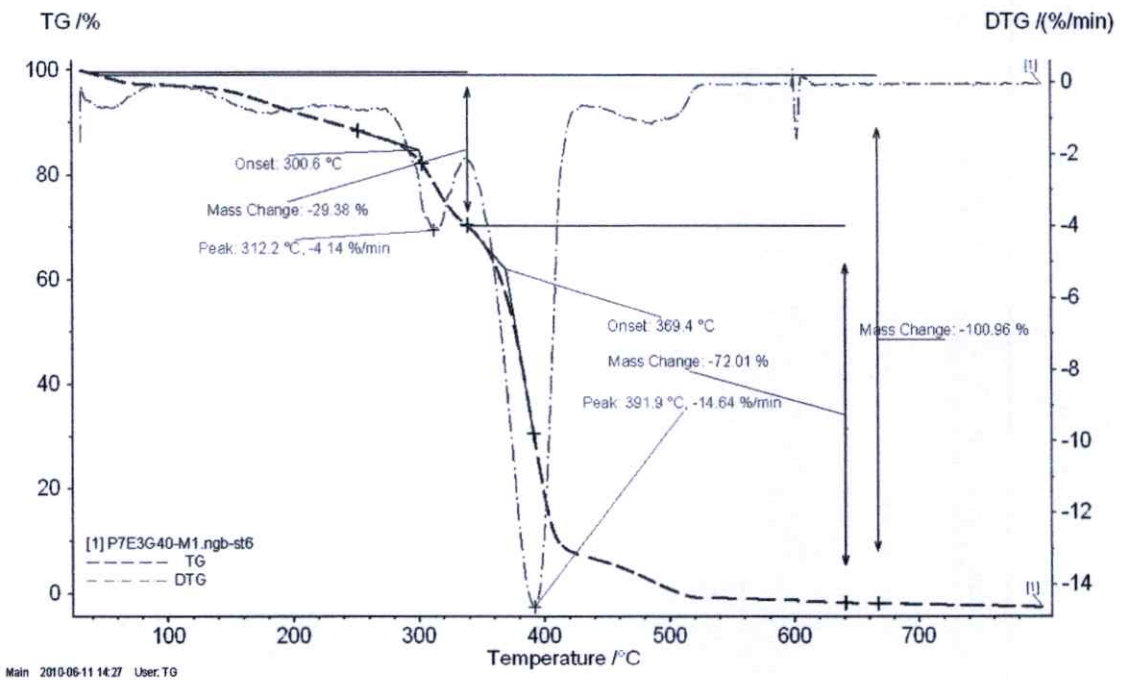
รูปที่ ข-9 TGA thermogram ของ HBS



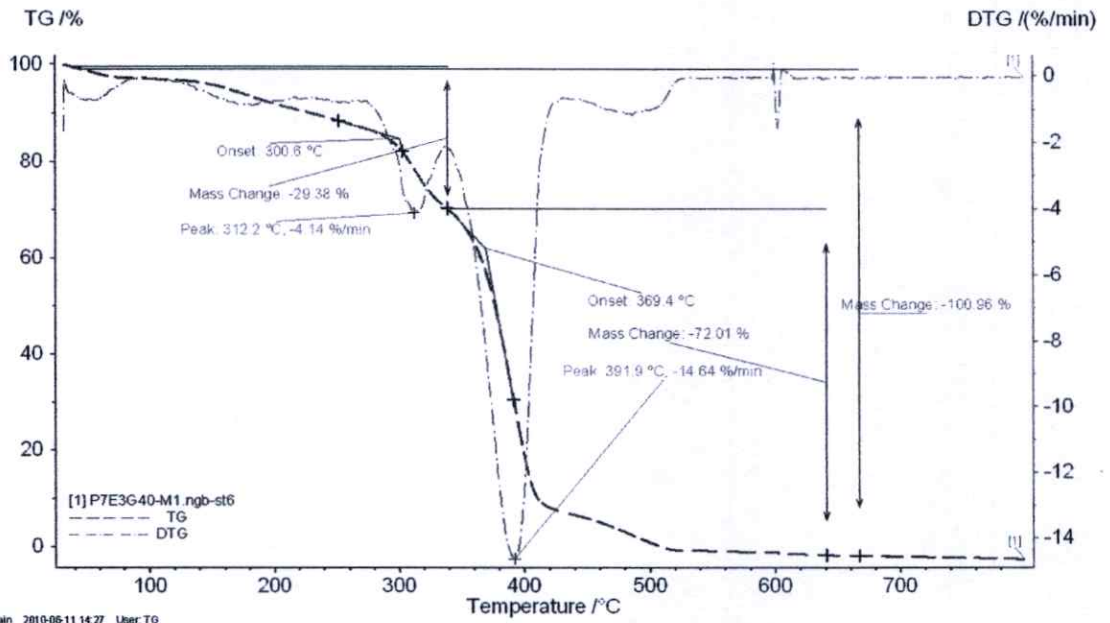
รูปที่ ข-10 TGA thermogram ของกลีเซอรอล



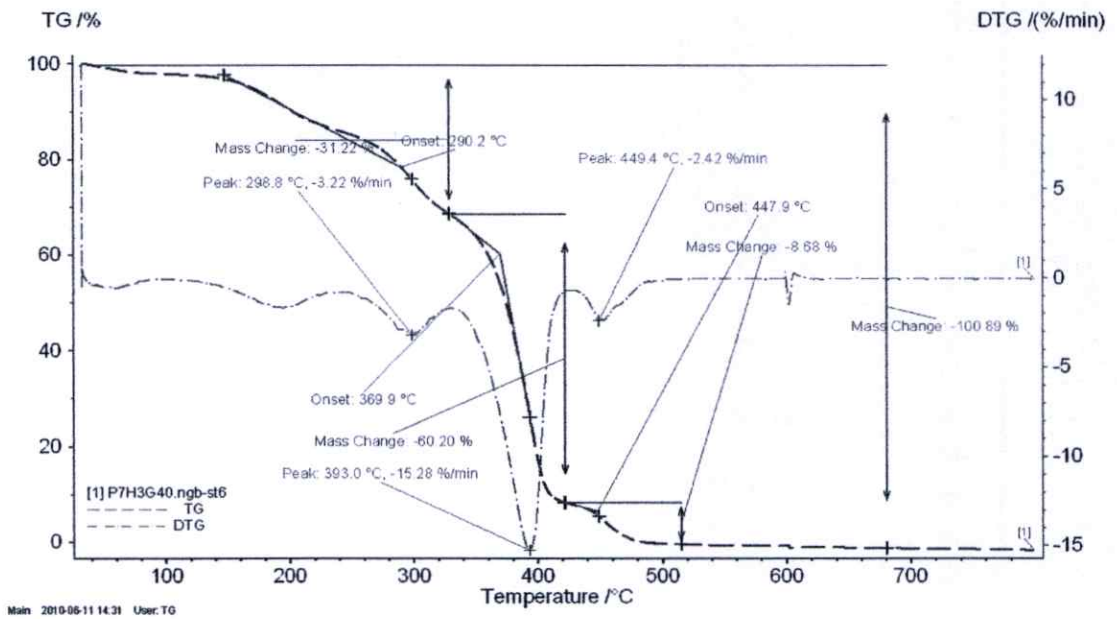
