

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก

ผสมพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต

**Biodegradable Plastics made from Hydrophobic Modified Starch and
Polybutylene Succinate (PBS)**



T117355

กรรณิการ์ นาคสมบุญ
เชาว์วัศ อรรถานิติ
ญาดา วงษ์บาท

สาขา.....
เลขทะเบียน..... 117355
ในเดือน,ปี..... 20 ก.ค. 2534

๖..... 12340129
๗.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Biodegradable Plastics made from Hydrophobic Modified Starch
and Polybutylene Succinate (PBS)**



**KANNIKA NARKSOMBOON
CHAOWAT AUTTHANIT
YADA WONGBAHT**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิกผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Biodegradable Plastics made from Hydrophobic Modified Starch and Polybutylene Succinate (PBS)

ชื่อนักศึกษา นางสาวกรรณิการ์ นาคสมบุญ รหัส 50050288
นายเชาวน์วัศ อรรณานิทธิ รหัส 50050308
นางสาวญาดา วงษ์บาท รหัส 50050309

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
เคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|--|
| ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ |  |
| ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ |  |
| รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|------------------|--|------------|---------------|
| โครงการพิเศษ | พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งคัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) | | |
| นักศึกษา | นางสาววรรณิการ์ | นาคสมบุญ | รหัส 50050288 |
| | นายเชาวนวัศ | อรรณานิธิ์ | รหัส 50050308 |
| | นางสาวญาดา | วงษ์บาท | รหัส 50050309 |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ | | |
| ภาควิชา | เคมี | | |
| สาขาวิชา | เคมีอุตสาหกรรม | | |
| ปีการศึกษา | 2553 | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด | | |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ชนิดใหม่ (Novel biodegradable plastics) จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) โดยจะเน้นศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง PBS/HBS (40/60, 50/50, 60/40) ผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) COA (5-15 %wt of starch), ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ COA เทียบกับกลีเซอรอล (Glycerol) และผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) 0.5-2 %wt of PBS โดยใช้ 2,5-bis-(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) (10% โดยน้ำหนักของ MA) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำการทดลองโดยการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอ่อนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเทคนิคการฉีด (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ได้แก่ สมบัติเชิงกล, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางความร้อน และศึกษาสัณฐานวิทยา จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์ COA เพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดุลัส, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรง มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล และเมื่อใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้ COA เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC, TGA และ DMTA พบว่าเมื่อเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ทำให้องศาความเป็นผลึก (X_c) มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง แต่ไม่ได้ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการสลายตัว (T_d) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ผลการศึกษาชั้นฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM เมื่อเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) ทำให้เม็ดแป้งมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ PBS

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, แป้งไฮโดรโฟบิก, พลาสติกไซเซอร์ COA, มาเลอิกแอนไฮไดรด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------|--|
| Title | Biodegradable Plastic made from Hydrophobic Modified Starch and Polybutylene Succinate (PBS) |
| Students | Miss Kannika Narksomboon Mr. Chaowat Autthanit Miss Yada Wongbaht |
| Degree | Bachelor of Science |
| Program | Industrial Chemistry |
| Academic Year | 2010 |
| Advisor | Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud |

ABSTRACT

This project aims to prepare novel biodegradable plastics made from blends of Polybutylene Succinate (PBS) and Hydrophobic modified starch (HBS). Some factors affecting properties of the blends were studied such as Palmitic-Stearic acid (COA) plasticizer loading (5-15 %wt of starch), plasticizer types (glycerol and COA) and addition of maleic anhydride (MA). Grafting was carried out by adding maleic anhydride (MA) amount of 0.5 - 2.0% by weight of PBS and 2, 5-bis (tert-butylperoxy)-2, 5 dimethylhexane (L101) 10% by weight of MA as an initiator. The blend samples were prepared by melt mixing using a twin-screw extruder and shaping by injection molding technique. Properties of the blends were then characterized, i.e., mechanical, physical, thermal and morphological properties. It was found that as the COA loading was increased (5 to 15 %wt of starch), tensile strength, modulus, % elongation at break and hardness were insignificant changed. PBS/HBS with glycerol plasticizer seemed to have better mechanical properties than those with COA plasticizer. Thermal properties studied by DSC, TGA and DMTA revealed that the maleic anhydride (MA) decreased the degree of crystallinity. However the melting temperature (T_m), decomposition temperature (T_d) and glass

transition temperature (T_g) were unchanged. Morphology studied by using Scanning Electron Microscope (SEM) revealed that adding maleic anhydride (MA) yielded good distribution.

Keywords: Polybutylene succinate (PBS), Hydrophobic modified starch (HBS), COA plasticizer, Maleic anhydride (MA)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ตลอดทั้งคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยแก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและหน่วยงานหรือองค์กรต่างๆดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจรัส ที่ปรึกษางานวิจัยและกรุณาให้คำปรึกษารวมถึงความช่วยเหลือต่างๆในระหว่างดำเนินงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและคำอธิบายในระหว่างดำเนินงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสุจิต สอนสะอาด และคุณกฤษณะ เกษมประดิษฐ์ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือรวมทั้งการแก้ไขปัญหาต่างๆตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อขอใช้เครื่องมือ, สารเคมีและคำแนะนำต่างๆตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาคธุรการภาคเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อการเบิกจ่ายในงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine)

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการวิเคราะห์เทคนิค DMTA

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการวิเคราะห์เทคนิค DSC, TGA และ SEM

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่ น้อง และเพื่อนๆนักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการดำเนินการวิจัยนี้ตลอดมา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นอีกมากมาย ที่ไม่ได้กล่าว ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือเอกสารต่างๆ แก่คณะผู้จัดทำ ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงขอกล่าวขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ | III |
| กิตติกรรมประกาศ | V |
| สารบัญ | VI |
| สารบัญตาราง | X |
| สารบัญรูป | XII |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ที่มา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย | 8 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 9 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 9 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | |
| 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 10 |
| 2.2 พลาสติกพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch-based Plastics) | 14 |
| 2.2.1 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต | 15 |
| 2.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ | 19 |
| 2.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพ | 20 |
| 2.2.4 การนำไปใช้ประโยชน์ | 20 |
| 2.2.5 ประเทศผู้ผลิต | 21 |
| 2.2.6 ราคาพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า | 22 |
| 2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS) | 22 |
| 2.3.1 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต | 23 |
| 2.3.2 สมบัติของ PBS และ PBSA | 25 |
| 2.3.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 25 |
| 2.3.4 การนำไปใช้ประโยชน์ | 26 |
| 2.3.5 บริษัทผู้ผลิต | 26 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.4 แป้ง (Starch) | 27 |
| 2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง | 27 |
| 2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง | 27 |
| 2.4.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง | 28 |
| 2.4.4 การย่อยสลายของแป้ง | 29 |
| 2.5 แป้งมันสำปะหลัง | 32 |
| 2.5.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง | 32 |
| 2.5.2 แป้งมันสำปะหลังคัดแปร | 33 |
| 2.5.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลัง | 34 |
| 2.6 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) | 35 |
| 2.6.1 กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) | 36 |
| 2.6.2 Palmitic-Stearic acid 45:55 (COA) | 36 |
| 2.7 สารช่วยผสม (Compatibilizer) | 37 |
| 2.7.1 มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอสเตอร์ (MA-g-PBS) | 39 |
| 2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน | 40 |
| 2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) | 40 |
| 2.8.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) | 41 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 42 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 51 |
| 3.3 วิธีการทดลอง | 52 |
| 3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม | 52 |
| 3.3.2 การเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ | 53 |
| 3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน | 53 |
| 3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของตัวอย่าง | 54 |

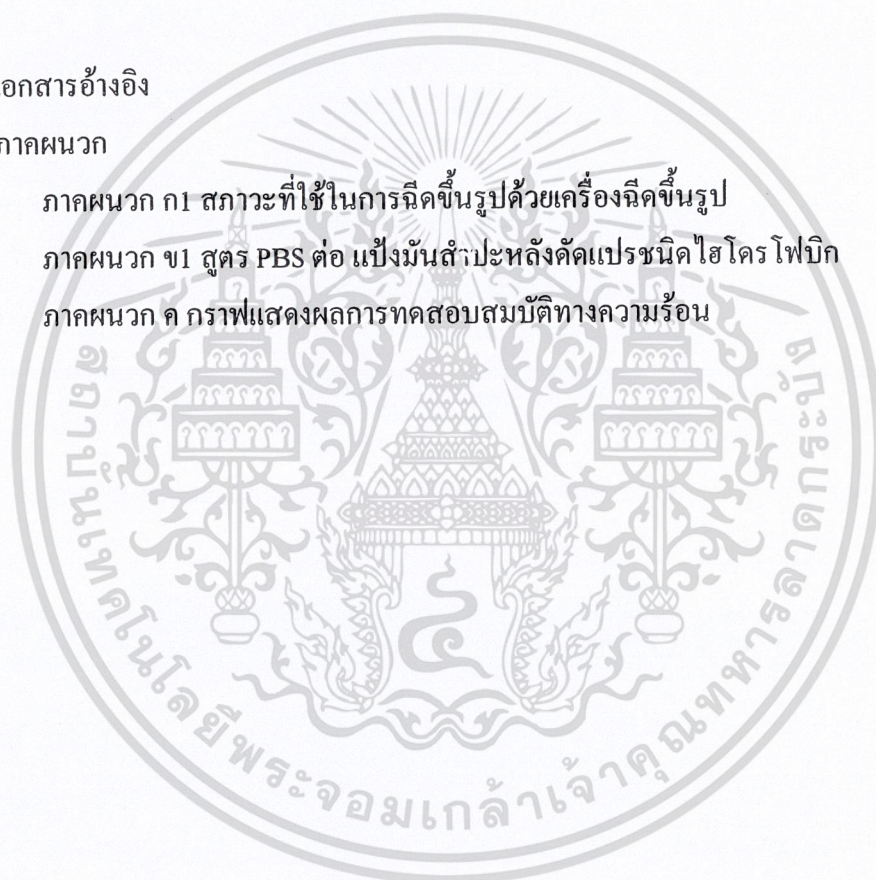
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.4 ปัจจัยที่ศึกษา | 56 |
| 3.5 แผนการดำเนินงาน | 58 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ | |
| 4.1 การศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) | 59 |
| 4.1.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล | 59 |
| 4.1.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ | 62 |
| 4.2 การศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA | 63 |
| 4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล | 64 |
| 4.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ | 67 |
| 4.3 การศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ | 68 |
| 4.3.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล | 68 |
| 4.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ | 72 |
| 4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน | 73 |
| 4.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC) | 73 |
| 4.4.2 Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) | 74 |
| 4.4.3 Thermogravimetric analysis (TGA) | 74 |
| 4.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM | 75 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง | |
| 5.1 การศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) | 79 |
| 5.2 การศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA | 79 |
| 5.3 การศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ | 80 |
| 5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน | 80 |
| 5.4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ DSC | 80 |
| 5.4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ DMTA | 81 |
| 5.4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ TGA | 81 |
| 5.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM | 81 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.5.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง PBS/HBS | 81 |
| 5.5.2 ศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ | 81 |
| 5.6 ข้อเสนอแนะ | 82 |
| เอกสารอ้างอิง | 83 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก1 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป | 86 |
| ภาคผนวก ข1 สูตร PBS ต่อ แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโครฟิสิก | 88 |
| ภาคผนวก ค กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน | 90 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| | หน้า | |
|----------------------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 12 |
| ตารางที่ 2.1 (ต่อ) | ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 13 |
| ตารางที่ 2.2 | เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิตพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน | 17 |
| ตารางที่ 2.2 (ต่อ) | เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิตพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน | 18 |
| ตารางที่ 2.3 | สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่ผลิตเพื่อการค้า | 19 |
| ตารางที่ 2.4 | การนำพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานไปใช้ประโยชน์ | 20 |
| ตารางที่ 2.5 | บริษัทผู้ผลิตพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า | 21 |
| ตารางที่ 2.6 | ราคาพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า | 22 |
| ตารางที่ 2.7 | เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิต PBS | 24 |
| ตารางที่ 2.8 | สมบัติของ PBS และ PBSA ที่ผลิตเพื่อการค้า | 25 |
| ตารางที่ 2.9 | บริษัทผู้ผลิต PBS และ PBSA เพื่อการค้า | 27 |
| ตารางที่ 2.10 | องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป | 32 |
| ตารางที่ 2.11 | สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งข้าวสาลีในอัตราส่วน 55/45 โดยมี (MA) เป็นสารช่วยผสม และใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา | 43 |
| ตารางที่ 3.1 | สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| ตารางที่ 3.2 | สมบัติบางประการของ Palmitic - Stearic acid 45:55 (COA) ที่ใช้ในการทดลอง | 49 |
| เอกสารอ้างอิง ตารางที่ 3.3 | บริษัทผู้ผลิตบางประการของ PBS ที่ใช้ในการทดลอง | 50 |
| ตารางที่ 3.4 | สมบัติบางประการของ Maleic anhydride (MA) และ Luperox® 101 | 50 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| | | หน้า |
|---------------|---|------|
| ตารางที่ 3.5 | สมบัติเชิงประการของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก | 50 |
| ตารางที่ 3.6 | เครื่องมือและอุปกรณ์ | 51 |
| ตารางที่ 3.7 | สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง | 52 |
| ตารางที่ 3.8 | อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ | 52 |
| ตารางที่ 3.9 | อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก | 53 |
| ตารางที่ 3.10 | ความดันที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก | 53 |
| ตารางที่ 4.1 | อักษรย่อแทนสูตรของ PBS และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก | 58 |
| ตารางที่ 4.2 | ตารางแสดงสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS โดยมีสารเติมพลาสติกไซเซอร์ คือ กทีเซอรอล และ COA | 63 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC | 73 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA | 74 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA | 75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 1.1 | วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 2 |
| รูปที่ 1.2 | กระบวนการสังเคราะห์ PLA | 3 |
| รูปที่ 1.3 | โครงสร้างทางเคมีของ PLA | 3 |
| รูปที่ 1.4 | โครงสร้างทางเคมีของ PBS | 4 |
| รูปที่ 1.5 | กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก | 4 |
| รูปที่ 1.6 | โครงสร้างทางเคมีของ PVA | 5 |
| รูปที่ 1.7 | โครงสร้างทางเคมีของ PCL | 5 |
| รูปที่ 1.8 | ราคาเป็งมันสำปะหลัง เป็งมันฝรั่ง เป็งข้าวโพด และเป็งสาทิในตลาดโลก | 6 |
| รูปที่ 1.9 | ห่วงโซ่มูลค่าของมันสำปะหลัง | 7 |
| รูปที่ 2.1 | โครงสร้างทางเคมีของเป็ง | 14 |
| รูปที่ 2.2 | กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้จากวัตถุดิบ ชีวมวล (Biomass) | 16 |
| รูปที่ 2.3 | โครงสร้างทางเคมีของ PBS | 22 |
| รูปที่ 2.4 | แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle® | 23 |
| รูปที่ 2.5 | โครงสร้างของอะไมโลส | 28 |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างของอะไมโลเพคทิน | 28 |
| รูปที่ 2.7 | โครงสร้างของกลีเซอรอล | 36 |
| รูปที่ 2.8 | โครงสร้างทางเคมีของกรดสเดียริก | 37 |
| รูปที่ 2.9 | โครงสร้างทางเคมีของกรดปาล์มิติก | 37 |
| รูปที่ 2.10 | ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์ | 38 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้กับสารช่วยผสมานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.11 | กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PBS, แป้ง, Maleic Anhydride, และตัวริเริ่มปฏิกิริยา L101 (PBS-g-MA) | 39 |
| รูปที่ 2.12 | ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ | 40 |
| รูปที่ 2.13 | ภาพตัดขวางของเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก | 41 |
| รูปที่ 2.14 | กระบวนการ Reactive extrusion ของพอลิเอสเทอร์ (PCL) กับแป้ง โดยใช้ MA เป็นสารช่วยผสม | 42 |
| รูปที่ 2.15 | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Bionolle/ผงไม้ | 45 |
| รูปที่ 3.1 | แผนผังแสดงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน | 57 |
| รูปที่ 4.1 | ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% | 59 |
| รูปที่ 4.2 | ค่ามอดูลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% | 60 |
| รูปที่ 4.3 | ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลัง คัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% | 60 |
| รูปที่ 4.4 | ค่าความแข็งกดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% | 61 |
| รูปที่ 4.5 | ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% | 62 |
| รูปที่ 4.6 | ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล และ COA ในปริมาณ 10% | 64 |
| รูปที่ 4.7 | ค่ามอดูลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล และ COA ในปริมาณ 10% | 65 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | หน้า |
|-------------|--|------|
| รูปที่ 4.8 | ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลัง ดัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล และ COA ในปริมาณ 10% | 65 |
| รูปที่ 4.9 | ค่าความแข็งกคของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลัง ดัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล และ COA ในปริมาณ 10% | 66 |
| รูปที่ 4.10 | ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล และ COA ในปริมาณ 10% | 67 |
| รูปที่ 4.11 | กลไกการเกิดการเชื่อม โยงของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ | 69 |
| รูปที่ 4.12 | ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% | 70 |
| รูปที่ 4.13 | ค่ามอดูลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% | 70 |
| รูปที่ 4.14 | ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลัง ดัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% | 71 |
| รูปที่ 4.15 | ค่าความแข็งกคของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% | 71 |
| รูปที่ 4.16 | ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% | 72 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นข้อมูลเพื่อการศึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่ปริมาณ COA 10%

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 4.17 | รูป SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 | 77 |
| รูปที่ 4.18 | รูป SEM กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 | 77 |
| รูปที่ 4.19 | รูป SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 และ MA 1% | 78 |
| รูปที่ 4.20 | รูป SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 และ MA 1% | 78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|----------------|-------------|---|
| PBS | หมายความว่า | พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate) |
| PGS | หมายความว่า | แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch) |
| HBS | หมายความว่า | แป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch) |
| PBS/PGS | หมายความว่า | พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และแป้งพรีเจล |
| PBS/HBS | หมายความว่า | พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และแป้งไฮโดรโฟบิก |
| COA | หมายความว่า | กรดปาล์มมิก - สเตียริก (Palmitic - Stearic acid) |
| MA | หมายความว่า | มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) |
| PBS-g-MA | หมายความว่า | พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polybutylene succinate graft Maleic anhydride) |
| MDI | หมายความว่า | เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต (Mathylene diphenyl diisocyanate) |
| TDI | หมายความว่า | โทลูอินไดไอโซไซยานต (Toluene diisocyanate) |
| DSC | หมายความว่า | Differential Scanning Calorimetry |
| DMTA | หมายความว่า | Dynamic Mechanical Thermal Analysis |
| TGA | หมายความว่า | Thermogravimetric analysis |
| SEM | หมายความว่า | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) |
| X_c (%) | หมายความว่า | องศาความเป็นผลึก (% Crystallinity) |
| ΔH_f | หมายความว่า | พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก |
| ΔH_f^0 | หมายความว่า | พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกที่มีความเป็นผลึก 100 % |
| T_m | หมายความว่า | อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก |
| T_g | หมายความว่า | อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา

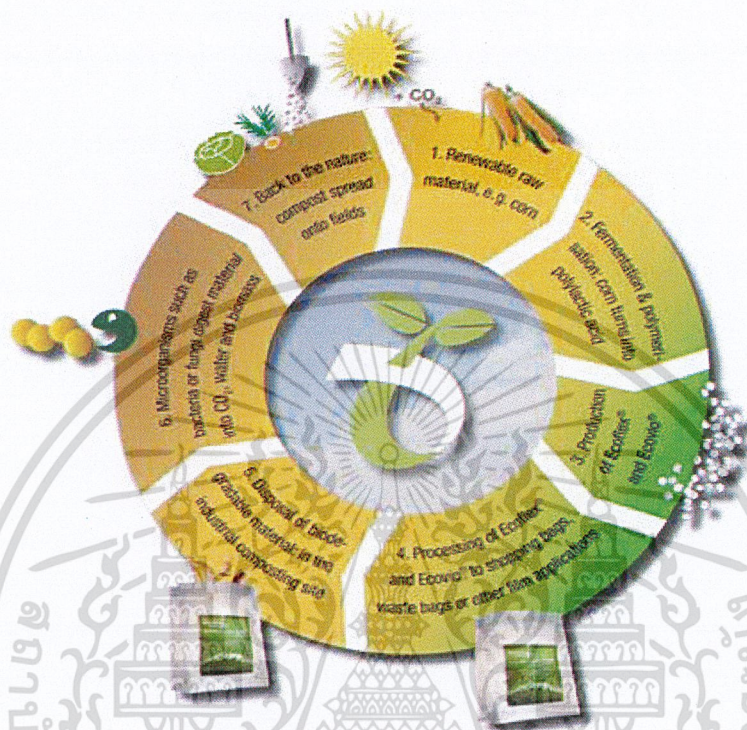
ปัจจุบันวัสดุหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่อำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ ทั้งในเรื่องรูปแบบของผลิตภัณฑ์ การตอบสนองด้านการใช้งานและความคงทนถาวร เกือบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการปิโตรเคมี

ปัญหาของพลาสติกที่ใช้งานแล้วหรือพลาสติกที่มีการปนเปื้อน มักจะเป็นปัญหาที่สำคัญและ โยงใยไปถึงมลภาวะของโลกอันเนื่องมาจากอัตราการใช้พลาสติกมีสูงขึ้นตลอดมา แต่ตัวพลาสติกเองมีการสลายตัวได้ช้ามาก บางส่วนถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ขณะที่บางส่วนถูกปล่อยทิ้งตามพื้นดินหรือแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาในการขจัดและทำลาย การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการควบคุมการใช้ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับพลาสติกไม่ให้มีมากจนเกินความจำเป็นหรือกำจัดด้วยการเผาไหม้ อันก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งทำให้โลกร้อนขึ้น ดังนั้นวิธีการหนึ่งคือหาวิธีการผลิตพลาสติกที่สลายตัวได้เอง (Degradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) หรือพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) [1] เป็นวัสดุเพื่อสิ่งแวดล้อมที่กำลังได้รับความสนใจจากกระแสความต้องการของโลกด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมซึ่งพลาสติกย่อยสลายได้หรือพลาสติกชีวภาพนั้น ได้ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ในด้านของวัตถุดิบที่ผลิตจากพืชที่สามารถปลูกขึ้นทดแทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านกระบวนการผลิตใช้พลังงานต่ำจนถึงกระบวนการกำจัดที่สามารถย่อยสลายเป็นชีว-มวล (Biomass) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [1]

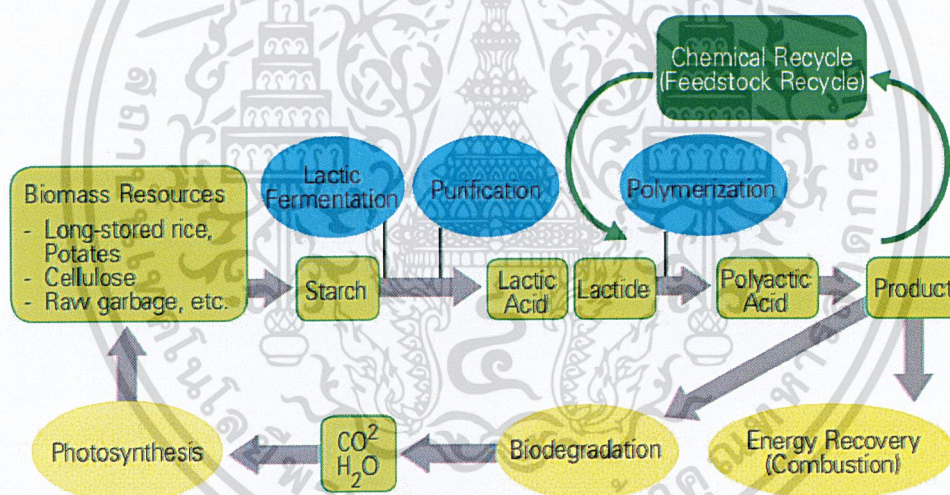
พลาสติกย่อยสลายได้ มีสมบัติในการใช้งานเทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิมบางชนิด โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้นี้สามารถทำการเตรียมได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือการผสมระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันความต้องการในการใช้เม็ดพลาสติกดังกล่าวมีอยู่ถึงประมาณ 500,000 เมตริกตันต่อปี [2] โดยพลาสติกย่อยสลายได้ที่กำลังเป็นที่นิยมใช้ คือพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic-acid; PLA) แต่อย่างไรก็ดี กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิดในทั่วโลกนั้นมีเพียง 200,000 เมตริกตันต่อปี จึงส่งผลให้ในปัจจุบันเกิดการขาดแคลน PLA ดังนั้นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดอื่นๆ จึงได้เข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้น โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่กำลังได้รับความนิยมในลำดับถัดมาคือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS) เนื่องจากการใช้เม็ดพลาสติกที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถย่อยสลายได้ชนิดนี้ สามารถนำไปขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิด

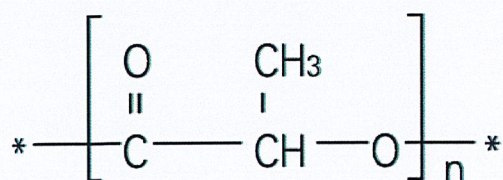
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งตามประเภทตามแหล่งวัตถุดิบได้ 2 ชนิด ดังนี้ [3]

1.แหล่งธรรมชาติ (Biological source) คือวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถหาหรือปลูกทดแทนได้ (Renewable source) โดยตัวอย่างพลาสติกที่ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติมีดังนี้

- พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic-acid; PLA) ผลิตโดยนำแป้งหรือน้ำตาลมาผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) เพื่อใช้เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) ในขั้นตอนการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ (Polymerization) ดังรูปที่ 1.2 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น PLA ที่มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 1.3

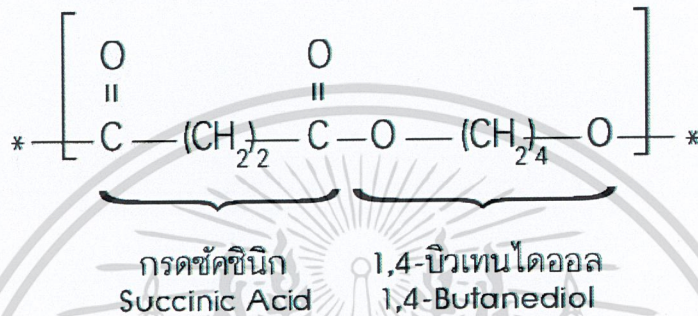


รูปที่ 1.2 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [3]

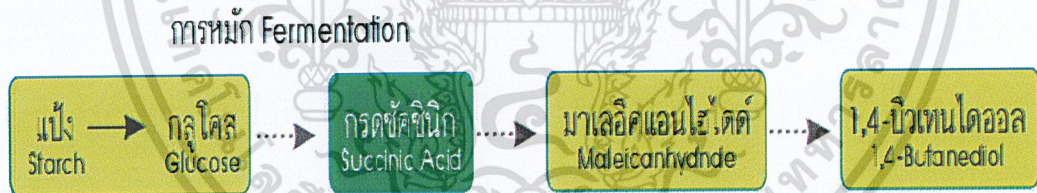


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 1.3 โครงสร้างทางเคมีของ PLA [3] เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS) เป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.4 ผลิตจากกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี และจากวัตถุดิบธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการหมักแป้ง และน้ำตาลได้เป็นกรดซัคซินิก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออล ผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBS [3]

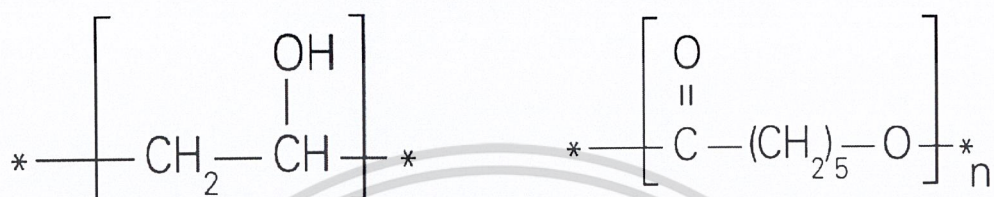


รูปที่ 1.5 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก [3]

นอกจากนี้พลาสติกย่อยสลายได้ยังสามารถผลิตจากเทคโนโลยีทางชีวภาพ โดยนำอินทรีย์ที่สำคัญในการสร้างพอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ไปใส่ในพืชเป้าหมาย เพื่อให้พืชสามารถผลิตพลาสติกผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง และเก็บสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ได้ซึ่งพลาสติกที่เป็นตัวอย่างในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates; PHAs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.แหล่งปิโตรเลียม (Petroleum source) คือวัตถุดิบที่มาจากน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ โดยที่พลาสติกในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinly alcohol; PVA) ดังรูปที่ 1.6 หรือ พอลิคาร์โพลแลคโตน (Polycaprolactone; PCL) ดังรูปที่ 1.7

