

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของชนิดแป้งดัดแปรและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของ
พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งดัดแปร



T107868

นางสาวณัฏฐิตา สุขอัจจะสกุล
นายธีรพล วงศ์วัฒน์อนันต์
นางสาวพัทธมน เรียงชัยนาม

รพ.
๑๖318๗
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 107868
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ย. 2553

b..... 1221369x
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of Modified Starch Types and Compatibilizers on
Properties of Degradable Bioplastics
made from Poly(lactic acid)/Modified Starch



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ ผลของชนิดแป้งดัดแปรและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งดัดแปร

นักศึกษา นางสาวณัฐธิดา สุขอัจจะสกุล
นายธีรพล วงศ์วัฒนอนันต์
นางสาวพัทธมน เรียงชัยนาม

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นายพิชัย ชูเอกวงศ์ (บริษัท วัลย์ดีพาณิชย์อุตสาหกรรม จำกัด)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ภัทธานุช มนต์วิเศษ	
กรรมการ	ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์	
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	


(ผศ.ดร.ชลลดา จารุสุทธิวิรุฬห์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง	ผลของชนิดแป้งดัดแปรและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งดัดแปร	
นักศึกษา	นางสาวณัฐธิดา	สุชัชจະสกุล
	นายธีรพล	วงศ์วัฒนอนันต์
	นางสาวพัทธมน	เรียงชัยนาม
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2550	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายพิชัย ชูเอกวงศ์ (บริษัท วัลย์ดีพาณิชย์อุตสาหกรรม จำกัด)	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) และศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกแอนไฮไดรด์ (PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนต (MDI) ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปร ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของสารช่วยผสม PLA-g-MA 0.125, 0.25 และ 0.5 % โดยน้ำหนัก และสารช่วยผสม MDI 0.5, 1.0, 2.0 % โดยน้ำหนัก ทำการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นศึกษาผลจากสมบัติต่างๆ คือ สมบัติเชิงกล, สมบัติการดูดซับน้ำ, สมบัติทางความร้อน, สันฐานวิทยา และความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน จากการศึกษาสันฐานวิทยา พบว่า PLA/EMS และ PLA/OXS เม็ดแป้งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในวัฏภาคของ PLA แต่ PGS ผสมกับ PLA ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA พบว่า สันฐานวิทยาไม่ต่างจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารช่วยผสม PLA-g-MA แต่การเติมสารช่วยผสม MDI สามารถทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น สมบัติเชิงกลของ PLA/EMS และ PLA/OXS มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม PLA/PGS มีสมบัติเชิงกลที่ต่างกันออกไป โดยมี เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่า ความแข็งแรงกระแทกสูงกว่า ความแข็งแรงดึงต่ำกว่า และมอดุลัสต่ำกว่า ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากความแตกต่างของสันฐานวิทยา ส่วนสารช่วยผสม PLA-g-MA ไม่ส่งผลต่อสมบัติมากนัก ขณะที่สารช่วยผสม MDI สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยยิ่งเพิ่มเอกซาร์เน็เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณสารช่วยผสมยิ่งทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ PLA/PGS มีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุด และจากผลการศึกษสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมแป้งลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้ความเป็นผลึกของ PLA ลดลง การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน (3 เดือน) สามารถพิสูจน์ได้ว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/แป้งดัดแปร ความสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (ฝังดิน) โดยที่ PLA/OXS สามารถย่อยสลายได้ดีที่สุด ส่วนการเติมสารช่วยผสม MDI ความสามารถย่อยสลายได้ต่ำกว่าสูตรที่เติมสารช่วยผสม PLA-g-MA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Effects of Modified Starch Types and Compatibilizers on Properties of Degradable Bioplastics made from Poly(lactic acid) / Modified Starch
Student names	Miss Nattida Sukajjasakul Mr. Theerapon Wongwattananan Miss Patthamon Reangchainam
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Special Project Coadvisor	Mr. Pichai Chueakwong (Wandee Panich Industry Co., Ltd)

ABSTRACT

This research was focused on studying effects of modified starch types (i.e. ester modified starch (EMS), oxidized starch (OXS), pregelatinized starch (PGS)) and effects of types and % loading of compatibilizers (i.e. poly(lactic acid) graft maleic anhydride (PLA-g-MA) and methylene diphenyl diisocyanate (MDI)) on properties of degradable bioplastics made from poly(lactic acid) (PLA) and modified starches at 50/50 blend ratio (w/w). 10 wt% loading of Polyethylene glycol (PEG) was used as a plasticizer. %Compatibilizer of PLA-g-MA loading used in this study was 0.125, 0.25 and 0.5 wt% and %compatibilizer of MDI loading was 0.5, 1.0 and 2.0 wt%. The mixture was compounded by using a two-roll mill and shaping by injection molding technique. Several properties of the blends, such as, mechanical properties, water absorption, thermal properties, morphology and biodegradability were investigated. From SEM results, it was revealed that starch particles were dispersed well in PLA matrix in PLA/EMS and PLA/OXS blends. However, pregelatinized starch seemed to blend with PLA. By adding the PLA-g-MA compatibilizer, it was found that morphology was unchanged, whereas the MDI compatibilizer seemed to help interfacial adhesion between starch particles and PLA. Mechanical properties of PLA/EMS and PLA/OXS blends were comparable. However, PLA/PGS showed different behaviors in mechanical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

testing, such as, higher % elongation at break, higher impact strength, lower tensile strength and lower modulus. This might be derived from different morphologies of the materials. The PLA-g-MA compatibilizer played a minor role in mechanical properties of the blends. Nevertheless, the MDI could improve mechanical properties of the blends. The higher the % MDI loading, the better the mechanical properties. For water absorption test, the PLA/PGS had much higher % water absorption compared to the others. From DSC results, addition of the starches yielded lower % crystallinity of PLA. From burial test (3 months), it was proven that PLA / modified starch had good biodegradability. PLA/OXS blend showed the best biodegradability compared to the others. It was seen that PLA/EMS with MDI compatibilizer had lower degradation than that with PLA-g-MA.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด เป็นอย่างสูงสำหรับการเอาใจใส่ดูแลให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพิชัย ชูเอกวงค์ และบริษัท วัลย์ดีพาณิชยอุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนทางด้านทุนวิจัย รวมทั้งกรุณาเป็นธุระจัดหาพอลิแลคติกแอซิด ให้อีกด้วย

ขอขอบพระคุณบริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์แบ่งตัด แปรรเอสเทอร์ แบ่งออกซิไดซ์ และแบ่งพรีเจล

ขอขอบพระคุณ คุณสถาปัตยกรรมศาสตร์ อาราดิ และบริษัท METTLER TOLEDO Co., Ltd. ที่ให้คำแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติทางความร้อน Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งแก้ปัญหาลดการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณ พี่วราภรณ์ พุทธิสละ และพี่อัจฉราพร รัตนมณี ที่ให้คำแนะนำและคอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้	5
2.2 พอลิแลคติกแอซิด	8
2.2.1 ลักษณะและสมบัติโดยทั่วไปของ PLA	8
2.2.2 กระบวนการผลิต PLA	9
2.2.3 การย่อยสลายของ PLA	12
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานของ PLA	13
2.3 แป้ง	13
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง	13
2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง	14
2.3.4 สมบัติของแป้ง	18
2.2.5 แป้งมันสำปะหลัง	18
2.3.6 แป้งดัดแปร	19
2.3.7 การดัดแปรแป้งทางเคมี	20
2.3.8 แป้งเอสเทอร์	22
2.3.9 แป้งออกซิไดซ์	23
2.3.10 แป้งฟรีเจล	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การย่อยสลายของแป้ง	29
2.5 สารช่วยผสม (Compatibilizers)	30
2.6 พลาสติไซเซอร์	34
2.7 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 วิธีการทดลอง	39
3.3.1 การเตรียมโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์	39
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	40
3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของพลาสติกชีวภาพ	41
3.3.4 ปัจจัยที่ต้องศึกษา	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ศึกษาผลของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ	44
4.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	44
4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	46
4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ	51
4.1.4 สมบัติทางความร้อน	52
4.1.5 ผลทดสอบการฝังดิน (Burial test)	53
4.2 ศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม	58
4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	58
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	50
4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ	67
4.2.4 สมบัติทางความร้อน	68
4.2.5 ผลทดสอบการฝังดิน (Burial test)	68
4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 การศึกษาผลของชนิดแป้งดัดแปร	74
5.2 การศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม	75
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก Datasheet แสดงสมบัติบางประการของพอลิแลคติกแอซิด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	81
ภาคผนวก ข1 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดฉีดขึ้นรูป	84
ภาคผนวก ข2 ความดันของหน่วย injection ที่ปรับจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์	85
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	86
ภาคผนวก ง DSC Thermogram	87
ภาคผนวก จ ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ IR-spectroscopy	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติที่สำคัญบางประการของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	14
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	19
ตารางที่ 3.1 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมโคพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์	39
ตารางที่ 3.2 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมพอลิเมอร์ผสม กรณีใช้ MA	40
ตารางที่ 3.3 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมพอลิเมอร์ผสม กรณีใช้ MDI	41
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองค์ประกอบเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งชนิดต่างๆ (50:50)	53
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองค์ประกอบเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/EMS (50:50) กับสารช่วยผสม PLA-g-MA และ MDI	68

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจาก PLA ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน	3
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด	8
รูปที่ 2.3 กระบวนการราซิไมเซชันของ LA	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกรดแลคติกในรูปแบบต่างๆ	10
รูปที่ 2.5 สมดุลระหว่างปฏิกิริยาควบแน่นของ LA	11
รูปที่ 2.6 การตัดทอนสายโซ่ PLA อันเนื่องมาจากความร้อน	11
รูปที่ 2.7 แผนภาพการสังเคราะห์ PLA โดยเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง	12
รูปที่ 2.8 แผนภาพวัฏจักรโดยย่อของพลาสติก PLA	13
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของอะไมโลส	15
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะเกลียวของอะไมโลส	16
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างอะไมโลเพกติน	16
รูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน	17
รูปที่ 2.13 แสดงสายโซ่ตรงและสายโซ่กิ่งของแป้ง	17
รูปที่ 2.14 แสดงการตัดแปรรูปแป้งแต่ละชนิด	22
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิด Dialdehyde starch และ Dicarboxyl starch	25
รูปที่ 2.16 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวและเครื่องเอกทราเดอร์	28
รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมกับอัตราส่วนขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม	31
รูปที่ 2.18 กลไกปฏิกิริยาเคมีของ PLA, แป้ง, MA และตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา DCP	32
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของมาลิอิกแอนไฮไดรด์	33
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ DCP	33
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของเมทิลลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต	34
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนไกลคอล	35
รูปที่ 4.1 SEM Micrograph กำลังขยายต่ำ (200X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แป้งตัดแปรรูป อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/OXS, (C) PLA/PGS	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 SEM Micrograph กำลังขยายสูง (1500X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แบ่งตัดแปรร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/OXS, (C) PLA/PGS	46
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ (50:50)	48
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ (50:50)	48
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ (50:50)	49
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ (50:50)	50
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ (50:50)	50
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่ง กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ในกรณีศึกษาผลของแบ่งตัดแปรรชนิดต่างๆ	52
รูปที่ 4.9 ภาพชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 50%, pH 7 (A) PLA/EMS, (B) PLA/OXS, (C) PLA/PGS	54-55
รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ PLA	56
รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของแบ่ง	57
รูปที่ 4.12 SEM Micrograph กำลังขยายต่ำ (200X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แบ่งตัดแปรร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS-M2, (C) PLA/EMS-D2	59
รูปที่ 4.13 SEM Micrograph กำลังขยายสูง (1500X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แบ่งตัดแปรร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS-M2, (C) PLA/EMS-D2	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม	61
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม	62
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม	62
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม	63
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม	64
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม	64
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม	65
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม	65
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม	66
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม	66
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสม ของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้ง กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ในกรณีศึกษาผลชนิดของสารช่วยผสม	67
รูปที่ 4.25 ภาพชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 50%, pH 7 (A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS- M2, (C) PLA/EMS-D2	69-70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PLA	หมายความว่า	พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid))
LA	หมายความว่า	กรดแลคติก (lactic acid)
EMS	หมายความว่า	แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch)
OXS	หมายความว่า	แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch)
PGS	หมายความว่า	แป้งพรีเจล (Pregelatinization starch)
PLA/EMS	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์
PLA/OXS	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งออกซิไดซ์
PLA/PGS	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งพรีเจล
MA	หมายความว่า	มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)
PLA-g-MA	หมายความว่า	พอลิแลคติกต่อกิ่งมาลิกแอนไฮไดรด์ (Poly(lactic acid) graft maleic anhydride)
DCP	หมายความว่า	ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide)
MDI	หมายความว่า	เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate)
PLA/EMS-M0.125	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MA 0.125 % โดยน้ำหนัก
PLA/EMS-M0.25	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MA 0.25 % โดยน้ำหนัก
PLA/EMS-M0.5	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MA 0.5 % โดยน้ำหนัก
PLA/EMS-D0.5	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MDI 0.5 % โดยน้ำหนัก
PLA/EMS-D1	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MDI 1 % โดยน้ำหนัก
PLAEMS-D2	หมายความว่า	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งเอสเทอร์ ที่ผสม MDI 2 % โดยน้ำหนัก
PEG	หมายความว่า	พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol)
SEM	หมายความว่า	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

DSC	หมายความว่า	Differential Scanning Calorimetry
T_g	หมายความว่า	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)
T_m	หมายความว่า	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melt temperature)
X_c	หมายความว่า	องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallization)
DS	หมายความว่า	องศาการแทนที่ (Degree of substitution)
php	หมายความว่า	ส่วนโดยร้อยละของพอลิเมอร์ (โดยน้ำหนัก) (Part per hundred of polymer)
wt%	หมายความว่า	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (percent weight)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

สืบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้พอลิเมอร์โดยเฉพาะการใช้งานพลาสติกได้เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด จึงเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมา คือ ปัญหาขยะพลาสติกและการกำจัด เนื่องจากสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ เมื่ออัตราการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล การกำจัดขยะพลาสติกจึงทำได้ยาก หากจะทิ้งให้ย่อยสลายก็ใช้เวลานาน นอกจากนี้การกำจัดขยะพลาสติกยังทำให้เกิดก๊าซพิษ ที่ส่งผลต่อปัญหามลภาวะเพิ่มขึ้น เมื่อมองในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตพลาสติก คือ ปิโตรเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) พบว่ามีปริมาณลดลงอย่างมาก เพราะอัตราการเกิดขึ้นทดแทนเกิดได้ช้ามาก แต่มีการขุดมาใช้อย่างมาก จากผลการศึกษาพบว่าหากเรายังบริโภคเชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยอัตรานี้ต่อไป คาดการณ์ว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้อาจจะหมดไปภายใน 100 ปี เหตุผลนี้จึงทำให้มีราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิล ตลอดจนปิโตรเคมีเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน ส่งผลให้ราคาพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นตามกัน

แนวทางการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากพอลิเมอร์ที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน [1] คือ

- การลดการใช้ (Reduce)
- การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse)
- การรีไซเคิล (Recycle)

ซึ่งทั้ง 3 แนวทางนี้จะส่งผลให้มีการยืดอายุการใช้งานของพอลิเมอร์ให้ยาวนาน และมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยจะส่งผลให้การผลิตพอลิเมอร์ใหม่ลดลง อีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (Degradable polymers) ซึ่งจะแก้ปัญหาการสะสมตัวของพอลิเมอร์ และลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอีกด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมานั้นเป็นปัจจัยที่ผลักดันให้เกิดการศึกษาค้นคว้า เพื่อผลิตวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพเทียบเคียงกับพลาสติก แต่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ไม่ได้มาจากปิโตรเลียม กล่าวคือ วัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resources) เช่น ผลผลิตทางการเกษตร และมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ โดยเรียกพอลิเมอร์หรือพลาสติกที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้ว่า พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (Degradable bioplastics)

ปัจจุบันได้มีการส่งเสริมให้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ในหลากหลายประเทศ ไม่ว่าจะเป็นประเทศในแถบยุโรป อเมริกา และในเอเชีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic); PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากในปัจจุบัน ซึ่งกรดแลคติก (Lactic acid) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตร เช่น อ้อย, ข้าวโพด, ข้าวสาลี และหัวบีท [1] จากนั้นกรดแลคติกจะถูกเปลี่ยนเป็นแลคไทด์ (Lactic) โดยทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้เป็น PLA ต่อไป [2]

แป้งเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีใช้ไม่หมด (Renewable materials) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และมีราคาถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลังซึ่งประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกมากที่สุดในโลก ปัจจุบันได้มีการผลิตแป้งดัดแปร (Modified starch) โดยใช้กระบวนการเคมีปรับเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติของแป้งให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch), แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch), แป้งพรีเจล (Pregelatinized starch)

เมื่อนำแป้งดัดแปร (Modified Starch) ผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA) จะมีปัญหาเรื่องการผสมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับแป้ง ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ซึ่งแป้งจะมีลักษณะเป็นเม็ด (Granular shape) กระจายอยู่ในวัฏภาคของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) รอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นนี้จึงมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ต่ำ ดังนั้นจึงใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติ และพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม [3]

สารช่วยผสม (Compatibilizer) ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ต่อกิ่งมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI)

มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) มีความว่องไวกับการเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งเกิดจากตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (Initiator) [4] ทำให้เกิดการต่อกิ่ง (Grafting) ที่สายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และสารช่วยผสมอีกชนิดหนึ่งคือ เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) ซึ่งสามารถใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่าง PLA และแป้งได้เช่นกัน [3]

โครงการพิเศษหลักสูตรเคมีอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2549 [5] ได้มีงานวิจัยศึกษาพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งดัดแปรเอสเทอร์ (PLA/EMS) ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถขึ้นรูปได้ พบว่า การใช้ PEG เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ช่วยปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งดัดแปรเอสเทอร์ได้ดีที่สุด

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องโดยมีแนวคิดที่จะศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Compatibilizer) รวมทั้งชนิดของแป้งดัดแปรที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมแป้งดัดแปร เพื่อนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจาก PLA ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมแป้งดัดแปร โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลของสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ เช่น

1. เพื่อศึกษาผลของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS)
2. เพื่อศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Poly(lactic acid) graft maleic anhydride; PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) ที่มีต่อสมบัติและกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาชนิดและปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร
2. ศึกษาชนิดของแป้งที่เหมาะสม ที่มีผลต่อสมบัติและกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม
3. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานที่เตรียมได้ ได้แก่
 - สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), โมดูลัส (Modulus), ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งกด (Hardness)
 - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)
 - สมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC)
 - ศึกษาด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
 - ความสามารถในการย่อยสลาย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร ที่ผสมสารช่วยผสม และสามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปรให้มีสมบัติดีขึ้น
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง โดยเฉพาะในการใช้งานทางด้านเกษตรกรรม เช่น กระจางเพาะชำ, กระจางต้นไม้, พลาสติกคลุมดิน (Mulch film), โรงเรือนพลาสติก (Greenhouse film) ฯลฯ
3. สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบให้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastics) [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบันได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ. 1960 ด้วยแนวคิดว่าจะเป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลาย ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ได้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการซึ่งสามารถวัดได้โดยการใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆของพลาสติก แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)

การย่อยสลายโดยแสง เกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงไปในพลาสติก หรือทำการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่อ่อนแอแตกหักง่ายเมื่ออยู่ภายใต้รังสียูวี (UV) อย่างเช่น มีหมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อหมู่คีโตนสัมผัสกับรังสียูวี จะเกิดการสลายพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเกิดการเข้าปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วบนตำแหน่งคาร์บอนบนสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นเองได้อย่างช้าๆ ในธรรมชาติโดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวีหรือแรงเชิงกลเป็นปัจจัยหลักในการเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide; ROOH) โดยพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความเสถียรทางความร้อน (Heat stabilizer additive) และสารเพิ่มความเสถียรต่อแสงยูวี (UV stabilizer additive) จะทำให้ ROOH เกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร แล้วเข้าทำปฏิกิริยาต่อบนตำแหน่งของคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น พอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ พอลิยูรีเทน พอลิคาร์บอเนต และแป้ง จะเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีความชื้นและสารเคมีหรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการแตกของสายโซ่พอลิเมอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยทั่วไปสามารถแบ่งย่อยเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่ง (Catalytic hydrolysis) และประเภทที่ไม่ใช้ตัวเร่ง (Non-catalytic hydrolysis) โดยประเภทที่ใช้ตัวเร่งยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบใช้ตัวเร่งภายนอกโมเลกุล (External catalytic hydrolysis) และแบบใช้ตัวเร่งภายในโมเลกุล (Internal catalytic hydrolysis) ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย และแบบใช้ตัวเร่งภายนอกโมเลกุลสามารถแบ่งออกเป็นอีก 2 ชนิด คือ ตัวเร่งชนิดที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Lipase และ Esterase ซึ่งกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนอีกชนิดคือ ตัวเร่งชนิดที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลน์ (Alkaline metal) กรด (Acid) และเบส (Base) ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ซึ่งกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์มี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกของการย่อยสลายเกิดขึ้นภายในเซลล์โดยการปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้เกิดการแตกพันธะเมื่อแตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายขั้นตอนที่ 2 ต่อไปทำให้ได้ผลผลิตสุดท้าย (Ultimate biodegradable) ซึ่งเสถียรในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ กลีโกล แร่ธาตุต่างๆ และชีวมวล (Biomass)