รูปที่ ข-11 TGA thermogram ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์



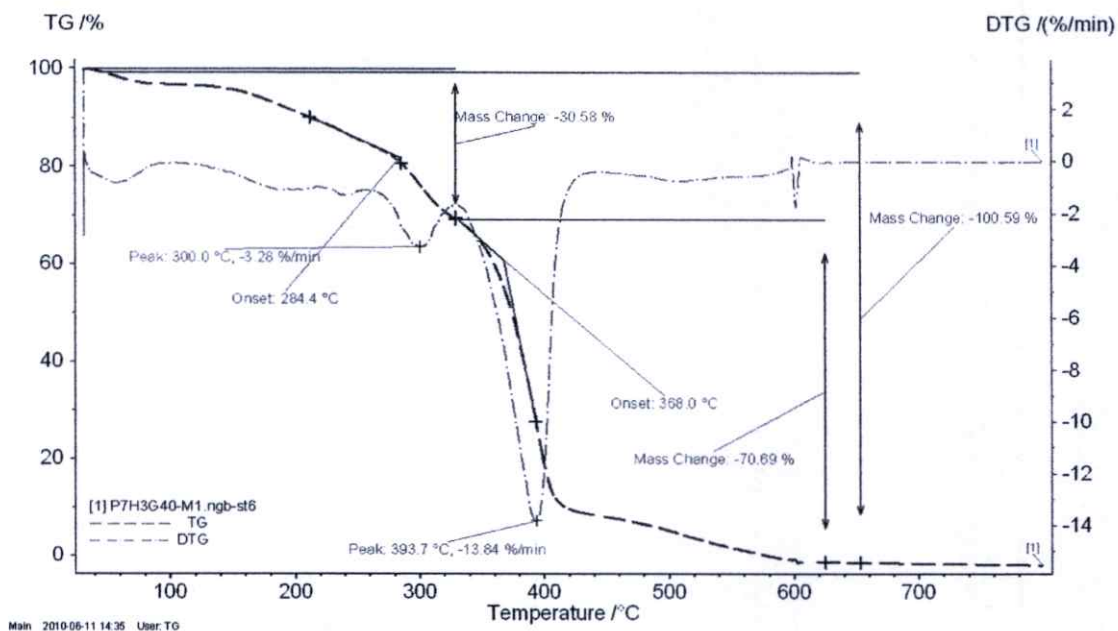
รูปที่ ข-12 TGA thermogram ของ P7E3G40



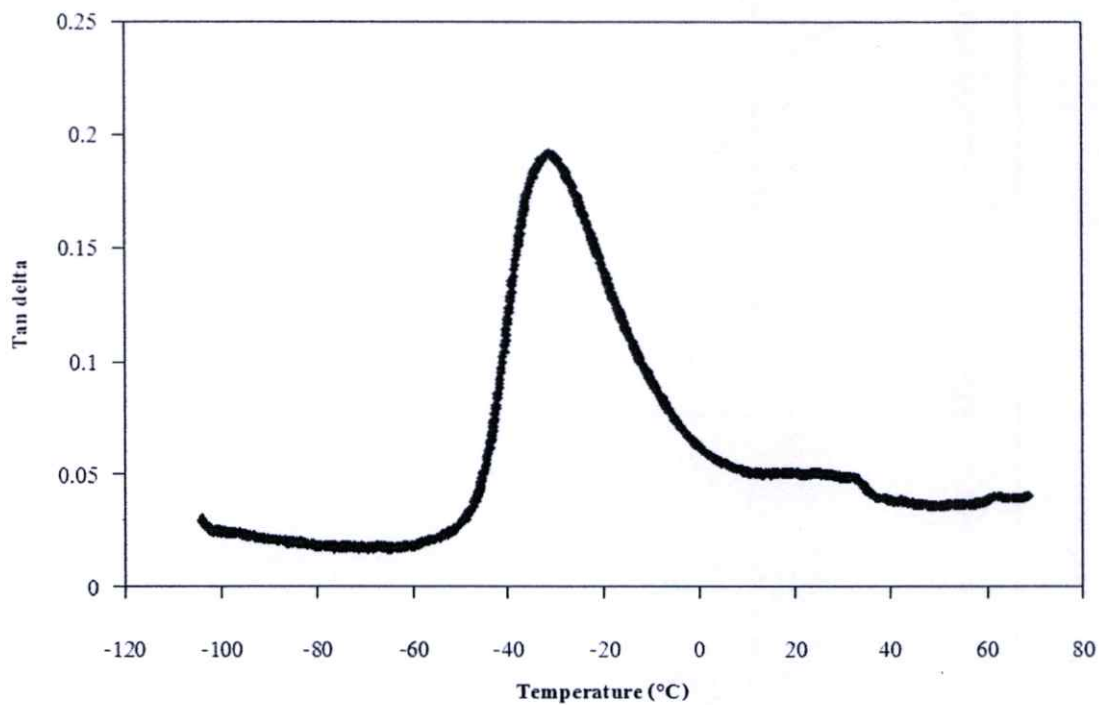
รูปที่ ข-13 TGA thermogram ของ P7E3G40/MA1