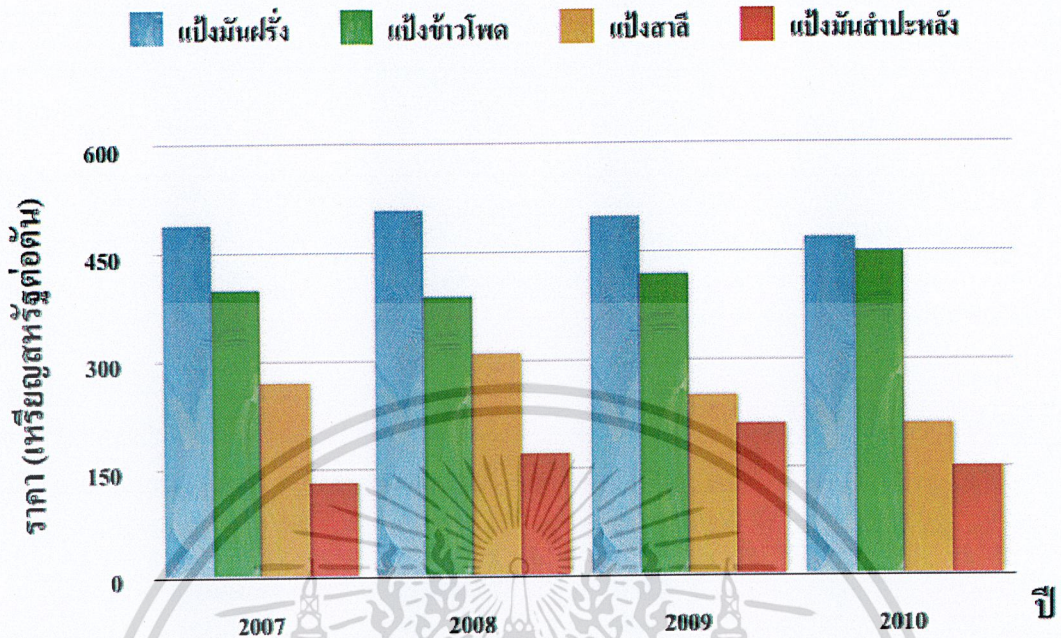


รูปที่ 1.6 โครงสร้างทางเคมีของ PVA [3]

รูปที่ 1.7 โครงสร้างทางเคมีของ PCL [3]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยวัตถุดิบมวลชีวภาพหรือผลผลิตจากการเกษตร ซึ่งได้แก่ ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เซลลูโลส ข้าวสาลี ปาล์ม น้ำมัน เป็นต้น โดยผลผลิตจากการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือเส้นใย (เซลลูโลส) เหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยในด้านความสามารถของการแข่งขันในเรื่องของราคาและความสามารถในการเพาะปลูกแล้วอาจจัดได้ว่าแป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch or Cassava starch) เป็นพืชที่มีความเป็นไปได้ และ มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเมื่อเทียบราคาแป้งมันสำปะหลังกับแป้งที่ทำจากพืชชนิดอื่นตามราคาตลาดโลก แป้งมันสำปะหลังจะมีราคาถูกที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.8 นอกจากนี้ราคาที่แข่งขันได้ของแป้งมันสำปะหลังแล้ว ประเทศไทยยังเป็นประเทศที่ส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลกด้วย [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

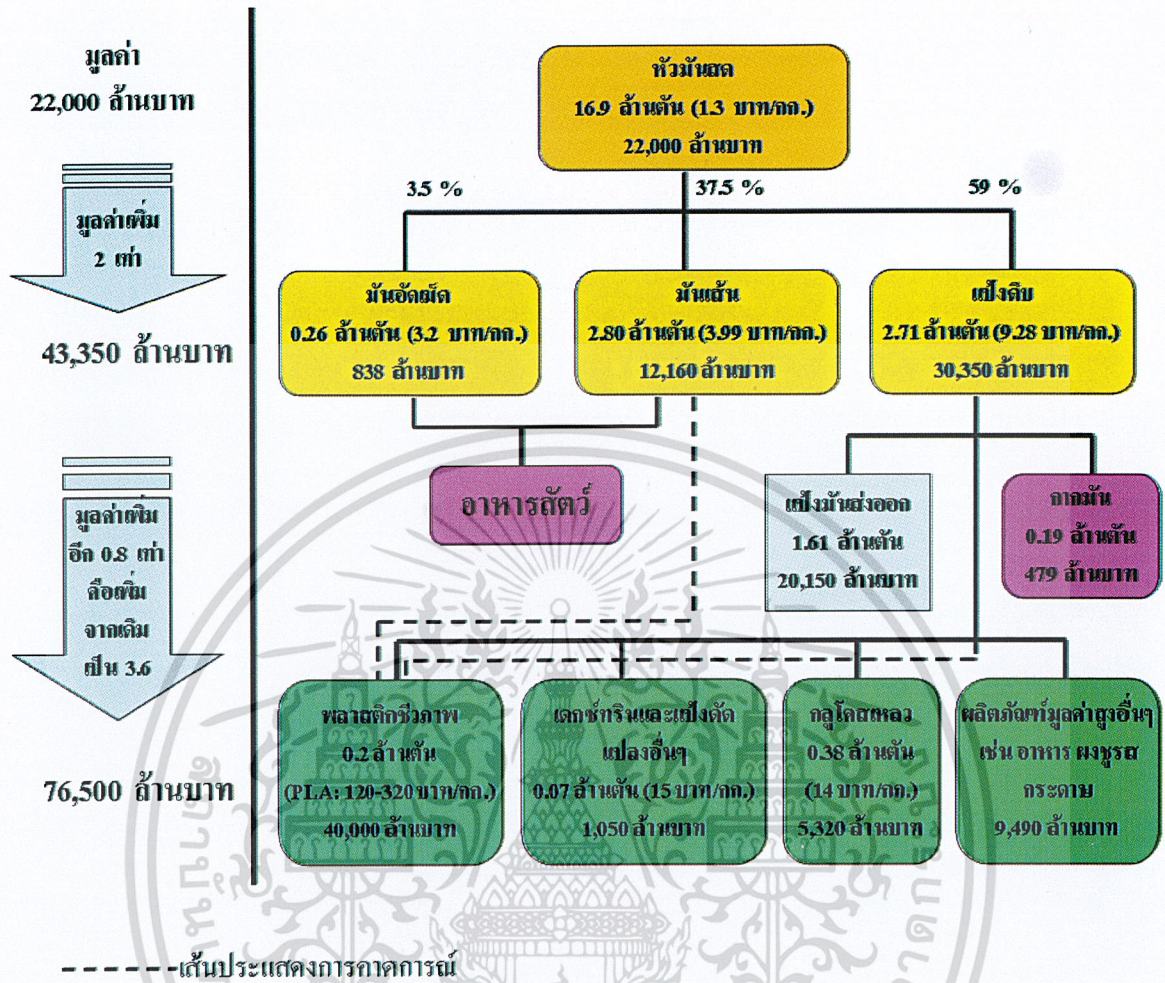


รูปที่ 1.8 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในตลาดโลก [5]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมันสำปะหลังที่ส่งออกเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของมันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีราคาต่ำและยังขึ้นอยู่กับปัจจัยจากตลาดต่างประเทศในเรื่องราคาและปริมาณความต้องการที่แน่นอน ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่า จึงควรมีการใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังในรูปแบบที่เป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังสดสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมได้อย่างมากมาย ดังรูปที่ 1.9 โดยหากนำหัวมันสำปะหลังสดไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง ได้แก่ มันอัดเม็ด มันเส้นและแป้งดิบ จะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มประมาณ 1 เท่า (ร้อยละ 100) คิดเป็นมูลค่าได้ถึง 43,350 ล้านบาท แต่หากมีการแปรรูปไปถึงผลิตภัณฑ์ขั้นปลายเช่น พลาสติกชีวภาพ เด็กซ์ทริน และแป้งตัดแปรอื่นๆ กลูโคสเหลว และผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมันสำปะหลังที่มีมูลค่าสูงอื่นๆ เช่น อาหารผงชูรส กระดาษ เป็นต้น จะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 80 คิดเป็น 76,500 ล้านบาท หรือประมาณ 3.5 เท่าของมูลค่าหัวมันสด โดยเฉพาะจากพลาสติกชีวภาพเพียงอย่างเดียวมีมูลค่าสูงถึง 40,000 ล้านบาท [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 ห่วงโซ่มูลค่าของมันสำปะหลัง [6]

จากงานวิจัยโครงการพิเศษ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2552 เรื่องพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งดัดแปรผสมพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนต [7] และวิทยานิพนธ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี การศึกษา 2553 เรื่องการศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตผสม แป้งดัดแปร [8] พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปรชนิดไฮโดร โฟ บิก (PBS/HBS) มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้ง ดัดแปรชนิดฟรีเจล (PBS/PGS) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปร ชนิดเอสเทอร์ (PBS/EMS) กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ฉีก จุดขาดและค่ามอดู ลัสสูงกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คุณลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (PBS/HBS) มีค่ามากกว่าชนิดที่กล่าวมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (PBS/HBS) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ผลของ ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) โดยการใช้กรดปาล์มมิก-สเตียริก (Palmitic-Stearic acid; COA) 5-15% โดยน้ำหนักของแป้ง ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ(COA) ที่อัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) / แป้งมันสำปะหลังชนิดดัดแปรชนิดแป้งไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Modified Starch; HBS) คือ 60/40 และ 40/60 ที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) ในปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2% โดยน้ำหนักของ PBS และใช้ 2,5-bis-(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) 10% โดยน้ำหนักของ MA เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยการเตรียมวัตถุดิบทำการผสม และขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสม ซึ่งได้แก่ สมบัติเชิงกล, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ชนิดใหม่ (Novel biodegradable plastics) จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Modified Tapioca Starch; HBS) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) COA, ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA และผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบพร้อมทำการผสม และขึ้นรูปตัวอย่าง

1.3.3 ทดสอบสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างที่เตรียมได้

- สมบัติเชิงกล เช่น มอดุลัส (Modulus), ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งกด (Hardness)

- สมบัติทางกายภาพ เช่น เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ (Water absorption)

- สมบัติทางความร้อน เช่น T_g , T_m , องศาความเป็นผลึก ด้วยเทคนิค DSC, DMTA และหาอุณหภูมิการสลายตัว ด้วยเทคนิค TGA

- สัณฐานวิทยา การกระจายตัวและการยึดเกาะของวัฏภาค ด้วยเทคนิค SEM

1.3.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ COA (5-15% โดยน้ำหนักของแป้ง)

- ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ (COA) ที่อัตราส่วนของพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนต (PBS) / แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) คือ 60/40 และ 40/60

- ผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) 0.5-2% โดยน้ำหนักของพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนต

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value added) เพื่อก่อให้เกิดเสถียรภาพด้านราคาแก่มันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบและแก้ไขปัญหา มันสำปะหลังล้นตลาดให้กับเกษตรกรได้

1.4.2 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพใหม่ได้ ทำให้ลดต้นทุนการใช้เม็ดพลาสติกย่อยสลายได้ลง โดยที่ไม่กระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปและการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพไทยแบบยั่งยืน อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาขยะและช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และโลกได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เนื่องจากความต้องการพลาสติกชีวภาพของตลาดโลก ในระยะ 5 ปีที่ผ่านมาอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการดำเนินงานตามนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมอย่างจริงจังของประเทศไทยที่พัฒนาแล้ว ผนวกกับการพัฒนาเทคโนโลยีของพลาสติกชีวภาพเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและก้าวกระโดด[9] จึงเกิดเป็นปัจจัยภายนอกสำคัญที่ผลักดันให้ประเทศไทยได้นำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และประเมินศักยภาพ ตลอดจนขีดความสามารถของประเทศในการพัฒนาให้เกิดอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ เนื่องด้วยความพร้อมของปัจจัยที่เกื้อหนุนทั้งในด้านวัตถุดิบ ประเทศไทยที่มีความอุดมสมบูรณ์ด้านวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) หรือผลผลิตจากการเกษตร ได้แก่ มันสำปะหลัง และ อ้อยซึ่งสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ทำให้สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมในห่วงโซ่มูลค่าตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีอุตสาหกรรมรองรับที่เข้มแข็งอยู่ในบางช่วงแต่ยังไม่ครบวงจร ได้แก่อุตสาหกรรมการแปรรูปมันสำปะหลัง เช่น แป้ง กลูโคสเหลว และกรดแลคติก ตลอดจนมีอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำรองรับที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพได้ทันที อย่างไรก็ตามปัจจัยในเชิงลบด้านปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับชาติที่เกิดจากปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่สามารถกำจัดให้หมดไปด้วยกระบวนการฝังกลบหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยในแต่ละปีจะมีปริมาณขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เหลือตกค้างอยู่ทั่วประเทศไม่ต่ำกว่า 1 ล้านตัน ดังนั้นถ้าประเทศไทยประสบความสำเร็จในการสร้างเทคโนโลยีและนวัตกรรมของตนเองโดยการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย จนถึงระดับการลงทุนในเชิงพาณิชย์เพื่อพัฒนาวัสดุใหม่สำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม นั่นคือสามารถสร้างให้เกิดพลาสติกชีวภาพได้อย่างครบวงจรจะทำให้เกิดทางออกที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหาขยะของประเทศในระยะยาวและรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นมีหลายลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งในที่นี้ได้ประมวล และคัดแปรการจำแนกประเภทพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยยึดตาม รูปแบบของรายงานชุด Environment Australia Biodegradable Plastics Development and Environment Impact ซึ่งจัดทำโดยบริษัท Nolan-ITU Pty Ltd. ประเทศออสเตรเลีย [10] และ รายงานชุด Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe จัดทำโดย European Commission's Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies (JRC/IPTS) ประเทศสเปน [11] โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังตารางที่ 2.1

ในที่นี้จะกล่าวถึงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อันได้แก่ พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน พอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) พอลิไตรเมทิลีนเทอแรพธาลेट (PTT) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยมีรายละเอียดครอบคลุมตั้งแต่ วัตถุดิบ เทคโนโลยีการผลิตระดับต้นน้ำ-กลางน้ำ และปลายน้ำ การนำไปใช้ประโยชน์ สมบัติทางด้านต่างๆ รวมถึง ผู้ผลิตในระดับแนวหน้าของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [12]

| ประเภทพอลิเมอร์ | รายละเอียด | ประเภทวัตถุดิบ |
|---|---|---|
| แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS) | มีแป้งเป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และผ่านการทำให้เป็นเจลาติน | แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |
| แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch-aliphatic polyester blends) | แป้งนำไปผสมกับพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA ,PCL ,PBS PBSA | - แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ - พอลิเอสเทอร์เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |
| แป้งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Starch-PVA blends) | แป้งนำไปผสมกับ PVA | - แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ - PVA จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี |
| พอลิแลคติกแอซิด (PLA) | พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีกรดแลคติกหรือแลคโทด์เป็นมอนอเมอร์ | เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |
| พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHAs) | กลุ่มพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรงซึ่งผลิตได้ทางธรรมชาติโดยแบคทีเรีย | เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |
| พอลิคาร์โปแลคโตน (PCL) | พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีคาร์โปแลคโตน (PCL) เป็นมอนอเมอร์ | เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี |
| พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) | พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงเตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4-บิวเทนไดออล (BDO) และกรดซัคซินิก | กรดซัคซินิก และ BDO เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

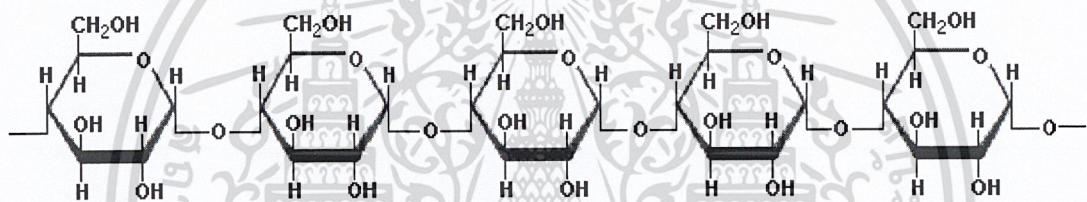
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [12]

| ประเภทพอลิเมอร์ | รายละเอียด | ประเภทวัตถุดิบ |
|---|--|--|
| พอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลต (PBT) | พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างเตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4-บิวเทนไดออล(BOD)และกรดเทอเรพทาลิก (TPA) หรือไดเมทิลเทอเรพทาเลต (DMT) | - BOD เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ - TPA และ DMT เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี |
| พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพทาเลต (PTT) | พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้าง เตรียมจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,3-โพรเพนไดออล (PDO) และกรดเทอเรพทาลิก (TPA) หรือไดเมทิลเทอเรพทาเลต (DMT) | -PDO เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ -TPA และ DMT เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี |
| โคพอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างสายโซ่ตรงและวงแหวนอะโรมาติก (ACC Copolyester) | พอลิเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างทั้งแบบสายโซ่ตรงและวงแหวนอะโรมาติกในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น PBAT | เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ |

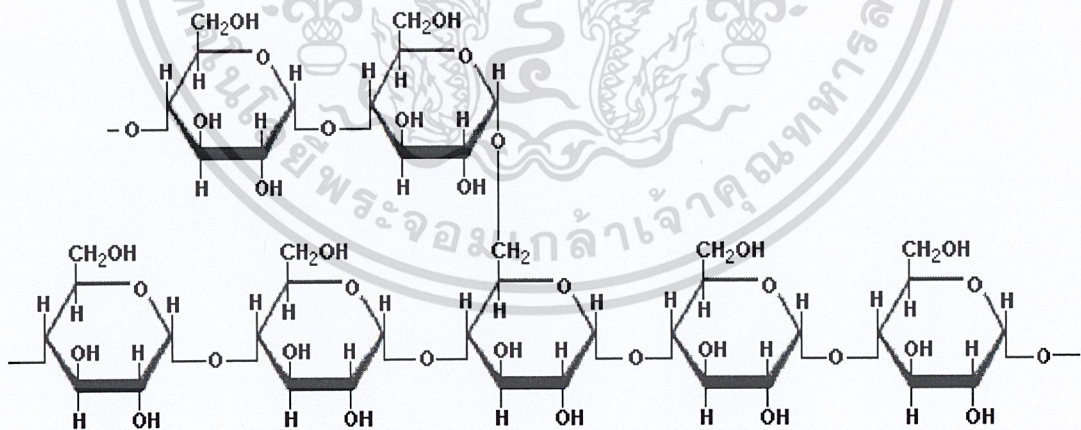
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch-based Plastics)

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งประกอบด้วย 2 โมเลกุลหลัก ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบสายโซ่ตรงที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบกิ่ง ที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความยาวเฉลี่ยระหว่าง 500 และ 2,000 หน่วยย่อยกลูโคส



โครงสร้างของอะไมโลส (Amylose)



โครงสร้างของอะไมโลเพกติน (Amylopectin)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานอาจมีปริมาณเป็งเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 90 โดยที่ปริมาณเป็งยิ่งมากขึ้นส่งผลให้พลาสติกสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดีขึ้น และทิ้งสารตกค้าง (Recalcitrant residues) ปริมาณน้อยลง

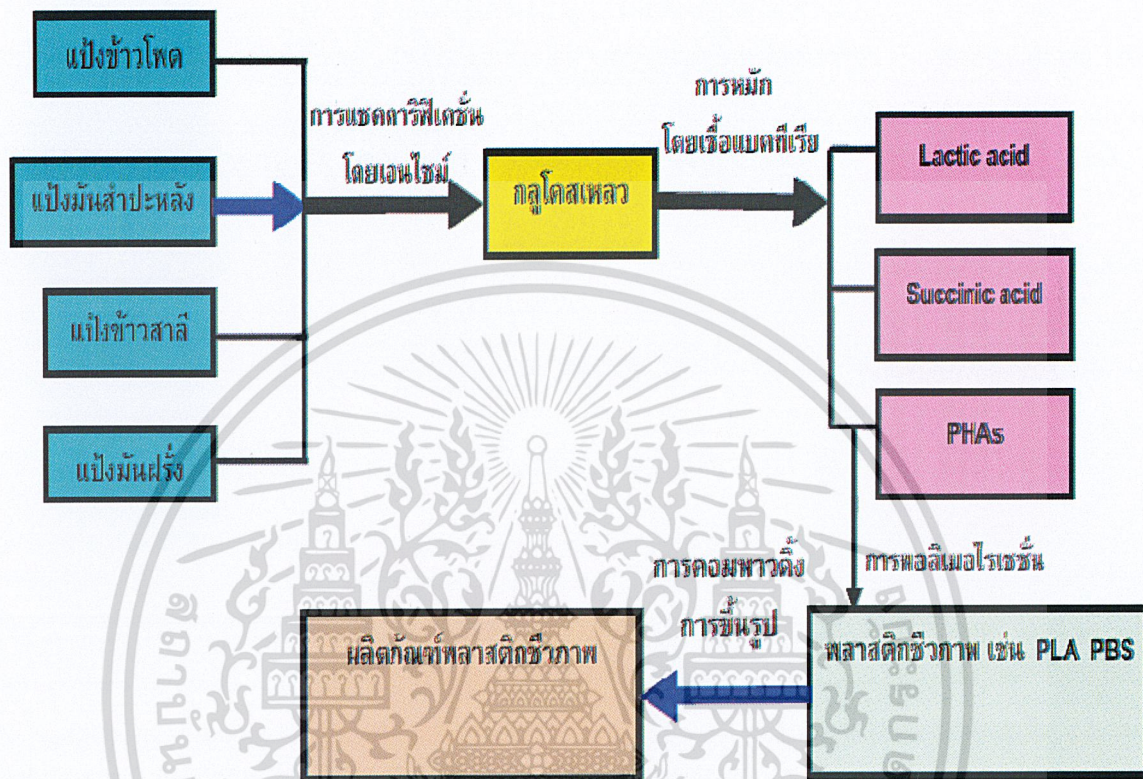
พลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานส่วนใหญ่ถูกผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมรรถนะสูง (High-performance-polymers) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะ และเหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ พลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานสามารถจำแนกได้หลายประเภท ได้แก่ เป็งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (TPS) เป็งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA, PCL, PBS, Poly (butylenes succinate adipate) PBSA, และเป็งผสม PVA เป็นต้น

2.2.1 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกเป็ง เช่น ข้าวโพด, มันฝรั่ง, มันสำปะหลัง, ข้าวสาลี, ข้าว เป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพจากวัตถุดิบชีวมวลนั้น มีกระบวนการผลิตที่สำคัญ[14] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เริ่มจากในส่วนของขั้นตอนต้นน้ำ โดยใช้เป็งซึ่งในประเทศไทย ผลิตได้จากน้ำมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็นเป็งมันสำปะหลัง แล้วนำไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็งให้เป็นน้ำตาลซึ่งเรียกว่าแซคคาริไฟเคชันด้วยเอนไซม์ทำให้ได้กลูโคสเหลว เมื่อนำกลูโคสเหลวไปหมักโดยเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราจะได้มอนอเมอร์ เช่น กรดแลคติก หรือ กรดซัคซินิก หลังจากนั้นนำไปสู่กระบวนการเชื่อมต่อโมเลกุลหรือพอลิเมอไรเซชันทำให้ได้ PLA หรือ PBS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ยกเว้นในกรณีของ PHAs จะเกิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายในเซลล์ของแบคทีเรียหลังจากการหมักกลูโคส ได้ทันที พอลิเมอร์เหล่านี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการผลิตขั้นปลายน้ำคือการคอมพาวด์ดิ้ง (Compounding) หรือนำไปผ่านกระบวนการผสมเพื่อทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) หรือวัสดุผสม (Polymer alloys) โดยการใส่สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือเพื่อเพิ่มมูลค่าและยกระดับการใช้งานของเม็ดพลาสติก แล้วนำไปผ่านกระบวนการสุดท้ายคือการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่างๆ ตามการใช้งานด้วยการฉีด เป่า หรืออัดรีดเป็นแผ่นฟิล์มในปัจจุบันประเทศไทยมีเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่มูลค่าเพิ่ม

ของพลาสติกชีวภาพ ที่สามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรม เพียง 2 ประเภท ได้แก่ การแซคคาริ-
ไมว่ฟิเคชันโดยเอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลกลูโคสจากเป็ง การผลิตกรดแลคติก และการขึ้นรูปเป็นใช้

ผลิตภัณฑ์พลาสติก ในขณะที่เทคโนโลยีในขั้นตอนอื่นๆ ยังอยู่ในระดับการวิจัยและพัฒนาในภาครัฐเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิต ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้จากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) [12]
(ลูกศรที่บ แสดงถึงกระบวนการในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิตพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน [15]

| ประเภทของพลาสติก | รายละเอียด |
|--|--|
| <p>แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS)</p> | <p>1. การคอมพาวด์</p> <p>TPS มีปริมาณแป้งที่ผ่านกระบวนการ (อะไมโลส) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเจลาติน (Gelatinized starch) โดยทั่วไปแป้งมักถูกเติมสารเติมแต่ง เช่น สารเสริมสร้างพลาสติก ถูกตัดแปรโครงสร้างหรือผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่มีประโยชน์และเหมาะสมในการนำไปใช้งาน และการย่อยสลายทางชีวภาพ</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>TPS สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูป เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป</p> |
| <p>แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch-aliphatic polyester blends)</p> | <p>1. การคอมพาวด์</p> <p>โดยทั่วไปมักมีการใช้พอลิเอสเทอร์ประมาณร้อยละ 50-60 ผสมกับแป้งเพื่อลดต้นทุนการผลิต และมีการเติมสารเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น</p> <p>แป้งที่ผสมกับพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ เช่น PLA และ PCL ได้รับความสนใจมากในปัจจุบันในการพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแป้งร้อยละ 45 ผสมกับ PCL มีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยส่วนใหญ่ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวเพียง 60 องศาเซลเซียส และเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน</p> <p>PBS และ PBSA เป็นพอลิเอสเทอร์อีกชนิดที่นำมาผสมกับแป้งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล จากการวิจัยพบว่าแป้งผสมกับ PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก จะมี tensile strength ต่ำกว่า ที่มี PBSA อย่างเดียว และ tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น</p> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิตพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน [15]

| ประเภทของพลาสติก | รายละเอียด |
|--|--|
| <p>แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch-aliphatic polyester blends) (ต่อ)</p> | <p>นอกจากนี้ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว และสมบัติในการขึ้นรูป พลาสติกที่มีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูง (มากกว่าร้อยละ 60) จะเปราะและแตกหักง่าย จึงมักมีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติกลงไปเพื่อช่วยลดความเปราะ และเพิ่มความยืดหยุ่น</p> <p>การเติมสารช่วยผสม เช่น พอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride functionalized polyester) ประมาณร้อยละ 5 จะช่วยให้แป้งและพอลิเอสเทอร์ผสมเข้ากันได้ดี และไม่แยกตัว (Phase stability)</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>แป้งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงมักใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแผ่นหรือฟิล์มพลาสติกคุณภาพสูง โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดเป็นแผ่นฟิล์ม การเป่าเป็นฟิล์มบางและการขึ้นรูปด้วยความร้อน</p> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ

นอกเหนือจากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพแล้ว TPS บางเกรดยังสามารถละลายในน้ำอีกด้วย PBSA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและแสดงสมบัติทางเทอร์โมพลาสติกดีมาก จากการวิจัยพบว่าแป้งผสมกับ PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5 - 30 โดยน้ำหนัก จะมี Tensile strength ต่ำกว่า ที่มี PBSA อย่างเดียว และ Tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและสมบัติในการขึ้นรูป [12] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่ผลิตเพื่อการค้า [12]

| สมบัติ | Starch (> 85%) /copolyester (Mater-Bi® NF01U) | Starch/PCL (Mater-Bi® ZF03U/A) | Starch/PLA (Bio-flex 219F) |
|------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------|
| ลักษณะ | N/A | N/A | เม็ด, สีน้ำตาล |
| ความหนาแน่น | 1.1-1.3 | 1.23 | 1.38 |
| Tm (°C) | 110 | 64 | >125 |
| Decomposition temp. (°C) | N/A | N/A | >280 |
| Tensile strength at yield (MPa) | 25 | 31 | 17.01 |
| Elongation at yield (%) | 600 | 900 | 319.96 |
| Flexural modulus (MPa) | 120 | 180 | 335.6 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานจะเกิดขึ้นที่ตัวเชื่อมไกลโคซิดิก ระหว่างโมเลกุลน้ำตาลโดยเอนไซม์ ทำให้ความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และง่ายต่อการย่อยสลายโดย กระบวนการทางชีวเคมี สำหรับพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 60 อนุภาคของแป้งทำหน้าที่ เป็นตัวประสานอย่างอ่อนๆ ในเนื้อพลาสติกและเป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลาย ซึ่งพลาสติกจะแตกตัวเป็นชิ้นส่วน เล็กๆ เท่านั้น แต่จะไม่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ จากการทดสอบการฝังกลบ [16] พบว่าแป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงนี้ สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8 สัปดาห์ และจากการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดสอบ โดยการฝังกลบ พบว่าการเติมปริมาณแป้งเพียงร้อยละ 5 ลงใน PBSA จะทำให้พลาสติกถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ ที่มี PBSA อย่างเดียว เนื่องจาก PVA ละลายในน้ำ ดังนั้นการย่อยสลายของพลาสติกผลิตจากแป้งผสมกับ PVA จึงเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายทางชีวภาพของโมเลกุลน้ำตาล