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)
2. กระบวนการหมักเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ หรือการคอมโพสท์ (Composting)
3. การย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Hydro-biodegradation)
4. การย่อยสลาย 2 ขั้นตอนโดยผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Photo-biodegradation)

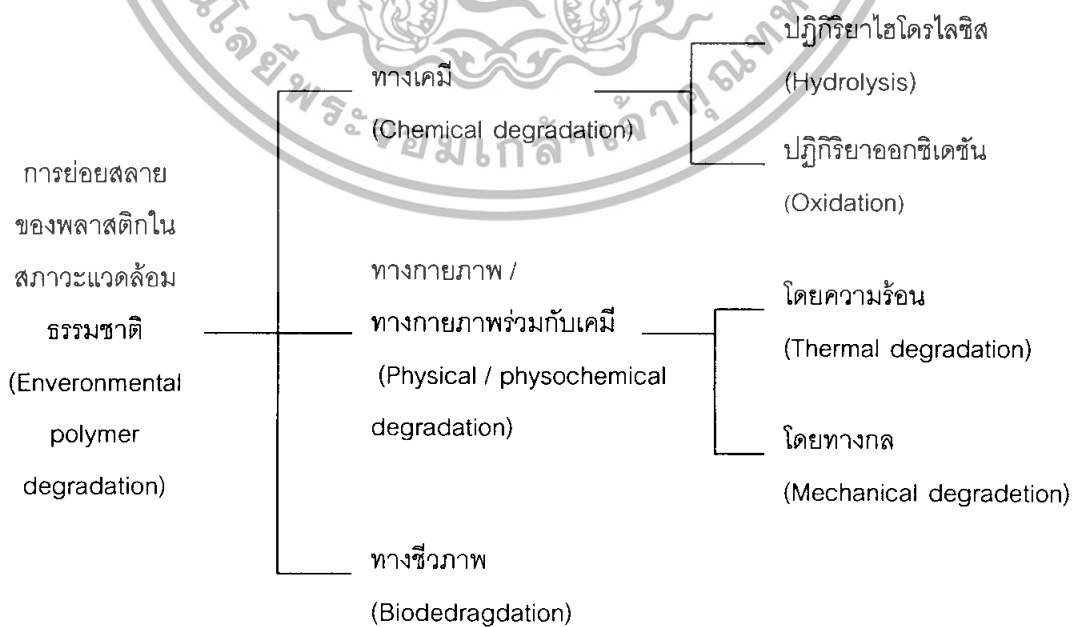
ปัจจุบันมีพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ประเภทหลักที่มีการศึกษาวิจัย และนำมาผลิตใช้ประโยชน์ คือ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch-based polymers) และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทพอลิเอสเตอร์ (Biodegradable polyester) โดยพอลิเมอร์ประเภทแรกเกิดจากการผสมพอลิเมอร์บางชนิด เข้ากับสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งที่เกิดจากการเรียงต่อกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น

กลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic) โดยใช้อัตราส่วนผสมได้ตั้งแต่ 10 - 90 % เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งาน ส่วนผสมที่เป็นแข็งจะทำหน้าที่เป็นจุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวของชิ้นส่วนพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาดเล็กลง ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแข็ง ประกอบด้วย พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเอสเทอร์ เป็นต้น โดยก่อนกระบวนการผสมอาจมีการปรับปรุงคุณภาพของแข็งที่ใช้โดยกระบวนการทางเคมีก่อนเพื่อให้มีสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมก่อนก็ได้

ส่วนพอลิเอสเทอร์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่ายโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายเป็นสารโมเลกุลเล็กลงได้ ซึ่งพอลิเอสเทอร์ยังสามารถจำแนกตามส่วนประกอบของสายโซ่เป็น 2 ประเภท คือ อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ และอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester) ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้หลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์แบบอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ เพราะสายโซ่มีความเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่า ในส่วนของอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester) จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยอาจต่อสายโซ่กับอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ให้เป็นโคพอลิเมอร์ (Aliphatic-aromatic copolyester) ก่อน จึงจะสามารถย่อยสลายได้

อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 กลุ่มใหญ่ๆ คือ Polybutylene succinate (PBS), Polycaprolactone (PCL), Polyhydroxyalkanoates (PHA), Polylactic acid (PLA) ซึ่ง 2 ชนิดแรกต้องใช้ออนอเมอร์จากปิโตรเคมี ส่วน PLA ใช้วัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ แต่ยังคงอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันเป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

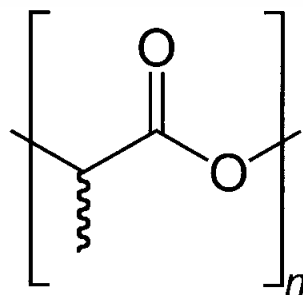
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) บางครั้งอาจถูกเรียกว่าพอลิแลกแทต (Polylactate) หรือพอลิแลกไทด์ (Polylactide) เป็นพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้จะผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1932 โดยนักวิจัยที่ชื่อ W.H. Carothers จากบริษัทดูปอนท์ (Dupont) ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันมีหลายบริษัทได้มีการผลิต PLA จนสามารถใช้ได้อย่างแพร่หลาย

2.2.1 ลักษณะและสมบัติโดยทั่วไปของ PLA

พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA) เป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastic) มีอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ประมาณ 173-178 °C มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ 50-80 °C และมีลักษณะโครงสร้างแบบอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ (Biodegradable) [2]

เนื่องจาก PLA มีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีค่ามอดุลัส (Modulus) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็ง (Stiffness) ที่สูง และสามารถขึ้นรูปได้ง่ายเช่นเดียวกับพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefin) ไม่ว่าจะเป็นการขึ้นรูปด้วยเทคนิค กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และกระบวนการอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น จึงนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม PLA ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการในการนำมาใช้งานบางการใช้งาน เช่น PLA มีความเปราะ (Brittleness) สูง และมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ที่ต่ำ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงมีการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการเติมสารเสริมแรง (Reinforcement) และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact) และสมบัติในการดึงยืด (Elongation) ให้ดีขึ้น [7]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการผลิต PLA

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์กรดแลคติก (Lactic acid; LA)

การผลิต PLA เริ่มต้นจากการสังเคราะห์กรดแลคติก (Lactic acid; LA) เพื่อใช้ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งกรดแลคติก (Lactic acid; LA) จะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) ประกอบอยู่ในโครงสร้างจึงทำให้มีความไวต่อปฏิกิริยา สามารถละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ แต่จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ ได้ โดยการสังเคราะห์ LA นั้นมีอยู่ 2 วิธี คือ

1) การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) [8]

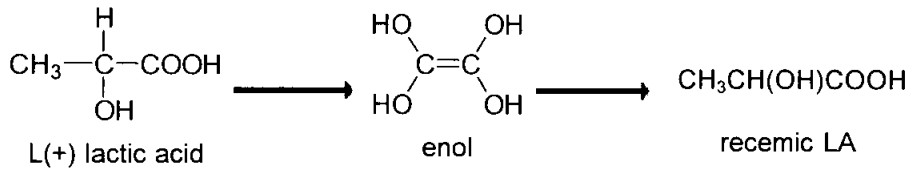
ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีนั้น จะใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากปิโตรเลียม อย่างเช่น อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) แล้วนำไปผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide; HCN) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วจะได้แลคโตไนไตรล์ (Lactonitrile) ออกมา ดังสมการ



จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยกรดเข้มข้นไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติกและเกลือแอมโมเนียม



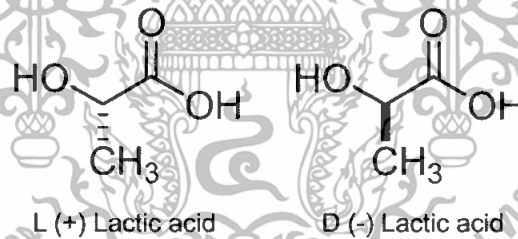
ซึ่งกรดแลคติกที่ได้จะอยู่ในรูปของผสมราซิมิก (Racemic mixture) ซึ่งก็คือ กรดดีแอล-แลคติก (DL-lactic acid) หรือ DLLA เนื่องจาก DLLA มีคาร์บอนอะตอมที่ไม่สมมาตร (Asymmetric carbon หรือ Chiral carbon atom) อยู่ในโครงสร้าง คือ หมู่ทุกหมู่ที่จับกับคาร์บอนอะตอมนี้จะแตกต่างกัน และอะตอมของไฮโดรเจนที่ติดอยู่นี้สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอินอลได้ ซึ่งนำไปสู่กระบวนการราซิไมเซชันด้วยตัวเอง (Autoracemization) เกิดเป็นของผสมราซิมิก โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ติดอยู่กับคาร์บอนนี้สามารถจัดเรียงตัวได้ทั้งซ้าย (L-form) และขวา (D-form)



รูปที่ 2.3 กระบวนการราซิไมเซชันของ LA [9]

2) การสังเคราะห์โดยการหมักด้วยจุลินทรีย์ [8,10]

ในกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์นั้น จะใช้วัตถุดิบทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด แล้วย่อยวัตถุดิบทางการเกษตรนี้ให้กลายเป็นแป้ง แล้วใช้เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ในการย่อยแป้งต่อไปก็จะได้น้ำตาลกลูโคส (Glucose) จากนั้นทำการหมักกลูโคสที่ได้ด้วยจุลินทรีย์ตามสภาวะที่เหมาะสม แล้วกรองแยก LA ที่ได้ออกมา ซึ่ง LA ที่ได้นั้นจะเป็นกรดแลคติก (LLA) หรือ กรดดีแลคติก (DLA) ขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่เลือกใช้ แต่นิยมใช้ LLA มากกว่าเพราะว่าเมื่อนำไปพอลิเมอไรซ์แล้วจะได้ผลึกที่ใส มีความเป็นผลึกสูง และไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ส่วน DLA เมื่อนำไปพอลิเมอไรซ์แล้วจะได้ผลึกที่ขุ่น มีความเป็นผลึกน้อยแล้วยังเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานในร่างกายมนุษย์อีกด้วย



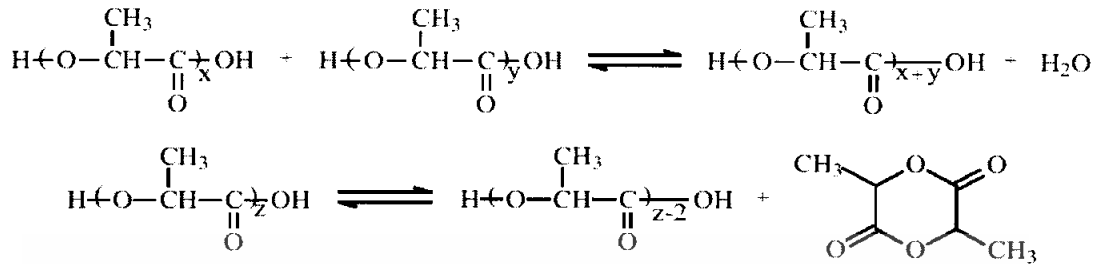
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกรดแลคติกในรูปแบบต่างๆ [11]

2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์ PLA

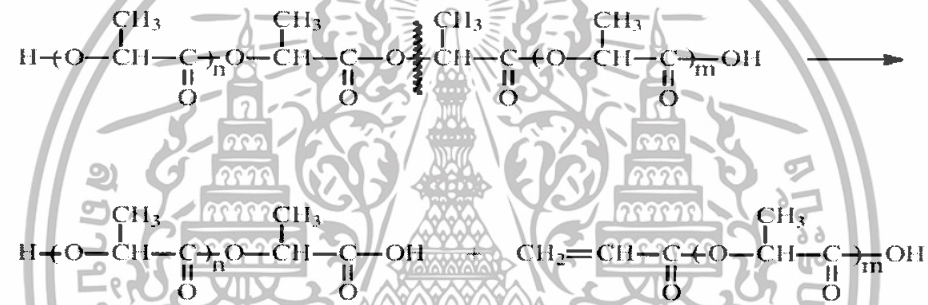
PLA เกิดจากการนำ LA มาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ พอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) และพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-opening polymerization)

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นนั้นไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการควบแน่นที่ใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization) นั้นจะเกิดกระบวนการควบแน่นของวงแลคไทด์ (Lactide) แข่งกับ PLA เป็นผลให้ได้ปริมาณ PLA น้อย และนอกจากนี้ PLA ที่ได้มานั้นยังเกิดการสลายตัวได้ง่ายอีกด้วย ส่วนกระบวนการควบแน่นที่ใช้วิธีเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอไรเซชันที่เป็นแบบสารละลาย (Solution polymerization) นั้นจะเกิดการถ่ายโอนสายโซ่โดยตัวทำละลาย จึงทำให้ PLA ที่ได้ออกมานั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [8]



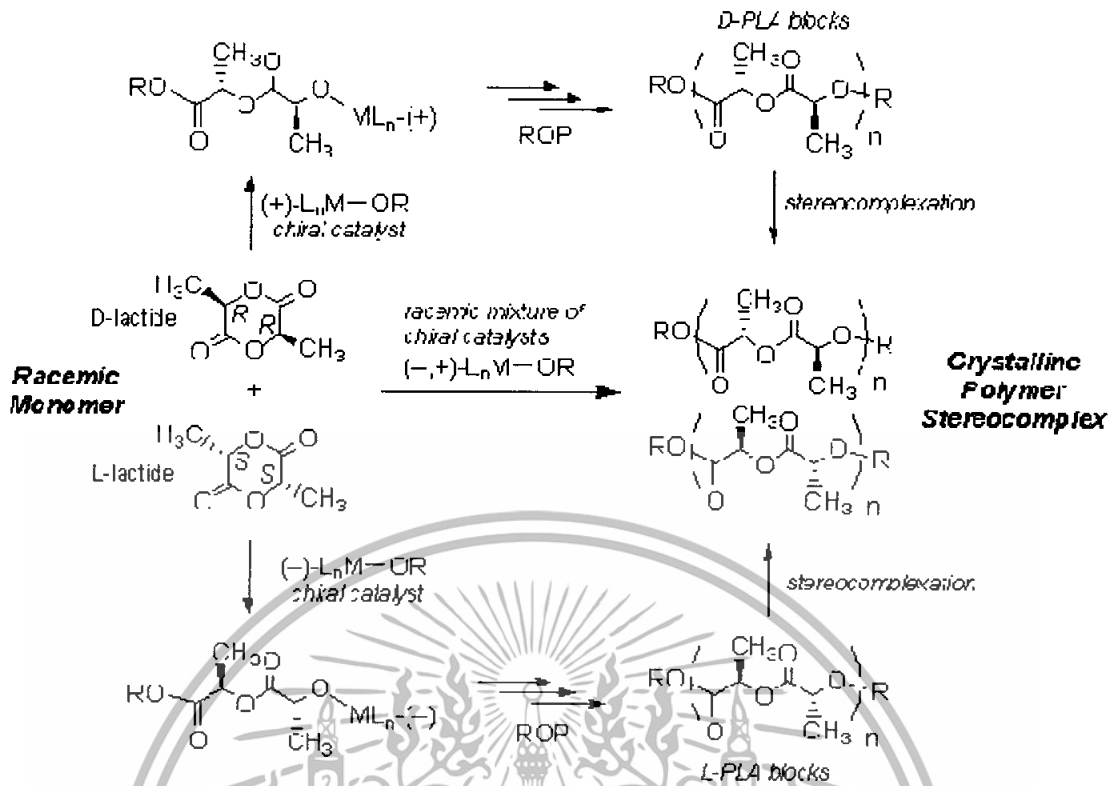
รูปที่ 2.5 สมดุลระหว่างปฏิกิริยาควบแน่นของ LA [9]



รูปที่ 2.6 การตัดทอนสายโซ่ PLA อันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal break-up of PLA) [9]

การพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงนั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจาก PLA ที่ได้จากกระบวนการนี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี การทำการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงนั้นมักใช้ทิน ทู คลอไรด์ (Tin (II) chloride; SnCl_2) หรือ แสตนนัส คลอไรด์ (Stannous chloride) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2]

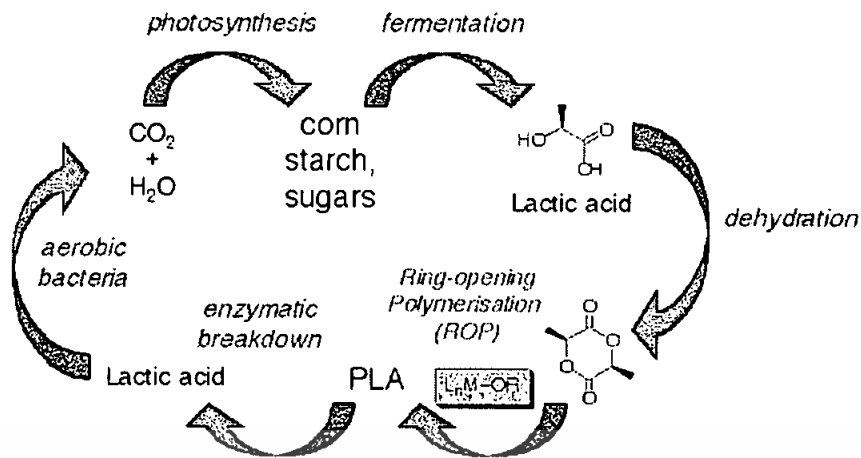
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภาพการสังเคราะห์ PLA โดยการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ROP) [12]

2.2.3 การย่อยสลายของ PLA

PLA ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะคอมโพสท์ (Compost) ที่อุณหภูมิ 60 °C มีการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่พันธะเอสเตอร์ของ PLA ทำให้สายโซ่ถูกตัดสั้นลง จนกลายเป็น LA มอนอเมอร์ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ ในขั้นตอนนี้พลาสติกจะมีสมบัติที่แตกหักเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจะถูกย่อยสลายต่อโดยจุลินทรีย์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) หรือก๊าซมีเทน (CH₄) โดยปฏิกิริยาทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะใช้เวลาประมาณ 4 เดือน ถึง 2 ปี ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น สภาวะแวดล้อม และปัจจัยภายในของตัว PLA เอง เช่น น้ำหนักโมเลกุลและองศาความเป็นผลึก



รูปที่ 2.8 แผนภาพวัฏจักรโดยย่อของพลาสติก PLA [13]

2.2.4 การประยุกต์ใช้งานของ PLA [1]

PLA เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติทางความร้อนและเชิงกลที่ดี โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับการควบคุมสมบัติเชิงกล และระยะเวลาในการย่อยสลาย โดยการปรับเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุล และสูตรในการผสม จึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็น ถุงหิ้ว (Bags) ขวดบรรจุน้ำผลไม้ (Bottles, Fruit juice) แผ่นฟิล์ม (Film) แผ่นฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Bi-axially oriented film) อุปกรณ์ทางอาหาร (Food service applications) เส้นใยไม่ทักทอ (Non-woven) ผลิตภัณฑ์เพื่อการบรรจุ (Packaging) และอื่นๆ อีกมากมาย

2.3 แป้ง (Starch) [14-19]

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

แป้ง หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนอื่น เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก แป้งที่มีสิ่งเจือปนอื่นอยู่มากเรียกว่า แป้งฟลาวัวร์ (Flour) ส่วนแป้งที่มีบริสุทธิ์สูง จะเรียกว่า แป้งสตาร์ช (Starch) แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่า แป้งดิบ (Raw starch หรือ Native starch) ซึ่งจะตรงข้ามกับแป้งที่ถูกตัดแปรหรือแปรรูปแล้ว ที่เรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch)

เราสามารถพบแป้งได้จากพืชชั้นสูง ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ถูกสะสมอยู่ จะพบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนของพืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เกิดจากโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันจนมีโมเลกุลขนาดใหญ่ แป้งเป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวได้ดีกับน้ำ แต่จะไม่ละลายในน้ำเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ ง่าย ราคาถูก มีเสถียรภาพทางความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อน ซึ่งแป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แป้งที่สำคัญที่มีการใช้กันทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและแป้งมันสำปะหลัง

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย หน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group ในธรรมชาติพบแป้งในลักษณะที่เป็นเม็ดแป้งขนาดเล็กมีโครงสร้างเป็นกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยมีส่วนที่เป็นผลึกสูงกว่าส่วนที่เป็นอสัณฐานมาก แป้งมีจุดหลอมเหลว (T_m) อยู่ในช่วง $160-200^\circ C$ แป้งมีองค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) และสารตัวกลาง (Intermediate material) ซึ่งการที่แป้งมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

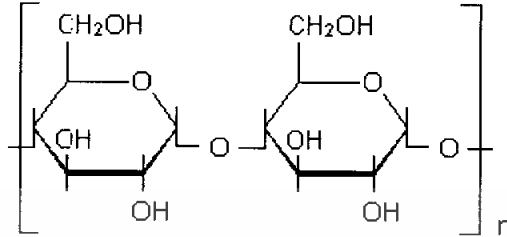
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติที่สำคัญบางประการของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน [14]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อะไมโลส (Amylose)