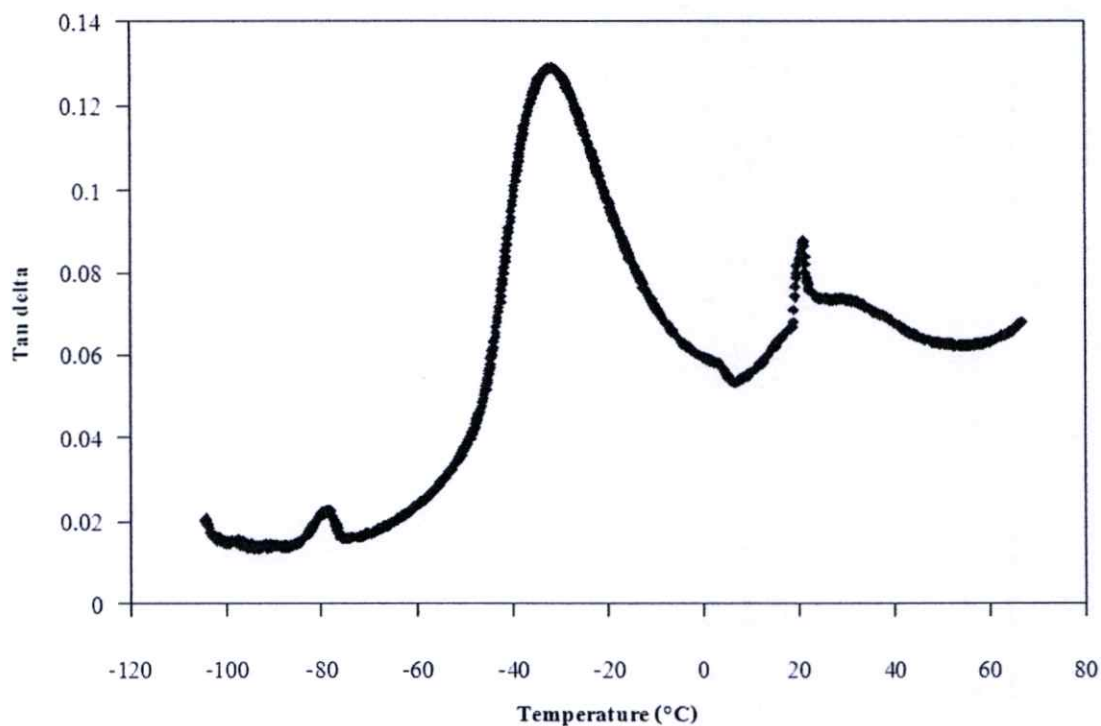
รูปที่ ข-14 TGA thermogram ของ P7H3G40



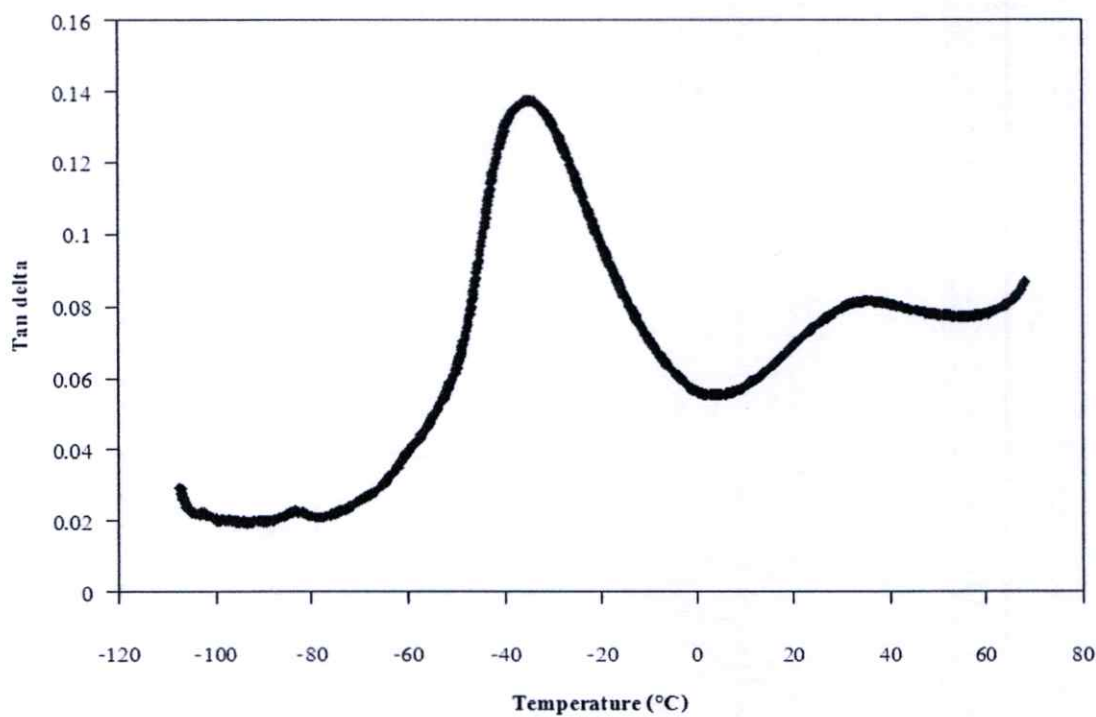
รูปที่ ข-15 TGA thermogram ของ P7H3G40/MA1