2.2.4 การนำไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 2.4 การนำพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ไปใช้ประโยชน์ [12]

| ประเภท | การนำไปใช้ประโยชน์ |
|---|--|
| แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก | <ul style="list-style-type: none"> TPS ถูกนำไปใช้งานในรูปของแผ่นฟิล์ม เช่น ถุงต่างๆ และฟิล์มสำหรับหีบห่อ โฟมกันกระแทก และผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดเช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น |
| แป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง | <ul style="list-style-type: none"> แป้งผสมกับพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงมักนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแผ่นหรือฟิล์มพลาสติกคุณภาพสูงในงานด้านบรรจุภัณฑ์ และอื่นๆ พลาสติกจากแป้งผสมกับ PBS หรือPBSA ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นพลาสติก และทำให้เป็นรูปร่างโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม (Thermoform) เพื่อผลิตเป็นถาดใส่ขนมประเภทบิสกิตหรือฟิล์มพลาสติก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปเผยแพร่ในทางใดทางหนึ่งโดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งเมื่อมีการนำไปใช้

1.2.5 บริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 2.5 บริษัทผู้ผลิตพลาสติกที่มีแปงเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า [12]

| ประเทศ | บริษัท | ชื่อทางการค้า |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| สหรัฐอเมริกา | | |
| | Bioplastics | Envaar [®] |
| | National Starch | - |
| | National Starch & Chemical | Hydroxypropyl Starch |
| | American Excelsior | (Amylose 70%) |
| | Novon International | Degra-Novon [®] |
| | USDA – Agritech | EAA/starch |
| | Warner & Lambert | Fluntera Plast |
| | Willow Ridge | Polystarch [®] |
| สหภาพยุโรป | | |
| อังกฤษ | Avebe | Paragon |
| อังกฤษ | Biopao | Biopack |
| เยอรมนี | Bioteo | Bioplast [®] TPS |
| เยอรมนี | Kunststoff GmbH | Bio-flex [®] |
| เยอรมนี | EMS Chemie/Battelle | Amylose |
| สวีเดน | Fluntera AG | Fluntera Plast |
| อิตาลี | Novamont | Mater-Bi [®] |
| | Novon Polymers AG | Novan |
| เนเธอร์แลนด์ | Rodenbura BioPolymer | Soranyl |
| เอเชีย | | |
| ญี่ปุ่น | Chisso/Novon International | Novon [®] |
| | EverCorn, Inc. | EverCorn [™] |
| | Nissel | Eco-ware |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 ราคาพลาสติกที่มีเป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า

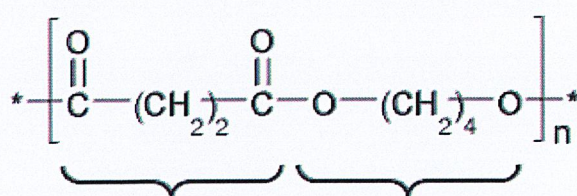
สำหรับราคาของพลาสติกชีวภาพ [17] นั้นจะไม่ผูกติดกับราคาน้ำมันดิบเนื่องจากใช้วัตถุดิบจากชีวมวลพลาสติกไม่ใช่ปิโตรเคมีซึ่งปรับตัวผันผวนตามราคาน้ำมันดิบ ราคาพลาสติกจากปิโตรเคมีมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นเท่าตัวตามราคาน้ำมันดิบ แต่ในทางกลับกันราคาพลาสติกชีวภาพมีแนวโน้มลดลงในอนาคต ในสหรัฐอเมริกาเมื่อพลาสติก PLA ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีราคาถูกใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติก PET จากปิโตรเคมี ดังนั้นในอนาคตราคาพลาสติกชีวภาพมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกับราคาพลาสติกจากปิโตรเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.6 [17]

ตารางที่ 2.6 ราคาพลาสติกที่มีเป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเพื่อการค้า (เหรียญสหรัฐ/กิโลกรัม)

| ชนิดพอลิเมอร์ | 2003 | 2005/6 | 2010 |
|---------------|---------|--------|----------|
| PLA | 2.2-3.4 | 2-3 | 1.35-1.8 |
| PHA | 20 | 3.3 | 2-5 |
| PBS | 3.5 | 4-4.5 | 3 |
| PBA | - | 4.5 | - |
| Starch-based | 0.6-4.5 | 1.6 | - |

2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Poly (butylene succinate); PBS)

PBS เป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมได้ จากปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ดังแสดงในรูปที่ 2.3



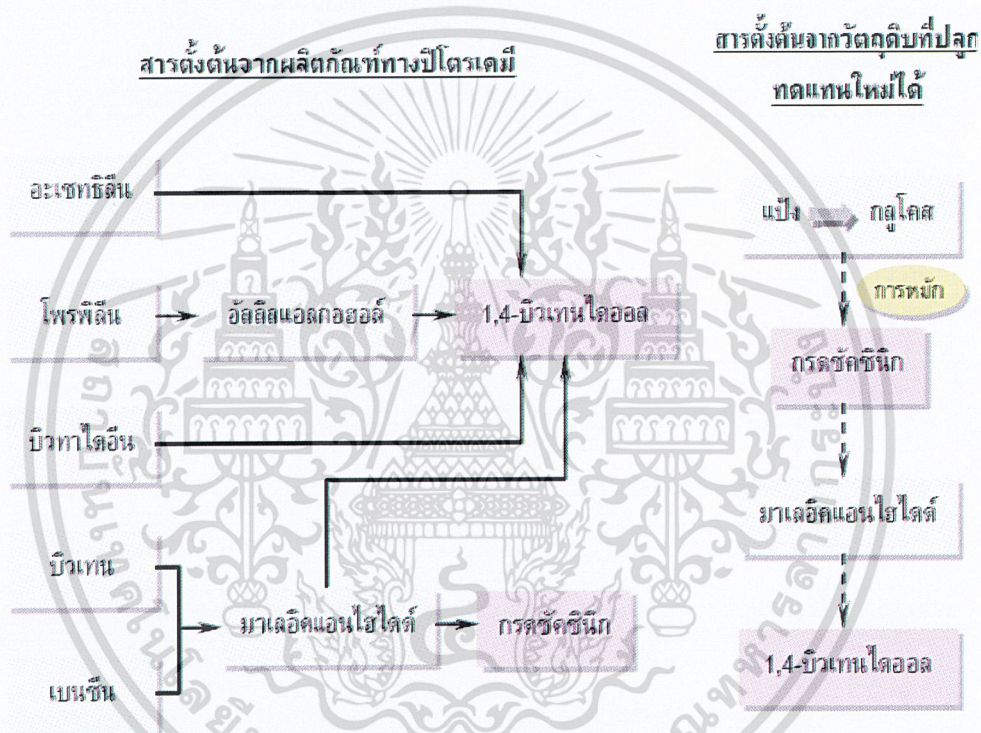
กรดซัคซินิก 1,4-บิวเทนไดออล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBS [18]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต

กรดซัคซินิก และ 1,4 -บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PBS โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามกรดซัคซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และยังสามารถต่อไปเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล โดยผ่านกระบวนการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle® [18]

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต : ผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี โดยเริ่มจากก๊าซบิวเทน ถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งจะถูกลเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิก และ 1, 4 - บิวเทนไดออล กรดซัคซินิกสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ โดยผ่านกระบวนการทางชีวภาพ และยังสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4 - บิวเทนไดออล โดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในการผลิต PBS [18]

| เทคโนโลยี | รายละเอียด |
|----------------|--|
| ต้นน้ำ-กลางน้ำ | <p>1. การหมัก</p> <p>การเตรียมน้ำตาล โดยการนำพืชไปบดหรือโม่ให้ละเอียดเป็นแป้ง แล้วนำแป้งไปย่อยได้เป็นน้ำตาล โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่มี เอนไซม์ หรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา</p> <p>การเตรียมกรดซัคซินิก: โดยการหมักน้ำตาลกลูโคสด้วยแบคทีเรีย และเชื้อราชนิดต่างๆ การเตรียมกรดซัคซินิก: โดยการหมักน้ำตาล กลูโคสด้วยแบคทีเรีย และเชื้อราชนิดต่างๆ</p> <p>การเตรียมบิวเทน ไดออล: สามารถเตรียมได้จากกรดซัคซินิกโดยผ่าน กระบวนการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน</p> <p>2. การพอลิเมอไรเซชัน</p> <p>การควบคุม: มอนอเมอร์ ได้แก่ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งเกิดปฏิกิริยากันแล้วเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาว PBS</p> |
| ปลายน้ำ | <p>1. การคอมพาวด์</p> <p>PBS มักถูกผสมกับแป้ง (TPS) และ Adipate copolymer (ได้เป็น-PBSA) เพื่อให้มีสมบัติเหมาะแก่การใช้งาน และลดต้นทุนการผลิต บริษัท Mitsubishi Motors Corp. ได้พัฒนา PBS ซึ่งเสริมแรงด้วย เส้นใยจากไผ่ (Bamboo fiber) เพื่อใช้แทน PP สำหรับอุปกรณ์ตกแต่งภายใน ยานยนต์</p> <p>2. การขึ้นรูป</p> <p>PBS สามารถนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ เช่น การ ฉีด การอัดรีด หรือการเป่า โดยใช้เครื่องมือขึ้นรูปสำหรับพลาสติกทั่วไป โดยอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปอยู่ในช่วง 160-200 องศาเซลเซียส ในปัจจุบันมีการผลิตโคพอลิเมอร์ของ PBS เกรดใหม่หลาย ชนิด ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปโดยการเป่าเป็นฟิล์ม และการทำเป็น โฟม</p> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สมบัติของ PBS และ PBSA

PBS เป็นเทอร์โมพลาสติก มีสีขาว มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/มล. ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA, PBS มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า PLA มาก แต่ต่ำกว่า PHBV และมี T_g ต่ำมาก โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูง ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ดี และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย

ตารางที่ 2.8 สมบัติของ PBS และ PBSA ที่ผลิตเพื่อการค้า [19]

| สมบัติ | PBS | | PBSA | | |
|---|------------|-----------------|--------|--------|--------|
| | Film grade | Injection grade | A type | B type | C type |
| ความหนาแน่น(กรัม/มล.) | 1.26 | 1.26 | 1.25 | 1.23 | 1.23 |
| T_g (°C) | -32 | -32 | -39 | -45 | -53 |
| T_m (°C) | 114 | 115 | 104 | 95 | 78 |
| Heat Distortion Temp. (°C) | 97 | 97 | 83 | 69 | n/a |
| Tensile Break (kgf/cm ²) | 580 | 210 | 510 | 480 | 420 |
| Tensile Elongation (%) | 700 | 320 | 710 | 780 | 800 |
| Flexural Modulus (kgf/cm ²) | 6,700 | 7,000 | 5,000 | 3,300 | 2300 |

2.3.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

PBS เกิดการย่อยสลายโดยผ่านกระบวนการ Hydro-biodegradable โดยเริ่มการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ซึ่งสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป โดยมีงานวิจัยระบุว่า แผ่นฟิล์ม PBS ที่มีความหนา 40 ไมครอน สามารถถูกย่อยสลายถึงร้อยละ 50 ภายในเวลา 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การนำไปใช้ประโยชน์

PBS สามารถนำไปใช้แทนที่ PET และ PP และยังสามารถนำไปใช้แทนที่พอลิโอเลฟิน โดยเฉพาะ LDPE, HDPE, PS และ PLA ในการใช้งานบางประเภท PBS ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง พลาสติกบรรจุภัณฑ์และอาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะโฟม สารเสริมสร้างพลาสติก แบบ Non-migrating สำหรับ PVC และพอลิเมอรัยย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่นๆ พลาสติกคลุมดินสำหรับการเกษตร กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงาน ทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น [18]

2.3.5 บริษัทผู้ผลิต

2.3.5.1 บริษัทผู้ผลิต PBS รายหลัก ได้แก่ บริษัท Showa Highpolymer ซึ่งอยู่ในเครือของบริษัท Showa Denko Group ประเทศญี่ปุ่น ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Bionolle® โดยผลิต PBS PBA และ PBSA จากวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการปิโตรเคมี นอกจากนี้บริษัท SK Chemicals ประเทศเกาหลีใต้ มีโรงงานขนาดเล็กเพื่อใช้ผลิต PBS, PBA และ PBSA ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า SkyGreen BDP

2.3.5.2 บริษัท Mitsubishi Chemical Corp. ร่วมกับบริษัท Ajinimoto ในประเทศญี่ปุ่น ได้ทำการพัฒนาการผลิต PBS จากวัตถุดิบทางการเกษตร (ข้าวโพด) โดยกระบวนการทางชีวภาพ และมีแผนในการสร้างโรงงานเพื่อผลิตกรดซัคซินิก ที่มีกำลังการผลิตเบื้องต้นประมาณ 30,000 ตัน/ปี ภายในปี ค.ศ. 2006 ซึ่ง PBS ที่ผลิต ได้นี้คาดว่าจะมีราคาต่ำกว่า PLA และสามารถนำไปใช้แทนที่ PLA ในการใช้งานด้านต่างๆ

2.3.5.3 บริษัท Ire Chemical Ltd. ประเทศเกาหลีใต้ ได้ก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ.1996 และในปี ค.ศ. 1998 ได้สร้างโรงงานผลิต PBS PBA และ PBSA ชั้นแรก ซึ่งมีกำลังการผลิตเริ่มต้น 100 ตัน/ปี ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 ได้สร้างโรงงานขั้นที่ 2 ซึ่งมีกำลังการผลิต 3,500 ตัน/ปี และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 12,000 ตัน/ปี ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า EnPol [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 บริษัทผู้ผลิต PBS และ PBSA เพื่อการค้า [20]

| ประเทศ | บริษัท | ชื่อทางการค้า |
|-----------|---------------------------|-----------------------|
| เอเชีย | | |
| ญี่ปุ่น | Showa Highpolymer | Bionolle [®] |
| ญี่ปุ่น | Mitsubishi Chemical Corp. | - |
| เกาหลีใต้ | SK Chemicals | SkyGreen |
| เกาหลีใต้ | Ire Chemical | BDP EnPol |

2.4 แป้ง (Starch)

2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยกลูโคสเป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น สามารถพบอยู่ในพืชทุกชนิด โดยพืชจะสะสมแป้งไว้ในเซลล์ เช่น ในเมล็ด เนื้อไม้ และรากพืช เป็นต้น

กระบวนการผลิตแป้ง[21] นั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ หลักการโดยทั่วไป คือ แยกเม็ดแป้งออกจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เส้นใย โปรตีน และเกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างน้ำ ทำการปั่นแยกแล้วอบให้แห้งต่อไป ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร และยารักษาโรค เป็นต้น ประโยชน์ของแป้งเกิดจากสมบัติความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดฟิล์ม คุณภาพสามารถควบคุมได้ง่ายอีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย และราคาถูก

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

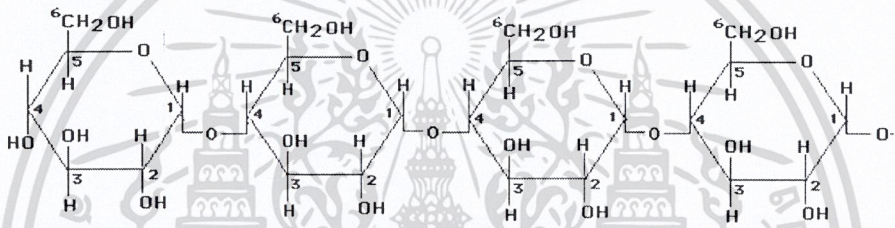
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 ต่อ 10 ต่อ 5 มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางซ้ายปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า กลุ่มปลายด้านที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end group) แป้ง

ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin)[22]

2.4.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

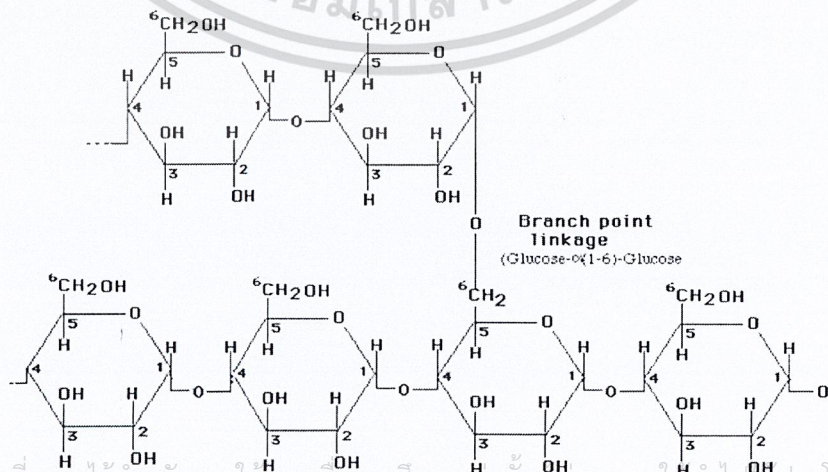
แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน

- อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายตรง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะ α -1, 4 Glycosidic linkage โดยแป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลส [22]

- อะไมโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์โซ่สาขาประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะ α -1,4 Glycosidic linkage และ α -1,6 Glycosidic linkage แต่ละโซ่สาขาในโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 20-30 หน่วย โดยโครงสร้างที่เป็นอะไมโลเพกติน จะมีประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของแป้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [22]

2.4.4 การย่อยสลายของแป้ง

2.4.4.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ [23]

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่นการกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่าง เช่น Alfatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยดำซึ่งเกิดขึ้นบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยดำ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่ โปรงแสงจนทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยดำง่าเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยดำง่าของเครื่องมือทาไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมี ดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลสัพันธะ 1,4 ไกลคอสิดิกของอะไมโลเพกติน
- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลสัพันธะ 1,4 ไกลคอสิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่อนรีดิวง และสามารถไฮโดรไลสัพันธะ 1,6 ไกลคอสิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้งและเดครินไปเป็นกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่าการตีพิมพ์นี้เป็นการรับประกันหรือการรับรองของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 หน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้ง ให้ได้มอลโตสจากปลายโซ่อนรีดิวง

2.4.4.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical hydrolysis)

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งตัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการหยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยการเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งตัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ นำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทสไซโคลเดกซ์ทริน

เมื่อพิจารณาตามลักษณะของการทำงานของเอนไซม์ จะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

1. เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo-enzyme)

- เบต้าอะไมเลส (β -amylase; 1,4- α -D-glucan maltohydrolase: EC 3.2.1.2) พบเอนไซม์นี้ในพืชชั้นสูง เช่น ข้าวบาเลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และพบได้ในถั่วหรือมันฝรั่งหวาน จัดเป็น Extracellular enzyme ในเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Bacillus cereus* เป็นต้น เบต้าอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะจากด้านนอกเข้ามาด้านใน โดยเริ่มจากปลายของอะไมโลสหรืออะไมโลเพกติน จากปลายด้านที่ไม่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ เอนไซม์จะตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกของโมเลกุลกลูโคสเป็นคู่ๆ ไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลมอลโตส เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ร่วมทำกิจกรรม เอนไซม์ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 125-150 กิโลดาลตัน มีความเสถียรที่ pH 4-9 และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 °C

- กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase; 1,4- α -D-glucan glucohydrolase: EC 3.2.1.3) สามารถผลิตได้จากเชื้อราในสกุล *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Rhizopus* ยีสต์และแบคทีเรีย กลูโคอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดน้ำตาลกลูโคสที่จับกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก และพันธะกิ่งแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก โดยการตัดพันธะกิ่งจะเกิดขึ้นช้ากว่าการตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก ถ้าการย่อยเกิดอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลูโคส เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50-110 กิโลดาลตัน มีความเสถียรที่ pH 3.5-5 และที่อุณหภูมิ ± 55 °C

2. เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-enzyme)

- แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase; endo-1,4- α -D-glucan glucohydrolase: EC 3.2.1.1) จัดเป็น Extracellular enzyme คือเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแล้วถูกขับออกมาออกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส (Maltose) กลูโคส (Glucose) และลิมิตเดกซ์ทริน (Limitextrin) เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุล

ประมาณ 50 กิโลคาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนร่วมกิจกรรม เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 5.5-9 และที่อุณหภูมิห้อง 150 องศาเซลเซียส

3. เอนไซม์ย่อยพืชราก (Debranching enzyme)

- ไอโซอะไมเลส (Isoamylase; glucogen-6-glucanohydrolase: EC 3.2.1.68) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยจุดที่เป็นกิ่งก้านของไกลโคเจนอะไมโลเพกตินได้ดี ไอโซอะไมเลสไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ในการทำงาน สามารถดำเนินกิจกรรมได้ดีในช่วง pH 3-4 และมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 45 ถึง 55 องศาเซลเซียส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถแยกได้จากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

- พุลูลานเนส (Pullulanase; Pullulan 6-glucanhydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิกของพุลูลาน และอะไมโลเพกติน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมกับไกลโคเจนได้ยากสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2-3 หน่วย ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์ และแบคทีเรีย เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 4.5-5.5 และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2.4.4.3 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสง (Photodegradable plastics)

พลาสติกสามารถสลายตัวได้โดยแสงจัดเป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับแสง ซึ่งพลาสติกชนิดนี้จะมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) เมื่อได้รับแสงอาทิตย์จะสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สายโซ่โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สลายตัว ดังนั้นถ้านำพลาสติกชนิดนี้ไปทิ้งไว้กลางแจ้งหลังจากการใช้งานแล้ว โดยปล่อยให้โดนแสงอาทิตย์พลาสติกชนิดนี้จะเสื่อมสภาพและค่อยๆสลายตัวไป

2.4.4.4 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ

การสลายตัวได้ในทางชีวภาพของพลาสติกมี 3 ลักษณะ คือ

1. พลาสติกไม่ได้เสื่อมสลายเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุน และต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

2. การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปอร้ออกไซค์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Auto-oxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายต่อ เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต่อไป

3. การเสื่อมสลายเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นได้โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน เป็นต้น

2.5 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [24]

| องค์ประกอบ | ปริมาณ (ร้อยละ) |
|------------|-----------------|
| ความชื้น | 12.59 |
| แป้ง | 87.0 |
| ไขมัน | 0.1 |
| โปรตีน | 0.1 |
| เถ้า | 0.2 |
| ฟอสฟอรัส | 0.01 |

2.5.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า ไบฟรินเจนต์ (Birefringence) ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกันแบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลส บางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่าบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline regions) หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะไบฟรินเจนต์ของเม็ดแป้งบริเวณที่เป็นผลึกนี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่าบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous regions) เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

2.5.2 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร

เนื่องจากแป้งมันสำปะหลัง มีสมบัติบางประการที่ยังไม่ตรงกับความต้องการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าบางชนิด เช่น ในการผลิตกระดาษ แป้งมันสำปะหลัง จะเหนียวเกินกว่าที่เครื่องเคลือบจะทำงานได้ หรือหากนำมาแป้งไปเก็บไว้ในที่ ที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้หน้าที่ผสมอยู่แยกจากตัวแป้ง ทำให้ไม่เหมาะสมกับการทำน้ำสลัด ดังนั้น จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งเพื่อให้ความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในรูปแบบแป้งแปรรูปหรือดัดแปร (Modified starch) โดยการนำแป้งมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของแป้งและทำให้แป้งมีสมบัติเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ การแปรรูปแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทยขณะนี้ใช้อยู่ด้วยกัน 3 วิธี [4] คือ

1. วิธี Degradation หรือ Conversion คือ การทำให้ความเหนียวของแป้งลดลง ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้ คือ

- Acid conversion คือ การนำแป้งมาเติมกรดเกลือและกรดกำมะถันเพื่อให้ความเหนียวของแป้งลดลง และสามารถคงรูปเจล (Gel) ได้โดยการทำให้เย็น แป้งที่ได้เรียกว่า Acid modified starch

2. วิธี Pregelatinization คือ การนำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40-50 เติมน้ำร้อน แป้งจะแห้งและสุกเป็นแผ่นบางๆ จากนั้นนำแผ่นแป้งไปบดผ่านตะแกรงเป็นแป้งอีกครั้ง แป้งที่ได้มีสมบัติเป็นกาวที่ทนน้ำเย็น จึงมีชื่อเรียกว่า Cold Water Soluble Starch (CWS) หรือแป้งอัลฟา (Alpha starch) หรือแป้งที่แปรรูปโดยกระบวนการทางกายภาพ (Physically modified หรือ Converted starch) ซึ่งแป้งที่ได้นี้จะสุก 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปใช้งานที่ไม่ต้องใช้ความร้อนในการทำเป็นกาวได้

3. วิธี Derivatives คือ การใช้สารเคมีในการเปลี่ยน โมเลกุลหรือคุณสมบัติของแป้ง โดยการเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้ง เพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติตามชนิดและปริมาณของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีนี้จะได้แป้งแปรรูป 2 ประเภท คือ

(1) Starch ester เช่น

- Acetylated starch ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร กระจายและกาว
- Phosphoric acid ester ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

(2) Starch ether เช่น

- Caboxymethyl ether, Hydroxyethylated starch, Hydropropylated starch และ Cation starch แป้งกลุ่มนี้ทนความเย็นได้ดีกว่า และมีราคาแพงกว่า ester

- Cross-linked starch ใช้ในขั้นตอนสุดท้ายของการแปรรูปอาหารเพื่อให้แป้งคงทนต่อภาวะกรดต่างชนิดปกติ แรงกวนและความร้อน

2.5.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลัง

การให้ความสนใจเกี่ยวกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้เกิดขึ้นเนื่องจากปัญหาการใช้พลาสติก เพราะพลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก แม้จะกำจัดได้โดยวิธีการเผาแต่ก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างร้ายแรง จึงได้เกิดแนวคิดที่จะนำวัสดุที่มีสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงกับพลาสติก แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติมาใช้ทดแทน ซึ่งเป็นที่มาของวัสดุที่เรียกว่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้อาจเตรียมมาจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ พอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือการผสมระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ แป้งซึ่งถือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ จึงได้รับความสนใจเนื่องจากข้อเด่นของแป้ง โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังคือมีความบริสุทธิ์สูง ราคาถูกและมีปริมาณมาก ปัจจุบันนี้จึงนิยมใช้แป้งมาผลิตเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ ซึ่งมีเทคโนโลยีและลักษณะการผลิตต่างกัน สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ [14]

1. การผลิตพลาสติกจากแป้งโดยตรง

เป็นกระบวนการที่ให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้น เนื่องจากแรงดันของน้ำในตัวแป้งที่กลายเป็นไอเมื่อถูกความร้อนสูงขณะที่ผ่านแรงอัดจากเครื่องอัดรีดหรือเอกทูดเดอร์ (Extruder) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า โฟมแป้ง นำไปใช้ประโยชน์เพื่อรองรับกันการกระแทกในภาชนะบรรจุภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แป้งผสมพลาสติกที่ย่อยสลายได้

เป็นการนำแป้งมาผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ จากนั้นนำมาขึ้นรูปหรือผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ แต่ราคาของพลาสติกที่ย่อยสลายได้นั้นยังสูงกว่าพลาสติกทั่วไปหลายเท่าตัว สำหรับการผสมนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงสูง เช่น Extruder หรือเครื่องผสม High speed ชนิดพิเศษที่ควบคุมความร้อนได้ และปริมาณการใช้แป้งที่ผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ถ้าต้องการให้มีความยืดหยุ่น (สมบัติของพอลิเมอร์) มาก ก็ต้องมีสัดส่วนของพลาสติกที่ย่อยสลายได้อยู่มาก ถ้าใส่แป้งมากขึ้นความแข็งของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้น แต่ความยืดหยุ่นจะลดลง

แป้งผสมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้ที่มีการวิจัยและพัฒนาแล้ว มีดังนี้

1. แป้งผสมพอลิคาโพรแลคโทน (PCL) สมบัติเด่น คือ ไม่เป็นพิษ จุดหลอมเหลวต่ำ ย่อยสลายในธรรมชาติได้เร็ว นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุต่างๆ
2. แป้งผสมพอลิแลคติก (PLA) จุดเด่น คือความปลอดภัยในการใช้เป็นภาชนะที่สัมผัสกับอาหาร ทั้งนี้เพราะกรดแลคติก (lactic acid) ได้มาจากกระบวนการหมัก (แป้ง) และกระบวนการควบแน่น (Condensation) ดังนั้นในอุตสาหกรรมอาหารและยา จึงเป็นที่ยอมรับมากกว่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น
3. แป้งผสมพอลิเอสเทอร์อื่นๆ กำลังอยู่ในความสนใจ และมีผู้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาแล้ว เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS), พอลิเอสเทอร์คาร์บอเนต (Polyester carbonate; PEC) แม้ประเทศไทยจะมีการใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในระดับหนึ่งแล้วก็ตาม แต่ก็ควรมีการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาหาแนวทางการใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังให้มากขึ้น อันจะเป็นผลดีต่อเศรษฐกิจของประเทศโดยรวม

2.6 พลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) [25] ตามนิยามของ IUPAC หมายถึง สารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติกหรือยาง (Elastomer) แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนในการใช้งาน และการยืดตัว แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์จะไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทุติยภูมิ (Secondary covalent) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันอ่อนลงเกิดโครงสร้างที่อ่อนตัวและพลาสติกไซเซอร์

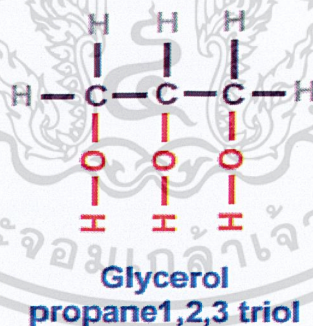
ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ (Copolymerization)