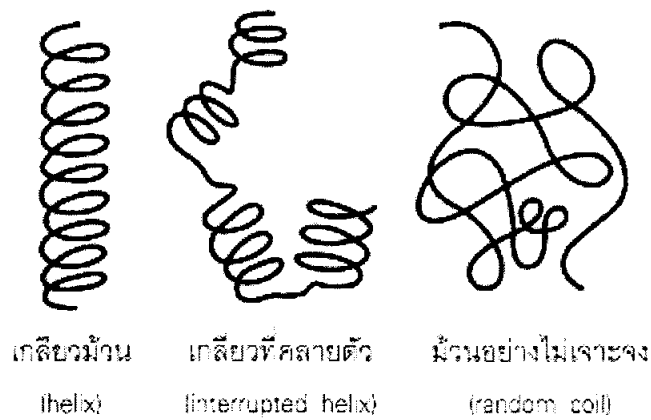
อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 200 - 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของอะไมโลส [16]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีองศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Degree of Polymerization; DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังรูปที่ 2.10 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6500 ถึง 160000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจงและจะไม่ละลายในสารละลายสำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง

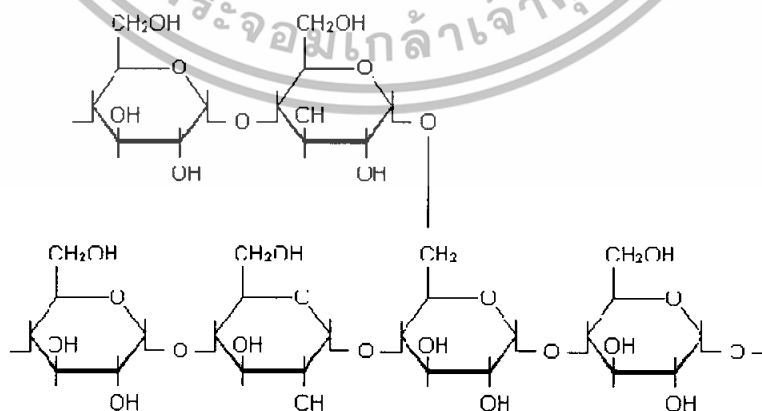


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะเกลียวของอะไมโลส [14]

อะไมโลสมีรูปร่างเป็นเส้นตรงเคลื่อนไหวได้ง่าย เมื่อเติมน้ำลงไปจะรวมตัวกันเป็นเส้นยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ เกิดเป็นสารละลายขุ่น และความสามารถในการละลายน้ำจะลดลง อะไมโลสสามารถทำปฏิกิริยากับไอโอดีนได้ สารประกอบเชิงซ้อนให้สีน้ำเงิน ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลสในแป้งได้ อะไมโลสที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในรูปของเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัว โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสอยู่ประมาณ 15-25%

2) อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

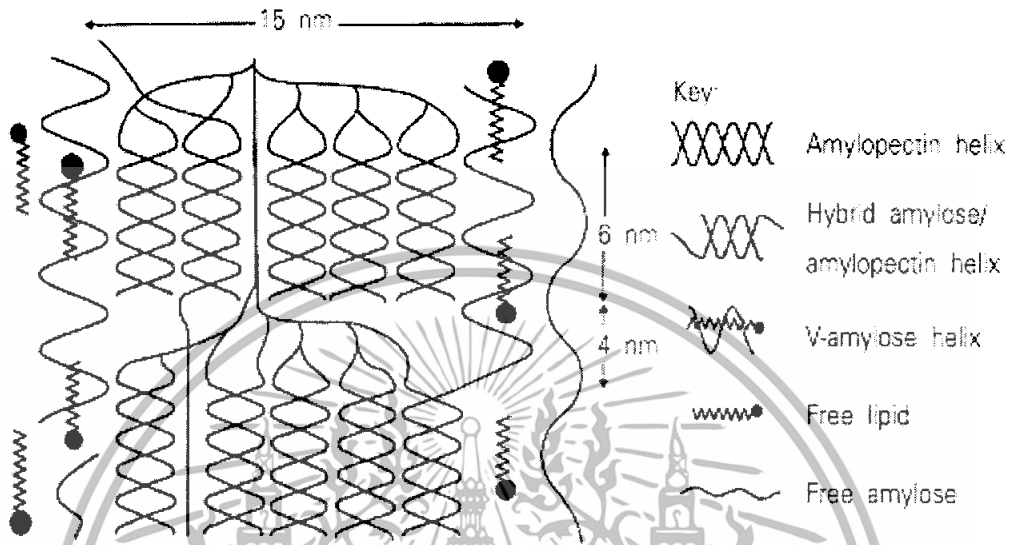
อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.11



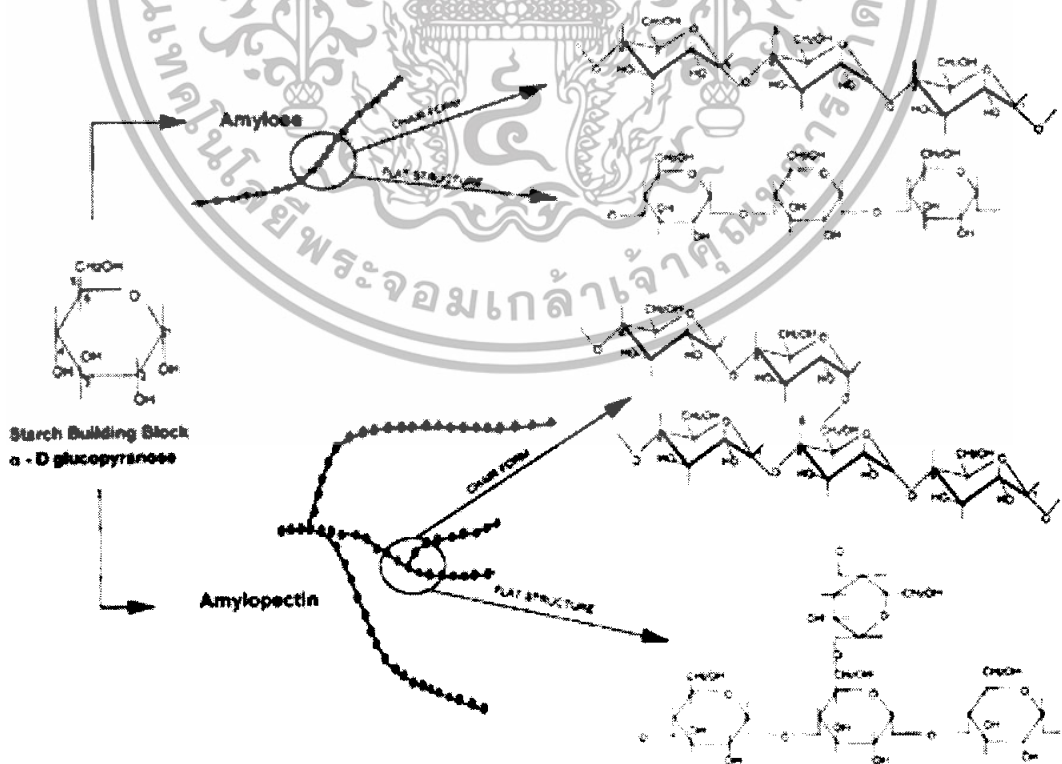
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างอะไมโลเพกติน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน [15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ส่วนสารมัธยันต์ (Intermediate material) มีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิดเท่านั้น องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส

2.3.4 สมบัติของแป้ง

สมบัติของแป้งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ซึ่งสมบัติที่สำคัญของแป้ง ได้แก่ การดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย และความหนืด

การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย คือ เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งปัจจัยการดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย ได้แก่

1. ชนิดของแป้ง
2. ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง หรือ จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง
3. สิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต
4. สมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี
5. ปริมาณที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว

ส่วนความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ความหนืดที่เกิดขึ้นของน้ำแป้ง สามารถวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืด ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง และการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ

2.2.5 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบจำนวน (Number average diameter) ประมาณ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (Polarized microscope) จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า ไบฟริงเจนซ์ (Birefringence) โดยแป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [14]

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

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ ซึ่งอยู่ประมาณ 18 - 23 % และมีองศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization; DP) ประมาณ 1100 ถึง 3220 ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณผลึก (Crystalline regions) หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก

ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า บริเวณอสัณฐาน (Amorphous regions) เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

2.3.6 แป้งดัดแปร (Modified starch)

แป้งดิบ (Nature starch) มีสิ่งเจือปนอื่น เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือเล็กน้อย แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกขจัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (Starch) แป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูงจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการผลิตดัดแปร (Modified starch) โดยการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจล การคืนตัวและการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็ง (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลที่ดีขึ้น มีสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งในบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือยังไม่เหมาะกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติบางอย่าง แป้งดัดแปร (Modified starch) ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 [14] หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่างๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการปนเปื้อนของสารประกอบเคมีอื่นๆ ต่ำ เหมาะต่อการนำมาทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนออสัณฐานอะไมโลเพกตินจะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด

2.3.7 การดัดแปรแป้งทางเคมี

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้งโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเป็นเจลหรือเจลาติไนเซชัน (45-50 °C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งขึ้นที่พื้นผิวบริเวณทั้งส่วนเปลือกและภายในส่วนออสัณฐาน เนื่องจากเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส ประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับไอโอดีนที่มีน้ำเป็นตัวกลาง เม็ดแป้งจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดแป้งแห้งกับไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้นดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่ชุ่มน้ำหรือเม็ดแป้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่าง เม็ดแป้งจะพองตัวและสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1000 ได้

ในระหว่างการดัดแปรแป้งทางเคมีจะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลได้โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต หรือโซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม การดัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำปฏิกิริยาน้อย ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ทำในน้ำ ให้ค่าองศาการแทนที่ (Degree of Substitution; DS) ต่ำ ประมาณ 0.1-0.2 ใช้วิธีการตัดแปรหลายวิธีร่วมกัน ให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับปรุงได้

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

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

แป้งตัดแปรที่ได้จากการเกิดอนุพันธ์ แป้งชนิดของปฏิกิริยาการตัดแปรออกเป็น 3 ชนิด คือ

- อีเทอร์ิฟิเคชัน (Etherification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของอีเทอร์ (O-CH₃)
- เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง โดยแขนของเอสเทอร์ (R-COCH₃)
- การเชื่อมโยง (Crosslinking) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า

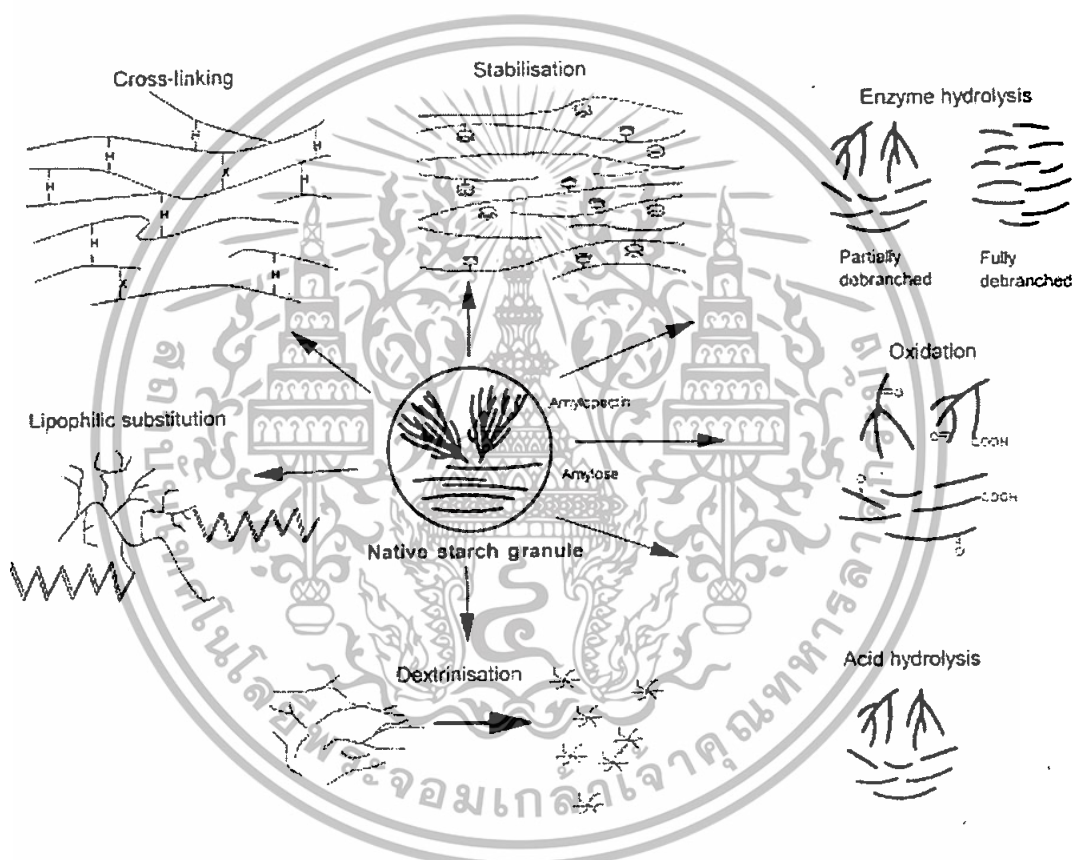
ทั้งแป้งอีเทอร์และแป้งเอสเทอร์จัดเป็นแป้งที่มีเสถียรภาพ (Stabilized starch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับ Etherifying agent หรือ Esterifying agent ในสภาวะเบส โดยทั่วไปแป้งอีเทอร์ และแป้งเอสเทอร์ที่ใช้ในทางการค้ามีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 หมู่ฟังก์ชันต่างๆจะเข้าแทนที่ภายในกลูโคสที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ส่วนใหญ่ แป้งอะซิเตต ไฮดรอกซีอัลคิลสตาร์ช คาร์บอนซีเมทิลสตาร์ช และแคทไอออนิกสตาร์ช จะมีหมู่แทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ส่วนหมู่แทนที่อื่นๆ จะเข้าแทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 สำหรับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะมีหมู่ฟังก์ชันเข้ามาแทนที่น้อยมาก

การแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชัน 1 หมู่ภายในโมเลกุลกลูโคสของแป้งอีเทอร์หรือแป้งเอสเทอร์ทำให้โมเลกุลอะไมโลส โครงสร้างของเม็ดแป้งดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้การยับยั้งการคืนตัวของเม็ดแป้งและทำให้มีความหนืดคงตัว แสดงลักษณะเป็นแป้งที่ให้ความคงตัว สำหรับการเข้าแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ของแป้งเชื่อมโยง มีจุดประสงค์เพื่อสร้างพันธะเชื่อมโยงข้ามระหว่างหมู่อะไมโลเพกติน ทำให้อัตราการพองตัวของแป้งลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งอนุพันธ์จะมีสมบัติดังนี้

1. จะมีคุณสมบัติเจลาตินในเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ
2. จะมีการพองตัว การละลายและความข้นมากกว่าแป้งดิบ
3. ความหนืดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของสารให้อนุพันธ์และขนาดโมเลกุลของอนุพันธ์ ทั้งนี้จะไม่แปรผันทางเดียวกัน เช่น เพิ่มการแทนที่ระดับหนึ่ง แป้งอนุพันธ์ให้ความหนืดมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอีกระดับหนึ่ง อาจจะทำให้ความหนืดน้อยลง เป็นต้น
4. จะให้สมบัติเป็นสารให้ความคงตัว (Stabilizing agent) เช่น ทนต่อการคั่นตัวหลังแช่แข็ง (Freeze-thaw) เป็นต้น



รูปที่ 2.14 แสดงการดัดแปรแป้งดัดแปรแต่ละชนิด [17]

2.3.8 แป้งเอสเทอร์

แป้งเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่เอสเทอร์ของสารเคมี แป้งเอสเทอร์ที่นิยมใช้ในทางการค้า ได้แก่ แป้งอะซิเตตและแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ของสารเคมี แป้งดัดแปรทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ และรักษาความหนืดไว้ได้ดี เมื่อเกิดเป็นเจลจะมีความใส มีความอ่อนตัวและยึดเกาะกันเป็นเนื้อเดียวกัน มีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเป็นสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด หมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้าแทนที่ หมู่ไฮดรอกซิลในหน่วยกลูโคสเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์แป้งเอสเทอร์ ได้แก่ อะซิเตต (Acetate) เบนโซเอต (Benzoate) ฟอสเฟต (Phosphate) ซัคซิเนต (Succinate) มาลิเนต (Malinate) เป็นต้น ในการผลิตแป้งเอสเทอร์สามารถแบ่งตามระดับการทำปฏิกิริยาออกเป็น 3 ชนิด คือ

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

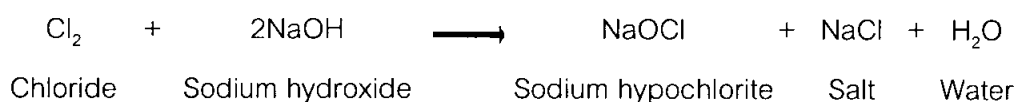
2.3.9 แป้งออกซิไดซ์

การดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันเป็นการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง สมบัติทางเคมี และขนาดของโมเลกุลเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป ได้แป้งดัดแปรที่เรียกว่า แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) หรือคลอรีเนต-สตาร์ช (Chlorinated starch) หรือ ออกซิสตาร์ช (Oxystarch) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงหมู่มไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่มแอลดีไฮด์ หมู่มคีโตน หรือหมู่มคาร์บอกซิล และมีการดัดโมเลกุลแป้ง ทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวเพิ่มขึ้น แป้งออกซิไดซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกินร้อยละ 5.5 และมีกลุ่มคาร์บอกซิลไม่เกินร้อยละ 1.1 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

1. การผลิตแป้งออกซิไดซ์

ในการผลิตแป้งออกซิไดซ์ทางการค้าจะใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์หรือแคลเซียมไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดซ์

การเตรียมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ทำโดยเติมแก๊สคลอรีนอย่างช้าๆ ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เย็นดังปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (24,650 แคลอรี) ในการผลิตต้องควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาให้ต่ำกว่า 30°C สารละลายไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์แป้งโดยทั่วไปจะมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 5-10% และมีความเป็นเบสเพียงเล็กน้อย

การผลิตแป้งออกซิไดซ์ ทำได้โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ลงในสารละลายแป้ง ปริมาณของสารละลายไฮโปคลอไรท์ที่ใช้วัดเป็น % Available chlorine ต่อน้ำหนักแป้งโดยทั่วไป % Available chlorine ในแป้งสูงสุดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะไม่เกิน 5 -6 % เมื่อเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์จะเกิดปฏิกิริยากับเม็ดแป้งดังนี้

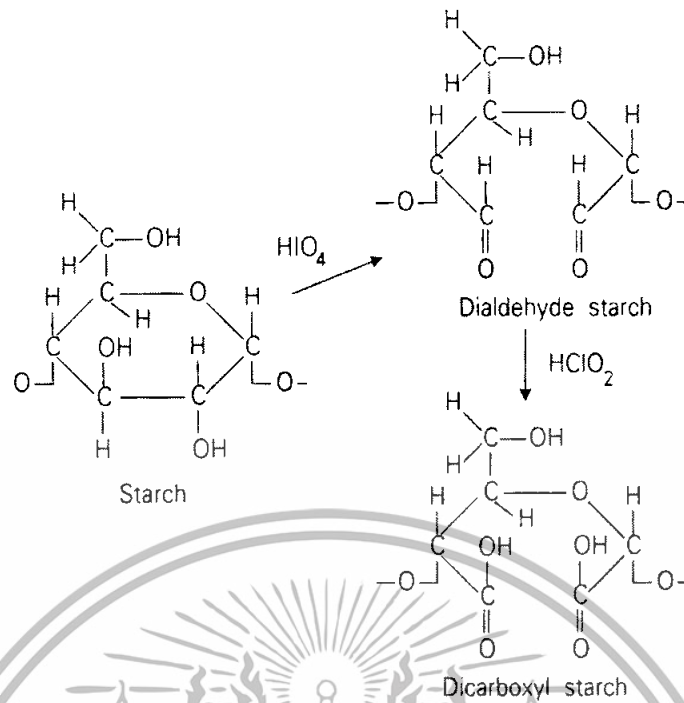


หลังจากเติมสารละลายไฮโปคลอไรท์จนถึงจุดที่ต้องการแล้ว ปรับ pH ของสารละลายแป้งให้เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย (pH 6.0-6.5) กำจัดไฮโปคลอไรท์ที่เกินโดยเติมตัวรีดิวซ์ เช่น ไฮโซลไฟต์ หลังจากนั้นล้างสารละลายแป้งโดยการกรองสูญญากาศแบบต่อเนื่อง (Continuous vacuum filter) หรือ Dorr-Clones กำจัดน้ำออกจากสารละลายโดยใช้เครื่องกรองสูญญากาศ (Vacuum filter) หรือการหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge) ทำให้แห้งใน Hot air dryer จนได้ความชื้นที่สมควร

เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นในระหว่างดำเนินปฏิกิริยาจะต้องระมัดระวังความร้อนที่จะเพิ่มขึ้น โดยการใช้สารละลายที่เย็นเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาหรือให้ความเย็นแก่สารละลายในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา ถ้าอุณหภูมิในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่จะทำให้เม็ดแป้งในบางส่วนละลายหรือพองตัว จะทำให้เกิดการสูญเสียของเม็ดแป้งออกซิไดซ์ในระหว่างกำจัดน้ำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอะมิโลเพกทินของแป้ง จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ 6 จะไม่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีพันธะแบบ 1,6 ไกลโคลลอสิดิกของอะมิโลเพกทิน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่ง 2 และ 3 ในการผลิตทางการค้าจะควบคุมให้มี pH 7-8 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนที่ 2 และ/หรือคาร์บอนที่ 3 จะเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอกซิล และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อพันธะระหว่างคาร์บอนที่ 2 และ 3 จะแตกออกได้ ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (Dialdehyde starch) (รูปที่ 2.15) จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์ที่เป็นด่างจะทำให้พันธะระหว่างหมู่กลูโคไพราโนสแตกออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับแป้งได้ไดคาร์บอกซิลสตาร์ช (Dicarboxyl starch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิด Dialdehyde starch และ Dicarboxyl starch [14]