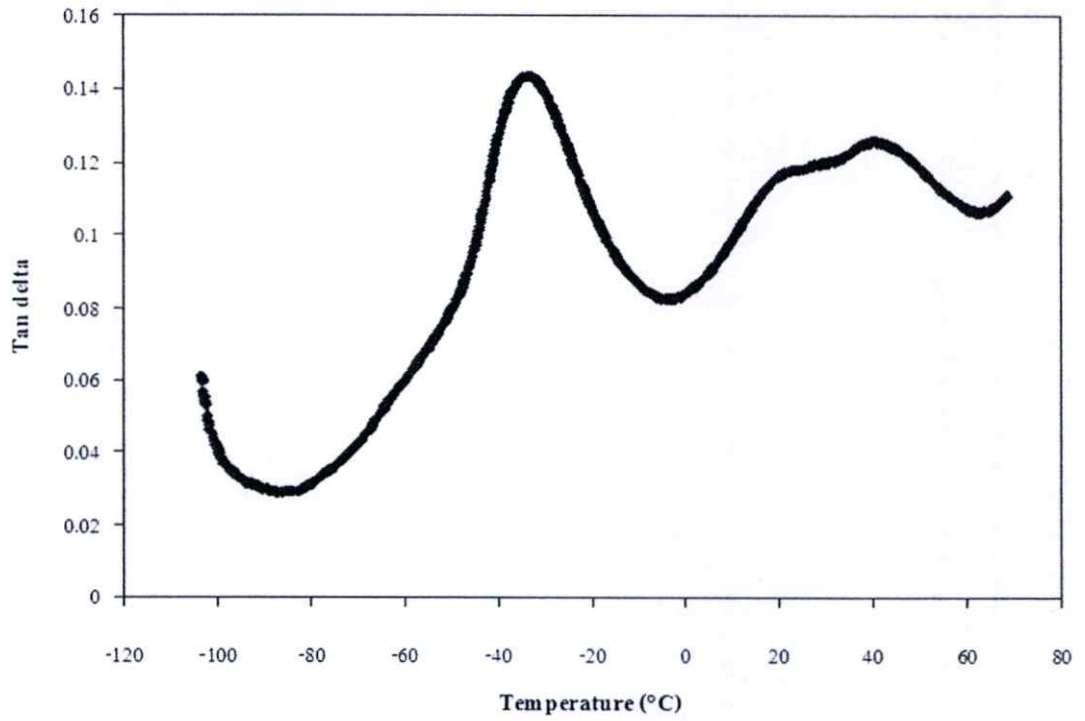
รูปที่ ข-16 DMTA thermogram ของ PBS



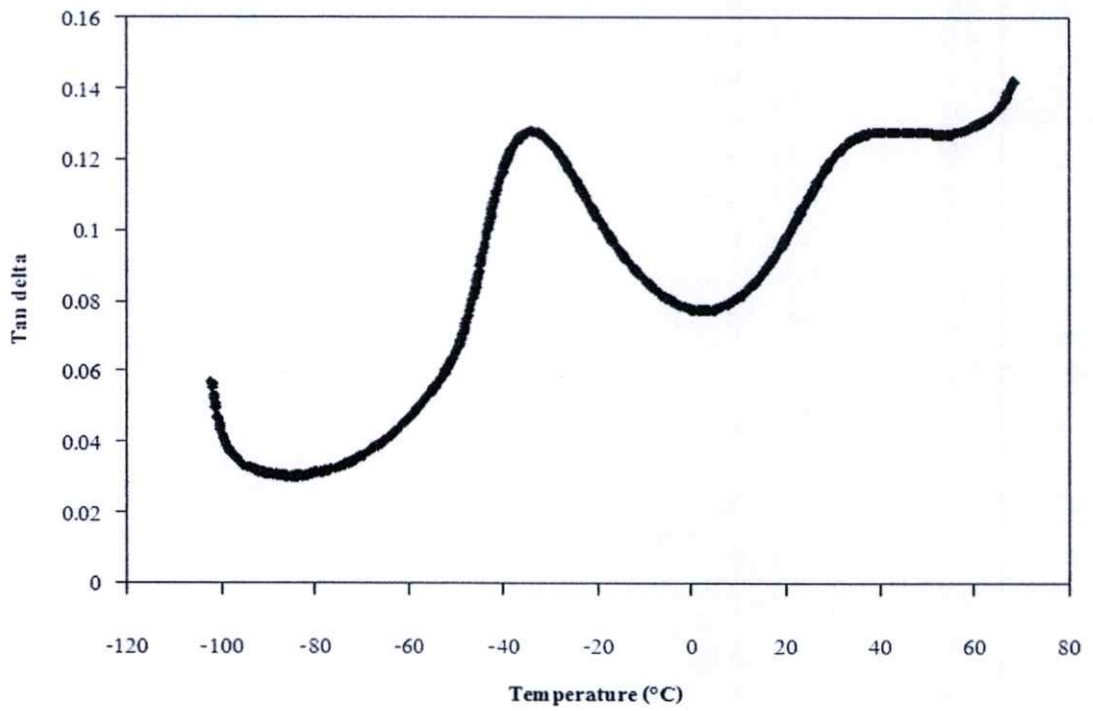
รูปที่ ข-17 DMTA thermogram ของ P7E3G40



รูปที่ ข-18 DMTA thermogram ของ P7E3G40/MA1



รูปที่ ข-19 DMTA thermogram ของ P7H3G40



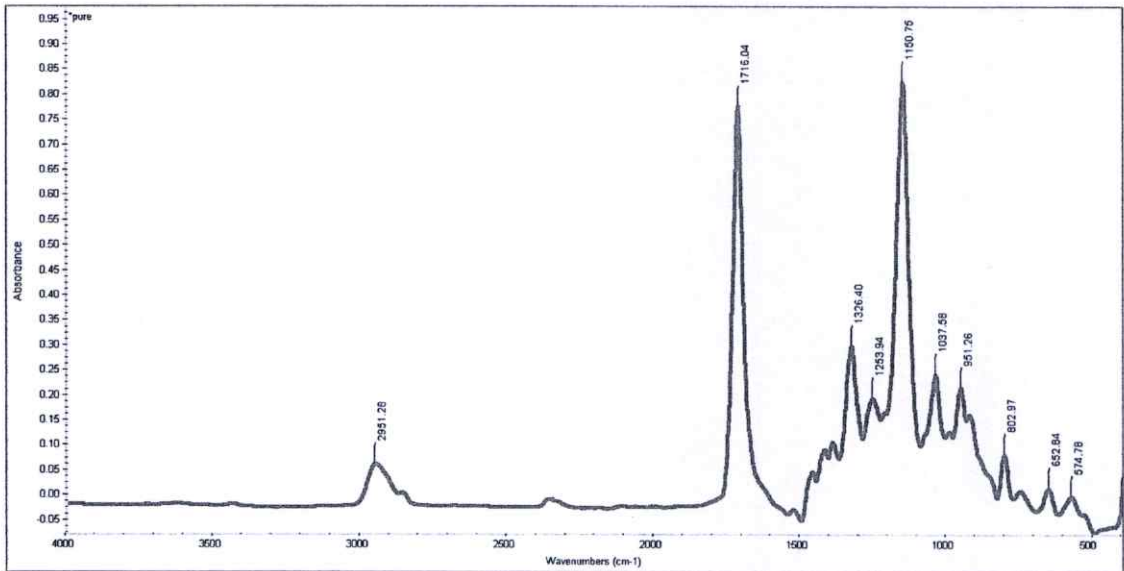
รูปที่ ข-20 DMTA thermogram ของ P7H3G40/MA1