สมบัติของพลาสติกไซเซอรที่ที่ต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรมีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติกไซเซอรที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำให้แห้ง พลาสติกที่ดีต้องมีลักษณะทางกายภาพดี สามารถทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน

พลาสติกไซเซอรที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอ ไค และโพลิ-โกแซ็กคาไรด์ พอลิแอล และลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด

2.6.1 กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine)

เป็นพอลิแอลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ โครงสร้างโมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืดรสนหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาลผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของกลีเซอรอล [26]

2.6.2 Palmitic-Stearic acid 45:55 (COA)

กรดสเตียริก หรือ N-octadecanoate คือกรดไขมันประเภทหนึ่ง โมเลกุลประกอบด้วยสายโซ่ ไฮโดรคาร์บอนยาว โดยทั่วไปผลิตจากไขมันสัตว์ซึ่งจะมีกรดปาล์มิติกผสมอยู่ 30-60% กรดสเตียริกเป็นกรดไขมันอิ่มตัว คือกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double bond) หรือหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) อื่นๆตามสายโซ่ของพอลิเมอร์เลย พบมากในพวกไขมันสัตว์ เช่น เนื้อหมู เนื้อวัว ไขมันจากกะทิ มะพร้าว และไขมันปาล์ม เป็นต้น กรดไขมันส่วนมากมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 12-18 ตัว จะมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงขึ้นตามจำนวนคาร์บอนอะตอมที่เพิ่มขึ้น และกรด

ไขมันอิ่มตัวมีจุดเดือดสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน ถ้าเป็นกรดไขมันอิ่มตัวมาก จะเป็นกรดไขมันเช่น เช่น กรดลอริก (C12) กรดไมริสติก (C14) กรดปาล์มิติก (C16) กรดสเตียริก (C18)

กรดสเตียริกเกรดการค้า จะมีการแทนที่ของกรดไขมันชนิดรอง (Minor fatty acid) เช่น กรดไมริสติกและ กรดโอเลอิก ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เหมาะสมของกรดชนิดนั้นๆ ซึ่งลักษณะทางกายภาพสามารถเปลี่ยนโครงสร้าง จากผลึกขนาดใหญ่เป็น โครงสร้างผลึกขนาดเล็กได้ นอกจากนี้ กรดสเตียริกสามารถเปลี่ยนจากสารที่มีความแข็ง และเปราะเป็นสารที่มีความนิ่มและสลายตัวได้ง่าย [27]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก [27]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของกรดปาล์มิติก [27]

การประยุกต์ใช้

ใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมการผลิตเทียนไข, พลาสติก, เครื่องสำอาง และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง สำหรับทำให้ยางนิ่มขึ้น

2.7 สารช่วยผสม (Compatibilizer)

จากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) [28] จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่อง ดังนี้

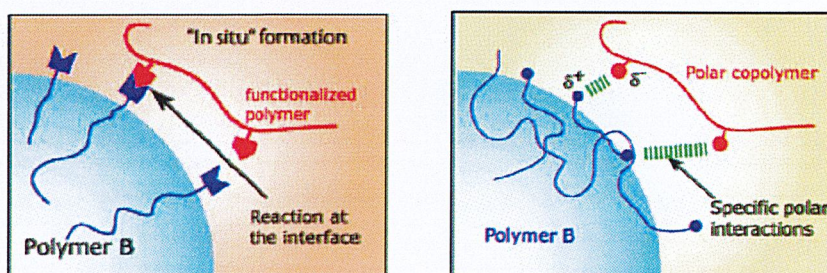
1. มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัสดุ (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดี
2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัสดุ (Interfacial tension) สูง
3. มีลักษณะรูปร่าง (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป
4. มีสมบัติเชิงกลต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ การนำข้อมูลไปใช้จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) โดยความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึงความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสมกันของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน แต่ไม่ใช่ความสามารถในการละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัสดุ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed-phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. Non-reactive Blending คือการเติมสารช่วยผสม ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสม เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือพอลิเมอร์ร่วมแบบโคบล็อก แบบไตรบล็อก แบบกราฟท์ หรือแบบส้อม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับบิวทาไดอีนแบบโคบล็อกเป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2. Reactive Blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนของการเติมสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม เช่น พอลิเมอร์ผสมของพอลิคาร์บอนเตกับพอลิเอสเทอร์ หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลง (Modify) โดยการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟท์พอลิเอทิลีนด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือกรดอะคริลิก (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเอไมด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (A) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุ (B) ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขึ้นชื่อทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.10 ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับสารช่วยผสม [28]

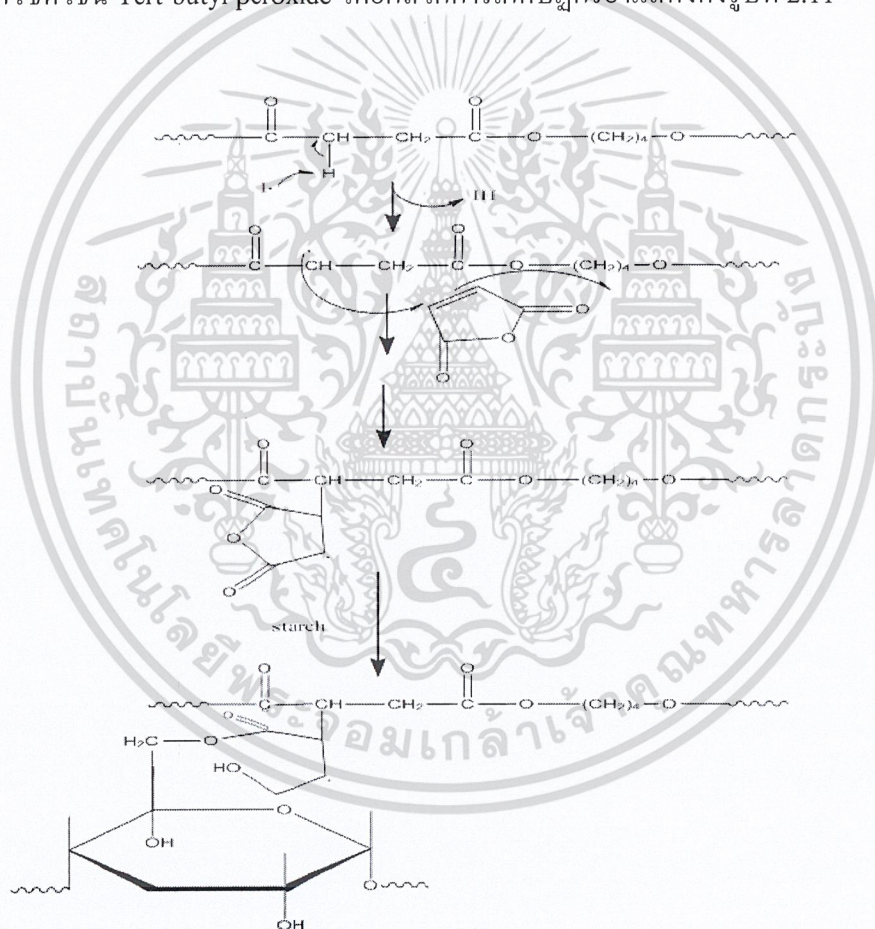
(A) Reactive blending

(B) Non-reactive blending

2.7.1 มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Maleic Anhydride Grafted

Polybutylene succinate; MA-g-PBS)

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอสเทอร์ เป็นสารควบคุมปฏิกิริยาชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมโพสิต โครงสร้างมีทั้งส่วนที่ไม่ว่องไวซึ่งจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอวาล์วกับพอลิเมอร์ และส่วนที่ว่องไวซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับสารตัวเติม โดยเตรียมจากปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะเกิดปฏิกิริยากับพอลิเอสเทอร์ โดยมีตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นเปอร์ออกไซด์ เช่น Tert-butyl peroxide โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PBS, แป้ง, Maleic Anhydride, และตัวริเริ่มปฏิกิริยา

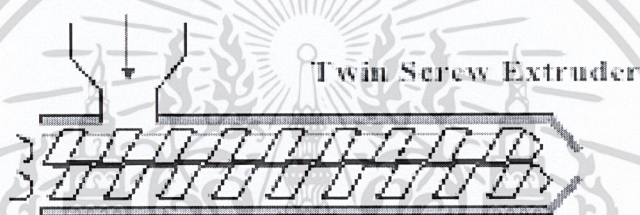
L101 (PBS-g-MA) [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอก (Twin-screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบนี้จะมีสกรูอาร์คิมิดีส (Archimedean screws) อยู่ 2 สกรู โดยจัดจำแนกของเครื่องอัดรีดตามลักษณะและทิศทางการเคลื่อนที่ของสกรูเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอัดรีดแบบเฟืองไม่ตรงกันและเครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน โดยเครื่องอัดรีดแบบเฟืองไม่ตรงกันจะมีกลไกการเคลื่อนที่เป็นแบบลาก (Drag flow conveyance mechanism) ในขณะที่เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกันมีการเคลื่อนที่แบบการกระจัดทางบวก (Positive conveyance) คือขึ้นอยู่กับความหนืด (อุณหภูมิจึงขึ้นกับการลาก [30] รูปที่ 2.11 แสดงเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอก



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนอก [30]

การนำเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มาใช้ประโยชน์ดังนี้คือ

- 1) เป็นที่แพร่หลายสามารถควบคุมความเหนียวของพอลิเมอร์ได้โดยการใช้การโปรแกรมสกรู ซึ่งอาศัยความตรงกันของความเหนียวและความว่องไวต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์และสกรู
- 2) เวลาในการกระจายตัวต่ำ จึงสามารถควบคุมได้ง่าย เหมาะสำหรับการทำสารประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์
- 3) การพาว์สคูปเป็นไปในทางบวก มีลักษณะคล้ายๆกับการนำเกียร์บีบมาช่วยนำพาว์สคูปให้เคลื่อนที่ไปตามสกรู

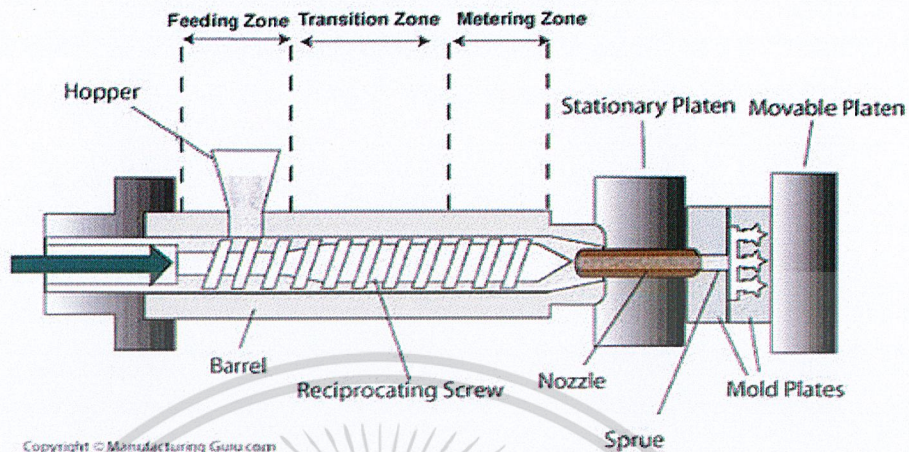
จัดเป็นการทำงานที่อาศัยหลักของการระบายอากาศ เนื่องจากก๊าซสามารถถูกกำจัดออกไป

ได้โดยง่ายหรืออาจใช้ทางระบายอากาศเป็นที่เติมสารตัวเติมต่างๆทำหน้าที่เป็นส่วนป้อนวัสดุ

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นด้วยกับเนื้อหาใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยภูมิ อย่างไรก็ตามเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีขีดจำกัดในการนำไปใช้งาน

2.8.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine)



รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางของเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก [31]

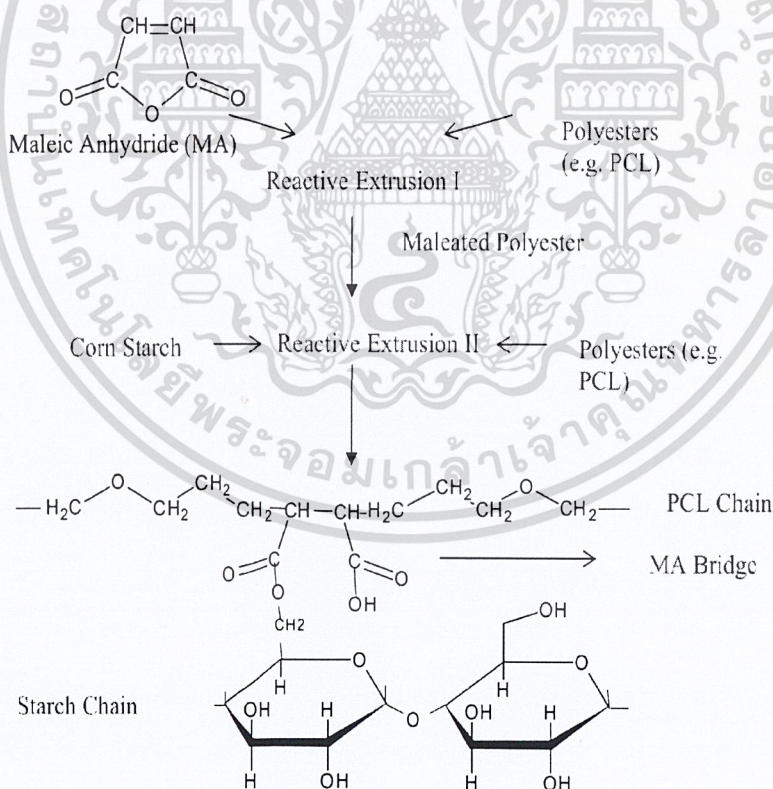
กระบวนการฉีดขึ้นรูปสมัยใหม่ [31] ส่วนมากจะใช้เกลียวหนอนในการหลอมพลาสติก ก่อนทำการฉีด (Preplasticating) เพื่อใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์หลอมเหลวในปริมาณที่ควบคุมได้ ก่อนที่จะส่งผ่านไปยังช่องว่างของแม่พิมพ์ หลักการนี้จะเหมือนกันกับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยเกลียวหนอนจะหมุนเพื่อถลำเลียงและหลอมพอลิเมอร์ที่พามาจากกรวยป้อนเม็ดพลาสติก ขณะที่เกลียวหนอนยังหมุนอยู่ จนกระทั่งได้ปริมาณน้ำหนักรีดเกลียวหนอนจะเคลื่อนถอยหลังตามแนวแกนในขณะที่เกลียวหนอนยังหมุนอยู่ จนกระทั่งได้ปริมาณน้ำหนักรีด (Shot weight) ตามต้องการ

การฉีดขึ้นรูปพลาสติกจะเกิดขึ้นในขณะที่เกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในลักษณะของกระบอกสูบ (Ram) และเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกหลอมเหลวตามแนวร่องของเกลียวหนอนจึงได้มีการใช้หัวแหวนป้องกันการไหลย้อนกลับประกอบอยู่ที่ปลายของเกลียวหนอน พลาสติกจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดที่ประกบติดกับตอนปลายของกระบอกฉีด ผ่านเข้าไปยังทางเข้าของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะถูกยึดอยู่บนแท่นยึดแม่พิมพ์ ซึ่งด้านหน้าจะถูกยึดติดอยู่กับที่ ขณะที่อีกด้านหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปมาได้ ทำให้แม่พิมพ์เปิดและปิดได้ เป็นสิ่งสำคัญมากในการทำให้แม่พิมพ์อยู่ได้อย่างมั่นคงในระหว่างการฉีดพลาสติกหลอมและช่วงหล่อเย็นของวัฏจักรการฉีดขึ้นรูป

รูป การหล่อเย็นแม่พิมพ์จะเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวที่ร้อนผ่านผนังช่องว่างของแม่พิมพ์ที่เมื่อวัสดุแข็งตัวจนถึงจุดหนึ่งที่สามารถระทุ้งออกจากช่องว่างของแม่พิมพ์ได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อการบิดเบี้ยวและเสียรูปของพอลิเมอร์ แม่พิมพ์จะถูกเปิดออกและชิ้นงานจะถูกนำออกด้วยกลไกการกระทุ้งที่สร้างขึ้นภายในระบบของแม่พิมพ์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2000 Carlson, D., Nie, L., [32] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของแป้งและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของแป้งที่มากกว่าในการผสม ในสัดส่วนที่เหมาะสมกับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์และแป้ง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ เพื่อที่จะต่อยอดไปสู่ตลาดอุตสาหกรรมของพลาสติกย่อยสลายได้ ซึ่งมีประเด็นหลัก คือ การศึกษา Reactive extrusion ของพอลิเอสเทอร์ที่ผสมกับแป้ง ซึ่งขั้นตอนแรกของเทคนิค Reactive extrusion จะใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา เช่น Benzoyl peroxide (BPO), Dicumyl peroxide (DCP) และใช้ Maleic anhydride (MA) เป็นสารช่วยผสม จากการผสมกันของพอลิเอสเทอร์กับสารช่วยผสม จะกำหนดอัตราส่วนของสารช่วยผสม อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 – 1.6% ขั้นตอนที่สองของเทคนิค Reactive extrusion จะใช้พอลิเอสเทอร์และแป้งผสมกัน ผลลัพธ์ที่สุดท้ายจะได้เป็นพอลิเมอร์ที่มี Maleic anhydride (MA) เกิดการกราฟท์กับแป้งและพอลิเอสเทอร์ ซึ่งทำให้พอลิเอสเทอร์กับแป้งมีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.14 กระบวนการ Reactive extrusion ของพอลิเอสเทอร์ (PCL) กับแป้งโดยใช้ MA เป็นสารช่วยผสม [32] ทั้งหมดนี้ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2004 Supasit Pumeechokechai [33] ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไม่ดัดแปร กับพอลิโพรพิลีนโดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และนำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรคือ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาคือ 2 ชั่วโมง แล้วนำแป้งมันสำปะหลัง ทั้งที่ดัดแปรและไม่ได้อัดแปรมาผสมกับพอลิโพรพิลีนและขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จนไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ และเมื่อปริมาณแป้งเป็น 0-50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปร มีสมบัติด้านแรงดึงสมบัติด้านแรงคดโค้ง การดูดซับความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน การดัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียงกัน

ในปี 2004 Jian-Feng Zhang and Xiuzhi Sun [29] ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งข้าวสาลี ในอัตราส่วน 55/45 โดยมี Maleic anhydride (MA) เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) และใช้ L101 (2,5 - bis (tert-butylperoxy) - 2,5 dimethylhexane) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในปริมาณ 1% และ 10% ตามลำดับ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) พบว่า มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยมีค่าความ แข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 52.4 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) เท่ากับ 4.1% ดังแสดงในตารางที่ 2.11

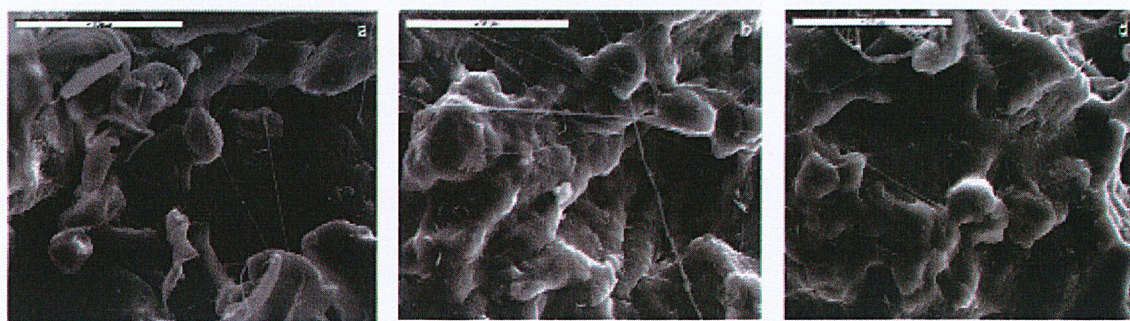
ตารางที่ 2.11 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งข้าวสาลีในอัตราส่วน 55/45 โดยมี (MA) เป็นสารช่วยผสม และใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา [29]

| Sample | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|--|------------------------|-------------------------|
| PLA/starch (55/45) | 30 ± 2.6 | 2.7 ± 0.1 |
| (PLA+0.01% L101)/starch (55/45) | 35.4 ± 3.6 | 4.0 ± 0.2 |
| PLA/starch/MA/(55/45/0.25)+10% L101 (MA basis) | 44.6 ± 1.1 | 3.7 ± 0.1 |

| Sample | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|---|------------------------|-------------------------|
| PLA/starch/MA/(55/45/0.50)+10% L101 (MA basis) | 50.0 ± 1.9 | 3.7 ± 0.4 |
| PLA/starch/MA/(55/45/1.00)+10% L101 (MA basis) | 52.4 ± 1.9 | 4.1 ± 0.1 |
| PLA/starch/MA/(55/45/2.00)+10% L101 (MA basis) | 45.4 ± 0.3 | 3.6 ± 0.2 |

ในปี 2005 V. Tserki, P. Matzinos, C. Panayiotou [34] ได้ทำการศึกษา การนำผงไม้จากลิกโนเซลลูโลซิก (Lignocellulosics) มาใช้ประโยชน์ในด้านพลาสติกย่อยสลายได้ เช่น แป้งจากต้นสน (Spruce flours), ผงไม้จากต้นมะกอก (Olive husk flours) เยื่อกระดาษ (Paper flours) ซึ่งจะใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) ในการเตรียม พลาสติกย่อยสลายได้ มีราคาไม่แพง และจะใช้พอลิเอสเทอร์ Bionolle 3020 เป็นส่วนผสมกับผงไม้ที่กล่าวมาข้างต้น โดยการตัดแปรผงไม้ลิกโนเซลลูโลซิก ด้วยปฏิกิริยา Acetylation และ Propionylation จะเรียกผงไม้ชนิดนี้ว่าผงไม้เอสเทอร์ (Esterified flour) โดยใช้ Maleic anhydride (MA) เป็นสารช่วยผสม กับ Dicumyl peroxide (DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเคมี พบว่า ผงไม้ที่ตัดแปรและผงไม้ที่มีสารช่วยผสม (Compatibilizer) มีสมบัติเชิงกลในด้านของค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของยั้งที่ดีขึ้นกว่าผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปร ผลทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในส่วนผสมที่แตกต่างกันของ Bionolle/ผงไม้ ที่ทำปฏิกิริยากัน ระหว่างผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปร, ผงไม้ที่ตัดแปรด้วย หมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์ และ Bionolle/ผงไม้ ที่มีการเติมสารช่วยผสม พบว่า ผงไม้เอสเทอร์และ Bionolle/ผงไม้ ที่มีการเติมสารช่วยผสม แสดงถึงการกระจายวัฏภาคได้ดีกว่าผงไม้ที่ไม่ตัดแปร และมีการยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่าง วัฏภาคที่สูงระหว่างเฟสสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)

(B)

(C)

รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Bionolle/ผงไม้

(A) ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปร (B) ผงไม้เอสเทอร์ (C) มีการเติมสารช่วยผสม [34]

ในปี 2006 Mani Bhattacharya et al., Avella et al. และคณะ [35] ศึกษาการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบแบ่งเอสเทอร์ (แบ่ง 60%, พอลิเอสเทอร์ 40%) ก่อนการเติมสารช่วยผสม พบว่าสมบัติด้านความแข็งแรงดึง การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ลดลง แต่มีการเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัส และเมื่อเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเกิดการเพิ่มขึ้นของค่าการยืด ณ จุดขาด และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งมีการเลือกศึกษา ส่วนประกอบของ แบ่ง : พอลิเอสเทอร์ : สารช่วยผสม (MA) : ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (DCP) ในอัตราส่วน 40 : 60 : 1 : 0.8 ตามลำดับ แสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด เท่ากับ 257 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าอัตราส่วนผสมในสูตรอื่นๆ และเกิดการยึดเกาะที่พื้นผิวระหว่างวัสดุที่ดี เหมาะแก่การผสมกันของเฟสสองเฟส (พอลิเอสเทอร์/แบ่ง) แต่ถ้าใส่สารช่วยผสม Maleic Anhydride (MA) 1.5% พบว่าค่ามอดุลัสของยังมีการเพิ่มขึ้น แต่เกิดการลดลงของค่าการยืด ณ จุดขาด และสารช่วยผสมที่ใช้ในการผสมนั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแบ่ง และสมบัติเชิงกลที่ต้องการ

ในปี 2006 Sailaja and Chanda [36] ศึกษาการใช้ Maleic anhydride (MA) เพื่อกราฟท์ (grafted) กับ PE สำหรับการเตรียม PE/แบ่งตัดแปร โดยใช้ Benzoyl peroxide เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเคมี ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเคมีอีกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ได้ระหว่างปฏิกิริยาการกราฟท์ (Grafted) คือ Ceric ammonium nitrate (CAN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2006 Tang., Mani Bhattacharya et al. และคณะ [37] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Benzoyl peroxide (BPO), Dicumyl peroxide (DCP) และ di-tert-butyl peroxide (DBP) เพื่อใช้ในการกราฟท์กับ Polybutylene succinate (PBS) กับแป้งคัดแปร โดยใช้ Maleic anhydride (MA) เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer)

ในปี 2007 Jean-Marie Raquez, Philippe Degee และคณะ [38] ได้ทำการศึกษากระบวนการ Reactive extrusion ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ในกลุ่ม อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ และจากกระบวนการปิโตรเคมี เช่นการพอลิเมอร์ไรเซชัน แบบเปิดวงของแลคโตน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ดีบุก (Tin) และอลูมิเนียม (Aluminium) จะทำให้พอลิเมอร์ เปลี่ยนไปเป็นวงมอนอเมอร์แบบเดิมได้ ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิเอสเทอร์ด้วยกระบวนการ Reactive extrusion ต้องอาศัยหลักการความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอสเทอร์และสารตัวเติมธรรมชาติ เช่น เม็ดแป้ง, ผงทัลคัม โดยใช้ Maleic anhydride (MA) เป็นสารช่วยผสม กระบวนการ Reactive extrusion เป็นวิธีการในการผสมและหลอมเหลวพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin-screw extruder) เพื่อทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization), การกราฟท์ (Grafting) ในทางอุตสาหกรรมใช้กระบวนการนี้เพื่อปรับปรุงปฏิกิริยาทางเคมี เพราะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ ข้อดีของกระบวนการนี้ เช่น ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายในกระบวนการหลอมเหลว, เป็นกระบวนการต่อเนื่องและได้พอลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เป็นต้น

ในปี 2008 ณัฐพงศ์ ภาคำ, ศิริินภา เกตุสุข, วรพงษ์ เหล่าฤทธิไกร [39] ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิแลคติกผสมแป้งคัดแปร โดยศึกษาผลของชนิดแป้งคัดแปร 2 ชนิด แป้งคัดแปรพรีเจล (Pregelatinized starch, PGS) และแป้งคัดแปรไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch, HBS) และชนิดกับปริมาณสารช่วยผสม ได้แก่ เมทิลีนไดฟีนิล-ไดไอโซไซยาเนต (MDI) และโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (TDI) โดยการเตรียมพอลิแลคติกผสมแป้งคัดแปรในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เป็นพลาสติกไซเซอร์ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ใช้สารช่วยผสม TDI ในปริมาณ 0%, 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยผสม MDI ในปริมาณ 0%, 1.5%, 3.1% และ 4.6% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของไดไอโซไซยาเนตเท่ากัน โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปชิ้นงาน

ไม่ว่ายังใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล, ค่าไปใช้

สมบัติการดูดซับน้ำ, สมบัติทางความร้อน, สันฐานวิทยา และความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า PLA/HBS มีสมบัติส่วนใหญ่ที่ดีกว่า PLA/PGS

ในปี 2009 ซอลดา เล้ากิตติกุล,พนิดา ตั้งนอบน้อม และพิมพาภรณ์ มั่นพิริยะกุล โครงการงานพิเศษ ปีการศึกษา 2552 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [7] ได้ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งคัดแปรพรีเจล(PGS)และแป้งคัดแปรไฮโดร โฟบิก (HBS)ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังคัดแปรกับ PBS พบว่าเมื่อมีการเติมสารช่วยผสม (PBS-g-MA) ลงไป ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นในส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS และลดลงในส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PGS ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นในส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PGS และลดลงในส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS ส่วนค่าความแข็งแรง จะเพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมของทั้งสองชนิดแป้ง เนื่องจากการเติมสารช่วยผสมจะทำให้เกิดความต่อเนื่องของวัฏภาคดีขึ้น สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PGS อันเนื่องมาจาก HBS เป็นแป้งคัดแปรที่ผ่านกระบวนการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง ด้วยพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความมีขั้วหรือความไม่ชอบน้ำที่น้อยกว่า ซึ่งจากโครงสร้างของแป้งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ ในทุกๆหน่วยซ้ำ ทำให้สมบัติความมีขั้วโดยรวมของแป้ง HBS ลดลง และเข้ากันได้ดีกับ PBS มากกว่าแป้ง PGS