2. สมบัติของแป้งออกซิไดซ์และการนำไปใช้

สมบัติของแป้งออกซิไดซ์ คือ แป้งมีลักษณะเป็นประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในตำแหน่งโมเลกุลอะไมโลส ทำให้อัตราการคืบตัวของแป้งเปียกลดลง แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใส่แป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ แป้งเปียก, สารละลาย และฟิล์มมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแป้งขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้น และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์จะไปละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์และล้างออกจากแป้ง

เม็ดแป้งของแป้งออกซิไดซ์มีลักษณะเหมือนเม็ดแป้งดิบ มีสมบัติโพลาไรเซชัน (Polarization) และการย้อมสีไอโอดีนคงเดิม เม็ดแป้งจะแตกตัวออกตามรอยแยกมากกว่าที่จะพองตัวเหมือนเม็ดแป้งดิบ เม็ดแป้งออกซิไดซ์มีความว่องไวต่อเมทิลีนบลูและสีย้อมประจุบวกอื่นๆ เช่น เม็ดแป้งของออกซิไดซ์ดูดซับสีย้อม ในขณะที่เม็ดแป้งดิบจะไม่ดูดซับสีย้อม ดังนั้นเมื่อย้อมเม็ดแป้งด้วยเมทิลีนบลูแล้วล้างส่วนที่ไม่ถูกดูดซับออก จะสามารถจำแนกเม็ดแป้งออกซิไดซ์ออกจากเม็ดแป้งดิบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์มีสมบัติเหมาะสมในการทำมาเฟ็งและลูกอม ซึ่งจะมีอายุการเก็บที่ยาวนานกว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งย่อยด้วยกรดเนื่องจากความเสถียรในภาวะที่มีน้ำตาลและความต้านทานต่อการหดตัวของแป้งออกซิไดซ์

แป้งออกซิไดซ์ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แข็ง และใสมากขึ้น มีแนวโน้มในการหดตัวหรือแตกน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งย่อยด้วยกรดหรือแป้งดิบ มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า เนื่องจากสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดระหว่างการผลิตออกซิเดชัน

ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ชูปังกิ่งสำเร็จรูป หรืออาหารประเภทของเหลวที่ต้องการความข้น เช่น น้ำสลัด มายองเนส ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษให้เรียบและแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษสำหรับกันหมึกซึม ใช้สำหรับเคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้เส้นด้ายสั้นและมีความยืดหยุ่นใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝาน้ำง ฉนวนกระเบื้อง

2.3.10 แป้งพรีเจล

แป้งพรีเจล หรือ แป้งพรีเจลาทีไนซ์ บางครั้งอาจเรียกว่าอัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยให้ความร้อนแก่แป้ง ทำให้แป้งสุกหรือเกิดการกลายเป็นเจล (Gelatinize) แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องทำแห้งแบบฝง (Spray dryer) หรือ เครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ (Extruder) และบดให้ละเอียด ได้แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล เหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ไล้กิ่งสำเร็จรูป ส่วนผสมของซูปผง

1. การผลิตแป้งพรีเจล

การผลิตแป้งพรีเจลสามารถใช้ได้ทั้งแป้งดิบ และแป้งดัดแปรเคมีชนิดต่างๆ โดยป้อนแป้งในรูปสารแขวนลอยหรือแป้งเปียก ลงในเครื่องทำแห้ง ซึ่งในสารแขวนลอย จะมีปริมาณของแข็งได้สูงถึง 44% และ 42% นอกจากนี้มีการเติมสารช่วยการกลายเป็นเจล (Gelatinization aid) เช่น เกลือหรือเบส เติมน้ำช่วยป้องกันไม่ให้แป้งติดกับลูกกลิ้ง (Surface active agent) เติมน้ำเช่น โซเดียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต เกลืออะลูมิเนียม เพื่อป้องกันแป้งเกาะกันเป็นก้อน เติมน้ำปรุงแต่งรส หรือส่วนผสมอื่นๆ ในการป้อนแป้งสู่เครื่องทำแห้งต้องมีการควบคุมให้แป้งมีความหนาสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

เมื่อผ่านน้ำแป้งสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้น้ำในน้ำแป้งระเหยออกไป ได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบบนผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกดูดออกโดยใบมีด หลังจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นนำไปอบแห้งและบดให้ละเอียด ผ่นแบ่งที่ฉาบบนลูกกลิ้งที่บางเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ และถ้าผ่นแบ่งหนาเกินไปจะทำให้ใบมีดทำงานไม่สะดวก

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการผลิตแป้งพรีเจลมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบสเปร์ย์ และเครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งเครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถมีอัตราการผลิต (ผลิตภัณฑ์/เวลา) ได้สูง ส่วนการใช้เครื่องมืออัดแรงสูงอย่างเครื่องอัดรีด มีอัตราการผลิตต่ำแต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะดวก การควบคุมคุณภาพ ภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นเครื่องมือทั้งสองแบบ

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีทั้งแบบเดี่ยว (Single) และแบบคู่ (Double) โดยต้องมีการปรับอุณหภูมิของผิวลูกกลิ้งและอัตราการหมุน ให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นและความสามารถในการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิด สำหรับลูกกลิ้งคู่จะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เท่ากันตลอดแนวความยาวของลูกกลิ้ง และให้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในลูกกลิ้ง อัตราการหมุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของโลหะที่ใช้ทำลูกกลิ้ง

แป้งบางชนิดที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว เมื่อนำมาผลิตแป้งพรีเจลจะทำให้เกิดกลิ่นหืน (Rancidity) เนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลาย สามารถแก้ไขกลิ่นหืนนี้ โดยการเติมเกลือออร์โทฟอสเฟต หรือทำการสกัดกรดไขมันด้วยเมทานอลและแอมโมเนียเพื่อปรับปรุงกลิ่นรสของแป้ง

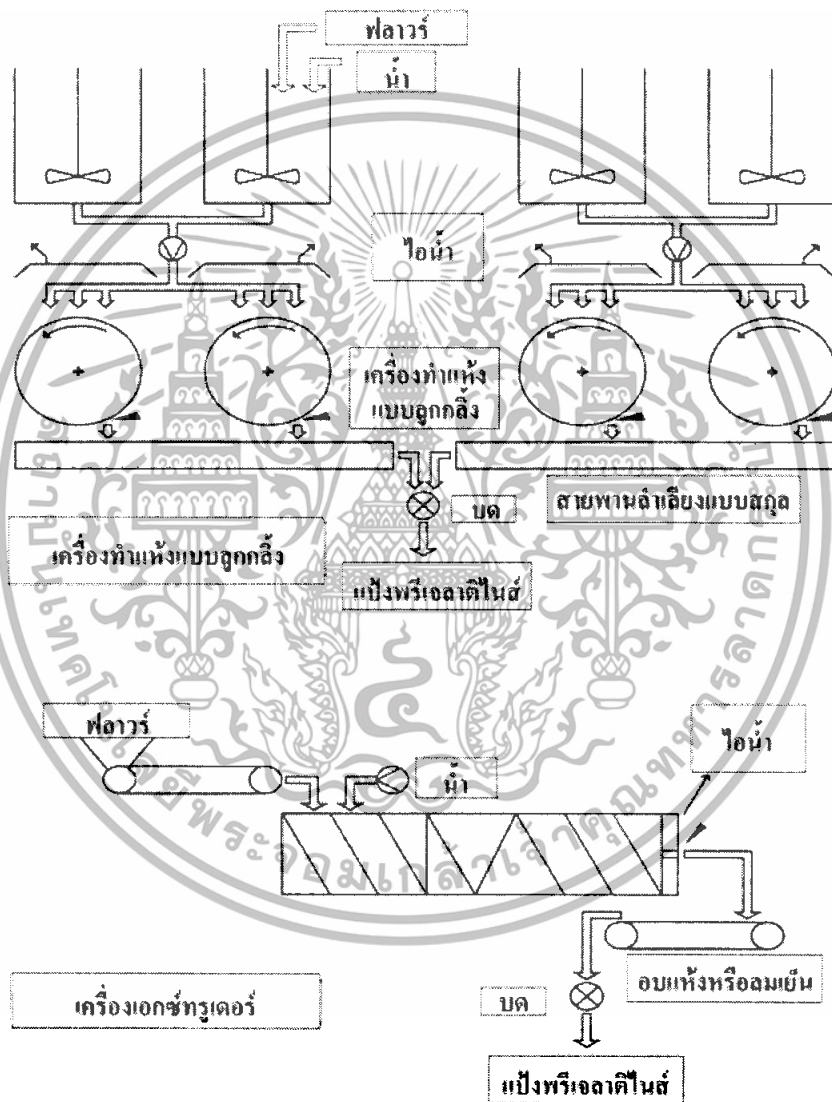
2. สมบัติของแป้งพรีเจลและการนำไปใช้

แป้งพรีเจลสามารถละลายและกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีการเกิดเจลหรือแนวโน้มในการเกิดเจลลดลง และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่สามารถละลายและให้ความหนืดได้ทันที โดยไม่ต้องใช้ความร้อน เช่น ในขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ไล้กิ้งสำเร็จรูป พาย ครีมหน้าขนมต่างๆ ส่วนผสมของซุปรอง ใช้เป็นสารยึดเกาะในอาหารประเภทเนื้อเพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้น และอุ้มน้ำในผลิตภัณฑ์ ใช้ในการผลิตขนมเค้กเพื่อช่วยการดูดซับน้ำและเก็บฟองอากาศได้ดีขึ้น ทำให้เค้กมีความชุ่มชื้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้น ได้ลักษณะเนื้อเค้กที่มีความสม่ำเสมอ ใช้เป็นส่วนผสมในของหวานที่มีลักษณะคล้ายโยเกิร์ต ใช้เป็นตัวปรับเนื้อสัมผัส (Texturizing agent) สำหรับชีเรียลข้าวโอ๊ต ใช้เป็นส่วนผสมในขนมขบเคี้ยว ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวสำหรับส่วนผสมของอาหารแช่แข็ง เช่น Milk Shake ใช้ในเภสัชกรรม เป็นสารยึดเกาะและสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด ซึ่งจะช่วยให้เม็ดยาไม่เสียสมบัติในการไหลและการยึดเกาะเป็นเม็ดโดยนำแป้งพรีเจลมาละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องและเติมในส่วนผสมของยา หรือผสมเป็นผงแห้งกับส่วนผสมอื่นๆ แล้วเติมน้ำที่หลัง ซึ่งจะให้สมบัติในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดเกาะดีกว่าการใช้แป้งเปียก นอกจากนี้การที่สามารถใช้แป้งพรีเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการให้ความร้อนสำหรับการเตรียมแป้งเปียก

ในอุตสาหกรรมกาวและกระดาษ ใช้แป้งพรีเจลเป็นกาวติดผนังห้อง ใช้เคลือบกระดาษ และในด้านอื่นๆใช้เป็นสารยึดเกาะในการถลุงถ่านหิน ใช้เป็นตัวป้องกันคอลลอยด์ (Protective colloid) สำหรับสีที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Water base paint) หรือใช้ผสมในน้ำยาช่วยในการเจาะบ่อน้ำมัน (Oil well drilling mud) เพื่อควบคุมการสูญเสียน้ำ



รูปที่ 2.16 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การย่อยสลายของแป้ง

1. การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยด่าง

1.1 การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหน้าและผนังเซลล์ได้

1.2 การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยด่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

1.3 การเกิดรอยด่าง (Soiling)

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

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

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

- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายไซนอนรีติวซิง และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 6 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้งและเดกตรินไปเป็นกลูโคส

- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายนอนรีติวซิง (Non-reducing end)

2. การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical hydrolysis)

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาตีไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยระดับถึงที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไชโคลเดกซ์ทริน

2.5 สารช่วยผสม (Compatibilizers)

จากการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน คือ พลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing) มีค่าเป็นบวก ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด Thermodynamic miscibility เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการผลิตพอลิเมอร์ผสม ซึ่งความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ผสมนี้ จะถูกกำหนดโดยสมมูลของเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) โดยความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึง ความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือการทำปฏิกิริยาขณะทำการผสม ซึ่งจะส่งผลต่อค่าพลังงานอิสระในการผสมสารโมเลกุลเล็ก ๆ นั้น เอนโทรปีจะมีค่าสูงพอที่จะเกิดความเข้ากันได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ เอนโทรปีจะมีค่าต่ำจนเกือบเป็นศูนย์ จึงทำให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ถูกกำหนดโดยเอนทัลปีเพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการผสม เป็นดังสมการ [20]

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

โดย G = พลังงานอิสระในการผสม (Free energy of mixing)

H = เอนทัลปี (Enthalpy)

S = เอนโทรปี (Entropy)

T = อุณหภูมิ (Temperature)

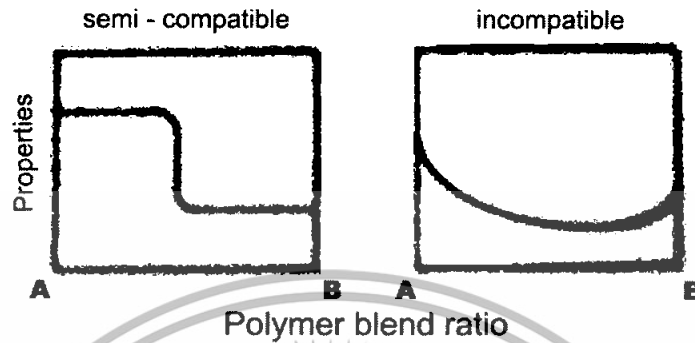
การที่พอลิเมอร์จะสามารถผสมเข้ากันได้ พลังงานอิสระในการผสมของระบบจะต้องมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\Delta G < 0$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Φ เป็นเศษส่วนโมล (Molar fraction) ของพอลิเมอร์หนึ่งองค์ประกอบ เมื่อนำสมบัติและอัตราส่วน ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองมาเขียนกราฟ จะได้กราฟในลักษณะรูปตัวเอส ในกรณีที่สามาเข้ากันได้เข้ากันได้ดีบ้าง และได้กราฟรูปตัวยู ในกรณีที่ไม่สามารถเข้ากันได้ ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์ผสมกับอัตราส่วนขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม [20]

โครงสร้างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้ เรียกว่า “Heterogeneous blender” ซึ่งจะมีลักษณะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) ของพอลิเมอร์หลักชนิดหนึ่ง และมีวัฏภาคการกระจาย (Dispersed phase) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งอยู่ภายใน ซึ่งแยกกันอยู่อย่างชัดเจนโดยมีลักษณะเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Phase boundary) พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้นั้น จะมีข้อบกพร่องหลายประการดังนี้ [21]

1. สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดี
2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค (Interfacial tension) สูง
3. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป
4. สมบัติเชิงกลต่ำ

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยมีการนำสารช่วยผสม มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคการกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็กแล้วทำให้สมบัติยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. Non-reactive Blending คือการเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสสูตรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการ

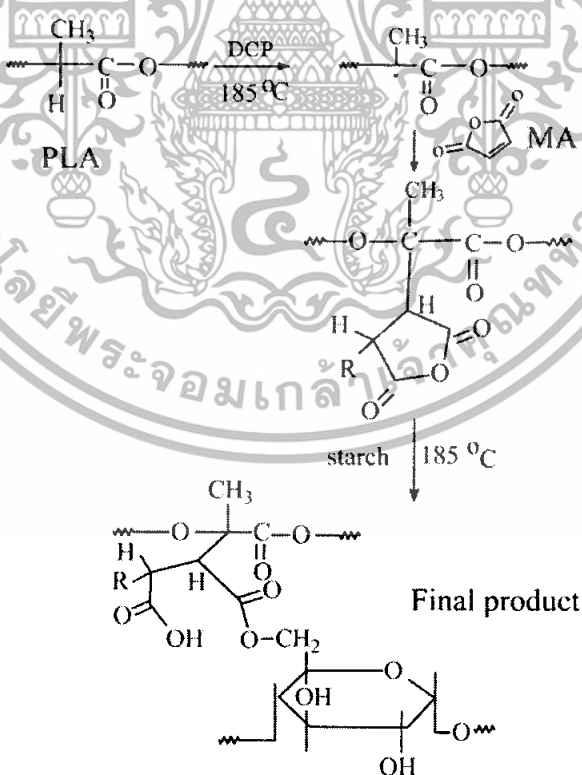
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้พอลิเมอร์รวมแบบไดบล็อก แบบไตรบล็อก แบบกราฟท์ หรือแบบสุ่ม

2. Reactive Blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนการเดินสารช่วยผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะผสม หรืออาจเกิดการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

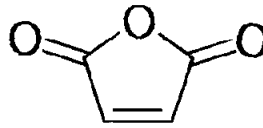
ในงานวิจัยนี้สารช่วยผสมที่นำมาใช้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และแป้งดัดแปร คือ PLA ต่อกิ่งมาลิกแอนไฮไดรด์ (PLA-g-MA) และ MDI ซึ่งสารช่วยผสมที่ดีนั้นควรมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และแป้งดัดแปร

มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุล $C_4H_2O_3$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 98.06 กรัมต่อโมล เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีนหรือใช้บิวเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน มาลิกแอนไฮไดรด์มักใช้พอลิเมอร์รวมแบบกราฟท์ ทำปฏิกิริยาได้ดีกับอนุโมลิสระของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยมีตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) หมู่แอนไฮไดรด์ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18

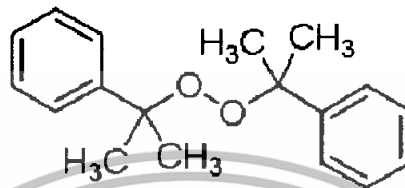


รูปที่ 2.18 กลไกปฏิกิริยาเคมีของ PLA, แป้ง, MA และตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา DCP [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

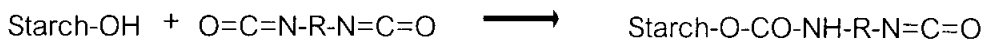


รูปที่ 2.19 โครงสร้างของมาลิกอิกแอนไฮดรายด์ [22]

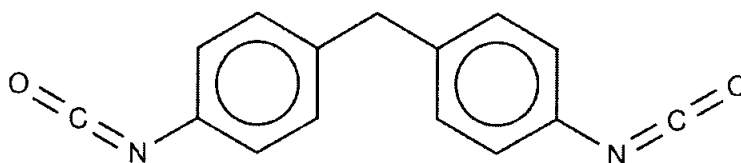


รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ DCP [23]

เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) ประกอบด้วยหมู่ไอโซไซยาเนต 2 หมู่ ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ 4 ขั้นตอน [21] เริ่มจากการทำปฏิกิริยาไนเตรชันระหว่างเบนซีนกับกรดไนตริกออกมาอยู่ในรูปไนโตรเบนซีน จากนั้นนำไนโตรเบนซีนมาทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันกับไฮโดรเจนกลายเป็นอะนิลีน ทำปฏิกิริยาระหว่างอะนิลีนกับฟอร์มาดีไฮด์เป็นเมทิลีนไดอะนิลีน (methylenedianiline; MDA) หรือ ไดอะมิโนไดฟีนิลมีเทน (diaminodiphenylmethane; DADPM) และสุดท้าย MDA/DADPA ทำปฏิกิริยากับฟอสจีนออกมาเป็น เมทิลีน ไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต หรือ MDI ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $C_{15}H_{10}N_2O_2$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 250.25 กรัมต่อโมล สามารถละลายในออกเทน เบนซีน และเคโรซีน เมื่อ MDI ทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลของ PLA และหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง เกิดเป็นพันธะยูรีเทน (Urethane linkage, $-RNHCOOR'$) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [25]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของเมทิลลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต [24]

2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [26]

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อทำให้วัสดุอ่อนตัวและโค้งงอได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ควรมีสมบัติ ดังนี้

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูงและมีน้ำหนักโมเลกุลอย่างน้อยประมาณ 300
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกับพลาสติกที่ต้องการผสม
3. พลาสติกไซเซอร์ไม่ควรตกผลึกที่อุณหภูมิใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้

หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติไซเซอร์ คือ ช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ (Bond rotation) ลดลง ทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ทั้งนี้เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับพอลิเมอร์จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงเท่ากับเป็นการลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลง

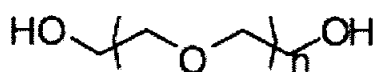
หน้าที่สำคัญของพลาสติกไซเซอร์ คือ

1. ลดความหนืด โดยจะทำให้ตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่น เพื่อลดแรง Van der Waals ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ แต่แตกต่างจากตัวทำละลายตรงที่ว่าต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกออกจากพลาสติกระหว่างการใช้งาน
2. ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวในการโค้งงอ (Flexibility) โดยทำการลด T_g ของพอลิเมอร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์มากขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง แต่ทำให้มีการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความทนแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น

พลาสติไซเซอร์จากแป้งที่นำมาใช้กับพลาสติกมีหลายประเภท เช่น พอลิเอทิลีนและไขมัน หรืออนุพันธ์ของไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) เป็นของเหลวที่ไม่มีพิษ และมีความหนาแน่นประมาณ $1.1-1.2 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) มีสูตรโมเลกุล $\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1}$ ตัวอย่างการเรียกชื่อ เช่น PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 400 ก็จะใช้ชื่อว่า PEG 400 โดย PEG มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.22 [5]



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนไกลคอล [27]