ตาราง ข-20 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในบางสูตร (ตอนที่ 1) ด้วยเทคนิค

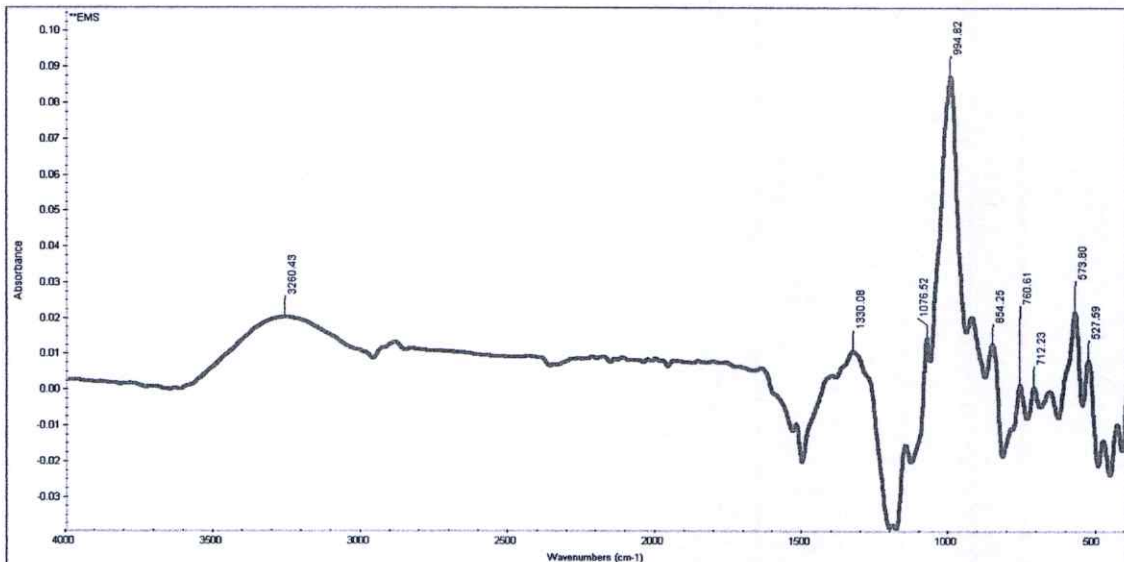
DSC

ตัวอย่าง	$T_m(^{\circ}\text{C})$	%Xc
P7E3G20	94.8	26.4
P7E3G30	93.2	23.7
P7E3G40	92.3	22.2
P7P3G20	n/a	n/a
P7P3G30	93.2	19.4
P7P3G40	93.3	11.9