ในปี 2010 ดวงพร คล้ายเพชร วิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2553 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [8] ได้ศึกษาฟิล์มไบโอพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมแป้งคัดแปร จากการทดลองพบว่า อัตราส่วน PBS/Starch ที่เหมาะสมกับการเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้คือ 70/30 ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือ 40 % (โดยน้ำหนักของแป้ง) แป้งที่เหมาะสมกับการเตรียมฟิล์มพลาสติก PBS ผสมแป้ง คือ แป้งคัดแปรเอสเทอร์ (EMS) และแป้งไฮโดรโฟบิก (HBS) เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้พอลิเมอร์ผสมนิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยังลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ฟิล์ม PBS/HBS มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าฟิล์ม PBS/EMS องศาความเป็นผลึกลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งคัดแปรเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง การใช้สารช่วยผสม PBS-g-MA ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก

ของ PBS ช่วยปรับปรุงสันฐานวิทยาทำให้เม็ดแป้งยึดติดกันกับ PBS ดีขึ้น รอยต่อระหว่างวัฏภาคใช้ระหว่าง PBS กับแป้งลดลง การดูดซับน้ำลดลง จากการศึกษสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

และ TGA พบว่าเมื่อเติมสารช่วยผสม ทำให้องศาความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) จากการศึกษาการย่อยสลายในดินในห้องปฏิบัติการโดยการฝังกลบพบว่า ฟิล์มในทุกสูตรสามารถที่จะย่อยสลายได้หมดภายใน 3 เดือนสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มไบโอพลาสติกที่ย่อยสลายได้จาก PBS ผสมกับแป้งคัดแปรมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยที่ฟิล์มที่ได้มีความหนา 40-50 ไมครอน มีสมบัติที่ดี และมีต้นทุนการผลิตลดลงได้ถึง 20-40 % เทียบกับฟิล์ม PBS บริสุทธิ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| สารเคมี | เกรด | บริษัท |
|---|---------------|--|
| 1. Bionolle (PBS) | 3001G | Showa High Polymer Co.,Ltd. |
| 2. Hydrophobic starch (HBS) | เกรดการค้า | Siam Modified Starch Co.,Ltd. |
| 3. Palmitic-Stearic acid (COA) | เกรดการค้า | Cognis Thai,Ltd. |
| 4. Maleic anhydride (MA) | เกรดการค้า | ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ.ซี.เอส. จีนอน |
| 5. 2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) | เกรดการค้า | ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ.ซี.เอส. จีนอน |
| 6. Phenolic antioxidant (Anox [®] 240) | เกรดวิเคราะห์ | Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd. |
| 7. Phosphite antioxidant (Alkanox [®] 240) | เกรดวิเคราะห์ | Great Lakes Chemical Corporation Co.,Ltd |

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ Palmitic - Stearic acid 45:55 (COA) ที่ใช้ในการทดลอง

| Fatty Acid | Formula | Molecular weight (g.mol ⁻¹) | Density (g/cm ³) | Melting Point (°C) | Boiling Point (°C) |
|------------|---|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Stearic | CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH | 284.48 | 0.847 | 69.6 | 240 |
| Palmitic | CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH | 256.42 | 0.853 | 62.9 | 222 |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ PBS ที่ใช้ในการทดลอง

| สมบัติ | PBS เกรด 3001G |
|---|----------------|
| ความหนาแน่น (กรัม/มล.) | 1.23-1.26 |
| T_g (°C) | -45 |
| T_m (°C) | 93-95 |
| Heat Distortion Temp. (°C) | 69 |
| Tensile Break (kgf/cm ²) | 480 |
| Tensile Elongation (%) | 780 |
| Flexural Modulus (kgf/cm ²) | 3300 |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Maleic anhydride (MA) และ Luperlox[®] 101

| สมบัติ | Maleic anhydride (MA) | Luperlox [®] 101 |
|---------------|-----------------------|---------------------------|
| Density | - | 8.877 g/mL at 25°C (lit.) |
| $T_{1/2}$ | - | 10 hr (108 °C) |
| Boiling point | 202 °C | 55-57 C/7 mmHg (lit.) |
| Melting point | 52.8 °C | ≥80 °C (SADT) (lit.) |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS)

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

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.6 เครื่องมือและอุปกรณ์

| เครื่องมือ | รุ่น | บริษัท |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1. ปริมาณที่เครื่องแก้ว | - | - |
| 2. เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง | 300-9466 /3100C | Denver Instrument Company |
| 3. เครื่องเคเตออร์ (Desiccator) | - | - |
| 4. ตู้อบ (Oven) | 7200 Tuttlingen /Germany | WTC binder |
| 5. เครื่องทดสอบเอกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) | LRM 110 | Lab Tech Engineering Co.,Ltd. |
| 6. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) | PL-20 | Intro Engineering Co.,Ltd |
| 7. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) | TTI-220/80 HITECH | Cosmo Co.,Ltd |
| 8. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Shore D Dorometer hardness test) | S/N 108817 | Yasuda Co.,Ltd |
| 9. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Grinder) | Bosco A600 | Bosco Engineering Co.,Ltd |
| 10. เครื่องทดสอบทางความร้อน DSC (Differential Scanning Calorimeter) | DSC822° | Shimazu Co.,Ltd. |
| 11. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA (Thermogravimetric Analyzer) | TGA/SDTA 851° | Perkin Co.,Ltd. |
| 12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) | DMA/SDTA 861° | Perkin Co.,Ltd. |
| 13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM | JSM-5410 LV | JEOL Co.,Ltd. |
| 14. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) | SHR 200 | J.C.K Machinegy Ltd.Ltdpart. |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1. อบ PBS และ HBS ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนมีน้ำหนักคงที่
2. ทำการผสมตามสูตรดังตารางที่ 3.7 โดยนำแป้งและ PBS ที่อบแล้วมาผสมกับ COA ในถุง เขย่าให้ COA กระจายตัว
3. ใส่ในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 3 นาที

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง

| แป้ง | อัตราส่วน PBS/ แป้ง | ปริมาณ COA (%โดยน้ำหนักของแป้ง) | ปริมาณ Glycerol (%โดยน้ำหนักของแป้ง) |
|------|------------------------|------------------------------------|---|
| HBS | 50/50 | 5 | - |
| | | 10 | - |
| | | 15 | - |
| | 60/40 | 10 | 10 |
| | 40/60 | 10 | 10 |

4. ใส่พอลิเมอร์ผสมลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Extruder) โดยใช้ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาทีและใช้อุณหภูมิในการผสมดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

| โซนสกรู | อุณหภูมิ (°C) |
|-----------------|---------------|
| ช่วงที่1 | 145 |
| ช่วงที่2 | 150 |
| ช่วงที่3 | 145 |
| หัวฉีด (Nozzle) | 145 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้พิมพ์เพื่อตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (Grafted copolymer) PBS-g-MA โดย Two-Step Method [32]

1. เตรียม PBS/ HBS ที่อัตราส่วนผสม 50/50 ที่ปริมาณ COA 10% โดยน้ำหนักของแป้ง
2. ผสม PBS กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 0.5, 1, 1.5, 2% โดยน้ำหนัก ใช้ร่วมกับ 2,5-bis-(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane (L101) 10% โดยน้ำหนักของ MA และเติม Antioxidant-Anox-20 กับ Antioxidant-Alkanox-240 เป็นปริมาณ 0.05 php (Part per hundred part of polymer)
3. ทำการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปผ่านด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ที่อุณหภูมิดังตารางที่ 3.8

3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องเกลียวหนอนคู่ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น
2. นำพอลิเมอร์ผสมไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
3. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการบดย่อยเข้าเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) สภาวะที่ใช้ดังตารางที่ 3.9 และ 3.10 เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน
4. นำชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.9 อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

| โซนสกรู | อุณหภูมิ (°C) |
|-----------|---------------|
| ช่วงที่ 1 | 140 |
| ช่วงที่ 2 | 145 |
| ช่วงที่ 3 | 150 |

ตารางที่ 3.10 ความดันที่ใช้ในเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

| ความดัน | ความดัน (Bar) |
|-----------|---------------|
| ช่วงที่ 1 | 40 |
| ช่วงที่ 2 | 35 |
| ช่วงที่ 3 | 30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งผู้พิมพ์ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของตัวอย่าง

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส (Modulus) (ตามมาตรฐาน ASTM D638)

นำชิ้นงานรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) โดยมีสภาวะการทดสอบ ดังนี้

สภาวะการปรับสภาพชิ้นทดสอบ: อุณหภูมิ 23 ± 2 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ R.H., ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ความเร็วของแท่นตัดขวาง (Crosshead speed) 100 มิลลิเมตรต่อนาที

ระยะห่างของชิ้นงาน 50.0 มิลลิเมตร

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง 5 kN

จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = F/A \quad (3.1)$$

$$\text{- มอดุลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.2)$$

$$\text{- ร้อยละการยืด ณ จุดขาด} = ((L - L_0)/L_0) \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร; mm^2)

L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (มิลลิเมตร; mm)

L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงชิ้นงาน (Gauge length หน่วยเป็นมิลลิเมตร; - mm)

- การทดสอบความแข็งกด

การทดสอบหาความแข็งกด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบใช้มาตรฐานแบบ Shore D ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องมี ความหนาไม่ต่ำกว่า $\frac{1}{4}$ นิ้ว กดเป็นเวลา 1 วินาที จึงสามารถอ่านค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

- ปริมาณความชื้น (ตามมาตรฐาน ASTM D570)

นำชิ้นงานที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักที่ได้ จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานไว้ภายใต้บรรยากาศปกติเป็นเวลา 1 วัน นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้น ดังแสดงในสมการ (3.4)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังจากทิ้งไว้ 1 คืน} - \text{น้ำหนักชิ้นงานหลังอบ}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังจากทิ้งไว้ 1 คืน}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

- Differential scanning calorimetry (DSC)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัมให้มีน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 °C/min จากอุณหภูมิห้องจนถึง 200 °C จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 °C/min จนถึง -40 °C และให้ความร้อนครั้งที่ 2 ด้วยอัตรา 10 °C/min จนมีอุณหภูมิถึง 200 °C ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [41] ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ได้จากสมการที่ 3.5

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^\circ} \times \frac{100}{\% \text{ PBS in sample}} \quad (3.5)$$

- Thermogravimetric analysis (TGA)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 °C/min จากอุณหภูมิ 30 °C ถึง 900 °C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจนตามมาตรฐาน ASTM E 1131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)

ทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีความกว้างประมาณ 5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 30 มิลลิเมตร หนาประมาณ 3.4 มิลลิเมตร นำชิ้นงานตัวอย่างใส่ในหัวของเครื่องทดสอบ ใช้ Large blending frame, Drive shaft clamp แบบ Medium clamp with knife edge โหมดทดสอบแบบ Tension ให้ ความร้อนด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ-100 °C จนถึง 100 °C เพื่อหาอุณหภูมิ เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

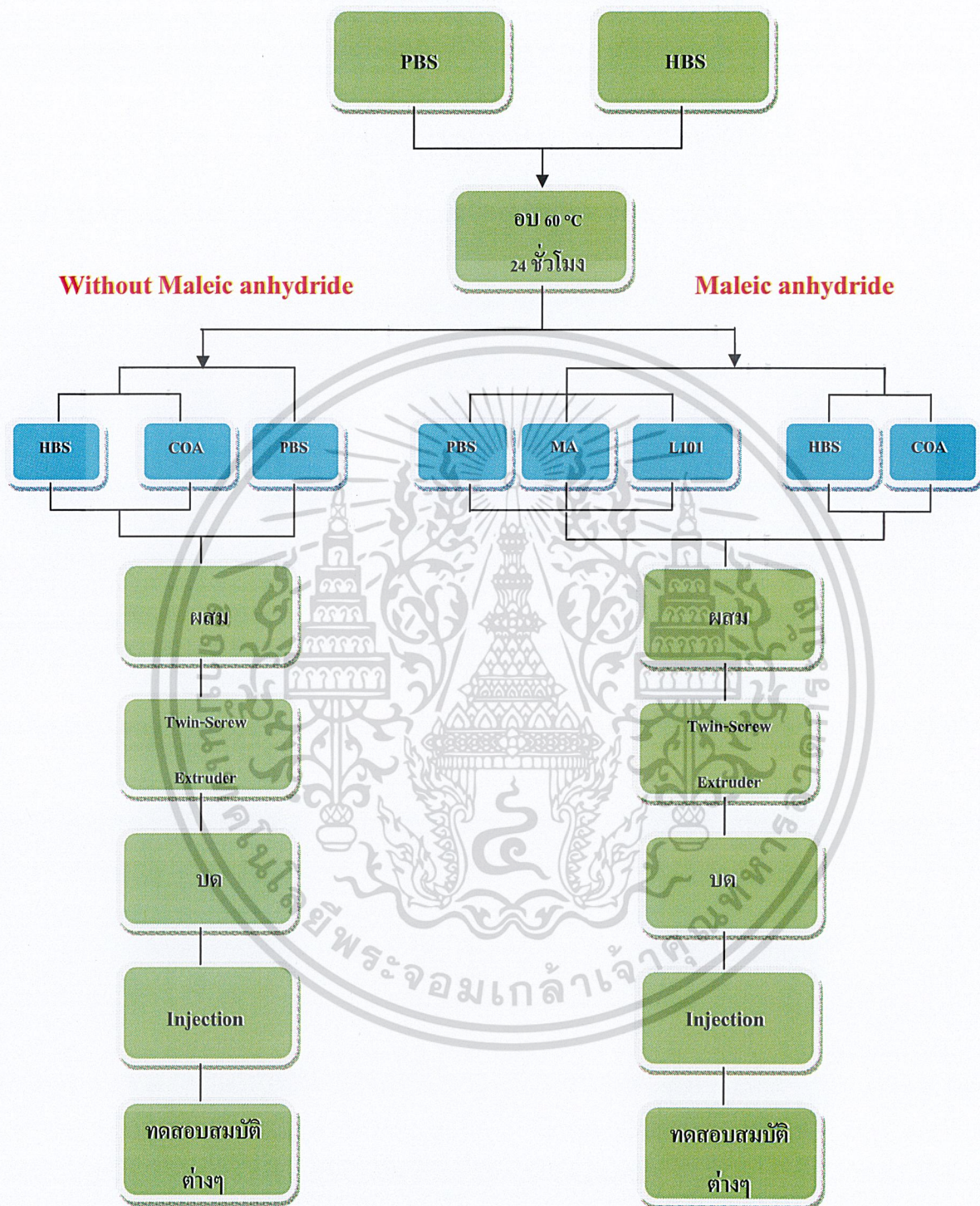
3.3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดที่กำลังขยายสูง การเตรียม ตัวอย่างแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที และทำการหักทันที นำตัวอย่าง มาเคลือบทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

3.4 ปัจจัยที่ศึกษา

- ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ COA (5-15% โดยน้ำหนักของแป้ง)
- ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ (COA) ที่อัตราส่วนของ พอลิวิทิลีนซัคซิเนต (PBS) / แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) คือ 60/40 และ 40/60
- ผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) 0.5-2% โดยน้ำหนักของพอลิวิทิลีนซัคซิเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพลาสติกชีวภาพที่เตรียมวัสดุผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน-ซัคซิเนต (PBS) กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Modified Starch; HBS) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีต่อสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) โดยการใช้กรดปาล์มมิก - สเตียริก (Palmitic-Stearic acid; COA) 5-15% โดยน้ำหนักของแป้ง, ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA และผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) ในปริมาณ 0.5 - 2% โดยน้ำหนักของ PBS จึงนำเสนอโดยใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสูตร ดังตารางที่ 4.1

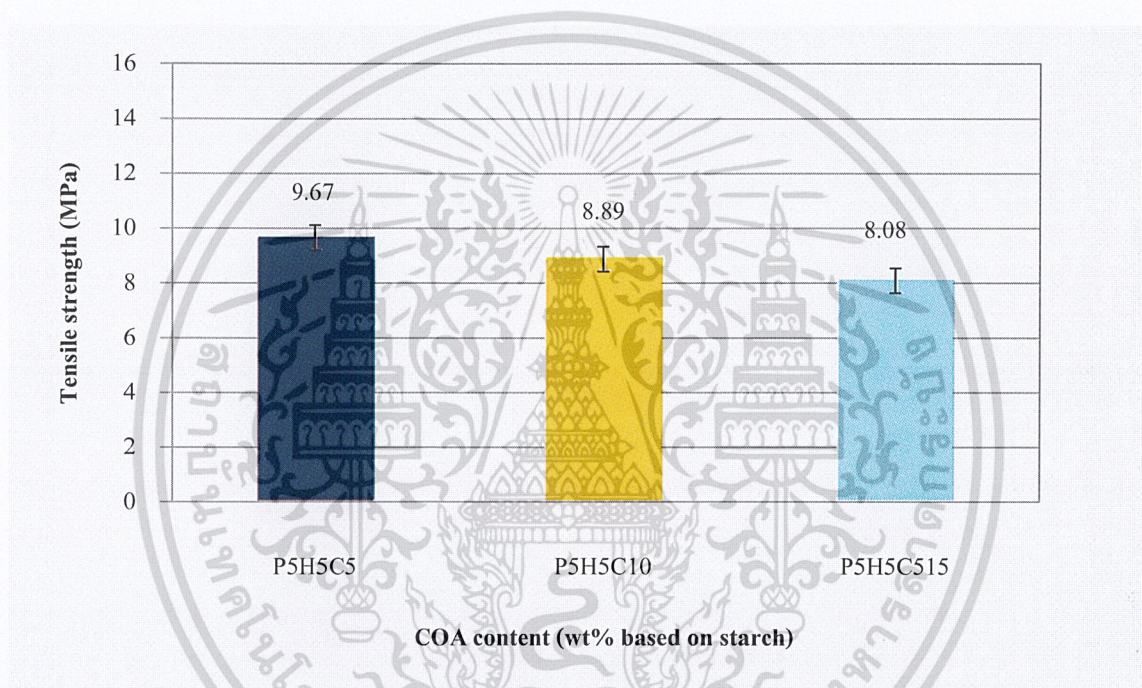
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรของ PBS และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก

| อักษรย่อที่ใช้แทน | สูตรที่ใช้ในการทดสอบ |
|-------------------|---|
| PBS | PBS 100 part |
| P5H5C5 | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 5% of starch |
| P5H5C10 | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 10% of starch |
| P5H5C15 | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 15% of starch |
| P4H6G10 | P = PBS 40 part, H = HBS 60 part, G = Glycerol 10% of starch |
| P4H6C10 | P = PBS 40 part, H = HBS 60 part, C = COA 10% of starch |
| P6H4G10 | P = PBS 60 part, H = HBS 40 part, G = Glycerol 10% of starch |
| P6H4C10 | P = PBS 60 part, H = HBS 40 part, C = COA 10% of starch |
| P5H5C10 / MA0.5% | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 10% of starch, Maleic anhydride 0.5% of PBS, L101 10% of MA |
| P5H5C10 / MA1.0% | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 10% of starch, Maleic anhydride 1.0% of PBS, L101 10% of MA |
| P5H5C10 / MA1.5% | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 10% of starch, Maleic anhydride 1.5% of PBS, L101 10% of MA |
| P5H5C10 / MA2.0% | P = PBS 50 part, H = HBS 50 part, C = COA 10% of starch, Maleic anhydride 2.0% of PBS, L101 10% of MA |

4.1 การศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

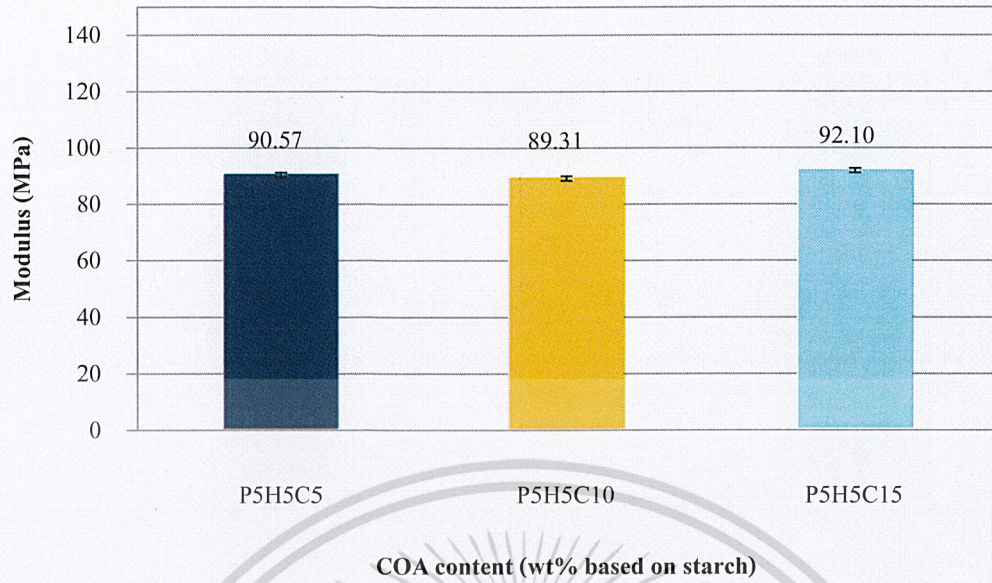
4.1.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) ในอัตราส่วน 50/50 โดยมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ คือ COA (Palmitic - Stearic acid) ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนักของแป้ง ซึ่งผลการวิจัยแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.4

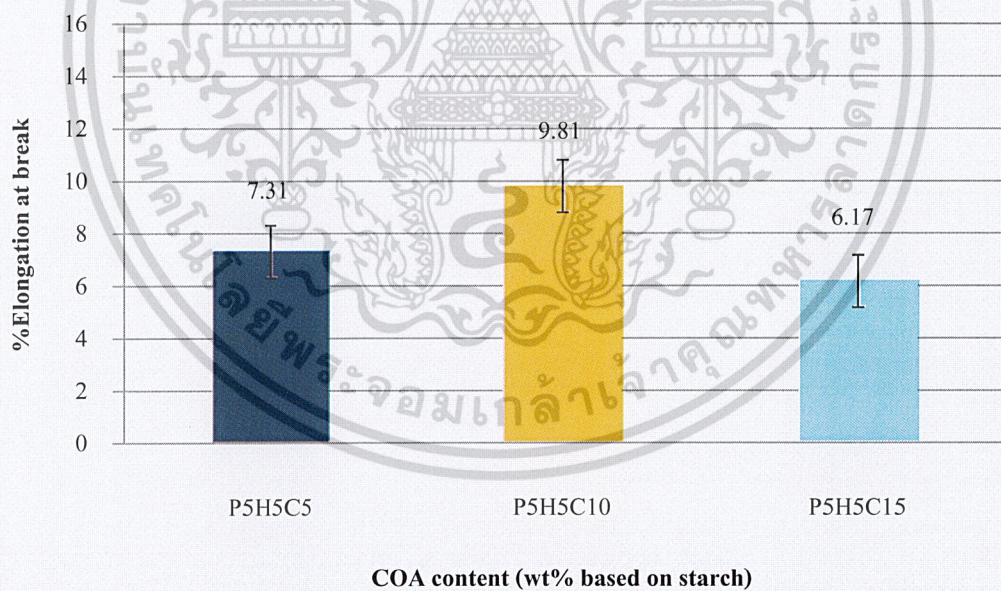


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

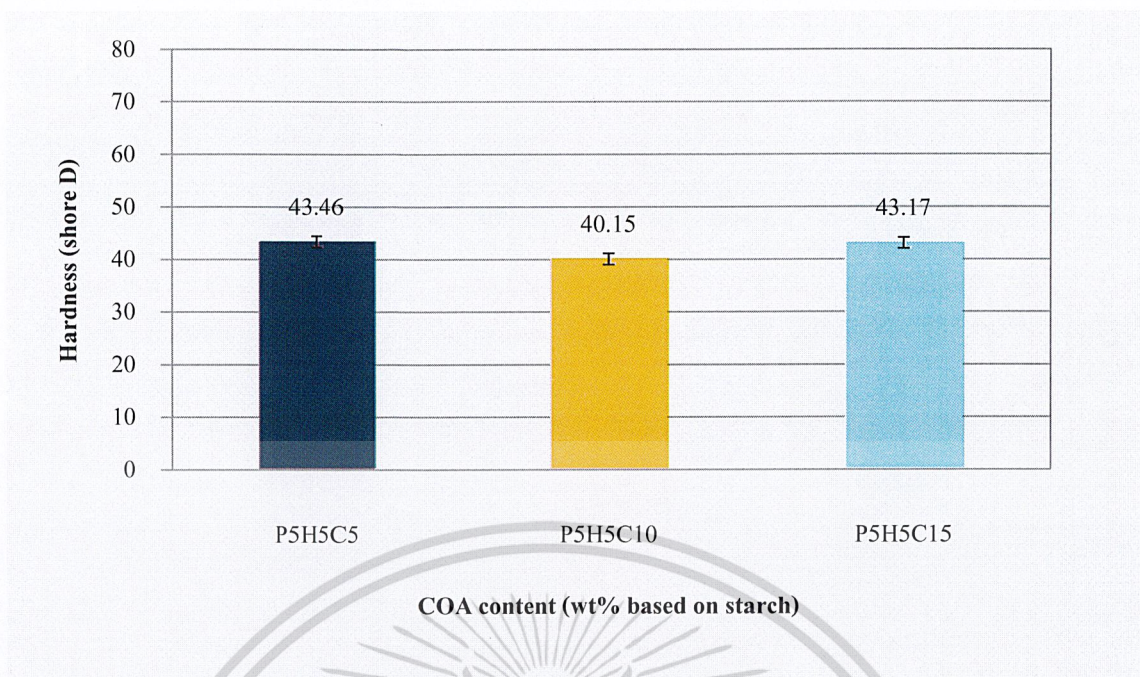


รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% ของปริมาณแป้ง



รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



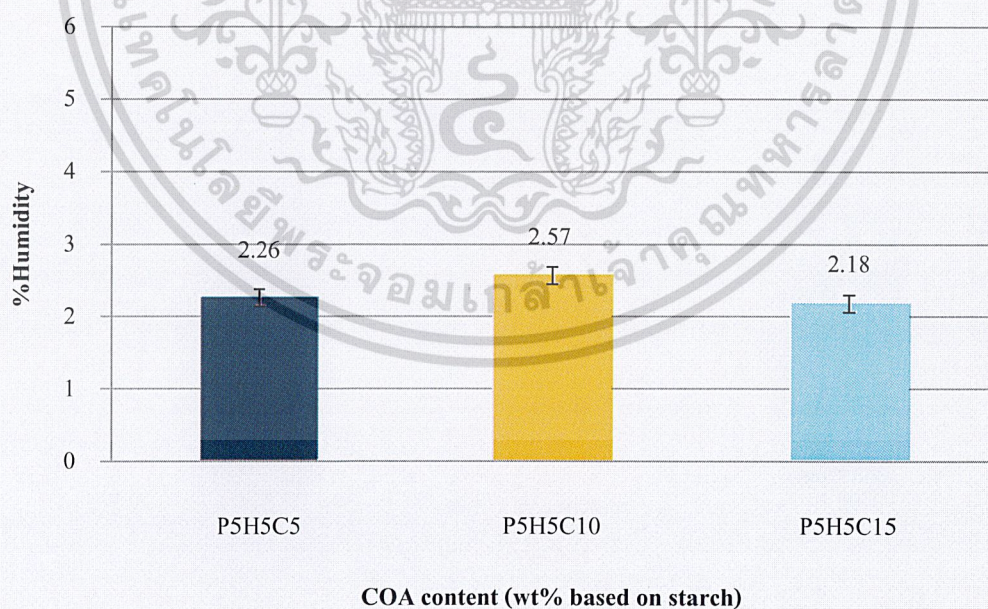
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งกดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% ของปริมาณแป้ง

จากการดำเนินงานวิจัยเบื้องต้นทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้กับปริมาณ COA ในอัตราส่วน PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโพลิก (HBS) เท่ากับ 50/50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของ COA นั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติเชิงกล กล่าวคือ เมื่อปริมาณของ COA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น การแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของแป้งและพอลิเมอร์จะมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดูลัส, ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด, จุดขาด และค่าความแข็งกด จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเล็กน้อย ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของ Plasticizing effect ที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งกดลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การยืด, จุดขาดเพิ่มขึ้น เพราะสายโซ่พอลิเมอร์หลุดออกจากกันได้ง่ายมากขึ้น (Disentanglement) เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ไปแทรกกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างโมเลกุลได้น้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจมีความชื้นอยู่ ทำให้เกิดการเสื่อมสลายหรือไฮโดรไลซิส (Hydrolysis degradation) เกิดการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งอย่างไรก็ดี การใช้ COA ในปริมาณที่น้อย เช่น ที่ปริมาณ COA ที่ 5% พบว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติเชิงกลในด้านค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด แต่มีความแข็งและการไหลที่ไม่เหมาะสม ทำการขึ้นรูปได้ค่อนข้างยาก และปริมาณ COA ที่ 10% พอลิเมอร์ผสมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด, จุดขาด ที่สูงที่สุด โดยมีความแข็งและการไหลที่เหมาะสม ทำการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น โดยการนำใช้ COA ในปริมาณที่มากขึ้น เช่น ที่ปริมาณ COA ที่ 15% เป็นต้นไป จะทำให้พอลิเมอร์ผสมเหลว

และไหลได้มากเกินไป ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ คาดว่าการใช้ COA ที่มากเกินไป ทำให้มี COA อีสระแพร่ออกจากวัสดุ (Bleeding) และทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ต่ำลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือก ปริมาณ COA 10% ในการศึกษาต่อไป