2.7 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Myles E. Morse และคณะ [3] ทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีความแข็งแรงสูงจากแป้งและพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid); PLA) เนื่องด้วยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้ง ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแป้งยังคงจับตัวเป็นกลุ่มก้อนในวัฏภาคของ PLA มีผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของ PLA กับแป้งลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงไปเพื่อเพิ่มความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันให้กับพอลิเมอร์ผสม จากงานวิจัยนี้พบว่า การใช้สารช่วยผสมเมทิลลินไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต (Methylenediphenyl diisocyanate; MDI) ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ (%) เทียบกับพอลิเมอร์ผสม หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) เป็นสารช่วยผสมกับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของ 2,5 บิสเทอโรอ็อกซี 2,5 ไดเมทิลเฮกเซน (2,5-bis(tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane; L101) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

Jian-Feng Zhang และ Xiuzhi Sun [4] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมของ PLA กับแป้งสาลี ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride; MA) และใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา งานวิจัยนี้พบว่า แรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PLA และแป้งเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเมื่อใช้สารช่วยผสม และพบว่า ที่อัตราส่วนผสม PLA กับ แป้งที่ 55 ต่อ 45% ที่ประกอบด้วย 1% MA และ 10% L101 ให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) สูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์

L. Moghaddam และคณะ [28] ศึกษาความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ผสมโดยเครื่องอัดรีด ในงานวิจัยนี้จะใช้สารช่วยผสมเป็น MA และใช้ ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และวิเคราะห์ผลโดยเครื่องเอทีอาร์ไออาร์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ATR-IR spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้พบว่า อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีค (Area ratio) ของ OH กับ C=O ของแต่ละสเปกตรัม แสดงถึงลักษณะของแต่ละองค์ประกอบและการกระจายตัวของแต่ละองค์ประกอบบนพื้นที่ผิวที่ถูกตัดมาทดสอบ จากการวิเคราะห์พบว่า พอลิเมอร์ผสมนี้เข้ากันได้ไม่ดี หรือองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมนี้มีการกระจายตัวไม่ดี

Woo Yeul Jang และคณะ [29] ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจาก PLA และแบ่งโดยใช้สารช่วยผสม MA และแบ่งมาลิตเตอเทอร์-โมพลาสติก (Maleated thermoplastic starch; MATPS) เพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PLA และแบ่ง ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry; DSC) จากการศึกษาโดย SEM พบว่า MA เป็นสารช่วยผสมที่ดี ส่วน MATPS ไม่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสม PLA กับแบ่ง ทางด้านการศึกษา DSC แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ MA เป็นสารช่วยผสม ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมธรรมดาที่ไม่ใช้ MA เป็นสารช่วยผสม

Hua Wang และคณะ [30] ศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแบ่ง โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสมให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับแบ่งในอัตราส่วน 55/45 (w/w) จากการศึกษาด้วย SEM พบว่า วัฏภาคทั้ง 2 เข้าเป็นเนื้อเดียวกันดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า MDI ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass-transition temperature; T_g) ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่และไม่ใส่ MDI จะมีค่าเท่ากัน และที่ความเข้มข้นของ MDI ต่ำๆ ประมาณ 0.25-0.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม จะเพิ่มความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยึดติด จุดขาด ขึ้นอย่างมาก

Jean-Marie Raquez และคณะ [31] ศึกษาวัสดุย่อยสลายได้ที่เตรียมจากเทคนิครีแอคทีฟ เอ็กซ์ทรูชัน (Reactive extrusion technique; REx) แบบใช้ตัวเร่ง และสารช่วยผสม งานวิจัยนี้ทำการศึกษา เทคนิค REx สามารถมีผลอย่างไรในการออกแบบและขึ้นรูป โดยใช้ อัลลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyesters) ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากเคมีเกษตร (สิ่งมีชีวิต) (Agrochemical) อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical) จากการทดลองพบว่าสามารถเตรียมวัสดุคอมโพสิตย่อยสลายได้จากพอลิเอสเตอร์ และสารตัวเติมจากธรรมชาติ (Natural fillers) ด้วยเทคนิค REx

S.Godbole และคณะ [32] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของฟิล์มผสมย่อยสลายได้ของพอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทีเรต (poly-3-hydroxybutyrate; PHB) ผสมแบ่ง เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุน โดยศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมี

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วเดียวกันในทุกอัตราส่วนทดสอบ PHB : แบ่ง การรวมตัวกันเกิดการแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงตัวแบบผลึก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงได้ผลสูงสุดที่อัตราส่วน PHB : แป้ง 0.7:0.3 (w/w) โดยวัสดุนี้อาจประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบบนแผ่นกระดาษ หรือกระดาษแข็ง เพื่อใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Poly(lactic acid) (เกรด 4042 D)* บริษัท Cargill-Dow Co., Ltd.
2. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดเอสเทอร์ (EMS) (DS = 0.02) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd.
3. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดออกซิไดซ์ (OXS) (DS = 0.002) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd.
4. แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดพรีเจล (PGS) บริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd.
5. มาลิกิกแอมไฮดรอกซี (MA) ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ.ซี.เอส ซีนอน
6. เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (MDI) บริษัท มิสซูชิ (ประเทศไทย) จำกัด
7. ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) บริษัท Kijpaiboon chemical Co., Ltd.
8. พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG - 400) บริษัท ITALMA Co., Ltd
9. Phenolic antioxidant (Anox[®] 20) บริษัท Optimaltech Co., Ltd
10. Phosphite antioxidant (Alkanox[®] 240) บริษัท Optimaltech Co., Ltd

หมายเหตุ * Datasheet ของ Poly(lactic acid) แสดงในภาคผนวก ก

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บริษัทเครื่องแก้ว
2. ตู้อบ
3. เดสิคเคเตอร์ (Desiccator)
4. เครื่องซั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
5. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two – roll mill) รุ่น LRM 110 บริษัท Lab Tech Engineering Co., Ltd.
6. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grider) บริษัท Bosco engineering Co., Ltd.
7. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) รุ่น TTI – 220/80 HITECH (Comos)
8. เครื่องทดสอบบอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR5K: Lloyd Instrument Ltd.
9. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact tester) รุ่น Yasuda

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Shore D Durometer hardness tester) รุ่น Yasuda 7689
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JEOL JSM 62
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC (Differential Scanning Calorimeter) บริษัท METTLER TOLEDO Co., Ltd
13. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (Grafted copolymer)

- 1) ผสม PLA กับสารช่วยผสม MA ในอัตราส่วน 0.5, 1, 2 % โดยน้ำหนัก ใช้ร่วมกับ Dicumyl peroxide (DCP) 10 % โดยน้ำหนักของ MA
- 2) ทำการผสมสารแต่ละสูตรให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมลูกกลิ้ง (Two – roll mill) ใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส
- 3) นำโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (grafted copolymer) ที่ได้ ไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)

ตารางที่ 3.1 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมโคพอลิเมอร์รวมแบบกราฟท์

สาร	ปริมาณสาร (%)
PLA	100
MA	0.5, 1, 2
DCP	10 (MA basic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

- 1) อบแป้งดัดแปรที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แป้งดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS), แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS)
- 2) นำโคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (Grafted copolymer) ที่ได้ มาผสม PLA และแป้งดัดแปรเอสเทอร์ ในอัตราส่วน 25:25:50 ตามลำดับ โดยทุกสูตรใช้ PEG 10 %โดยน้ำหนัก, Anox[®] 20 และ Alkanox[®] 240 อย่างละ 0.05 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (Part per hundred: php)

ในกรณีใช้ MDI ทำการผสม PLA กับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ในอัตราส่วน 50 : 50 โดยเตรียมสูตรผสม MDI 0.5, 1, 2 %โดยน้ำหนัก และทุกสูตรใช้ PEG 10 %โดยน้ำหนัก, Anox[®] 20 และ Alkanox[®] 240 อย่างละ 0.05 php

- 3) ทำการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมลูกกลิ้ง (Two – Roll Mill) อีกครั้ง โดยที่ใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส
- 4) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
- 5) นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
- 4) นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมใส่ลงส่วนป้อนสาร (Hopper) ของเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วทำการปรับอุณหภูมิและความดัน ตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมพอลิเมอร์ผสม กรณีใช้ MA

สาร	ปริมาณสาร (%)
PLA / Modified Starch	25 : 50
Grafted copolymer	25
PEG	10
Antioxidant - Anox [®] 20	0.05
Antioxidant - Alkanox [®] 240	0.05

หมายเหตุ แสดงว่าได้เติมปริมาณ MA เท่ากับ 0.125, 0.25 และ 0.5 %โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สูตรผสมที่ใช้ในเตรียมพอลิเมอร์ผสม กรณีใช้ MDI

สาร	ปริมาณสาร (%)
PLA / Modified Starch	50: 50
MDI	0.5, 1, 2
PEG	10
Antioxidant - Anox [®] 20	0.05
Antioxidant - Alkanox [®] 240	0.05

3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของพลาสติกชีวภาพ

1. ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

แช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการหักอย่างรวดเร็ว ทำการเคลือบผิวที่จะศึกษาด้วยทองแล้วนำไปส่องดูผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะและกระจายตัวของเม็ดแป้งใน PLA

2. ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests)

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) วัดค่าความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้ชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	5	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของชิ้นงาน (Gauge length)	25	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	5	กิโลนิวตัน

2.2 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact test)

ทดสอบด้วยเครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact tester) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ชิ้นงานที่มีรอยบาก (Notch) ลึก 0.1 นิ้ว ทดสอบชิ้นงาน 5 ชิ้นต่อสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

ทดสอบหาค่าความแข็งกด ตามมาตรฐาน ASTM D785 ด้วยเครื่อง Durometer แบบ Shore D ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า ¼ นิ้ว กดเป็นเวลา 5 วินาที จึงสามารถอ่านได้ รายงานค่าเฉลี่ย 10 จุดโดยไม่ซ้ำจุดเดิม

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

ศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption) ตามมาตรฐาน ASTM D 570-81 นำชิ้นงานที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดบันทึกน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 2 วัน ปริมาณการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$M_t (\%) = [(W_w - W_d) / W_d] \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่

M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลา (t) ใดๆ
 W_d คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ
 W_w คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

4. ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม ให้มีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วให้ความร้อนครั้งที่ 2 ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนมีอุณหภูมิถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity; X_c) ของ PLA สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m / \rho_{PLA}}{\Delta H_m^\circ} \times 100 \% \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ΔH_m	คือ ค่าเอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวพอลิเมอร์ผสม
ΔH_m°	คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลว PLA ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.6 J/g [28]
ϕ_{PLA}	คือ อัตราส่วนของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม $\phi_{PLA} = 0.5$

5. ทดสอบการฝังดิน (Burial Test)

เป็นการทดสอบความสามารถการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมในดิน โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 5 เซนติเมตร ในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้น 50 % เช่น กล่องพลาสติก และขุดขึ้นมาเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงทุกอาทิตย์โดยมีการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรดต่างของดินทุกๆ 3 วัน

3.3.4 ปัจจัยที่ต้องศึกษา

1. ศึกษาผลของแป้งตัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งเอลเทอร์, แป้งออกซิไดซ์ และแป้งพรีเจล ที่ผสมกับพอลิแลคติกแอซิด ในอัตราส่วน 50 : 50
2. ศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกแอนไฮดรไรต์ ที่ 0, 0.125, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต ที่ 0, 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอลเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาวัดคุณสมบัติสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร (Modified starch) ในอัตราส่วน 50:50 โดยเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม เช่น ชนิดของแป้ง ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) นอกจากนี้ยังทำการศึกษามวลของชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม (Compatibilizer) ได้แก่ พอลิแลคติกต่อกิ่ง มาลิกแอทไฮดรอกไซด์ (PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch) ที่มีต่อสมบัติและกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร (Modified starch) ที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล (เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปร้อเซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งกด (Hardness)) สมบัติทางกายภาพ (ได้แก่ ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)) สมบัติทางความร้อน (ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m)) และสัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติต่างๆ ที่ศึกษาจะเป็นปัจจัยสำคัญในการนำพอลิเมอร์ผสม เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องกับการใช้งานและมีประสิทธิภาพ

4.1 ศึกษาผลของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ

4.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ คือ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidize starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2 พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) พบว่าเม็ดแป้งที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในวัฏภาคของพอลิแลคติก (PLA) ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยพบช่องว่างเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและแป้งดัดแปร

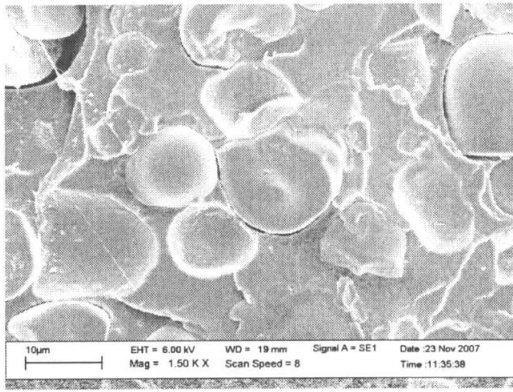
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) ผสมกันได้ดียิ่งขึ้น และแป้งไม่มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1(C) และ 4.2(C) เนื่องจากแป้งพรีเจลคือแป้งดัดแปรที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า กระบวนการพรีเจลาตินไนเซชัน (Pregelatinization) ซึ่งเม็ดแป้งบวมตัวแตกออกหรือถูกทำลาย ทำให้ผนังแข็งของเม็ดแป้งแตกออกไม่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม คาดว่าเนื่องจากแป้งพรีเจลถูกกระทำด้วยลูกกลิ้งร้อนในขั้นตอนการทำให้แห้งในกระบวนการผลิต ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แป้งพรีเจลผสมกับพอลิแลคติกแอซิดได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิแลคติกแอซิดแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) ที่เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดอย่างชัดเจน

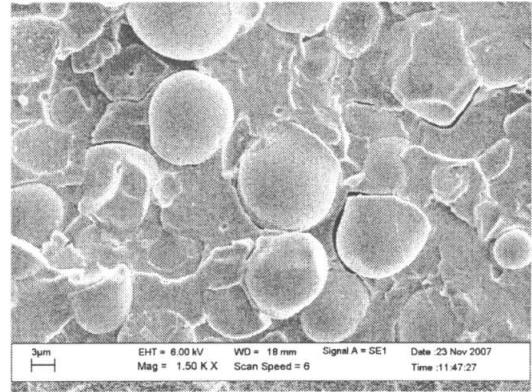


รูปที่ 4.1 SEM Micrograph กำลังขยายต่ำ (200X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แป้งดัดแปร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/OXS, (C) PLA/PGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)



(B)



(C)

รูปที่ 4.2 SEM Micrograph กำลังขยายสูง (1500X) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/ แป้งดัดแปร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/OXS, (C) PLA/PGS

4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การศึกษสมบัติเชิงกลที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength), ค่ามอดุลัส (Modulus), ความแข็งกด (Hardness) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับ แป้งดัดแปรชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS)

โดยทั่วไปพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับ 70 MPa เมื่อพิจารณาจากการศึกษาสัณฐานวิทยาดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่มีการผสมแป้งดัดแปร ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จะลดลง เนื่องจากอนุภาคแป้งจะแทรกตัวอยู่ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียหาย จาก

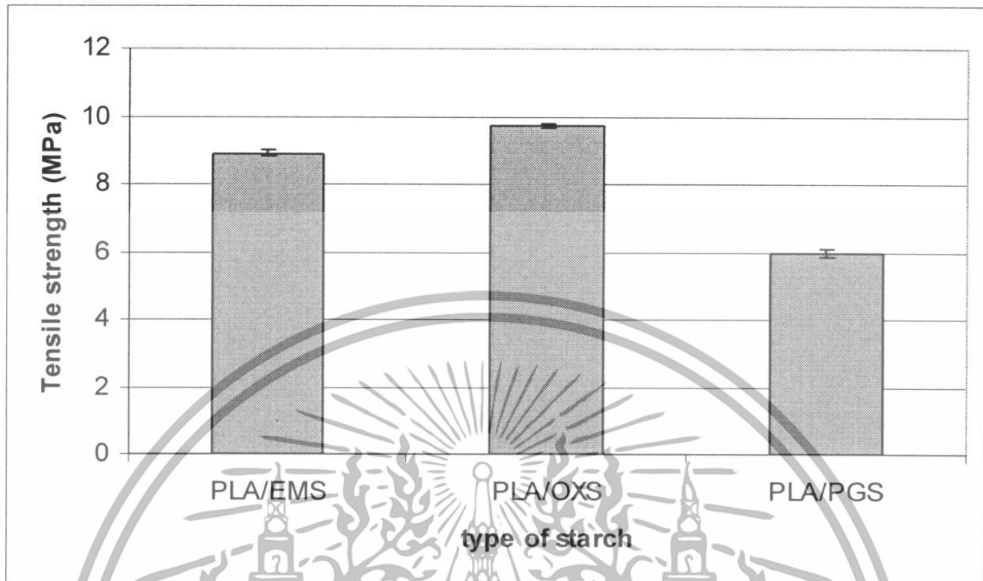
รูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Elongation at break) ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงกว่าและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) เล็กน้อย อาจเนื่องมาจากแป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งดัดแปรที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่พื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีนี้จะเปลี่ยนแปลงทำให้หมู่ฟังก์ชันของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; -OH) ที่มีในเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงเป็นหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group; -COH), หมู่คีโตน (Ketone group; -CO-) หรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group; -COOH) จึงทำให้แป้งออกซิไดซ์มีความเป็นขั้วมากกว่าแป้งเอสเทอร์ และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นยังทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแป้ง ทำให้พื้นผิวของเม็ดแป้งออกซิไดซ์ขรุขระกว่าแป้งเอสเทอร์ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้มีผลต่อการยึดเกาะของพื้นผิวระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งออกซิไดซ์สามารถยึดเกาะกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ได้ดีกว่าเม็ดแป้งเอสเทอร์ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) จึงมีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงกว่าและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และอย่างไรก็ดีการที่เม็ดแป้งออกซิไดซ์สามารถยึดเกาะกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ได้ดีกว่าเม็ดแป้งเอสเทอร์ ส่งผลต่อการถ่ายเทแรงของพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) สามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) จึงมีค่าที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS)

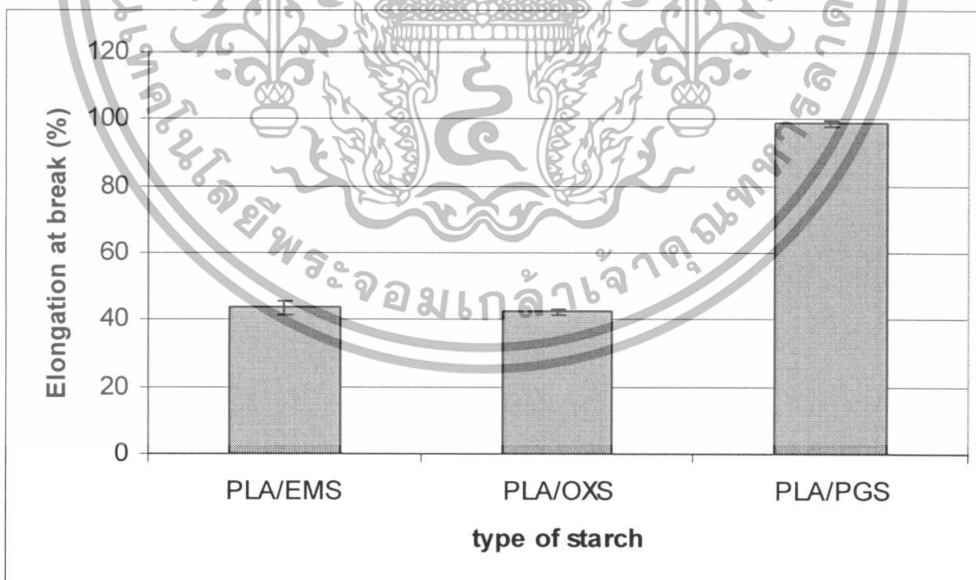
นอกจากนี้ทั้งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงกว่าและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) ซึ่งคาดว่าเนื่องจากแป้งพรีเจล ซึ่งเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการพรีเจลาตินในซอสัน (Pregelatinization) ทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (Denature) ทำให้แป้งพรีเจลมีลักษณะที่นิ่มและยืดหยุ่นกว่าเม็ดแป้งทั้งสองชนิด และพบค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) ตามลำดับ เนื่องจากแป้งพรีเจลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่จึงสามารถรับแรงกระทำและถ่ายเทแรงได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ที่ได้

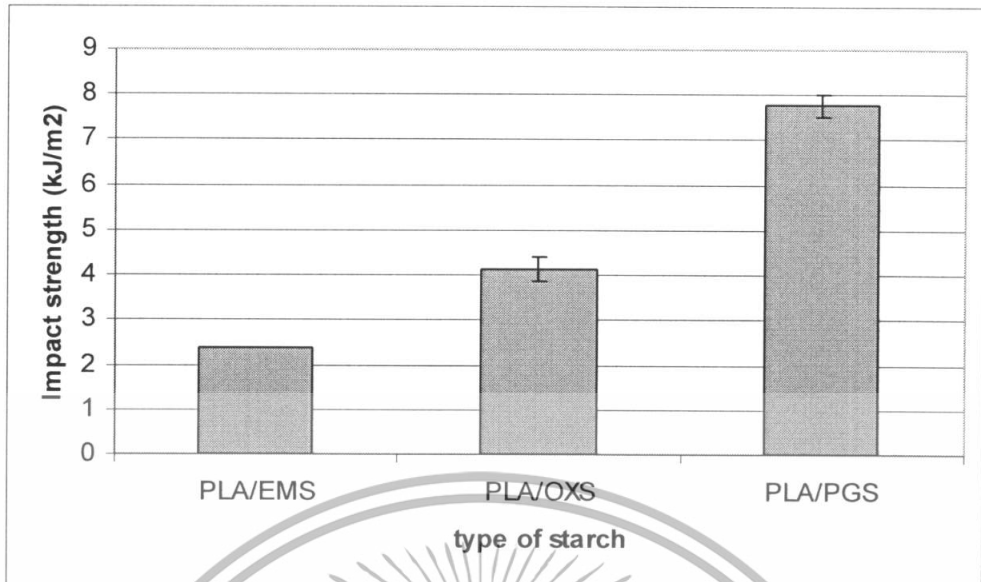


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ (50:50)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ (50:50)