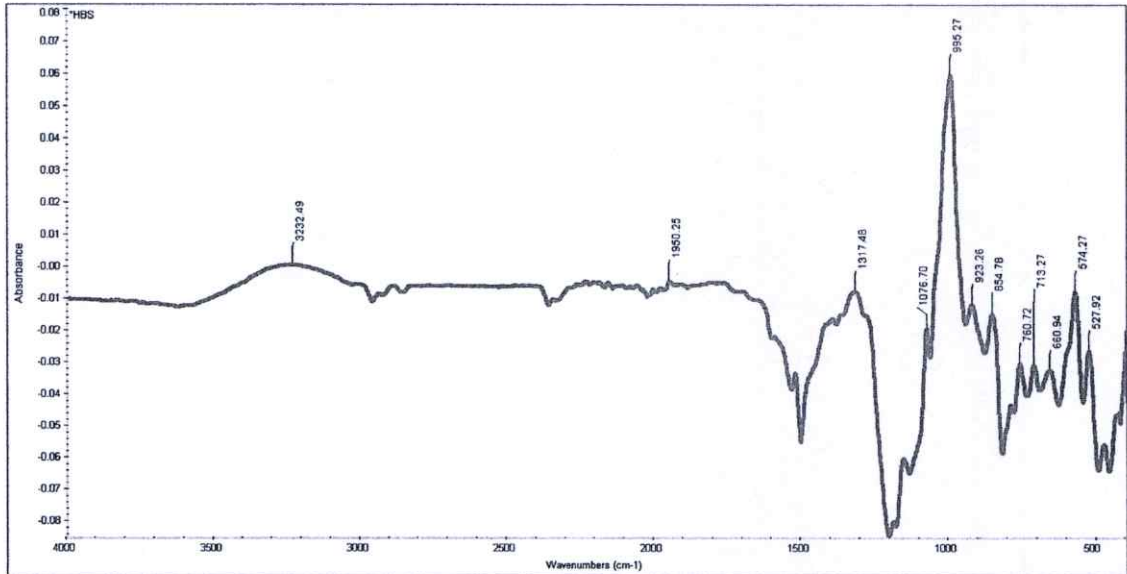
ภาคผนวก ค.  
การพิสูจน์เอกลักษณ์



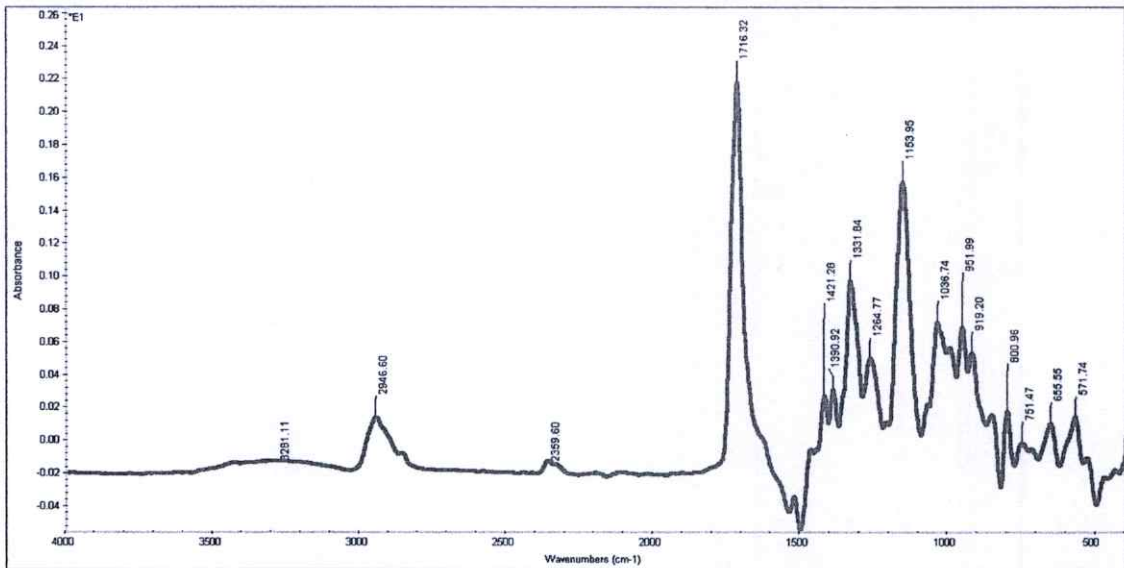
รูปที่ ค-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PBS บริสุทธิ์



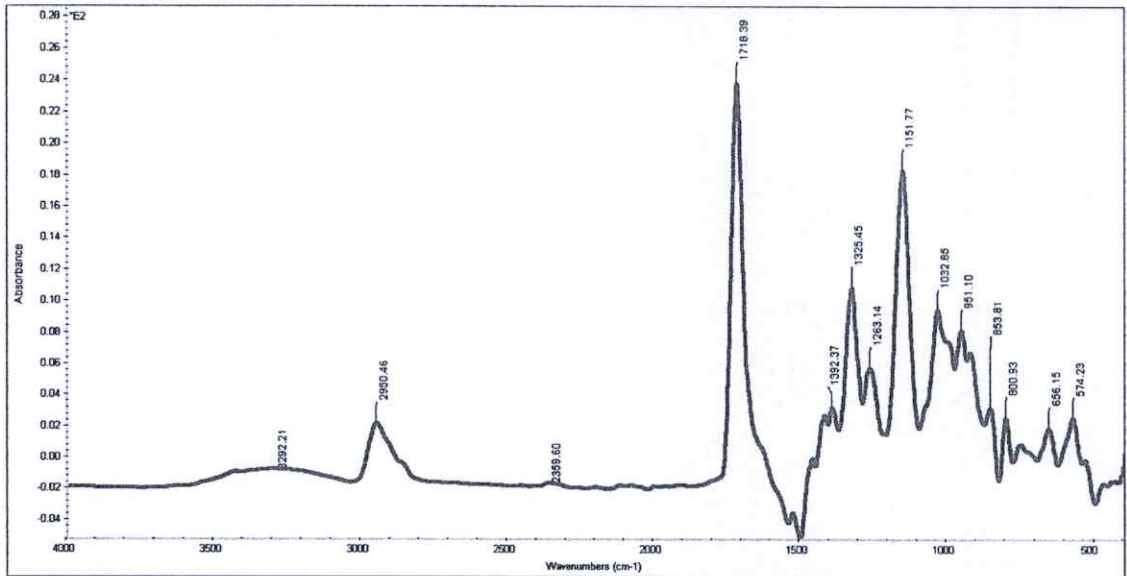
รูปที่ ค-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งเอสเทอร์



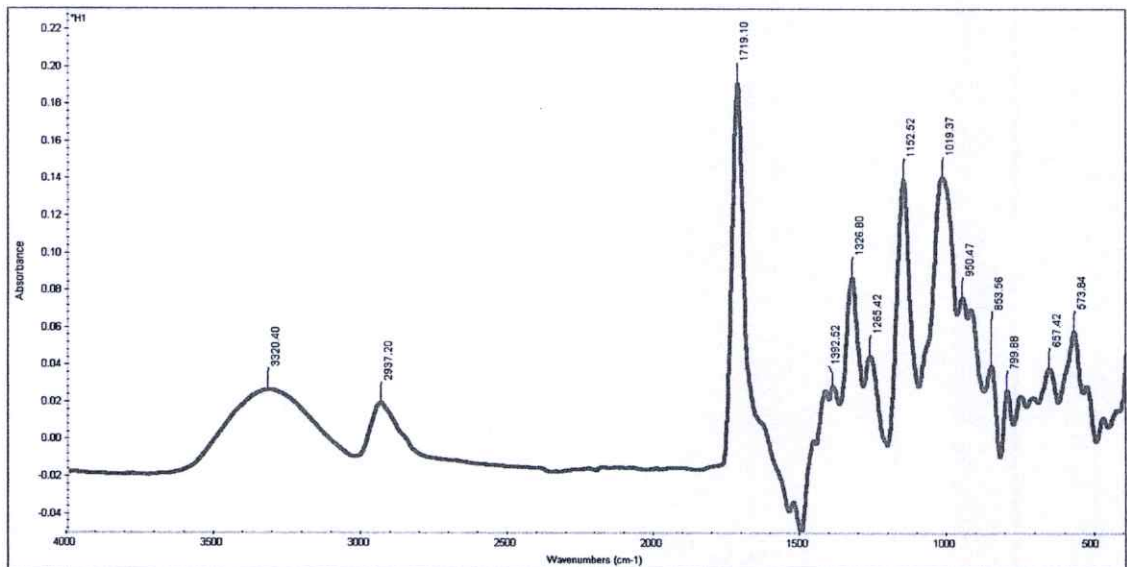
รูปที่ ค-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งไฮโดรโฟบิก