4.1.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณของ COA ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก COA ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จะเข้าแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) ระหว่างสายโซ่มากขึ้น แต่ปริมาณการเติมต้องมาก โมเลกุลของน้ำจึงสามารถเข้าไปดูดซับหรือไปจับที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งได้มากขึ้น จากผลการวิจัยพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้า [7] ได้ศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งดัดแปรผสมพอลิวิวิทิลีนซัคซินेट จากผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นซึ่งใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 20-40% โดยน้ำหนักของแป้ง มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 1.9-2.3% ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยนี้ ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่แตกต่างกันมากนัก มีนัยสำคัญ คืออยู่ในช่วง 2.1-2.6%



รูปที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิด HBS: 50/50

และ COA ในปริมาณ 5, 10 และ 15% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาชนิดของพลาสติกไฮเซอร่ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA (Palmitic - Stearic acid) ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ทั้งในและต่างประเทศ ได้มีการใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไฮเซอร่ในหลายงานวิจัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กรดปาล์มมิติก - สเตียริก (Palmitic-Stearic acid; COA) เป็นพลาสติกไฮเซอร่อีกตัวเลือกหนึ่งเพื่อศึกษาเปรียบเทียบชนิดของพลาสติกไฮเซอร่ โดยได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับ HBS ในอัตราส่วน 40/60 และ 60/40 โดยมีการเติมพลาสติกไฮเซอร่ คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA

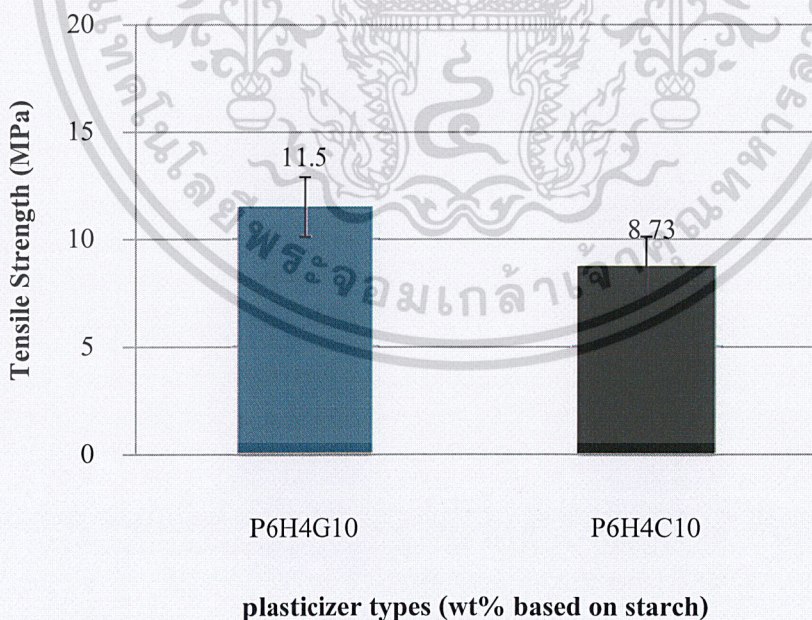
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงสูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS โดยมีการเติมพลาสติกไฮเซอร่ คือ กลีเซอรอล และ COA

| สูตร | PBS | HBS | % COA โดยน้ำหนัก ของแป้ง | % Glycerol โดยน้ำหนัก ของแป้ง | การขึ้นรูป | |
|---------|-----|-----|--------------------------------|-------------------------------------|------------|--------|
| | | | | | ได้ | ไม่ได้ |
| P4H6G10 | 40 | 60 | - | 10 | | ✓ |
| P4H6C10 | 40 | 60 | 10 | - | | ✓ |
| P6H4G10 | 60 | 40 | - | 10 | ✓ | |
| P6H4C10 | 60 | 40 | 10 | - | ✓ | |

เมื่อพิจารณาพลาสติกไฮเซอร่ทั้ง 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสม P4H6G10 และ P4H6C10 ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ คาดว่าเนื่องจากการใช้แป้งปริมาณมาก ทำให้ส่วนเมทริกซ์ (Matrix) คือ PBS มีสัดส่วนที่น้อยลงเทียบกับสัดส่วนของแป้งซึ่งมีอนุภาคเป็นอนุภาคกระจาย (Dispersed phase) ทำให้แป้งกระจายตัวได้ไม่คืบนัก เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนหรืออาจเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างภูมิภาคของ PBS กับแป้งเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การยึดเกาะระหว่าง PBS และแป้งลดลง ประกอบกับการใช้พลาสติกไฮเซอร่ที่ 10% ของปริมาณแป้ง ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ทำให้ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ แต่ที่อัตราส่วนผสม P6H4G10 และ P6H4C10 ส่วนเมทริกซ์ คือ PBS มีสัดส่วนมากกว่าเมื่อเทียบกับสัดส่วนของแป้ง จะทำให้มีความต่อเนื่องในภูมิภาคมากกว่า จึงสามารถทำการขึ้นรูปได้ที่ปริมาณพลาสติกไฮเซอร่เท่ากัน คือ 10% ของปริมาณแป้ง

4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.6-4.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ จะมีค่าความแข็งแรงดึง, และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่มากกว่าการใช้ COA เป็นพลาสติกไซเซอร์ แต่มีค่ามอดุลัส และค่าความแข็งกด ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องมาจากผลทาง Polar theory [40] กล่าวว่าพลาสติกไซเซอร์เกิดพันธะกับโมเลกุลพอลิเมอร์ ดังนั้นโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ ควรมีหมู่ที่มีขั้วและไม่มีขั้วซึ่งจะเข้ากันได้กับพอลิเมอร์นั้นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้กลีเซอรอลซึ่งมีความเป็นขั้วสูง กับ COA ซึ่งมีสภาพขั้วน้อยกว่า เมื่อนำมาผสมใน PBS/HBS จึงส่งผลต่อระยะห่างหรือช่องว่างของโซ่พอลิเมอร์ โดยทำให้ระยะห่างของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง พอลิเมอร์ที่ผสมกลีเซอรอล จึงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามสภาพขั้วที่น้อยกว่าของ COA ส่งผลให้มีระยะห่างของโซ่พอลิเมอร์มากกว่ากรณีแรก ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจึงลดต่ำกว่ากรณีแรก จึงสามารถสรุปได้ว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่า COA

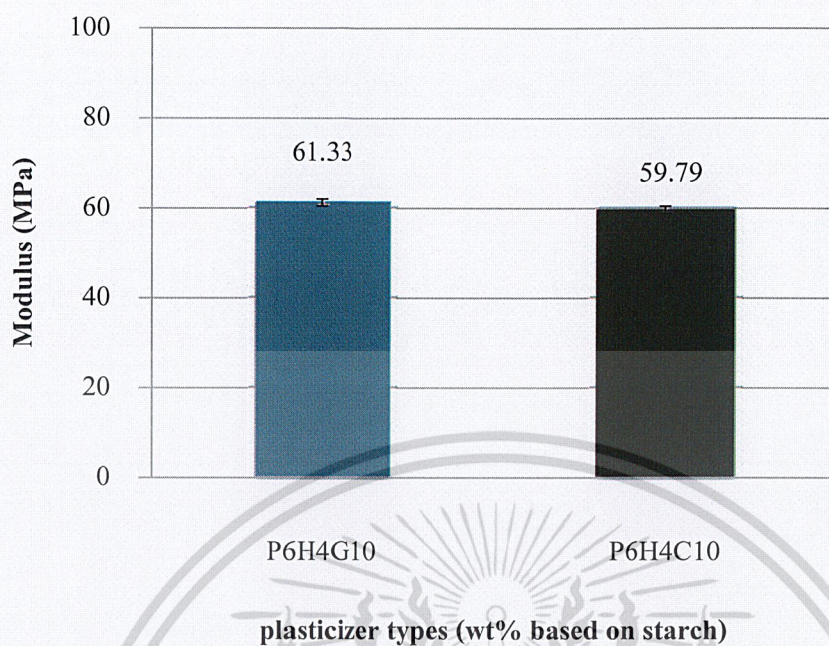


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใส่

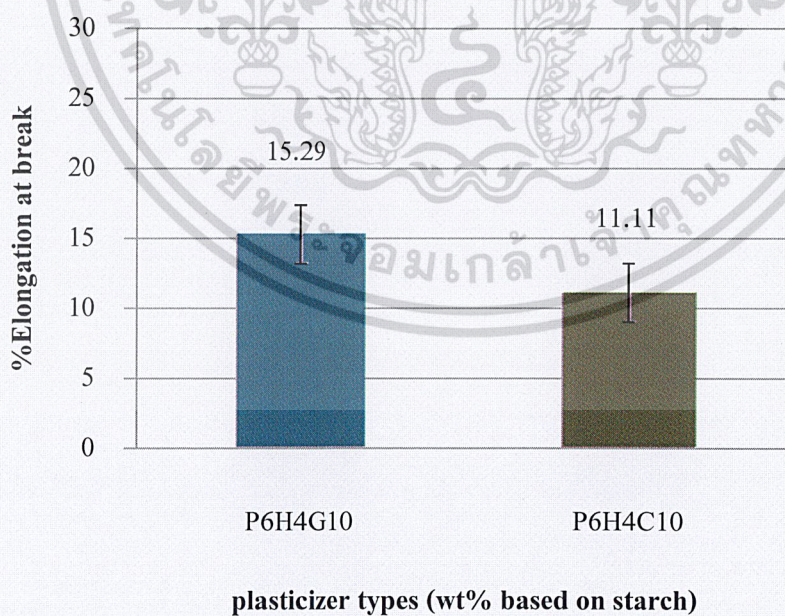
กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA ในปริมาณ 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

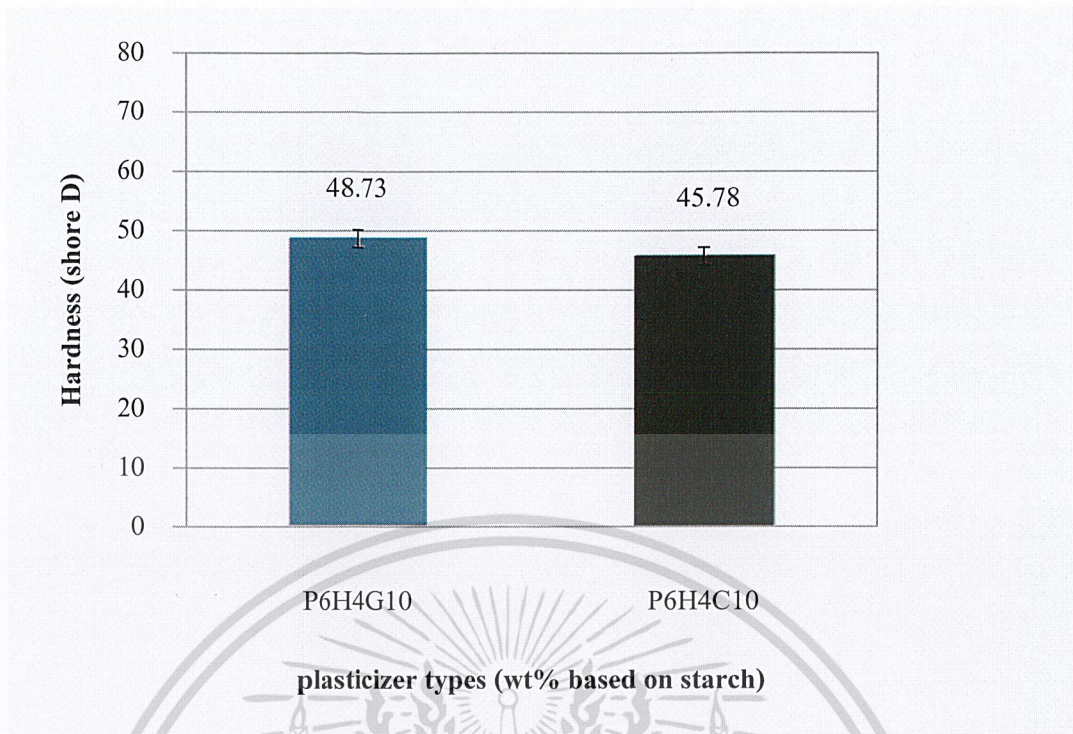


รูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA ในปริมาณ 10% ของปริมาณแป้ง



รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA ในปริมาณ 10% ของปริมาณแป้ง

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบ่ล่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

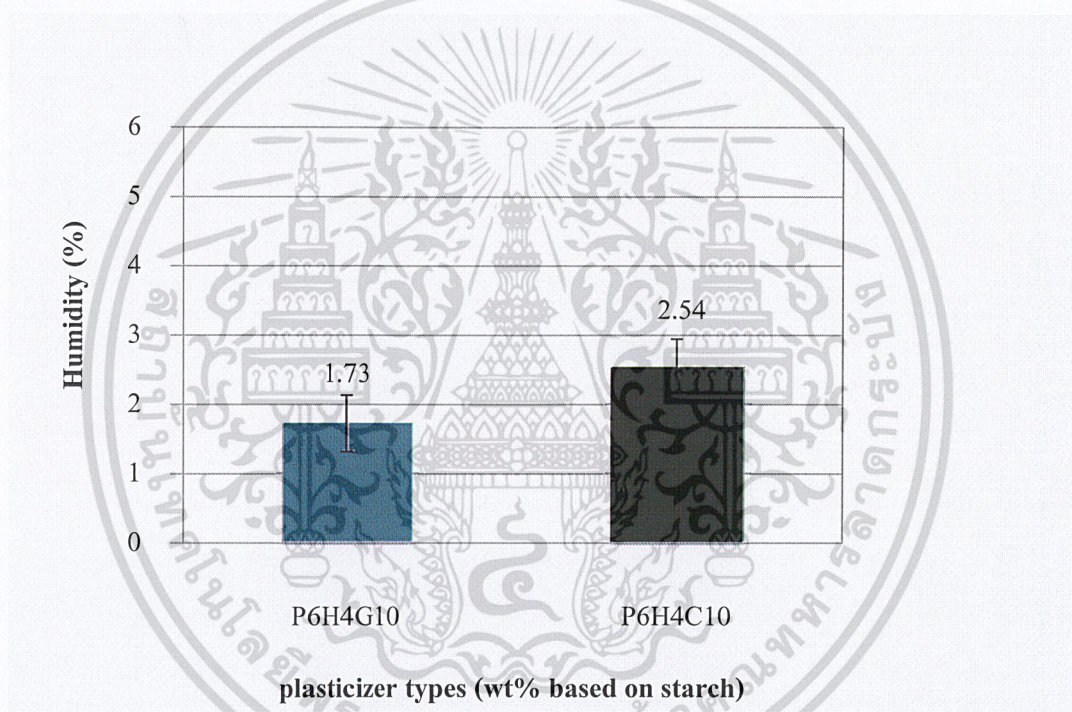


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งกดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้ กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA ในปริมาณ 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะน้อยกว่าการใช้ COA เป็นพลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากกลีเซอรอล (Glycerol) มีความเป็นขี้มากกว่า จึงส่งผลให้ระยะห่างของโซ่พอลิเมอร์ลดลง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปดูดซับหรือไปจับที่หมู่ไฮดรอกซีในโครงสร้างของแป้งได้น้อยลง จึงทำให้ COA ซึ่งมีสภาพขี้ที่น้อยกว่าและมีระยะห่างของโซ่พอลิเมอร์มากกว่ากรณีแรกที่ใช้กลีเซอรอล จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าสูงมากกว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์



รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 60/40 โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) และ COA ในปริมาณ 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

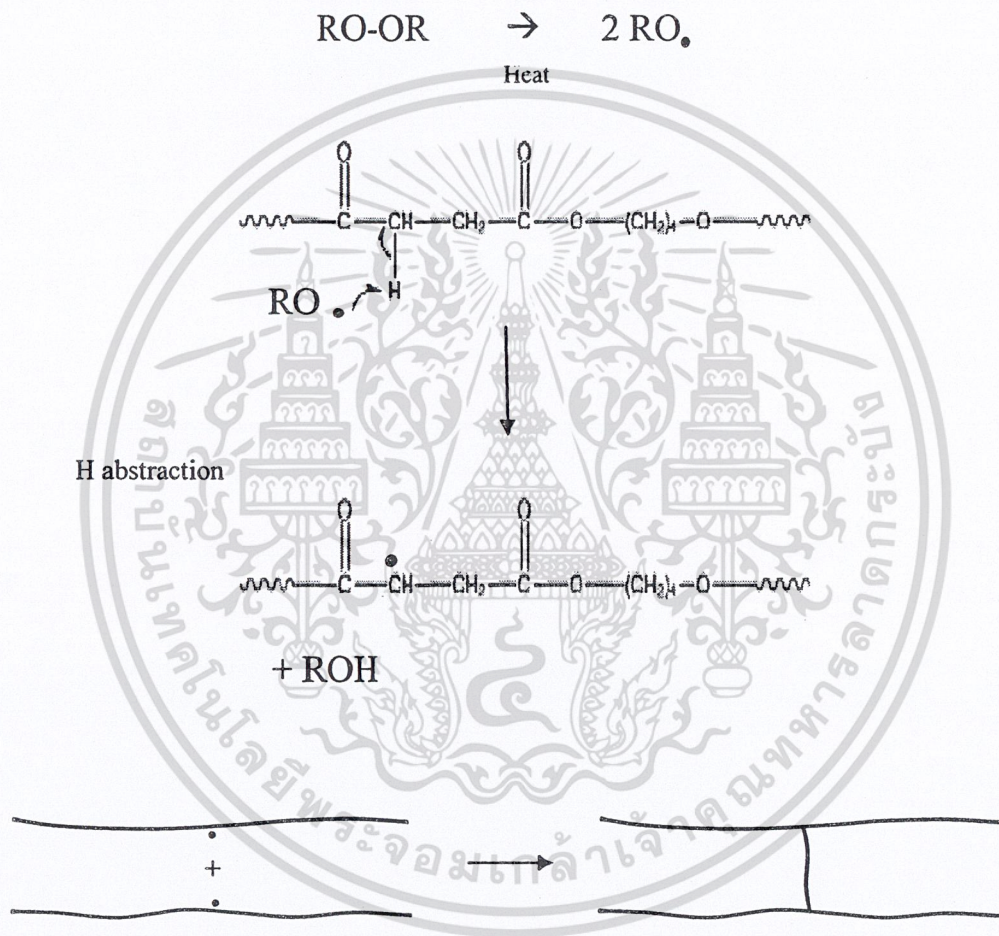
4.3 การศึกษาผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)

ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม มักมีปัญหาในการผสมซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเป็นผลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีข้อบกพร่อง คือสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ต่ำ ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงมีการนำมาเติมแอนไฮไดรด์มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ที่ปริมาณ MA 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนักของ PBS โดยเลือกใช้อัตราส่วน PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) เท่ากับ 50/50 ผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล

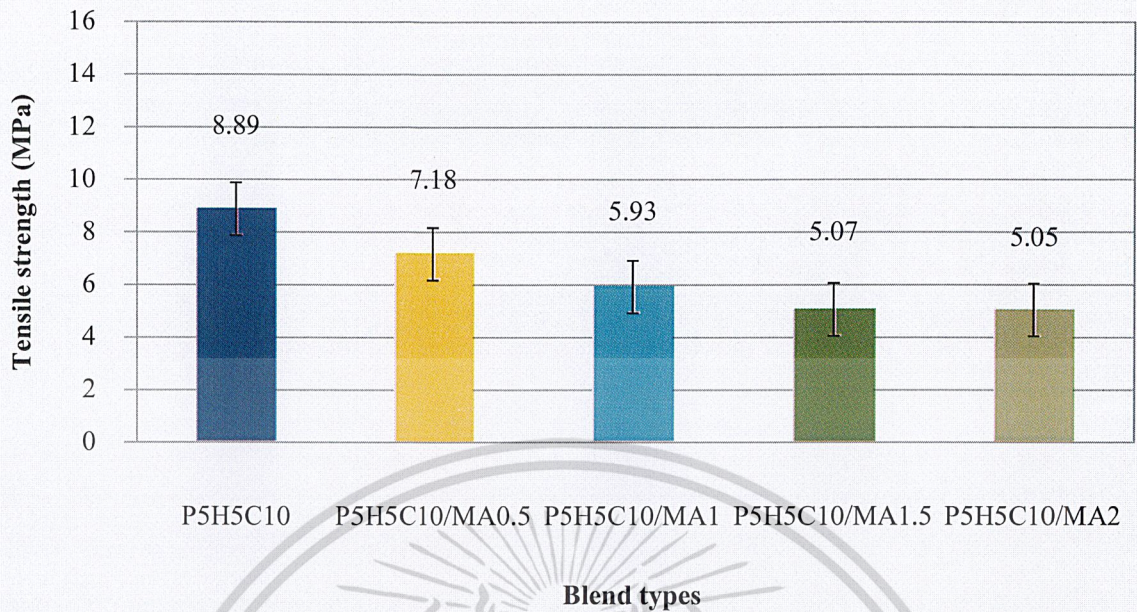
จากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) พบว่าเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ลงไป ทำให้ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ส่งผลทำให้การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคดีขึ้นหรือเข้ากันได้ดี จึงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง อาจเนื่องมาจากการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ทำให้การแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งอาจเกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาการเสื่อมสลายแบบการเชื่อมโยง (Degradation) โดยจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเปราะและแตกหักได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงลดลง แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากอาจเกิดการเชื่อมโยง เพราะค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพราะการใช้อุณหภูมิที่สูงสารจำพวกเปอร์ออกไซด์จะเกิดการแตกตัวที่ควบคุมไม่ได้ สามารถเกิดปฏิกิริยาตำแหน่งพันธะคู่ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) แบบ Michael addition ทำให้เกิดเป็นการเชื่อมโยง เพราะฉะนั้นจึงควรเตรียมกราฟที่ PBS ด้วย MA ก่อน แล้วค่อยใส่สารจำพวกเปอร์ออกไซด์ ไม่เช่นนั้นถ้าเราใช้ปริมาณ MA มาก ปริมาณเปอร์ออกไซด์ ก็จะมากขึ้นตาม แต่ในงานวิจัยนี้เราควบคุมปริมาณเปอร์ออกไซด์ (L101) ที่ 10% ของปริมาณ MA เนื่องจากการที่เปอร์ออกไซด์มากขึ้น จะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ H-abstraction ดังรูปที่ 4.11 และคาดว่า

เนื่องจาก PBS ที่ใช้เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดความชื้นได้ดี อาจเกิดการเสื่อมสลาย (Hydrolytic degradation) ซึ่งสาเหตุนี้สามารถอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลในด้านของค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลง จึงไม่แนะนำให้ใช้มาเลิกแอนไฮโดรด์ (MA) ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS โดยผลการวิจัยแสดงดังรูปที่ 4.12 - 4.15

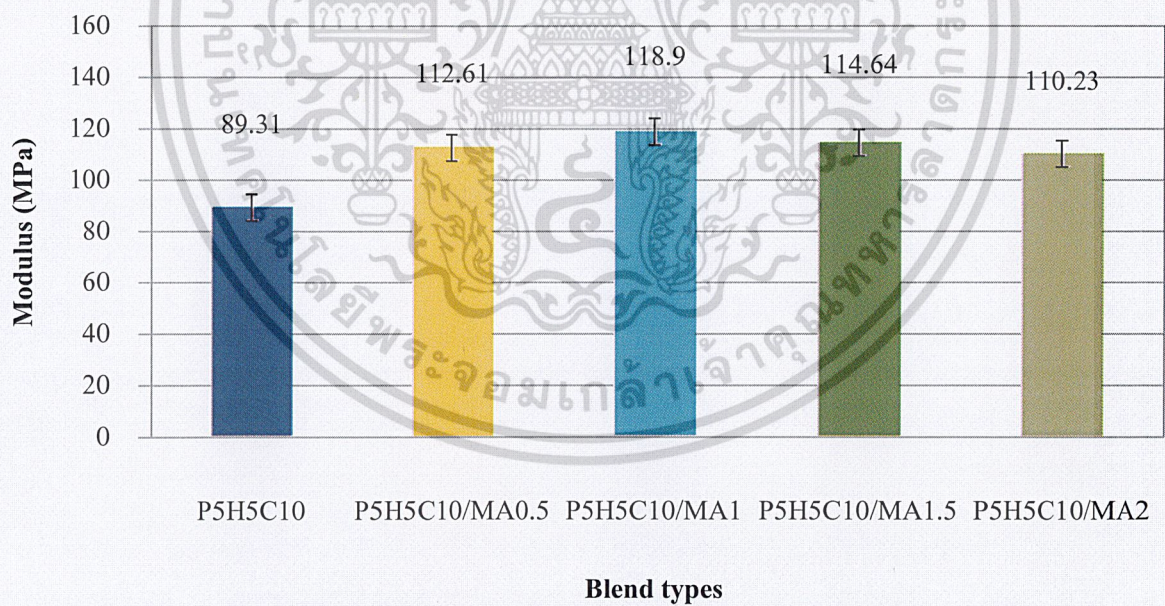


รูปที่ 4.11 กลไกการเชื่อมโยงที่คาดว่าจะเกิดของพอลิวิทิลีนซัคซิเนต (PBS) ด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

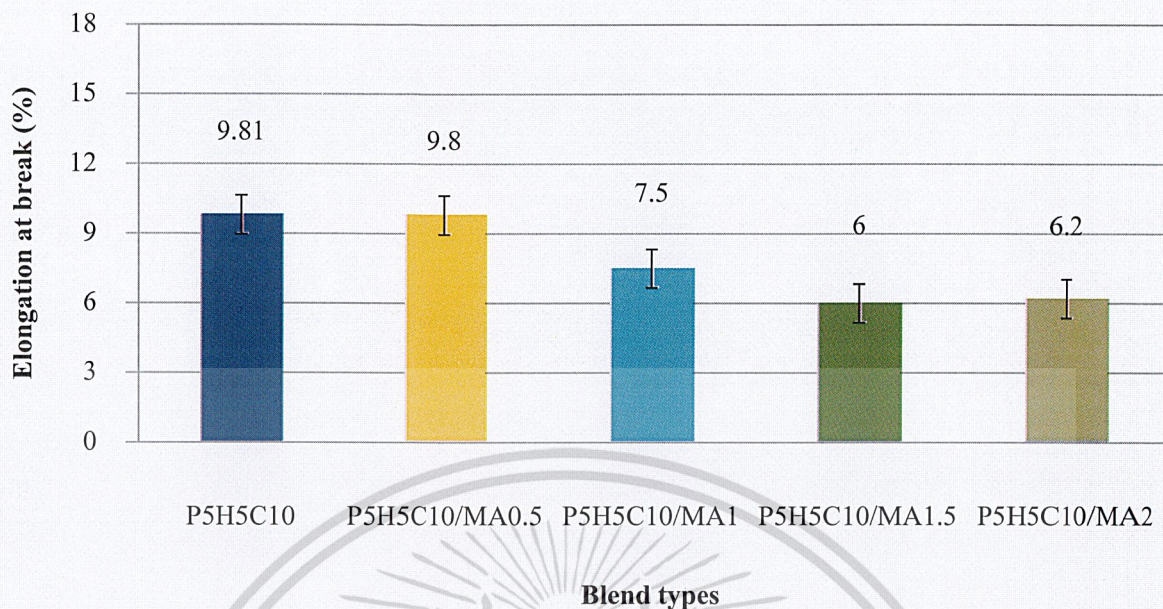


รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดึงของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% ของปริมาณแป้ง

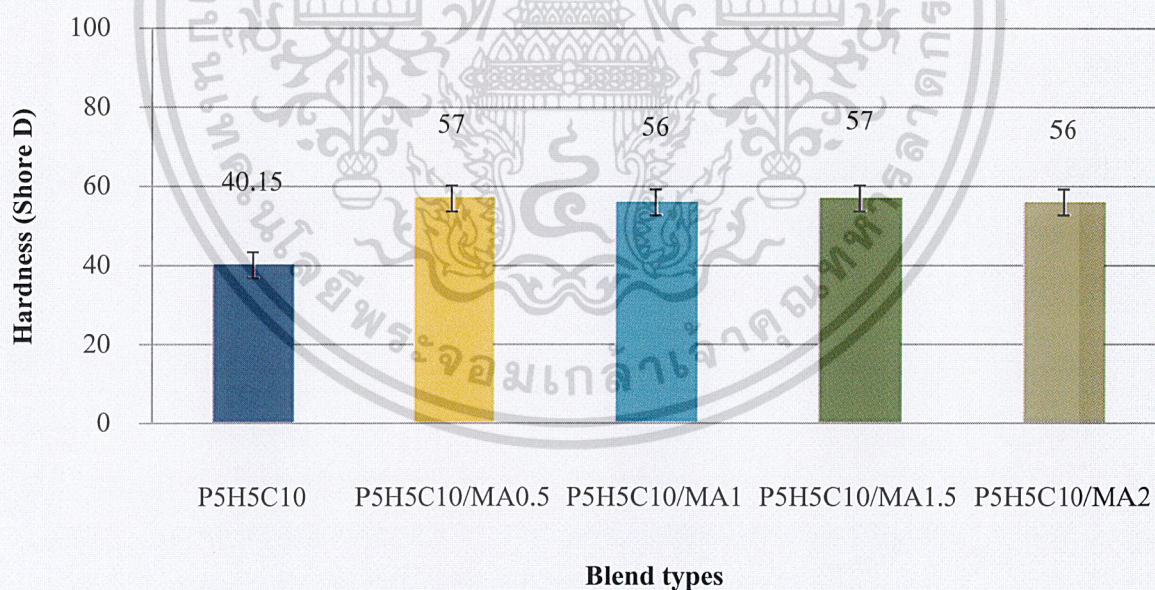


รูปที่ 4.13 ค่ามอดุลัสของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% ของปริมาณแป้ง