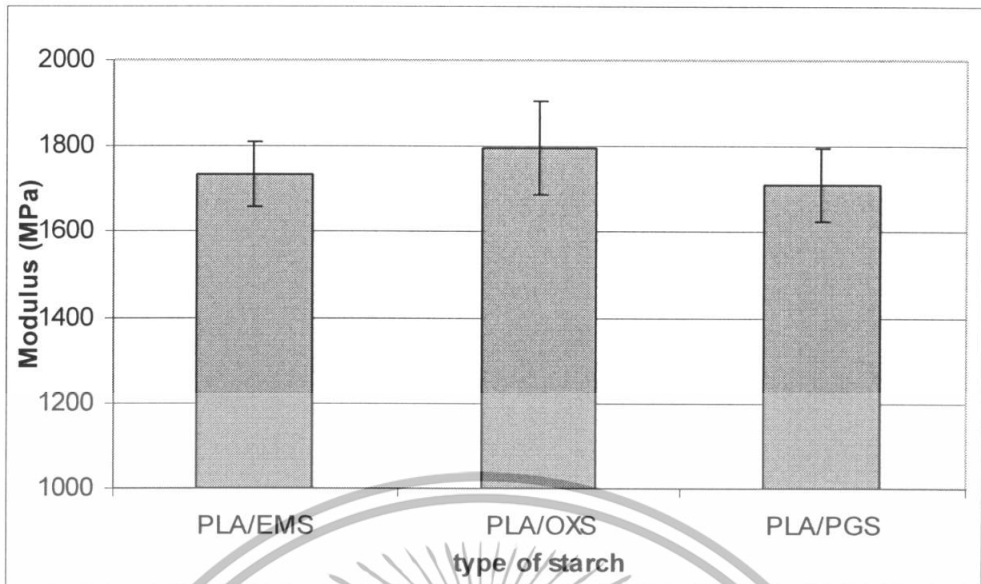
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



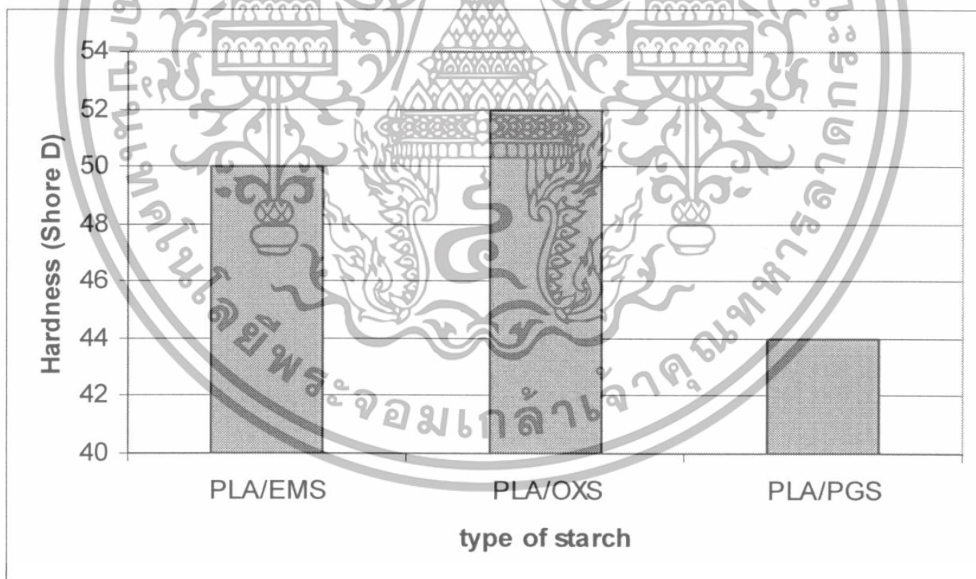
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ (50:50)

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมอดุลัส (Modulus) หรือมอดุลัสของยัง (Young's modulus) คือค่าที่บอกถึงความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุ หรือความสามารถในการรับแรงต่อการเปลี่ยนรูปหรือเสถียรภาพของวัสดุ ซึ่งแป้งที่ผสมพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จะเพิ่มความแข็งให้กับพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการทดลองมีค่าที่สูงซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.6 แต่พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีค่ามอดุลัสที่ต่ำกว่าทั้งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) ซึ่งกระบวนการพรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization) ทำให้แป้งพรีเจลมีความแข็งที่น้อยกว่าแป้งเอสเทอร์และแป้งออกซิไดซ์ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีความแข็งน้อยกว่าทั้งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) และในทำนองเดียวกันการทดสอบความแข็งกดเป็นการทดสอบความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้หัวแบบ Shore D ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าความแข็งกด (Hardness) มีพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีค่าที่น้อยกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) โดยเมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) ที่มีกำลังขยายต่ำ (500X) ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า แป้งทั้ง 3 ชนิดมีการกระจายตัวที่ดี ไม่เป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบค่า

เอกสารมีความแข็งแรงกด ความแข็งของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจึงมีผลต่อค่าความแข็งกดที่ได้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ (50:50)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ (50:50)

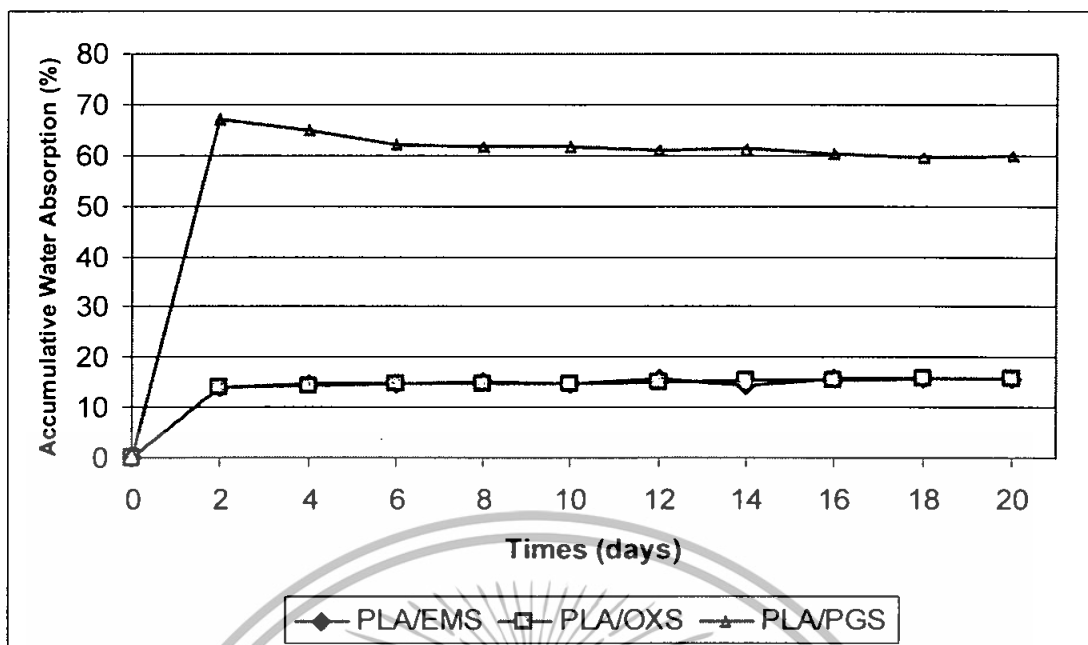
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ในช่วงแรกของการแช่ น้ำ ชีงงานสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วใน 2 วันแรก ต่อมาจะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลง จนกระทั่งคงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากอนุภาคของแป้งสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาก เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxyl group, -OH) อยู่ในสายโซ่จำนวนมากเป็นส่วนประกอบ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซีนี้อาจเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับน้ำ จึงทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ในขณะที่พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่า เมื่อเม็ดแป้งเกิดการบวมตัว (Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งเกิดการอิมบิวชันของน้ำจึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก ทั้งนี้จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ในช่วงแรกของการแช่น้ำชีงงานสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วและลดน้อยลงจนกระทั่งคงที่

จากรูปที่ 4.8 ยังเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้โดดเด่นกว่าอีกสองสูตรที่เหลือซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีแป้งพรีเจล (PGS) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งแป้งพรีเจลนี้เป็นแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Denature) เม็ดแป้งแตกออก จึงทำให้แป้งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น จึงมีโอกาสน้ำจะสัมผัสกับแป้งมากขึ้น ทำให้แป้งชนิดนี้ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ แต่เมื่อสังเกตในช่วงท้าย (วันที่ 2 เป็นต้นไป) พบว่าปริมาณการดูดซับน้ำค่อยๆ ลดลง คาดว่าเนื่องจากเม็ดแป้งที่บริเวณผิวชั้นตัวอย่างบางส่วนอิมบิวต์หลุดออกจากผิวของชีงงาน จึงทำให้น้ำหนักของชีงงานลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้ง กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่น ในกรณีศึกษาผลของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ

4.1.4 สมบัติทางความร้อน

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากการทดสอบไม่สามารถหาค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้ง ออกซิไดซ์ (PLA/OXS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) ได้ เนื่องจากไม่สามารถเห็นความแตกต่างของเส้นกราฟได้อย่างชัดเจน

จากตารางที่ 4.1 พอลิแลคติกแอซิดผสมกับแป้งดัดแปรทั้งสาม (PLA/EMS, PLA/OXS, PLA/PGS) มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Pure PLA) นอกจากนี้พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ผสมกับแป้งดัดแปรจะมีค่าองศาความเป็นผลึกน้อยกว่า PLA ที่ไม่ได้ผสมกับแป้ง เนื่องจากเม็ดแป้งที่เติมเข้าไปเป็นสารตัวเติม (Filler) ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีความสามารถในการเปลี่ยนโครงสร้าง (Conformation) เป็นโครงผลึกได้ยากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคแป้งไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งอนุภาคแป้งนั้นจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ทำให้สายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้ความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมแป้งลดลง ซึ่งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) มีค่าองศาความเป็นผลึกใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) แสดงว่าอนุภาคแป้งของแป้งทั้งสองชนิดนี้ส่งผลถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ได้ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองค์ประกอบความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้งชนิดต่างๆ (50:50)

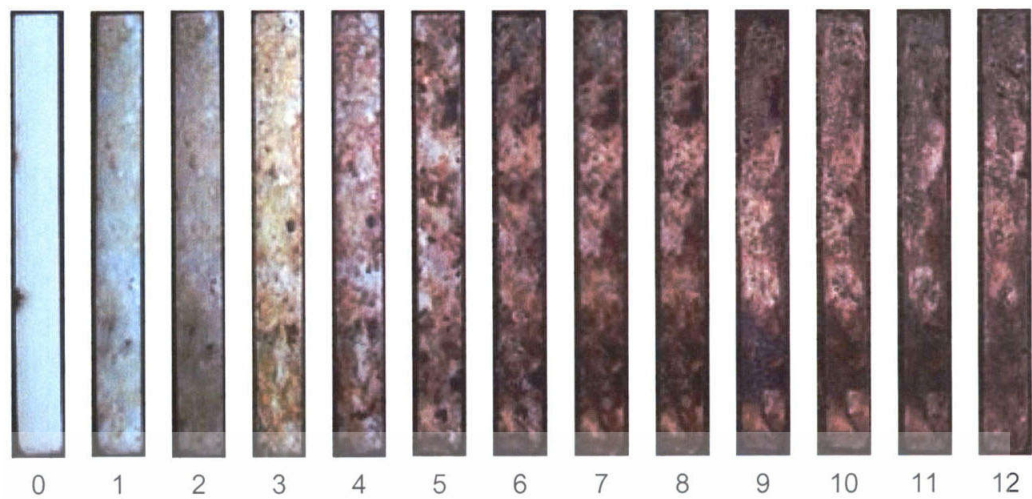
สาร	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
Pure PLA	60.6	150.5	46.2
PLA/EMS	76.5	144.4	14.4
PLA/OXS	n/a	147.1	14.5
PLA/PGS	n/a	147.2	20.4

4.1.5 ผลทดสอบการฝังดิน (Burial test)

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Burial test) นี้เป็นการทดสอบการย่อยสลายเชิงเปรียบเทียบ (Comparative study) อย่างง่าย เพื่อศึกษาผลของการผสมแป้งดัดแปรที่มีต่อการย่อยสลายของวัสดุผสม PLA/แป้งดัดแปร โดยมีได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM แต่อย่างใด

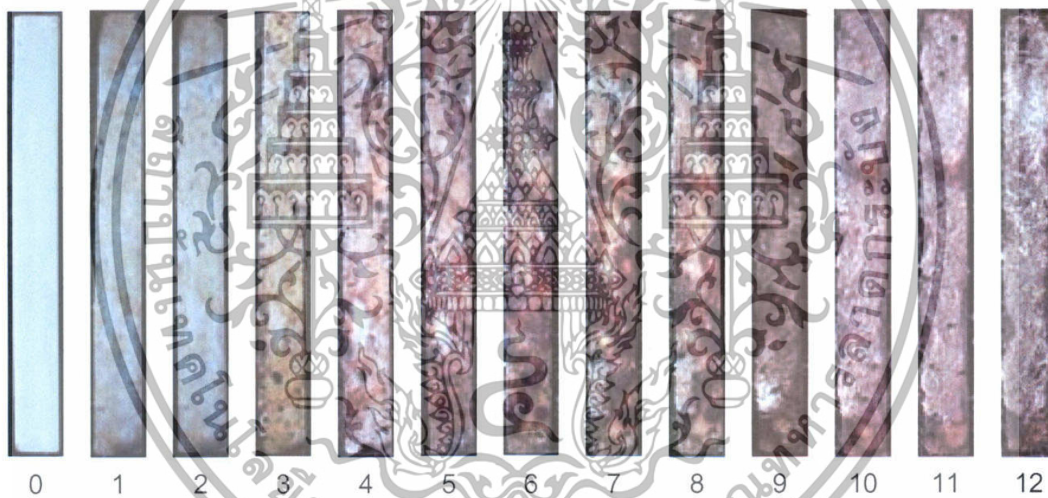
ในกรณีนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS), พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิโดซ์ (PLA/OXS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพีจีเอส (PLA/PGS) ซึ่งสามารถผลได้ดังรูปที่ 4.9(A) และ 4.9(C) จะเห็นได้ว่าการผสมแป้งดัดแปรในพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จะทำให้เกิดการย่อยสลายของวัสดุได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Pure PLA) พบว่าการผสมแป้งดัดแปรแต่ละชนิดจะให้ผลการย่อยสลายต่างกัน กล่าวคือพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิโดซ์ (PLA/OXS) เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี หรือเกิดการย่อยสลายมากที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากกลไกการย่อยสลายของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และแป้ง แสดงดังรูป 4.10 และ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Weeks

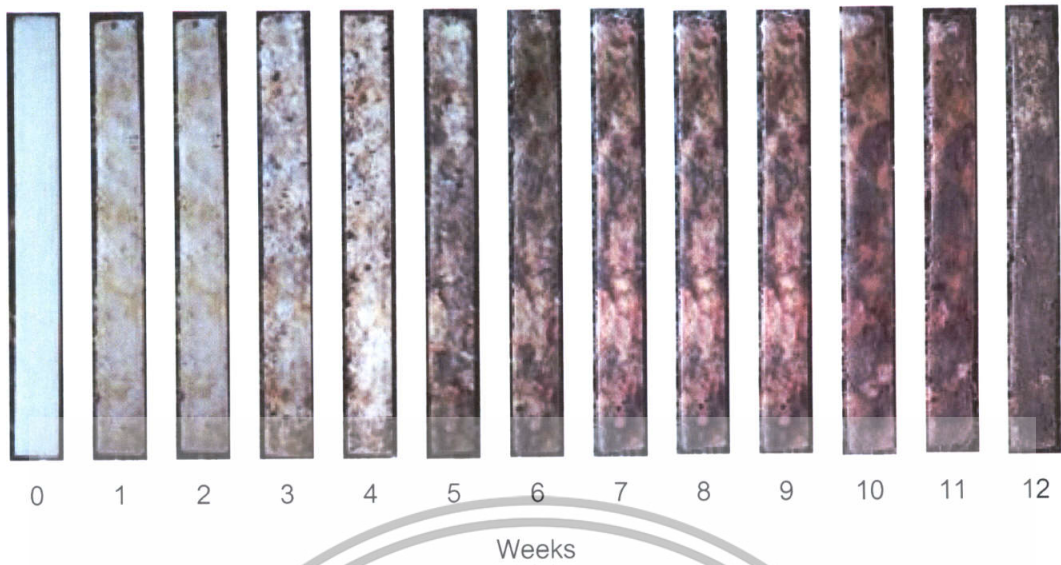
(A)



Weeks

(B)

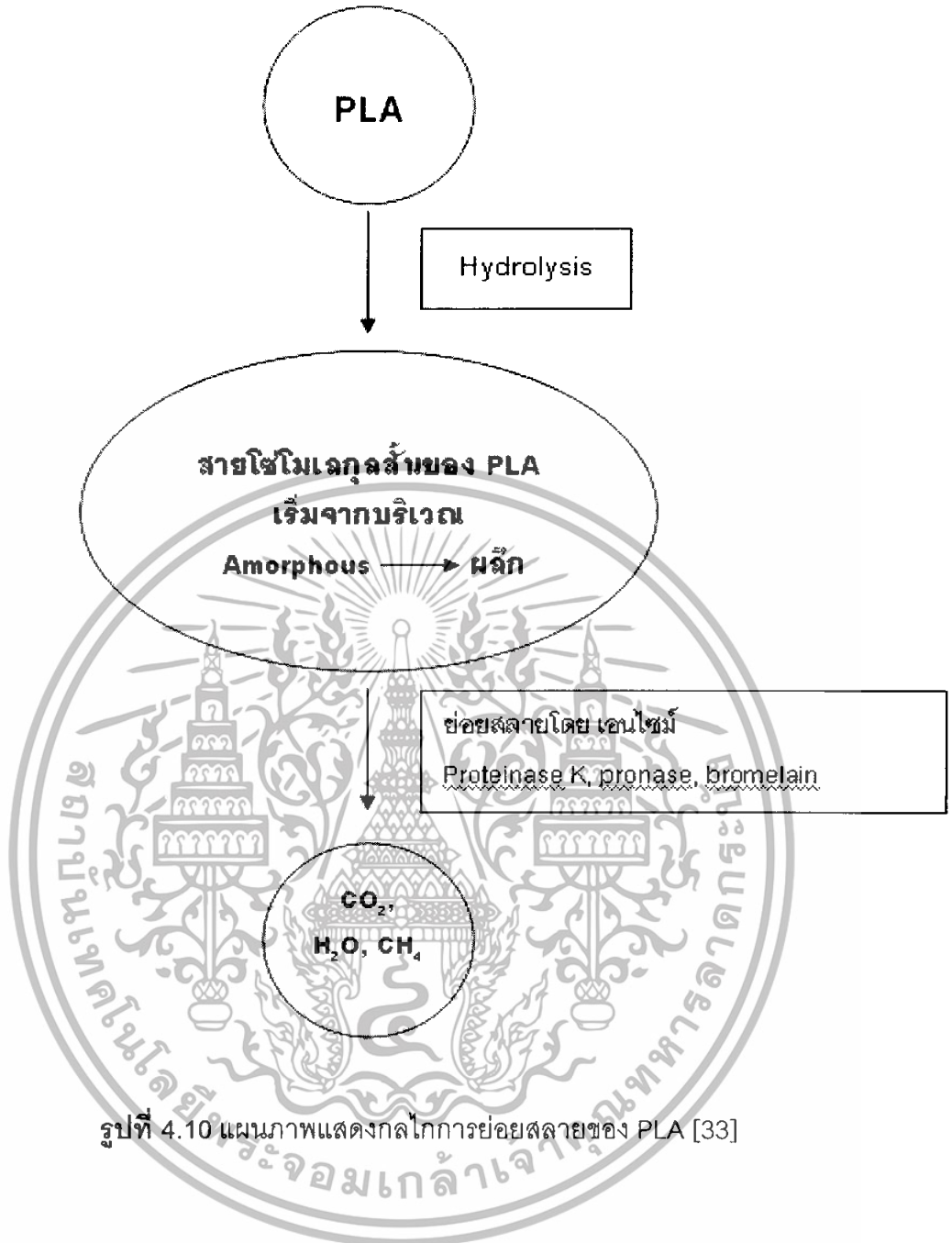
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพชิ้นงานหลังการทดสอบการผุกร่อนเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 50%, pH 7
(A) PLA/EMS, (B) PLA/QXS, (C) PLA/PGS