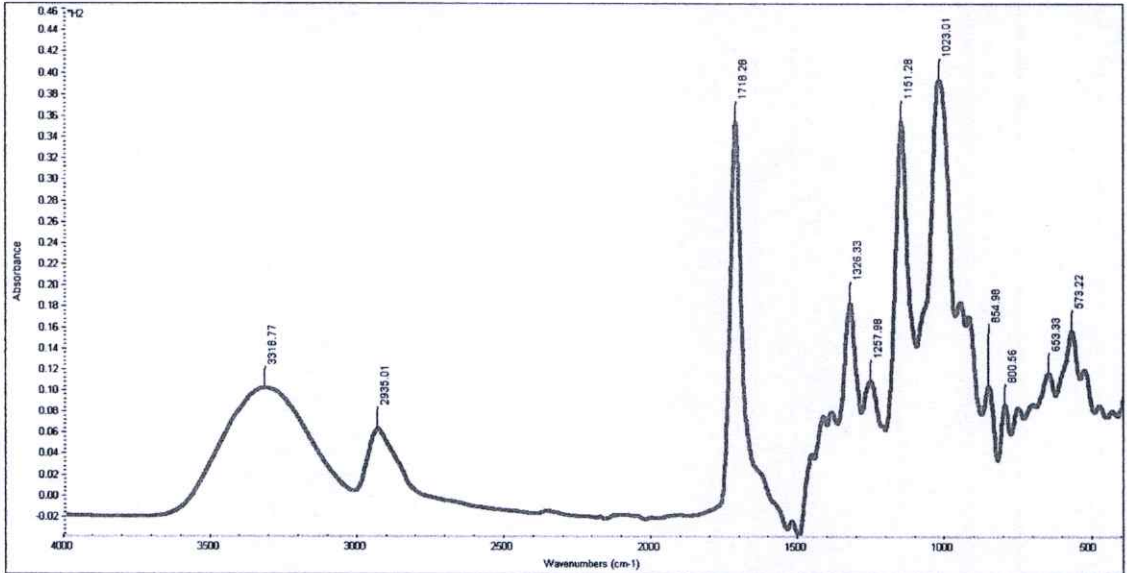
รูปที่ ค-4 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P7E3G40



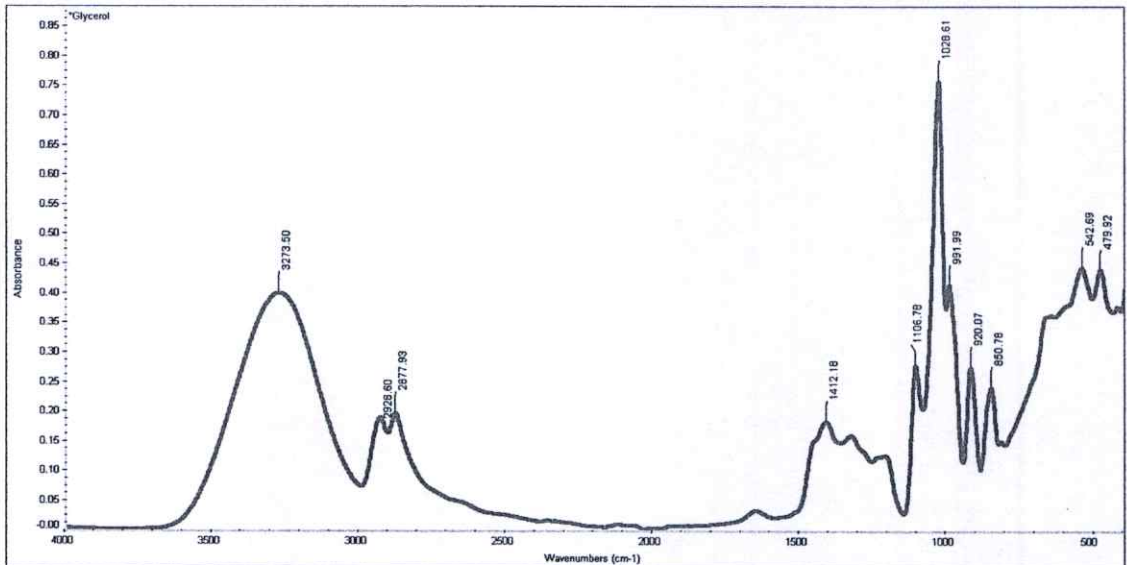
รูปที่ ค-5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P7E3G40/MA1



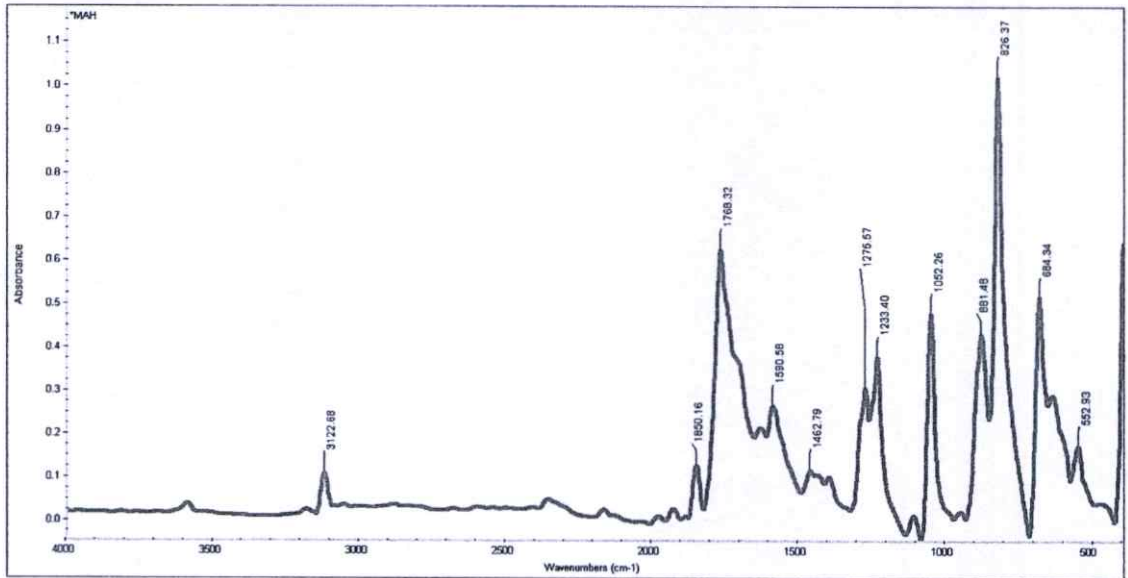
รูปที่ ค-6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P7H3G40