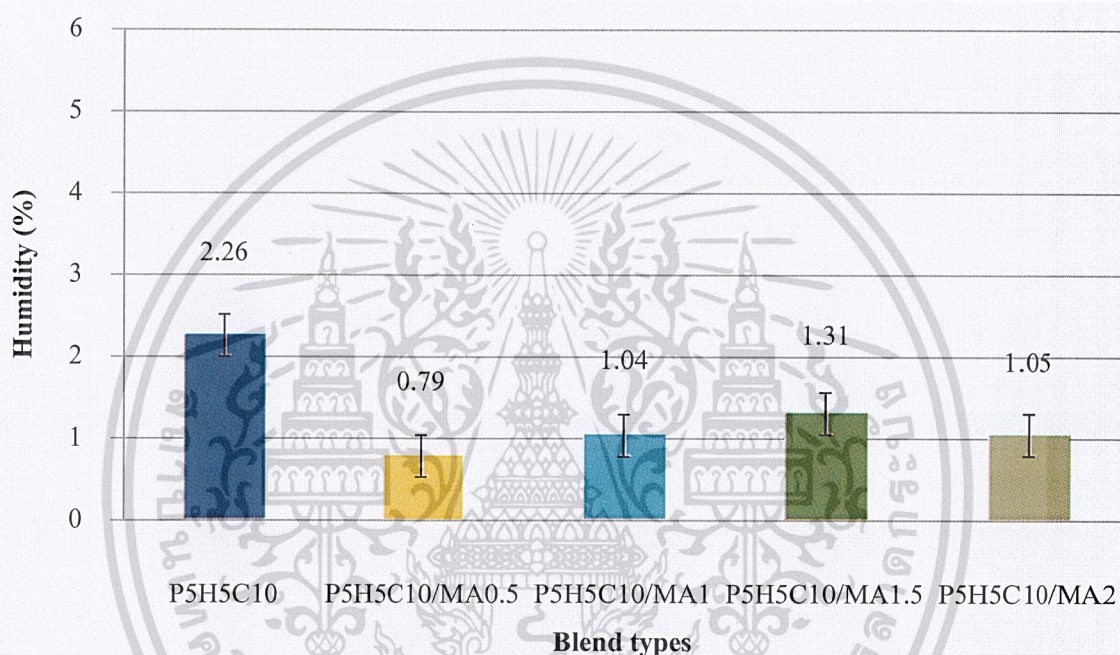


รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งกดของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

พบว่าเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ลงในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งงานมีการดูดซับน้ำที่น้อยลงเนื่องจากการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ขึ้นบางส่วน ทำให้ช่องว่างโดยเฉพาะระหว่างเม็ดแป้ง กับ PBS มีน้อยลง ซึ่งช่องว่างดังกล่าวถือว่าเป็นบริเวณที่มีการดูดซับน้ำมากที่สุด ดังนั้นการดูดซับน้ำจึงน้อยลง



รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของสูตรที่ใช้ PBS/แป้งมันสำปะหลังคัดแปรชนิด HBS: 50/50 และ MA ในปริมาณ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2% ที่ปริมาณ COA 10% ของปริมาณแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

4.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้ง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการเติมแป้ง เนื่องจากทฤษฎีแป้งจะไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งอนุภาคของแป้งนั้นจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ชั้นลามลลา (lamella) บางลง สายโซ่ของพอลิเมอร์จึงจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมแป้งลดลง และจากความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แป้งมีการนำความร้อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับ PBS จึงทำให้อัตราการให้ความร้อนในการวิเคราะห์ส่งผลต่อค่า T_m โดยทำให้ค่า T_m ลดลง และในงานวิจัยนี้พบว่า พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (ΔH_f) และองศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity; X_c) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS กับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) มีค่าไม่แตกต่างกันกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการผสม (Pure PBS)

โดยเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่า X_c จะลดลง เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้การยึดเกาะระหว่าง PBS กับแป้งดีขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ PBS ทำได้ยาก จึงเป็นการขวางกั้นการเกิดผลึกในโครงสร้าง ส่งผลให้ค่าองศาความเป็นผลึกลดลง โดยกราฟ DSC แสดงดังภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

| ตัวอย่าง | T_m (°C) | ΔH_f (J/g) | X_c (%) |
|----------------|------------|--------------------|-----------|
| Pure PBS | 99.8 | 57.2 | 50.2 |
| P5H5C10 | 95.9 | 57.9 | 50.8 |
| P5H5C10 / MA1% | 96.8 | 57.0 | 47.4 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต (DMTA) เพื่อหาค่าของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ (ตารางที่ 4.4) พบว่าส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PBS เกิดการสั่นเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ปรากฏพีก T_g เกิดขึ้นที่ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยพบว่าค่า T_g ของ PBS ไม่แตกต่างกันในทุกสูตร ซึ่งจากทฤษฎีกรรมวิธีของผสมที่เป็นพลาสติกไซเซอ์ลงในพอลิเมอร์จะทำให้เกิด Plasticizing effect ส่งผลให้ค่า T_g ของพอลิเมอร์ลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยไม่เป็นไปตามคาดการณ์ เกิดการหักล้างของ 2 ปรากฏการณ์ กล่าวคือ การใส่พลาสติกไซเซอ์ ส่งผลให้ T_g ของพอลิเมอร์ลดลง แต่การใส่แป้งทำให้สายโซ่ขยับตัวได้ยาก ซึ่งคาดว่าบางส่วนของสายโซ่โมเลกุล หรือ หมู่ปลายของสายโซ่ไปเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับก้อนของแป้ง (แป้ง) ส่งผลให้ค่า T_g สูงขึ้น ดังนั้นจาก 2 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหักล้างกัน จึงส่งผลให้ค่า T_g ของ PBS ไม่เปลี่ยนแปลง โดยกราฟ DMTA แสดงดังภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DMTA

| ตัวอย่าง | T_g ($^{\circ}\text{C}$) | |
|----------------|------------------------------|--------|
| | PBS | Starch |
| Pure PBS | -26 | - |
| P6H4G10 | -25 | - |
| P6H4C10 | -25 | - |
| P5H5C10 | -25 | - |
| P5H5C10 / MA1% | -25 | - |

4.4.3 Thermogravimetric analysis (TGA)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Decomposition temperature; T_d) ของพอลิเมอร์ผสมพบว่าช่วงต้นที่อุณหภูมิ $50 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งงานน้ำหนักลดลงเนื่องจากซึ่งงานมีการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลน้ำ จนกระทั่งช่วงที่สองที่อุณหภูมิ $300 - 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งงานเริ่มเกิดการเสถียรภาพจากการสลายตัวของแป้ง และช่วงที่สามเป็นการการคายน้ำของแป้ง ซึ่งงานเริ่มเกิดการสลายตัวของ PBS ในช่วงอุณหภูมิ $390 - 395\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยกราฟ TGA จะ

พบว่าทุกๆสูตรจะมีอุณหภูมิสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (°C) |
|----------------|------------------------------|
| P5H5C10 | 308.0 |
| P5H5C10 / MA1% | 306.0 |

4.5 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic starch; HBS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวและการยึดเกาะของวัสดุแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ในสูตรผสมที่มีอัตราส่วนระหว่าง PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) และในสูตรที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA)

จากรูปที่ 4.17 - 4.18 คือพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) ในอัตราส่วน 50/50 พบว่า แป้ง HBS จะเห็นเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นทรงกลมของแข็ง ทำหน้าที่คล้ายเป็นสารตัวเติม (Filler) ซึ่งเม็ดแป้งจะกระจายตัวค่อนข้างดีในวัสดุของ PBS แต่มีการยึดเกาะ (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดี ระหว่างเม็ดแป้งกับ PBS และเห็นช่องว่างหรือรูคุดว่าเกิดจากการหลุดออกของอนุภาคเม็ดแป้ง แสดงถึงการยึดติดกับ PBS ที่ไม่ดี

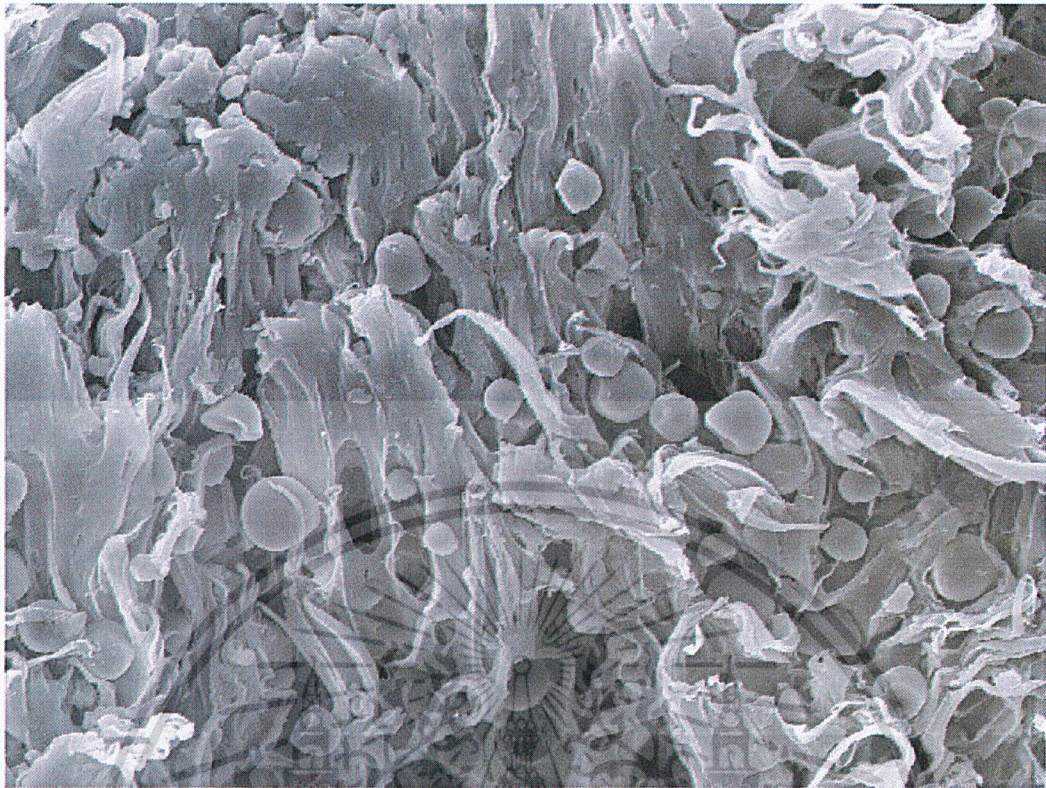
จากรูปที่ 4.19 - 4.20 คือพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) ในอัตราส่วน 50/50 โดยมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) 1% โดยน้ำหนักของ PBS พบว่า PBS/HBS เม็ดแป้งจะมีการกระจายตัวได้ดีในวัสดุของ PBS และจะเห็นช่องว่างบริเวณรอยต่อวัสดุ (Interface) ระหว่าง PBS กับเม็ดแป้ง ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าจาก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) เป็นการเสียสภาพแบบยึดเกาะหรือการเสียสภาพแบบแอ็ดฮีซีฟ (Adhesive failure) เกิดการแยกออกของเม็คแป็ง และส่วนเมตริกซ์ของ PBS ที่รอยต่อหรืออินเตอร์เฟส สาเหตุเนื่องจากความแข็งแรงของการยึดเกาะต่ำเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุทั้งสอง โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล

2.) อาจเกิดจากการเตรียมตัวอย่างโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งพอลิเมอร์และแป็งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว และหดตัวไม่เท่ากัน เมื่อวัสดุผสมถูกแช่เย็นที่อุณหภูมิต่ำมากอาจทำให้เกิดการหดตัวไม่เท่ากัน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง PBS กับเม็คแป็งได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



100µm

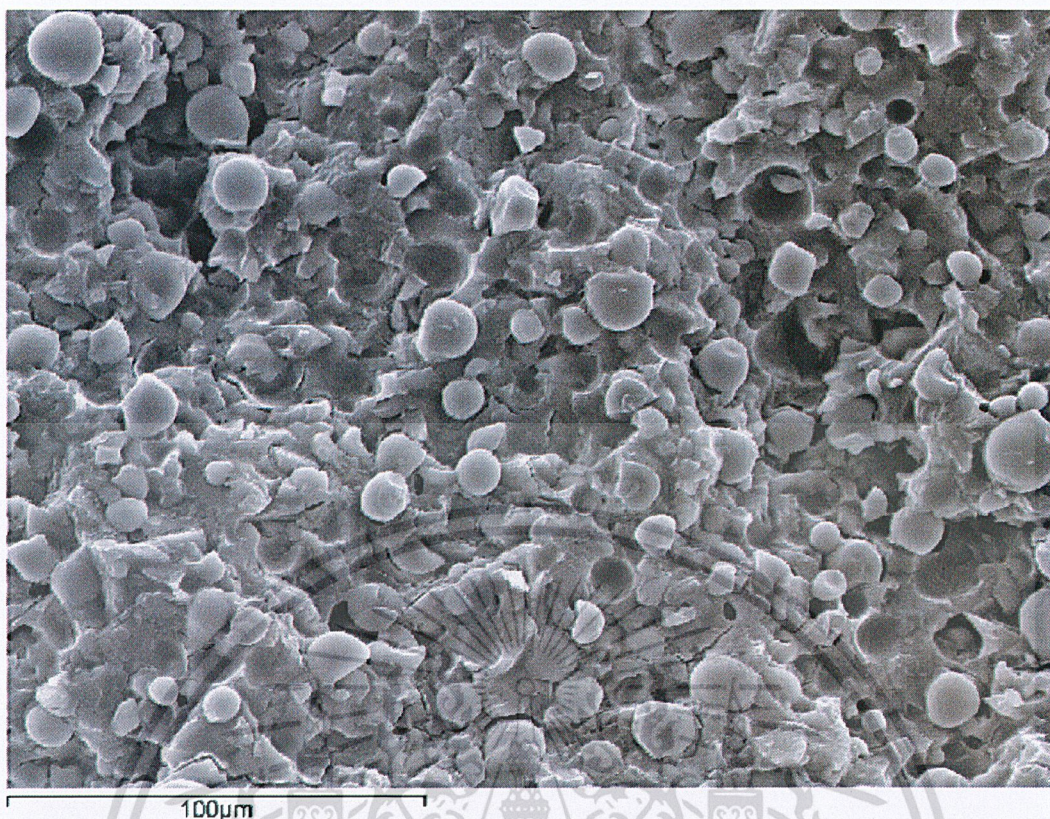
รูปที่ 4.17 รูป SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50



30µm

รูปที่ 4.18 รูป SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.19 รูป SEM กำลังขยาย 500 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 และ MA 1%



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 รูป SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงสัณฐานวิทยาของสูตร PBS/HBS: 50/50 และ MA 1%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังคัดแปรรชนิดไฮโดรโฟบิกผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่นผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer), ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ และผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 การศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

- จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (COA) เพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความแข็งดึง, ค่ามอดุลัส, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งกด จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเล็กน้อย ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกล
- ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยก่อนหน้า [7]
- จากการศึกษาผลของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ พบว่าปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (COA) มีผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติเชิงกล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาณพลาสติกไซเซอร์ 10% ในการศึกษาต่อไป

5.2 การศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) และ COA

(Palmitic - Stearic acid) ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - เมื่อพิจารณาพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ที่อัตราส่วนผสม P4H6G10 และ P4H6C10 ไม่
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สามารถทำการขึ้นรูปได้

- จากการศึกษาสมบัติเชิงกล เพื่อทำการเปรียบเทียบพลาสติกไซเซอรท์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าเมื่อใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอรท์ จะมีค่าความแข็งแรงดึง, และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่มากกว่าการใช้ COA เป็นพลาสติกไซเซอรท์ แต่มีค่ามอดุลัส และค่าความแข็งกด ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงสามารถสรุปได้ว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรท์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่า COA
- ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่า เมื่อใช้ COA เป็นพลาสติกไซเซอรท์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะมีค่ามากกว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรท์

5.3 การศึกษาผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)

- จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS เมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ลงไป ทำให้ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง จึงไม่แนะนำให้ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS
- ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่าการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้พอลิเมอร์ผสมดูดซับน้ำได้น้อยลง

5.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

5.4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ DSC

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วน PBS/HBS ที่ 50/50 พบว่า เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS) จะทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ลดลงเมื่อเทียบกับ PBS ที่ไม่มีการเติมแป้ง โดยที่องค์ประกอบเป็นผลึกของ PBS (X_c) มีค่าไม่แตกต่างกันกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้มีการผสม (Pure PBS) และการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลให้ค่าองค์ประกอบเป็นผลึกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ DMTA

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พบว่าส่วนที่เป็นออสถฐานของ PBS เกิดการสั่นเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ปรากฏพีด T_g เกิดขึ้นที่ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยพบว่าค่า T_g ของ PBS ไม่แตกต่างกันในทุกสูตร

5.4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้ TGA

จากการทดสอบทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ที่อัตราส่วนระหว่าง PBS/HBS ที่ 50/50 พบว่า ทุกๆสูตรจะมีอุณหภูมิสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกัน

5.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

5.5.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง PBS/HBS

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS ในอัตราส่วน 50/50 พบว่า เม็ดแป้งจะกระจายตัวค่อนข้างดีในวัฏภาคของ PBS แต่มีการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างเม็ดแป้งกับ PBS และเห็นช่องว่างหรือรูคุดที่เกิดจากการหลุดออกของอนุภาคเม็ดแป้ง

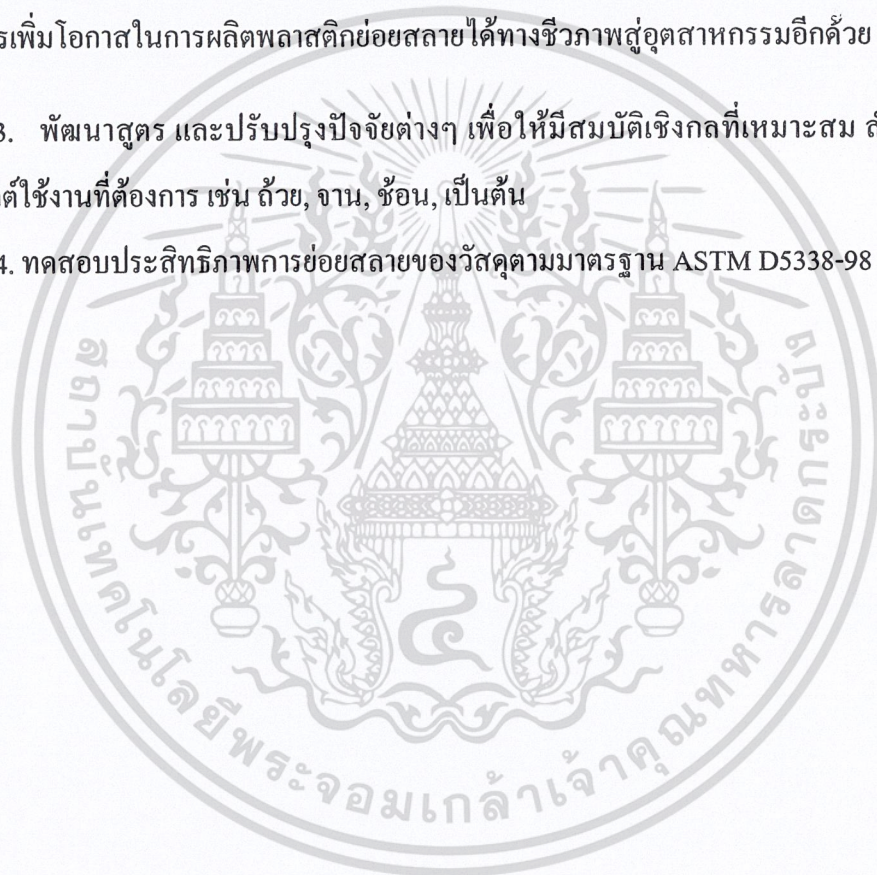
5.5.2 ศึกษาผลของการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/HBS ในอัตราส่วน 50/50 โดยมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) 1% พบว่าพอลิเมอร์ผสม PBS/HBS เม็ดแป้งจะมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ PBS และเห็นช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) วิธีใหม่และใช้สารจำพวกเปอร์ออกไซด์ ที่สามารถแตกตัวได้หมด และไม่เกิดการเสื่อมสลาย (Degradation) ของ PBS/HBS
2. ควรศึกษาพลาสติกไซเซออร์ และสารช่วยผสมชนิดอื่นๆที่เหมาะสมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้น เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีมากขึ้น และนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสู่อุตสาหกรรมอีกด้วย
3. พัฒนาสูตร และปรับปรุงปัจจัยต่างๆ เพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ เช่น ถ้วย, จาน, ช้อน, เป็นต้น
4. ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D5338-98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.epi-thailand.com/technology/how-it-works.php>
2. <http://www.nia.or.th/innolinks/page.php?issue=200903§ion=6>
3. <http://www.thai-plastic.com/pt/news.php?g=3&p=21&func=detail&id=2552>
4. กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. “การแปรรูปและใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลัง”. สิ่งพิมพ์ของศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีแห่งชาติ ปีที่3 ฉบับที่2 เดือนเมษายน - มิถุนายน 2546.
5. ศูนย์บริการวิชาการเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, โครงการศึกษาวิจัยแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรม การเกษตรแบบครบวงจร, พฤษภาคม 25436.
6. ศาสตราจารย์ ดร.ธีระ สูตะบุตร และคณะ, ข้อมูล พ.ศ. 2548 ดัดแปลงจากแผนกลยุทธ์การวิจัยด้านเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ตามวาระการวิจัยแห่งชาติในภาวะวิกฤตเพื่อฟื้นฟูชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แผนภูมิที่ 2 หน้า 17 และรายงานฉบับร่าง Evaluation and Identification for Raw Intervention Ideas for Thailand’s Tapioca Subsector โดย AgriSource Co. Ltd.
7. ชอลดา เล้ากิตติกุล, พนิดา ตั้งนอบน้อม และพิมพ์ภรณ์ มั่นพิริยะกุล. “พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งดัดแปรผสมพอลิวิทิลีนซัคซิเนต”, โครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2552.คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. ดวงพร คล้ายเพชร. “ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งดัดแปรผสมพอลิวิทิลีนซัคซิเนต”, วิทยานิพนธ์ ปีการศึกษา 2553.คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
9. <http://www.vcharkarn.com/varticle/38614>
10. Environment Australia Biodegradable Plastics - Development and Environment Impact, Nolan-ITU Pty Ltd., Australia, 2002, <http://www.deh.gov.au/settlements/publications/waste/de degradables/biodegradable/index.html>
11. Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, JRC/IPTS, Spain, 2005, www.biomatnet.org/publications/1944rep.pdf
12. <http://www.nia.or.th/bioplastics/download/ROADMAP.pdf>
13. <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5004/nkc5004u.html> อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. http://boc.dip.go.th/~dip_cms/Joomla_1.5.14x/download/report25.pdf
15. <http://www.european-bioplastics.org/>
16. <http://www.tonkwamdee.com/forum/index.php?topic=79.0;wap2>
17. <http://www.tpia.org/stat/graphindex.asp>
18. http://www.pttpm.com/uploads/ENNewsletters/pdf_201048922960_5334240256.pdf
19. สุพรรณษา ต้นถื่อ, นิดา พรหมเทพอุดม, ศิวพร เพชรทองช่วย และวีราภรณ์ ผิวสอาด. “การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิวิธินิลีนซัคซิเนตโคโคดีเพทและพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต เพื่อใช้งานบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพ”. ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
20. <http://kucon.lib.ku.ac.th/Fulltext/KC3609010.pdf>
21. <http://as.doa.go.th/fieldcrops/cas/pro/p008.HTM>
22. http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_6.html
23. <http://www.researchgate.net/publication/39025724>
24. <http://www.thaitapiocastarch.org/>
25. <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a1.shtml>
26. http://www.whk.ac.th/whk2008/web/science/biology/Chapter2/Part4_2.html
27. Richard H., Morris and Stephen E. O'Rourke. “**Metallic Stearates: A review of their function and use as release agents for rubber compounds**”. The Hallstar company Chicago, Illinois 60606
28. http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u_ratanakamnuan/CH441-Polymers-Additives-BW.pdf
29. Jian-Feng Zhang and Xiuzhi Sun. “**Mechanical Properties of Poly (lactic acid)/Starch Composites Compatibilized by Maleic Anhydride**”. Journal of Biomacromolecules 5 (2004) 1446-1454.
30. <http://www.xindacorp.com/products/twin-screw-extruder>
31. <http://www.designengineerlife.com/2010/injection-molding-precess/>
32. Denise Carlson, Li Nie, Ramani Narayan and Philippe Dubois. “**Maleation of polylactide (PLA) by reactive extrusion**”. Journal of Applied Polymer Science. Volume pages 477–485, 25 April 1999
33. Supasit Pumeechokechai. “**Preparation of modified cassava starch and polypropylene blends**”. Chulalongkorn University. Issued: 2004-02-23. ISBN: 9745319686.

34. Tserki V., Matzinos P. and Panayiotou C. **“Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler Part 2. Development of biodegradable composites using treated and compatibilized waste flour”**. Journal of Applied Science and Sanufacturing. 37(2005) 1231-1238.
35. Mani, R., Bhattacharya, M., Journal of European Polymer, vol. 37, 515 (2006).
36. Sailaja R. R. N. and Manas Chanda. **“Use of maleic anhydride - grafted polyethylene as compatibilizer for HDPE–tapioca starch blends: Effects on mechanical properties”**. Journal of Applied Polymer Science. Volume 80, Issue 6, pages 863–872, 9 May 2006.
37. Maliger R.B., McGlashan S.A., Halley P.J. and Matthew L.G. **“Compatibilization of starch-polyester blends using reactive extrusion”**. Journal of Polymer Engineering and Science, March, 2006.
38. Jean-Marie Raquez, Philippe Degree, Yogaraj Nabarb, Ramani Narayanb and Philippe Dubois. **“Biodegradable materials by reactive extrusion: from catalyzed polymerization to functionalization and blend compatibilization”**. Journal of European Polymer 9 (2007) 1370–1379.
39. ณัฐพงศ์ ภาคำ, ศิริินภา เกตุสุข, วรพงษ์ เหล่าฤทธิไกร. **“การศึกษาพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิแลคติกผสมแป้งดัดแปรชนิดพรีเจลและไฮโดรโฟบิก”**, โครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2551. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
40. รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ **“เคมีพอลิเมอร์”**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้า 334 - 337.
41. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine)

| Description | Unit | Tolerance | Value |
|--------------------------------|------|-----------|-------|
| INJECTION | | | |
| Injection delay | Sec | +1 | 0.10 |
| Max injection pressure | Bar | +10 | 70 |
| Decompression stroke | mm. | +3 | 60 |
| Metering stroke | mm. | +5 | 60 |
| Injection speed 1 | % | +20 | 28 |
| Injection stroke 1 | mm. | +10 | 45 |
| Injection speed 2 | % | +20 | 30 |
| Injection stroke 2 | mm. | +10 | 8 |
| Injection speed 3 | % | +20 | 18 |
| Injection stroke 3 | mm. | +10 | 6 |
| Injection speed 4 | % | +20 | - |
| Injection stroke 4 | mm. | +10 | - |
| Injection speed 5 | % | +20 | - |
| SWITCHOVER TO FOLLOW UP PRESS | | | |
| Follow-up pressure stroke-dep. | 0/1 | | 0 |
| Follow-up pressure stroke | mm. | +3 | 4 |
| Follow-up pressure stroke-dep. | 0/1 | | 1 |
| Follow-up pressure stroke | mm. | +2 | 4 |
| FOLLOW-UP PRESSURE | | | |
| Follow-up pressure 1 | Bar | +20 | 30 |
| Follow-up press 1 time | Sec. | +2 | 150 |
| Follow-up pressure 2 | Bar | +20 | - |
| Follow-up press 2 time | Sec. | +2 | - |
| Follow-up pressure 3 | Bar | +20 | - |
| Follow-up press 3 time | Sec. | +2 | - |
| Follow-up pressure 4 | Bar | +20 | - |

| Description | Unit | Tolerance | Value |
|---------------------------|------|-----------|-------|
| Follow-up press 4 time | Sec. | +2 | - |
| Follow-up pressure 5 | Bar | +20 | - |
| Follow-up press 4 time | Sec. | +2 | - |
| Cooling time | Sec. | +5 | 105 |
| TEMPERATURE | | | |
| Zone 1 (Nozzle) | °C | +10 | 142 |
| Zone 1 | °C | +10 | 145 |
| Zone 2 | °C | +10 | 150 |
| Zone 3 (Hopper) | °C | +10 | 150 |
| METERING DECOMPRESSION | | | |
| Metering delay | Sec. | +1 | 0.10 |
| Screw speed | RPM | +30 | - |
| Decompression stroke 1 | Bar | +5 | - |
| Back pressure 1 | mm. | +10 | 2 |
| Back stroke 1 | Bar | +5 | 35 |
| Back pressure 2 | mm. | +10 | 3 |
| Back stroke 2 | Bar | +5 | 45 |
| Metering speed 1 | % | +10 | 65 |
| Metering stroke 1 | mm. | +5 | 40 |
| Metering speed 2 | % | +10 | 65 |
| Metering stroke | mm. | +5 | 60 |
| Decompression program | 0/1 | | 1 |
| Decompression stroke 2 | mm. | +1 | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