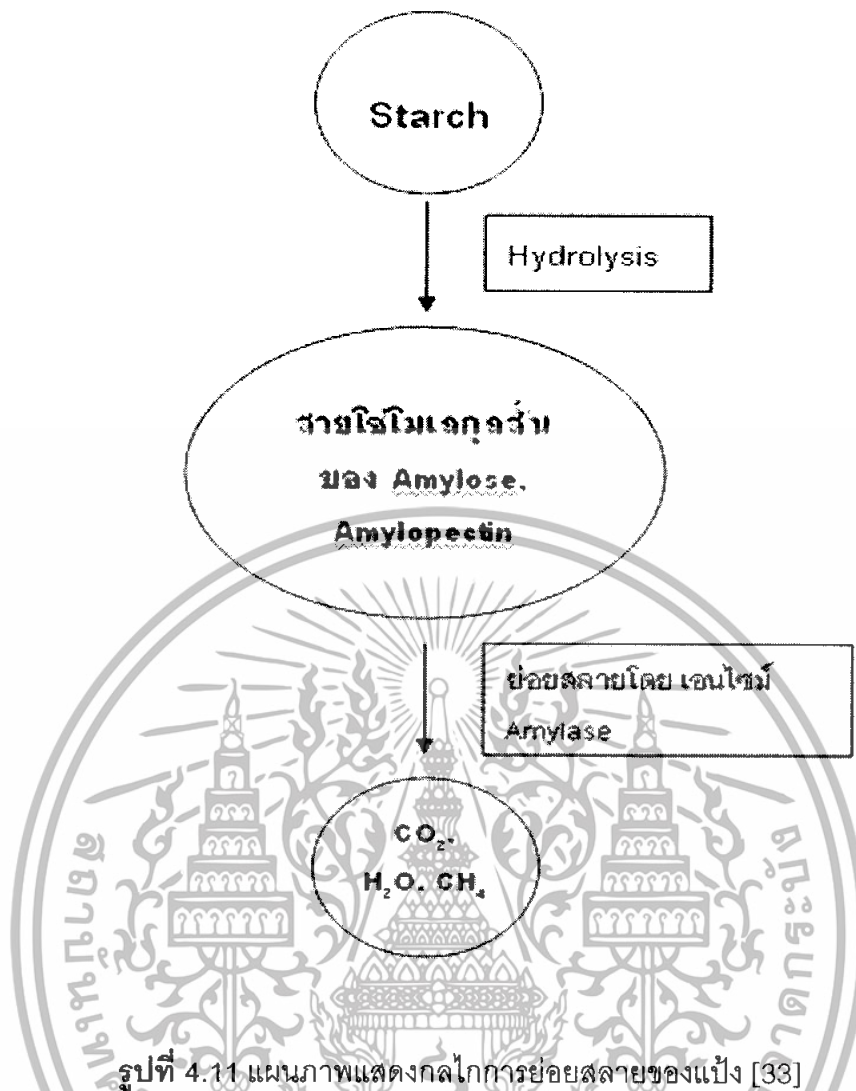


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของ PLA [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงกลไกการย่อยสลายของแป้ง [33]

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า การย่อยสลายในขั้นตอนแรกนั้นต้องอาศัยน้ำในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เพื่อให้ตัดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นลง การที่พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะพื้นผิวภายนอกของชิ้นงานมากที่สุด เพราะว่า แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้สายโซ่ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินถูกตัดให้สั้นลง คาดว่าทำให้เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ได้เร็วขึ้น พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะพื้นผิวภายนอกของชิ้นงานรองลงมา ส่วนพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ทั้งที่แป้งพรีเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุด อาจเป็นเพราะว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีองค์ประกอบความเป็นผลึกมากที่สุด (จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC แสดงผลในตารางที่ 4.1) ซึ่งกระบวนการไฮโดรไลซิสในพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) นั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

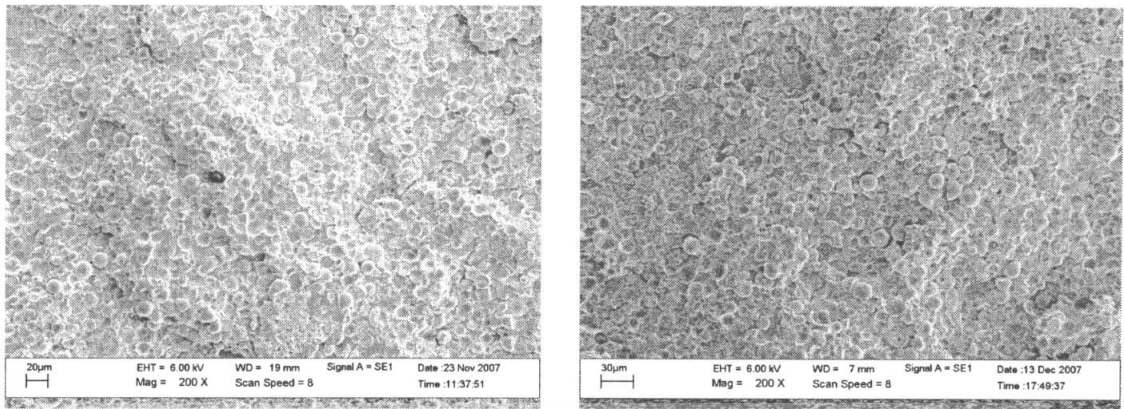
เกิดปฏิกิริยาบริเวณของส่วนอสัณฐาน (Amorphous) จนสมบูรณ์ก่อนเพราะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าส่วนของผลึก (Crystalline) จากนั้นจึงเริ่มเกิดปฏิกิริยาในส่วนของผลึกต่อไป [33]

4.2 ศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม

4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม คือ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกอิกแอนไฮดราต (PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกสูตรของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ (PLA/EMS) ในอัตราส่วน 50 : 50 เพื่อใช้ทำการศึกษาค้นคว้าผลของสารช่วยผสม พบว่าในกรณีของการใช้สารช่วยผสมพอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกอิกแอนไฮดราต (PLA-g-MA) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ที่เติม MA ปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก (PLA/EMS-M0.5) ดังรูปที่ 4.12A และ 4.12B ตามลำดับ ที่มีกำลังขยาย 200 เท่า พบว่ามีสัณฐานวิทยาที่คล้ายกัน มีการกระจายตัวของอนุภาคแป้งและพบช่องว่างเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาค PLA และเม็ดแป้งดัดแปร ทั้งไม่เติมสารช่วยผสมและเติมสารช่วยผสมมีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวและการยึดเกาะของอนุภาคแป้งในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ (PLA/EMS)

ส่วนในกรณีของการใช้สารช่วยผสมเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ ทั้งไม่เติมสารช่วยผสม และเติมสารช่วยผสม MDI ดังแสดงในรูปที่ 4.12(A) และ 4.12(C) ที่มีกำลังขยาย 200 เท่า มีลักษณะไม่แตกต่างกัน แสดงว่าสารช่วยผสม MDI ก็ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวและการยึดเกาะของเม็ดแป้งเช่นเดียวกับสารช่วยผสม PLA-g-MA แต่จากรูปที่ 4.13(C) พบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคน้อยลงเมื่อเติมสารช่วยผสม MDI แสดงว่าสารช่วยผสม MDI สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ (PLA/EMS) ผสมกันได้ดียิ่งขึ้น



(A)

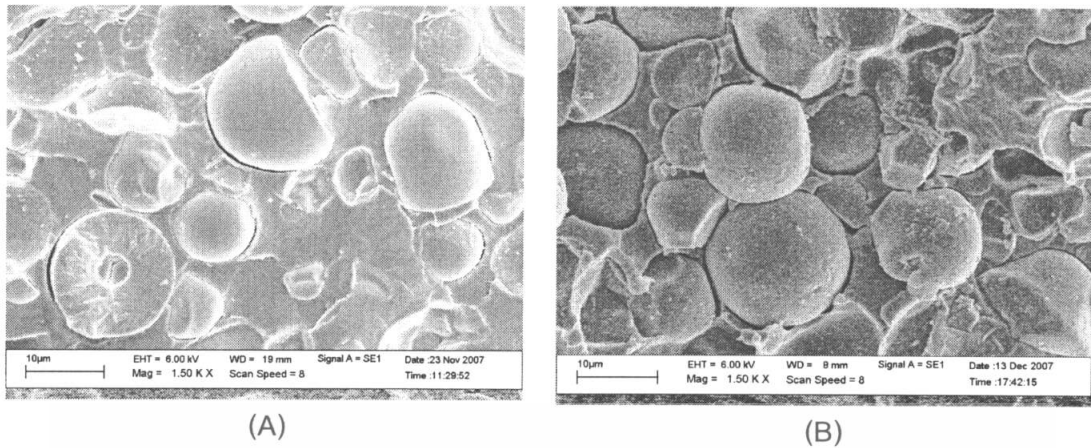
(B)



(C)

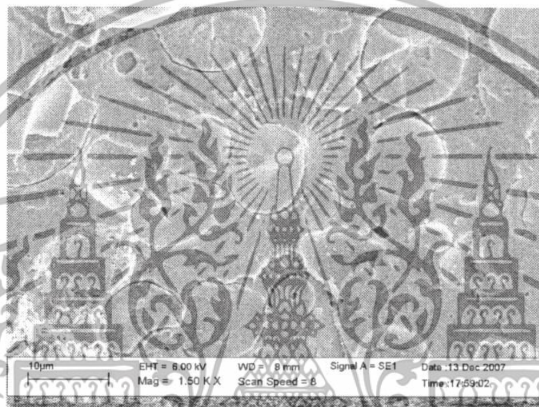
รูปที่ 4.12 SEM Micrograph ทำดังขยายต่ำ (200X) แสดงลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสม PLA / แป้งตัดแปร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS-M2, (C) PLA/EMS-D2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A)

(B)



(C)

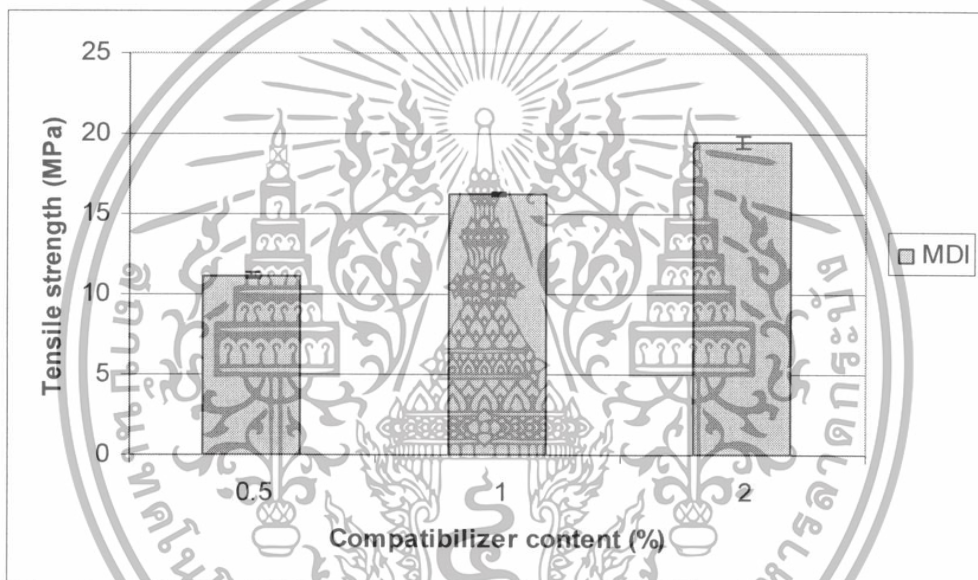
รูปที่ 4.13 SEM Micrograph กำลังขยายสูง (1500X) แสดงลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA / แป้งตัดแปร อัตราส่วน 50:50 (A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS-M2, (C) PLA/EMS-D2

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและแป้งเอสเทอร์ในอัตราส่วน 50:50 โดยใช้สารช่วยผสม PLA-g-MA ที่ปริมาณ 0.125, 0.25 และ 0.5 % โดยน้ำหนัก และ MDI ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก พบว่าจากรูปที่ 4.14 การเติมสารช่วยผสม MDI ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น และยังเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม MDI มากขึ้น ก็ยิ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่การเติมสารช่วยผสม MDI มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และค่ามอดุลัส ของพอลิเมอร์ผสมลดลง และยังเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม MDI ก็ยิ่งทำให้ค่ามีแนวโน้มที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ

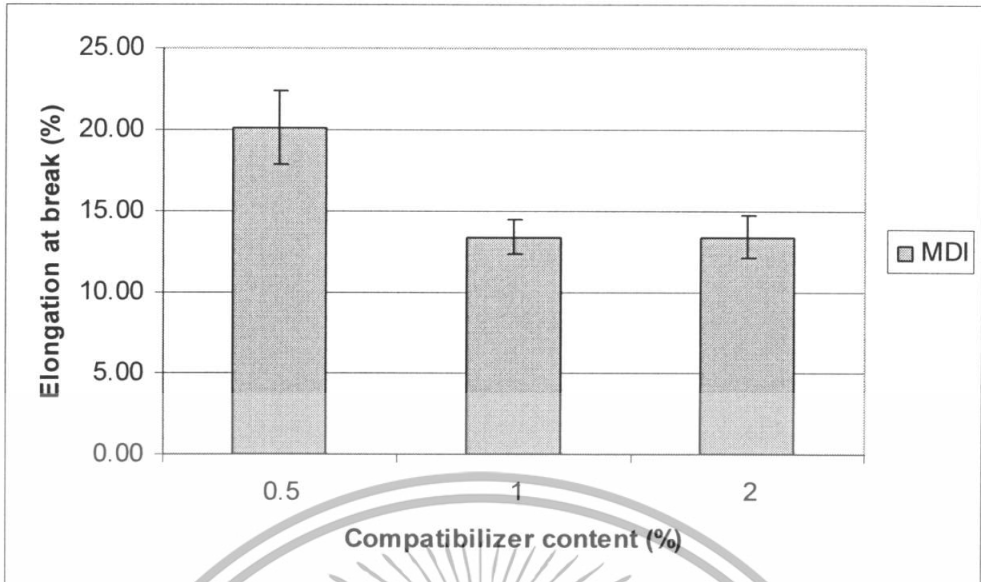
เนื่องจาก MDI ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของไอโซไซยาเนต (Isocyanate group: $\text{N}=\text{C}=\text{O}$) ราคาไม่ต่ำกว่าครึ่งลิตรทุกถัง อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมด 2 หมู่ ซึ่งหมู่ไฮโซไซยานาเนตว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้ง โดยสังเกตจากผลการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) รูปที่ 4.16(C) การเติมสารช่วยผสม MDI จะช่วยรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียสภาพของพอลิแลคติก (PLA) และแป้ง แข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) แนวโน้มน้อยลง และค่ามอดุลัส (Modulus) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการที่พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ส่งผลพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะมากขึ้นตามไปด้วย จึงมีผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

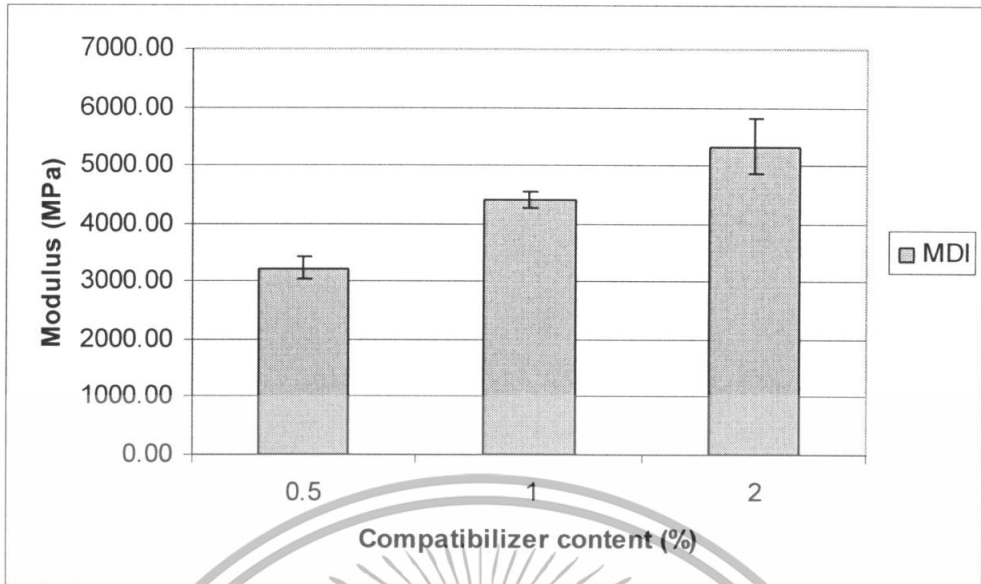


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม



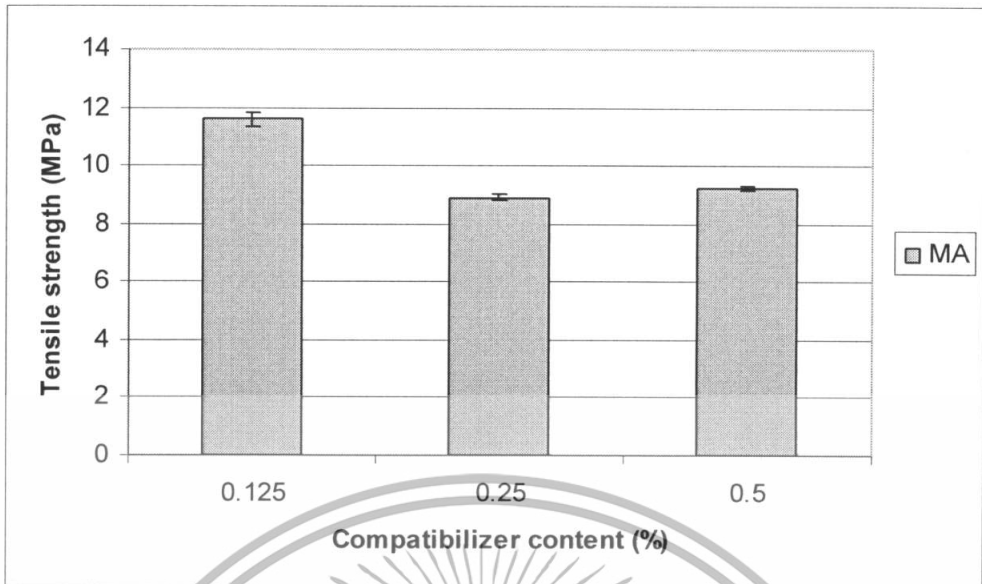
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

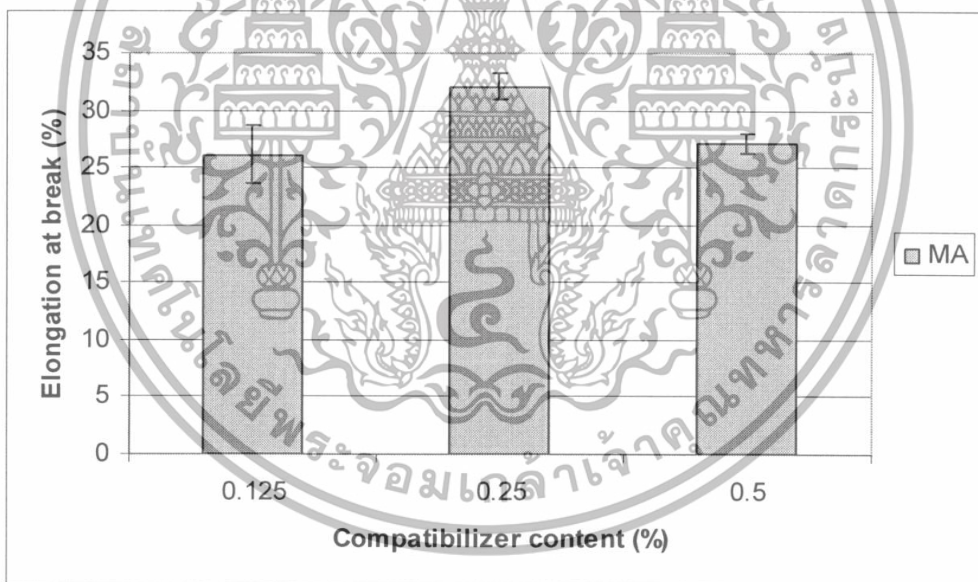


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม

ส่วนกรณีการเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA จากรูปที่ 4.18-4.21 พบว่าไม่ว่าจะเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ในปริมาณเท่าไรก็ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และค่ามอดูลัส (Modulus) ของพอลิเมอร์ผสม คาดว่าเนื่องจากการทดลองนี้ใส่สารช่วยผสมปริมาณที่น้อย จึงทำให้สารช่วยผสม PLA-g-MA ไม่ส่งผลต่อพอลิเมอร์ผสมได้เท่ากับสารช่วยผสม MDI แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเติม MA 0.5 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งไม่สามารถอธิบายสาเหตุที่เกิดขึ้นได้