รูปที่ ค-7 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P7H3G40/MA1



รูปที่ ค-8 อินฟราเรดสเปกตรัมของกลีเซอรอล



รูปที่ ก-9 อินฟราเรดสเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์



## ภาคผนวก จ.

## การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ จ-1 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัสของยัง และความแข็งแรง  
ฉีกขาดในทิศ MD และTD (ตอนที่ 1)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
PBS	MD	14.0±1.6	383.4±77.1	145.3±10.7	129.5±18.0
	TD	7.2±1.1	95.8±0.9	147.1±8.6	56.0±4.8
P7E3G20	MD	5.8±0.3	309.2±47.6	67.9±4.0	51.9±2.1
	TD	2.3±0.2	14.6±1.83	87.4±7.2	18.2±2.8
P7E3G30	MD	5.8±0.3	209.0±30.8	62.1±5.7	54.4±6.2
	TD	3.8±0.4	22.2±0.3	79.4±9.0	33.6±3.0
P7E3G40	MD	4.7±0.5	283.1±27.0	42.3±7.9	50.3±4.0
	TD	4.1±0.2	28.8±2.9	73.2±7.8	46.5±1.4
P7P3G20	MD	n/a	n/a	n/a	n/a
	TD	n/a	n/a	n/a	n/a
P7P3G30	MD	3.2±0.5	70.1±17.0	61.8±4.0	39.3±9.4
	TD	1.8±0.1	9.0±0.5	49.9±7.6	17.0±1.4
P7P3G40	MD	3.3±0.1	74.2±20.8	35.4±2.0	28.2±3.3
	TD	1.0±0.2	10.4±1.1	27.8±1.5	11.7±2.1
P6E4G20	MD	n/a	n/a	n/a	n/a
	TD	n/a	n/a	n/a	n/a
P6E4G30	MD	4.0±0.3	100.1±15.8	65.5±4.6	39.2±6.0
	TD	2.0±0.3	18.6±0.2	78.4±6.8	18.1±2.4
P6E4G40	MD	3.4±0.4	121.0±17.5	63.6±5.7	34.3±2.8
	TD	2.3±0.1	21.0±1.3	70.3±6.4	22.5±1.6

ตารางที่ จ-1 (ต่อ)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
P6P4G20	MD	n/a	n/a	n/a	n/a
	TD	n/a	n/a	n/a	n/a
P6P4G30	MD	n/a	n/a	n/a	n/a
	TD	n/a	n/a	n/a	n/a
P6P4G40	MD	2.7±0.1	39.8±10.0	26.7±2.2	26.3±3.9
	TD	1.2±0.2	8.7±1.1	23.5±1.3	10.2±1.4
P7E3G40/MA1	MD	5.7±0.1	296.3±5.9	5.5±6.4	56.6±0.9
	TD	3.0±0.1	194.3±0.5	7.3±7.7	38.2±0.5

a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ จ-2 ค่าความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัสของยัง และความแข็งแรงฉีกขาดในทิศ MD และ TD (ตอนที่ 2)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
PBS	MD	32.8±0.5	423.2±13.0	104.3±6.7	244.5±10.1
	TD	14.6±0.4	133.1±4.9	118.2±5.4	137.6±11.4
P7E3G40	MD	4.4±0.6	236.7±48.7	35.7±3.5	49.5±3.5
	TD	2.6±0.3	24.8±3.5	32.1±3.7	41.0±6.7
P7E3G40/MA1	MD	4.2±0.3	196.5±76.6	35.7±1.7	40.8±4.6
	TD	3.6±0.3	83.8±14.9	34.9±2.4	43.8±3.1
P7H3G40	MD	9.9±1.1	299.2±54.8	44.8±2.2	85.0±5.3
	TD	5.0±0.4	79.1±8.7	38.1±3.1	41.6±3.1
P7H3G40/MA1	MD	8.7±0.2	273.0±36.5	69.6±6.7	80.7±11.6
	TD	6.2±0.3	119.3±7.5	55.6±2.3	61.2±10.4

a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ จ-3 ค่าความแข็งแรงของรอยยึด

สูตร	Maximum force (N)
PBS	4.0±0.4
P7E4G40	2.7±0.2
P7E3G40/MA1	2.4±0.3
P7H3G40	5.2±0.7
P7H3G40/MA1	4.5±0.6

a = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ฉ.  
เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

ตารางที่ ฉ-1 เปรียบเทียบสมบัติของเครื่องเป่าขึ้นรูปในระดับห้องปฏิบัติการ กับในระดับอุตสาหกรรม

ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	ห้องปฏิบัติการ	อุตสาหกรรม
ขนาดหัวตาย (Dimeter)	50 mm	120 mm
(Die gap)	0.8	0.1
สกรู (Screw)	19.05 mm	45 mm
ความยาวสกรู (Screw length)	476.25 mm	1130 mm

ตารางที่ ฉ-2 เปรียบเทียบสถานะในการเป่าขึ้นรูปในระดับห้องปฏิบัติการ กับในระดับอุตสาหกรรม

สถานะ	Tscrew (°C)				Tdie (°C)	Screw speed (rpm)	Chiller (°C)	Take off speed (m/min)
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4				
ห้องปฏิบัติการ	150	150	150	-	150	40	-	1.1
อุตสาหกรรม	132	135	136	136	137	6.38	17.6	7.96

## ภาคผนวก ช.

ตารางที่ ช ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนสำหรับงานเกษตรกรรมตามมาตรฐาน  
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 ความ กว้าง 10 มิลลิเมตร ไม่น้อยกว่า	1.0	1.5	2.5	3.5	5.0	7.5	10.0

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

ดวงพร คล้ายเพชร

ที่อยู่

526 ถ.คอนนงค ต.ตลาด อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84000

ประวัติการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์