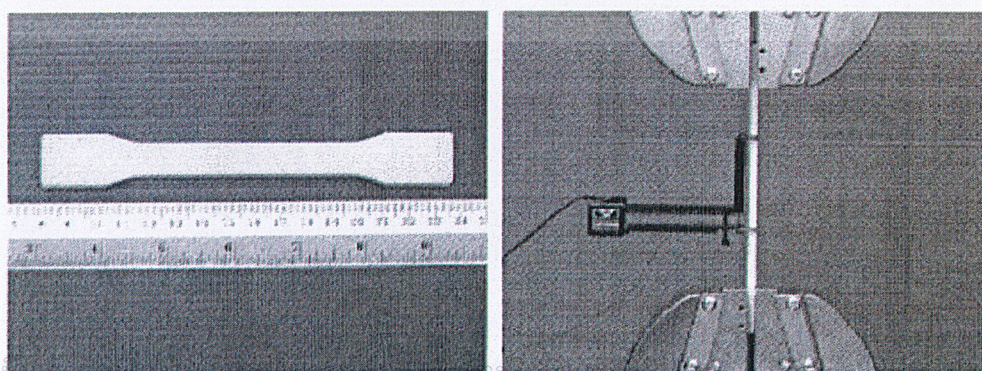
ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของPBS และแป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก

ตารางที่ ข1 สูตร PBS ต่อ แป้งมันสำปะหลังตัดแปรชนิดไฮโดรโฟบิก (HBS)

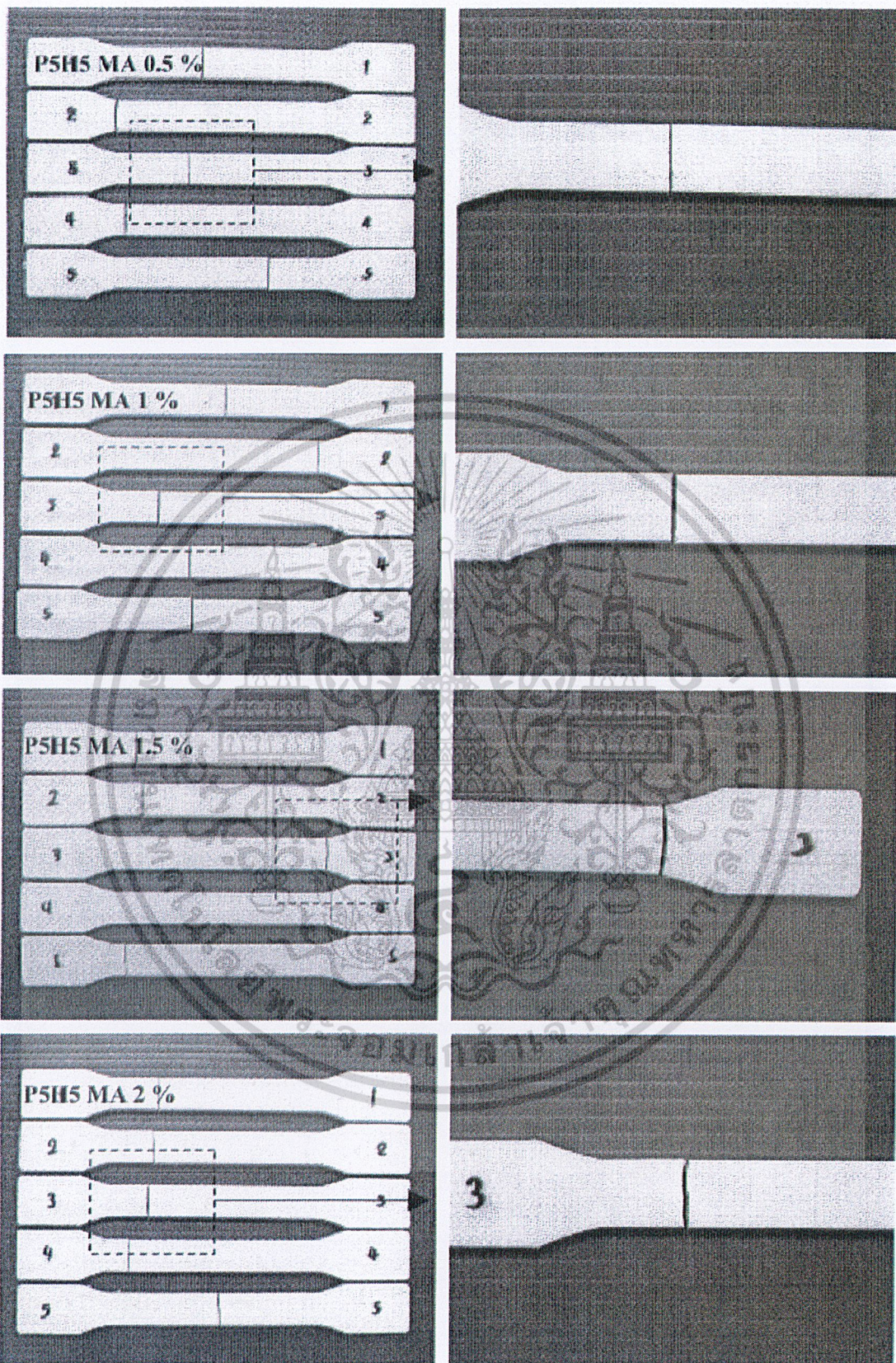
| สารตัวอย่าง | ผลการทดสอบ | | | |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------------|
| | ความ แข็งแรงดึง (MPa) | เปอร์เซ็นต์การ ยืด ณ จุดขาด (%) | มอดุลัส (MPa) | ความแข็งกด (Shore D) |
| PBS | 30.09 | 541.0 | 58.47 | 44.67 |
| P5H5C5 | 9.67 | 7.31 | 90.57 | 43.46 |
| P5H5C10 | 8.89 | 9.81 | 89.31 | 40.15 |
| P5H5C15 | 8.08 | 6.17 | 92.10 | 43.17 |
| P4H6G10 | - | - | - | - |
| P4H6C10 | - | - | - | - |
| P6H4G10 | 11.50 | 15.29 | 61.33 | 48.73 |
| P6H4C10 | 8.73 | 11.11 | 59.79 | 45.78 |
| P5H5C10 / MA0.5% | 7.18 | 9.80 | 112.61 | 57.00 |
| P5H5C10 / MA1.0% | 5.93 | 7.50 | 118.90 | 56.00 |
| P5H5C10 / MA1.5% | 5.07 | 6.00 | 114.64 | 57.00 |
| P5H5C10 / MA2.0% | 5.05 | 6.20 | 110.23 | 56.00 |

หมายเหตุ ที่สูตรสารตัวอย่าง P4H6G10 และ P4H6C10 ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากอธิการบดี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ภาพที่ ก ตัวอย่างและลักษณะการทดสอบสมบัติเชิงกล

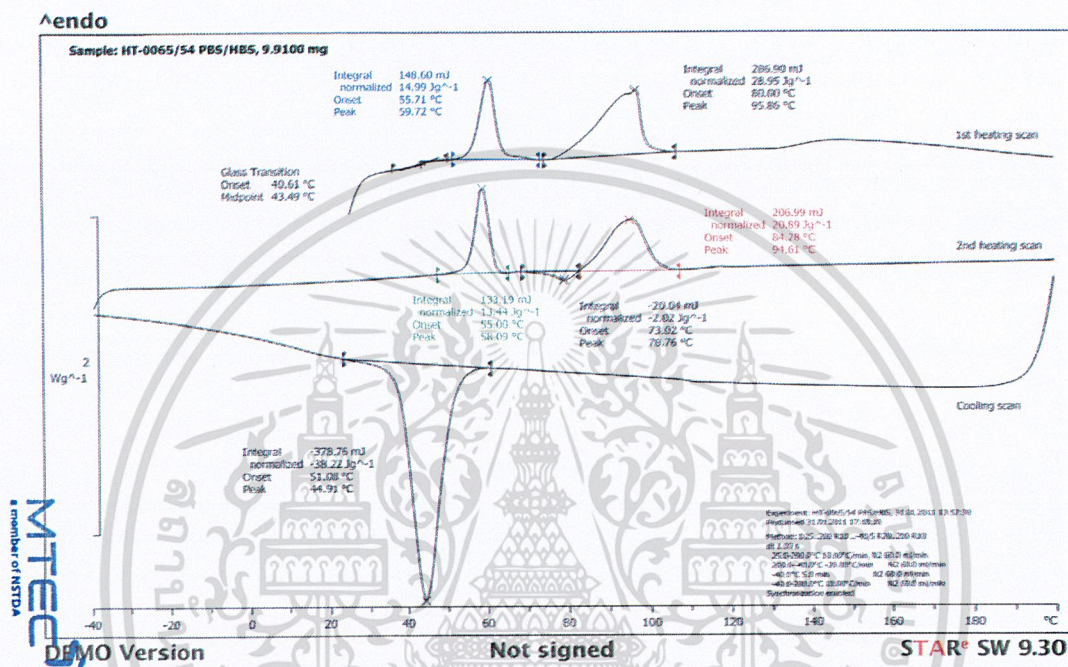


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งภาพที่ ก 1 ลักษณะของชิ้นตัวอย่างหลังการทดสอบ สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

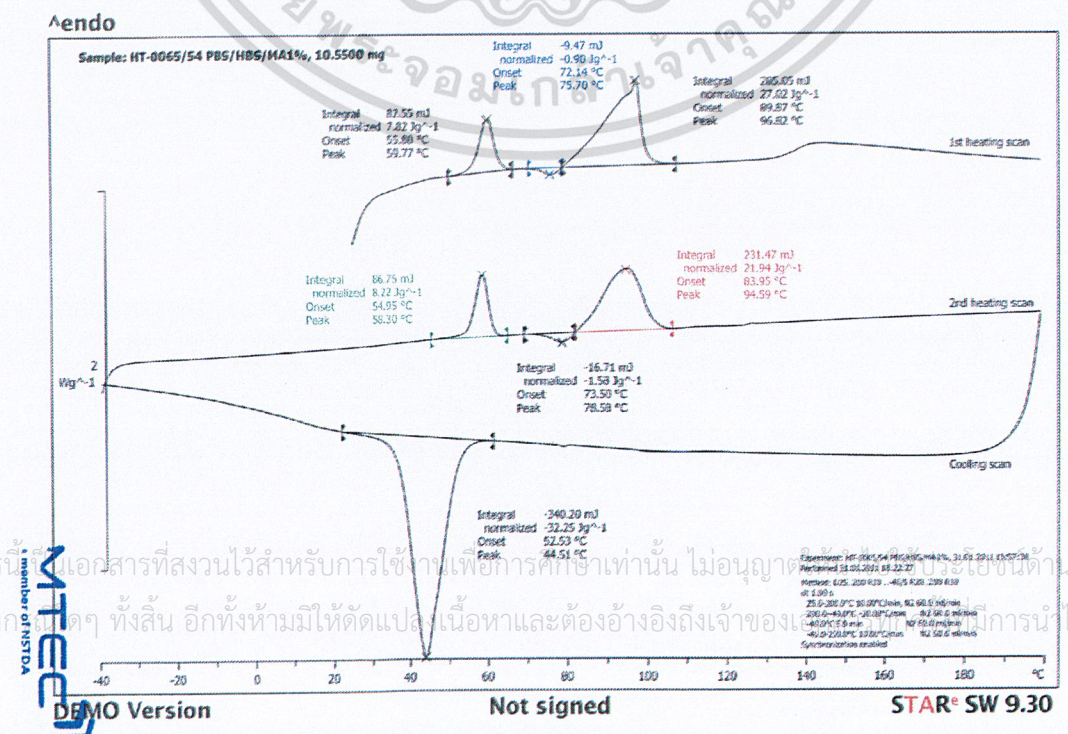
ภาคผนวก ค

DSC Thermogram

ภาพที่ ค 1 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% (P5H5C10)



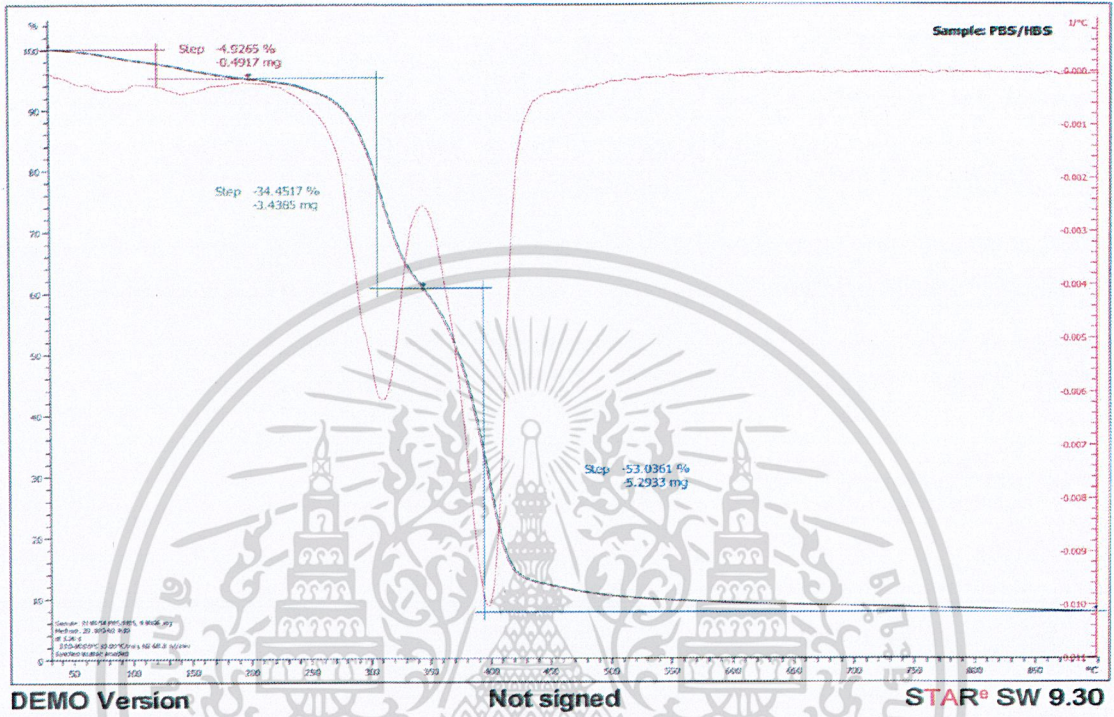
ภาพที่ ค 2 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% และ MA1% (P5H5C10/MA 1%)



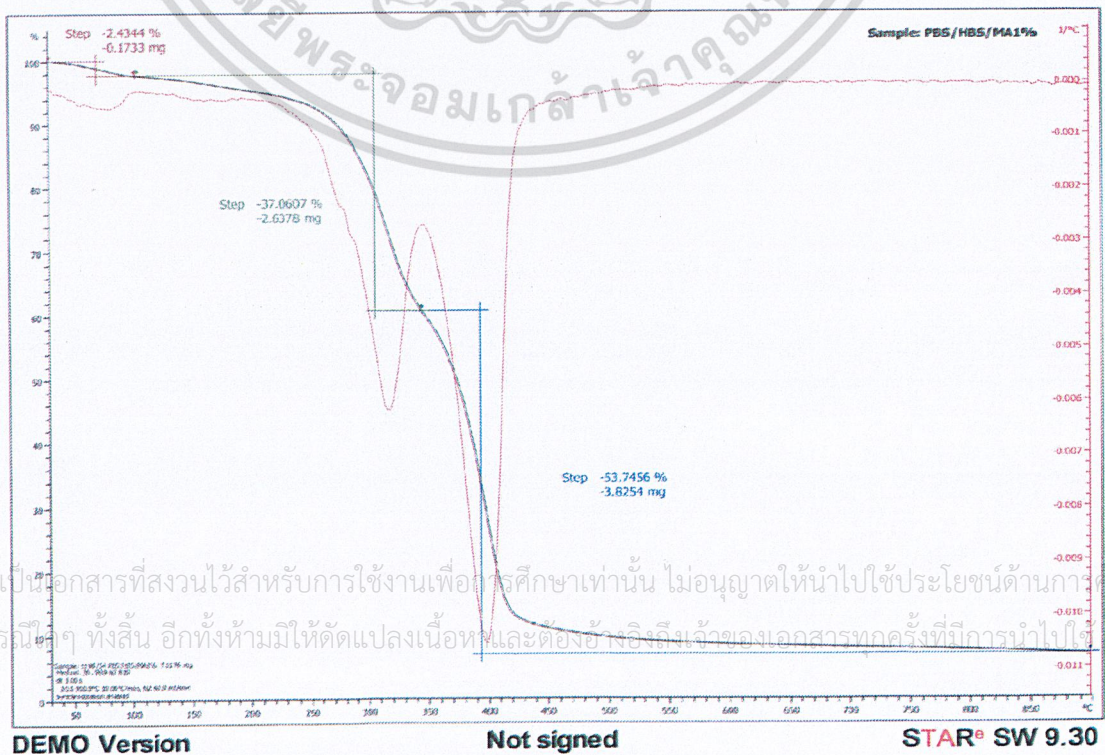
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากล่าวตักเตือน ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ไปให้

TGA Thermogram

ภาพที่ ค3 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% (P5H5C10)



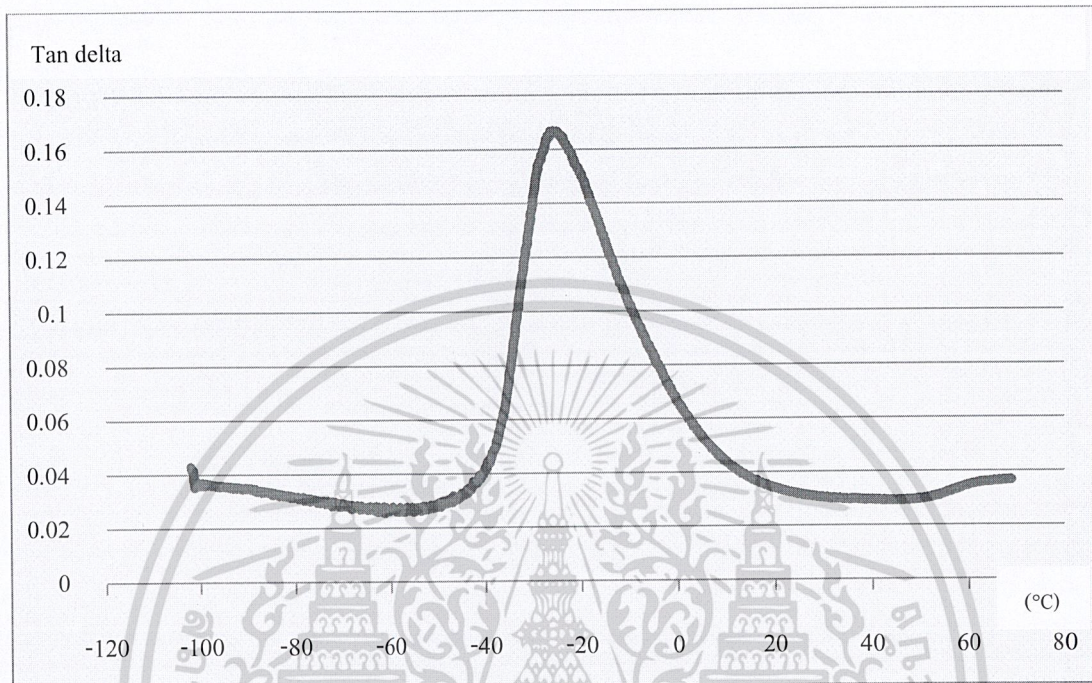
ภาพที่ ค 4 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% และ MA1% (P5H5C10/MA1%)



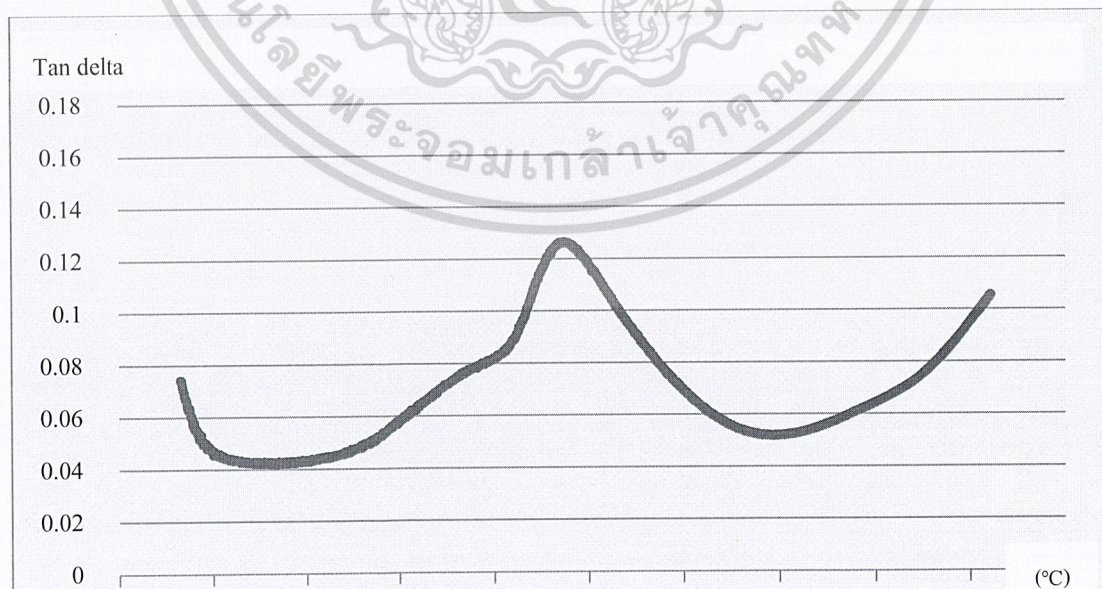
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DMTA

ภาพที่ ค 5 อัตราส่วน PURE PBS

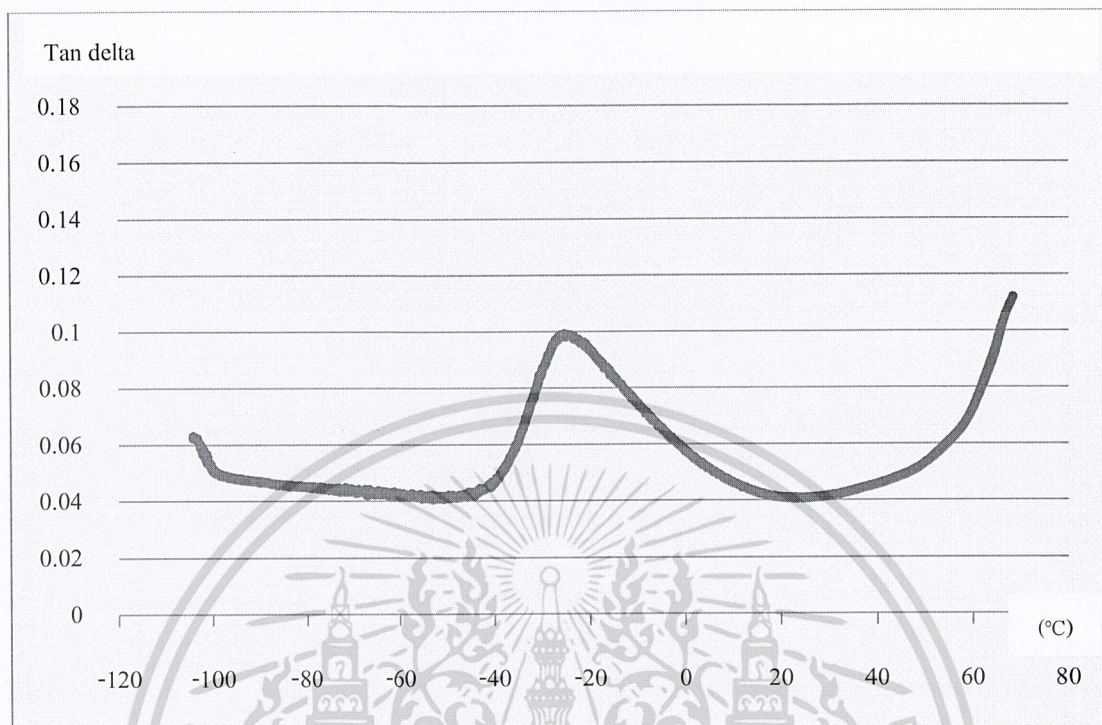


ภาพที่ ค 6 อัตราส่วน PBS/HBS: 60/40, Gly 10% (P6H4G10)

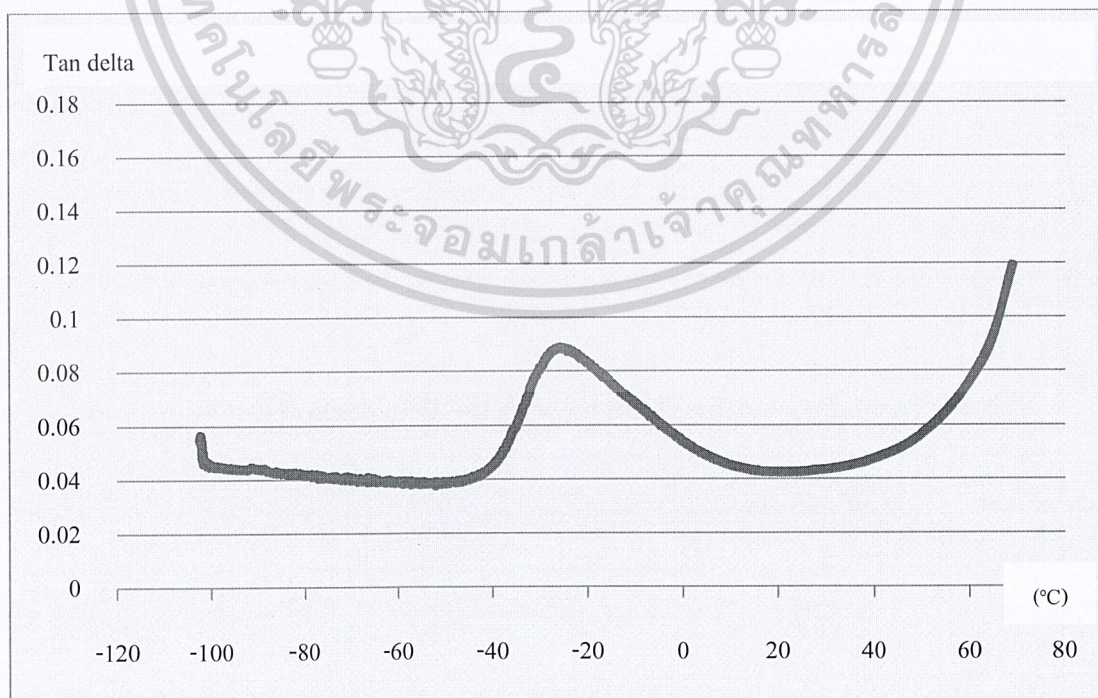


เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า
 ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการฟ้องร้อง
 ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการฟ้องร้อง

ภาพที่ ก 7 อัตราส่วน PBS/HBS: 60/40, COA 10% (P6H4C10)

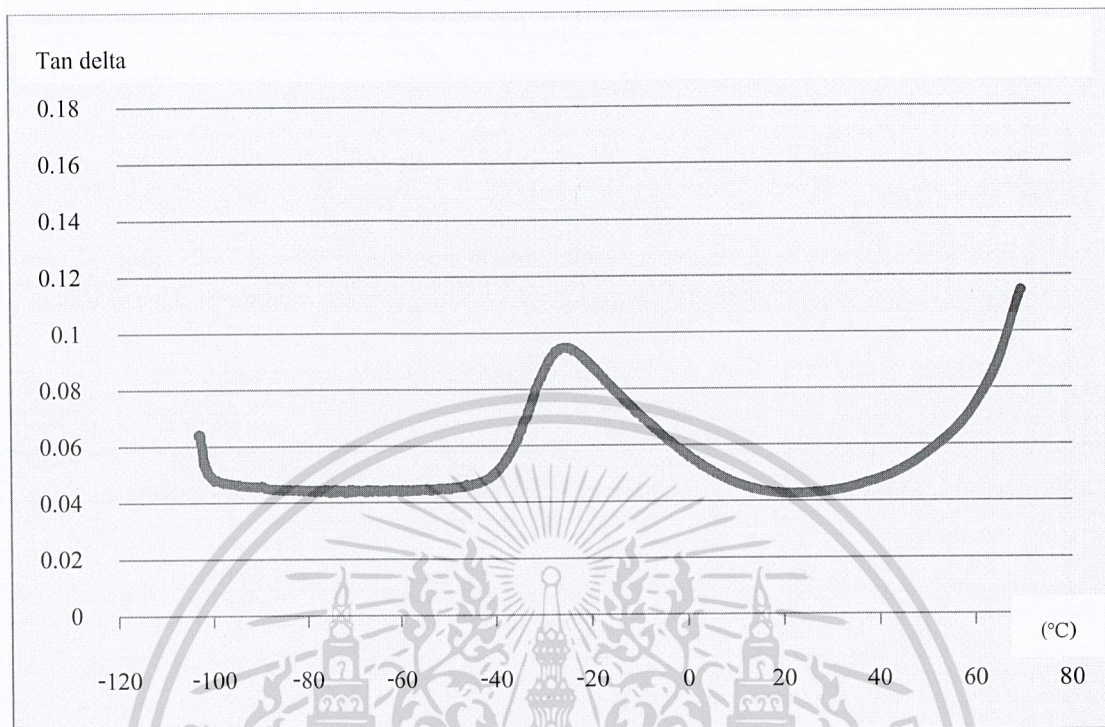


ภาพที่ ก 8 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% (P5H5C10)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ ค 9 อัตราส่วน PBS/HBS: 50/50, COA 10% และ MA1% (P5H5C10/MA 1%)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้