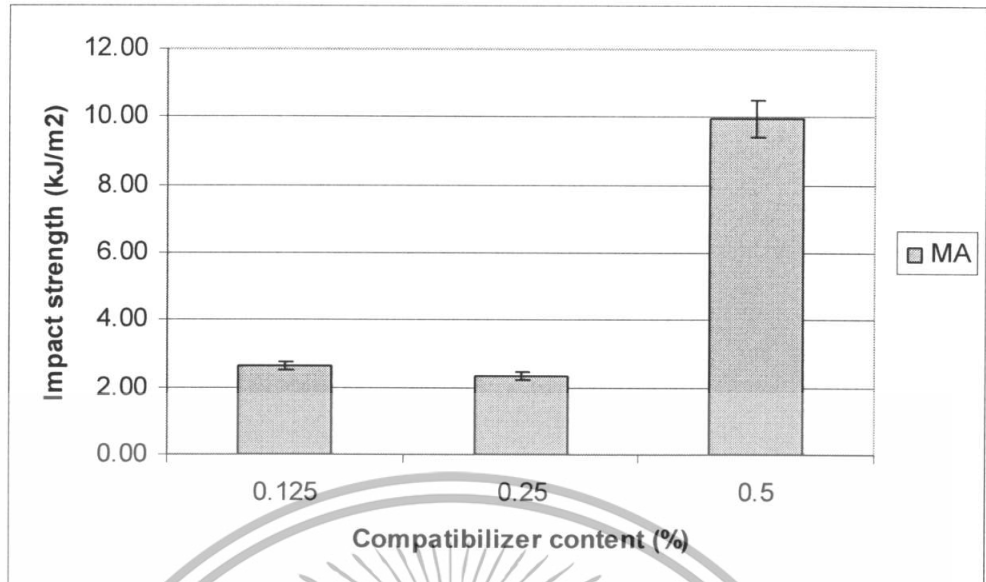


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม

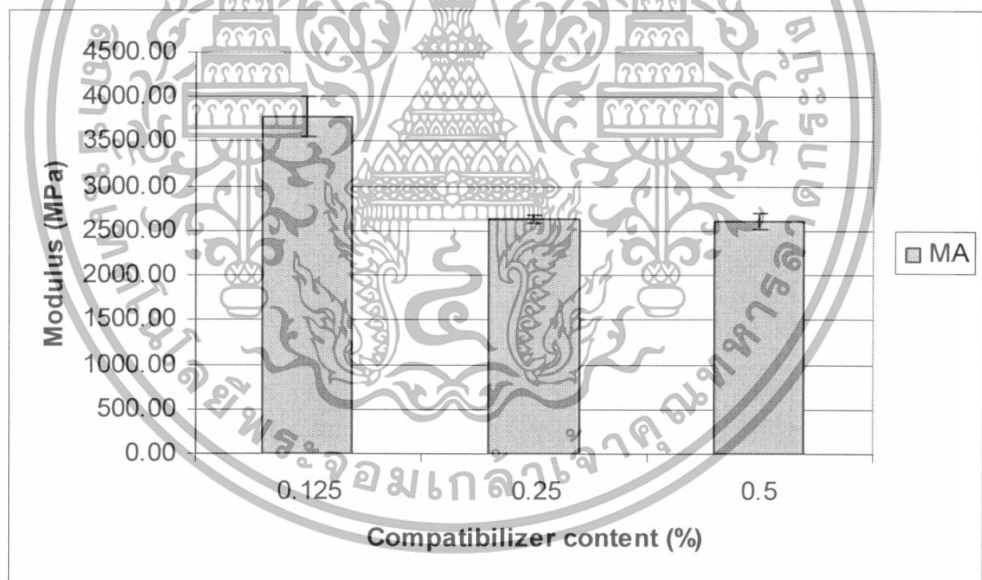


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



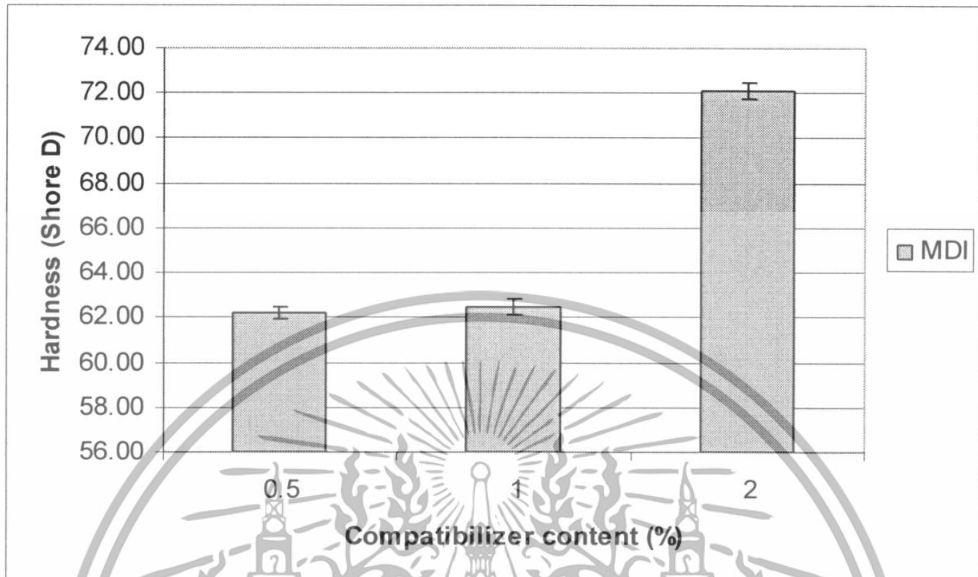
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม



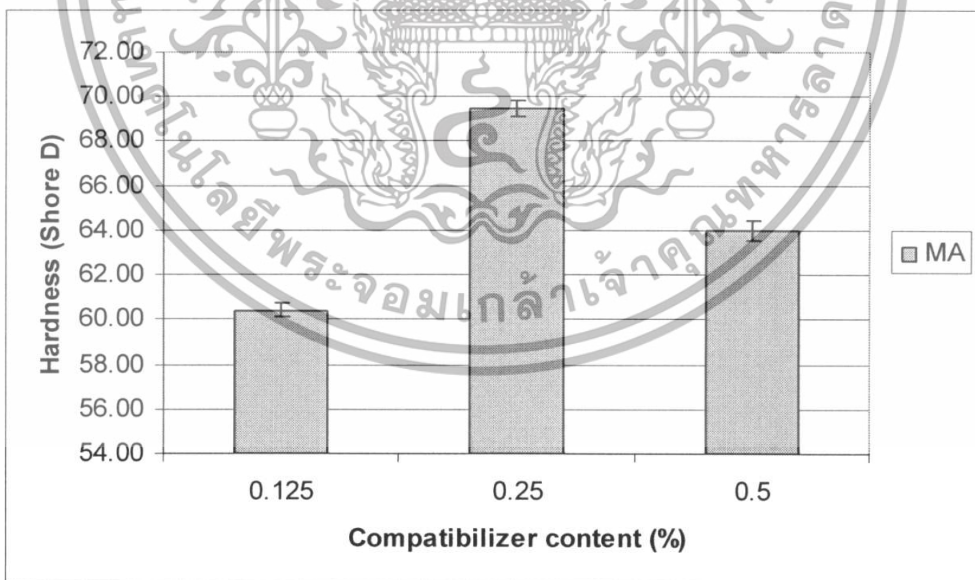
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม

นอกจากนี้ค่าความแข็งกดที่ได้ จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 พบว่า ไม่ว่าจะเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA หรือ MDI และในปริมาณเท่าใด ก็ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งกด (Hardness) เนื่องจากค่าที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สาเหตุมาจากเม็ดแป้งเอสเทอร์ (EMS) มีการกระจายตัวที่ดีในวัฏภาคของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จากการพิจารณาผลการศึกษาลักษณะฐานวิทยา (SEM) ดังรูปที่ เอกสารที่ 2B และ 4.12C ซึ่งทำให้มีค่าความแข็งกดที่ได้ มีผลเนื่องมาจากความแข็งแรงของเม็ดแป้งในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากรณีของสารช่วยผสมนั้นเราได้ทำการเลือกแบ่งเพียงชนิดเดียวมาทำการทดสอบ นั่นคือ แบ่งเอสเทอร์ (EMS) จึงทำให้ค่าความแข็งกตที่ได้ทั้งหมดทุกสูตรมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกตของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ MDI เป็นสารช่วยผสม



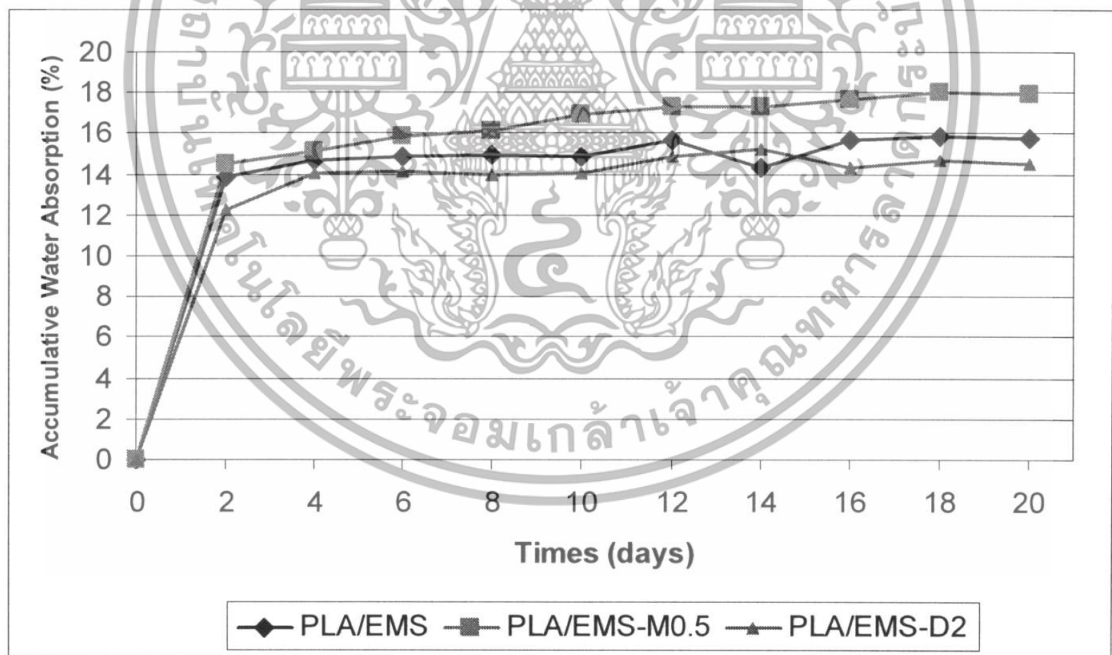
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกตของพอลิเมอร์ผสม PLA / EMS (50:50) โดยใช้ PLA-g-MA เป็นสารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

สาเหตุเดียวกับกรณีของการศึกษาชนิดของแป้ง คือ อนุภาคของแป้งสามารถดูดซับน้ำได้ดีมาก เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy group, -OH) อยู่ในสายโซ่จำนวนมากเป็นส่วนประกอบ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซีนี้อาจสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับน้ำ จึงทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ในขณะที่ PLA มีความสามารถในการดูดซับน้ำ น้อยกว่า เมื่อเม็ดแป้งเกิดการบวมตัว (Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งเกิดการอึดตัวของน้ำจึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก ทำให้ในช่วงแรกของการแช่น้ำ ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วใน 2 วันแรก ต่อมาจะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้ง กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำ และยังพบว่าการเติมสารช่วยผสมไม่ว่าจะเป็น PLA-g-MA หรือ MDI ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของพอลิเมอร์ผสม PLA กับแป้ง กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลับ ในกรณีศึกษาผลชนิดของสารช่วยผสม

4.2.4 สมบัติทางความร้อน

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

จากตารางที่ 4.2 ไม่สามารถหาค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและแป้งเอสเทอร์ที่เติม MA ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก (PLA/EMS-M2) ได้ เนื่องจากไม่สามารถเห็นความแตกต่างของเส้นกราฟได้อย่างชัดเจน และจากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าองศาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมทั้งไม่เติมสารช่วยผสมและเติมสารช่วยผสมไม่ว่าจะเป็น PLA-g-MA หรือ MDI ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า การเติมสารช่วยผสม ไม่ว่าจะ เป็น PLA-g-MA หรือ MDI ไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก ปริมาณที่ใส่น้อยทำให้จนไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อสังเกตค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมที่เติม MA 2 % (PLA/EMS-M2) และพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม MDI 2 % (PLA/EMS-D2) พบว่ามีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) หลายค่า แสดงว่าการเติมสารช่วยผสมทำให้ชนิดของผลึกเพิ่มขึ้น จึงทำให้ในการทดลองพบค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) หลายค่า

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองศาความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/EMS (50:50) กับสารช่วยผสม PLA-g-MA และ MDI

สาร	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
Pure PLA	60.6	150.5	46.2
PLA/EMS	76.5	144.4	14.4
PLA/EMS-M2	n/a	111.5, 132.8, 148.7	18.5
PLA/EMS-D2	45.0	133.4, 149.2	16.0

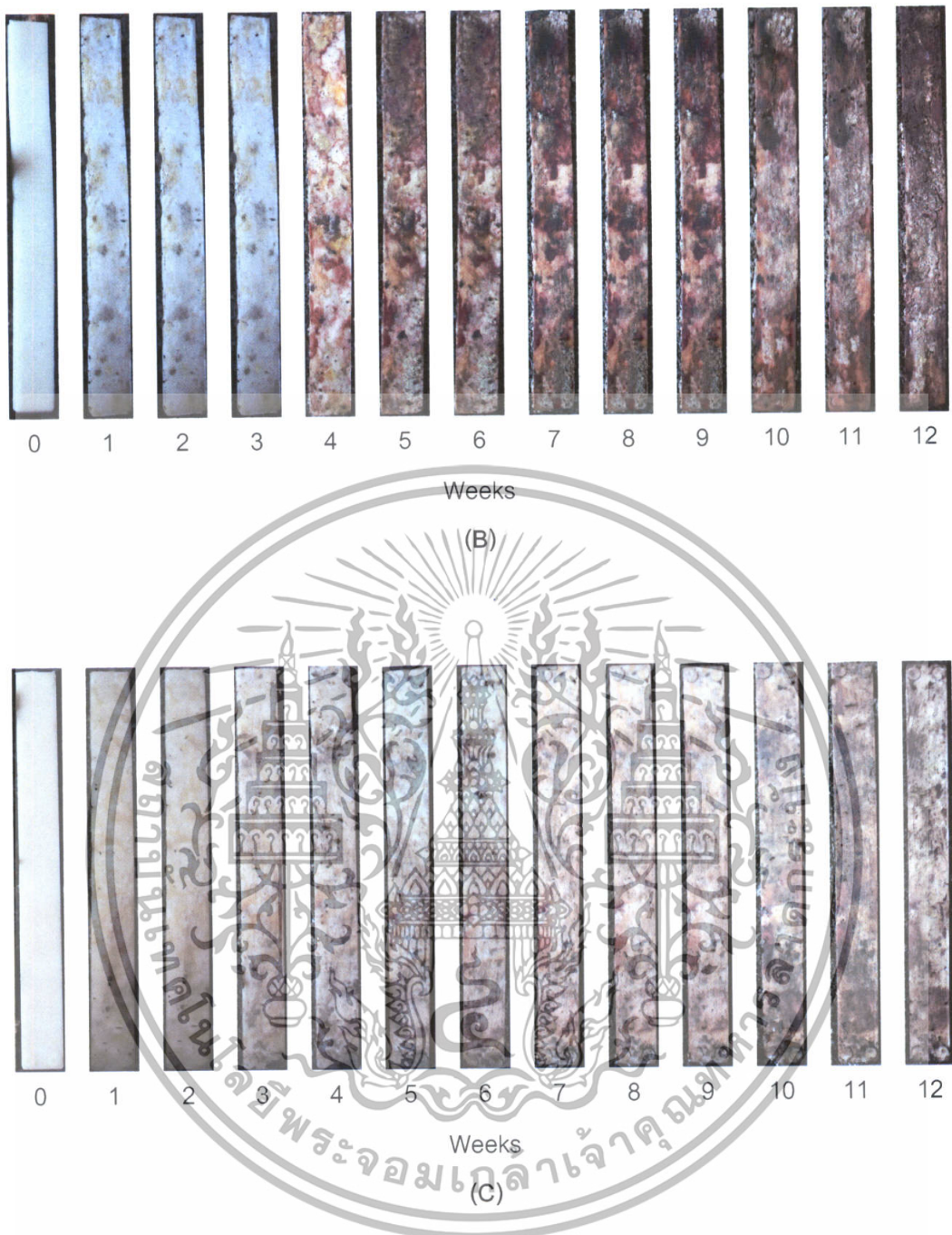
4.2.5 ผลทดสอบการฝังดิน (Burial test)

จากการศึกษาผลชนิดของสารช่วยผสม ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 4.20 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและแป้งเอสเทอร์ที่เติม MA ปริมาณ 2 % โดยน้ำหนัก (PLA/EMS-M2) เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของสีบนชิ้นงานและเกิดความขรุขระบนชิ้นงานอันเนื่องมาจากเชื้อรามากที่สุด ซึ่งโดยหลักการแล้วพอลิเมอร์ผสมซึ่งใส่สารช่วยผสมควรมีการย่อยสลายที่ช้ากว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสมเนื่องจากสารช่วยผสมนี้จะทำหน้าที่ปรับปรุงรอยต่อระหว่างวัฏภาคให้ดียิ่งขึ้นทำให้น้ำและจุลินทรีย์เข้าไปบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคได้ยากขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก แต่ที่ได้ผลเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก PLA/EMS-M2 มีรอยแยกระหว่างเม็ดแป้งกับพอลิแลคติกแอซิดพอๆ กับ PLA/EMS ดูได้จากภาพ SEM รูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.13 นอกจากนั้นผลของสมบัติเชิงกลของ PLA/EMS-M2 กับ PLA/EMS ยังให้ผลที่คล้ายคลึงกันอีกด้วย ซึ่งนั่นทำให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกอิกแอนไฮดรายด์ (PLA-g-MA) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับเมทิลลีนไดฟีนิลไดไอโซไซนาเนต (MDI) ส่วนพอลิเมอร์ผสมพอลิแลค-ติกแอซิดกับแบ็งดัดแปรเอสเทอร์ที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PLA/EMS) เกิดการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานรองลงมาและพอลิเมอร์ผสมที่เติม MDI 2 % (PLA/EMS-D2) เกิดการเปลี่ยนแปลงสีและลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด เพราะว่าเมทิลลีนไดฟีนิลไดไอโซไซนาเนต (MDI) มี หมู่ฟังก์ชันของไอโซไซยาเนต (Isocyanate group; $-N=C=O$) ทั้งหมด 2 หมู่ ซึ่งหมู่ไอโซไซยาเนตต้องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) กับหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ของแบ็งอยู่ถึง 2 หมู่ ซึ่งทำให้รอยแยกระหว่างเม็ดแบ็งกับพอลิแลคติกแอซิดลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแบ็งดัดแปรเอสเทอร์ที่ไม่เติมสารช่วยผสม (PLA/EMS) ซึ่งดูได้จากภาพ SEM จากรูปที่ 4.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ภาพชิ้นงานหลังการทดสอบการผิ่ดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 50%, pH 7
(A) PLA/EMS, (B) PLA/EMS- M2, (C) PLA/EMS-D2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA/แป้งดัดแปร จากตารางที่ 4.3 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Pure PLA) มีราคา กิโลกรัมละ 140 บาท และพอลิเมอร์ผสม PLA/EMS มีราคา กิโลกรัมละ 84.45 บาท พอลิเมอร์ผสม PLA/OXS มีราคา กิโลกรัมละ 85.81 บาท พอลิเมอร์ผสม PLA/PGS มีราคา กิโลกรัมละ 88.09 บาท จากตารางที่ 4.4 พบว่า PLA/EMS ที่มีการใส่ MA 0.5% หรือ MDI 2% มีราคา กิโลกรัมละ 100.2 และ 84.90 บาท ตามลำดับ ซึ่งการผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA/แป้งดัดแปร มีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่า PLA ธรรมดาถึง 39.64 % (ในกรณีของ PLA/EMS) 38.71 % (ในกรณีของ PLA/OXS) 37.08 % (ในกรณีของ PLA/PGS) 34.9 % (ในกรณีของ PLA/EMS-M0.5) และ 39.36 % (ในกรณีของ PLA/EMS-D2) โดยพอลิเมอร์ผสม PLA/แป้งดัดแปร ที่มีการเติมสารช่วยผสม มีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานและเพิ่มความทนทาน นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้แป้งมันสำปะหลังภายในประเทศมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA/แป้งดัดแปรชนิดต่างๆ

สารเคมี	ราคาลาด (บาท/กิโลกรัม)	สูตรของพอลิเมอร์ผสม							
		Pure PLA		PLA/EMS		PLA/OXS		PLA/PGS	
		ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
PLA	140	100	140	50	70	50	70	50	70
EMS	27	-	-	50	13.5	-	-	-	-
OXS	30	-	-	-	-	50	15	-	-
PGS	35	-	-	-	-	-	-	50	17.5
MA	1,450	-	-	-	-	-	-	-	-
MDI	98	-	-	-	-	-	-	-	-
DCP	115	-	-	-	-	-	-	-	-
PEG 400	90	-	-	10	9.0	10	9.0	10	9.0
Anox [®] 20	430	-	-	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215
Anox [®] 240	370	-	-	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185
		รวม	140	รวม	92.9	รวม	94.4	รวม	96.9
				ราคาต่อ 1 kg	84.45	ราคาต่อ 1 kg	85.81	ราคาต่อ 1 kg	88.09
				ประหยัด (%)	39.64	ประหยัด (%)	38.71	ประหยัด (%)	37.08

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA/EMS ทั้งที่ใส่สารช่วยผสมและไม่ใส่สารช่วยผสม

สารเคมี	ราคาตลาด (บาท/กิโลกรัม)	สูตรของพอลิเมอร์ผสม							
		Pure PLA		PLA/EMS		PLA/EMS-M2		PLA/EMS-D2	
		ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
PLA	140	100	140	50	70	50	70	50	70
EMS	27	-	-	50	13.5	50	13.5	50	13.5
MA	1,450	-	-	-	-	0.5	7.25	-	-
MDI	98	-	-	-	-	-	-	2	1.96
DCP	115	-	-	-	-	0.05	0.057	-	-
PEG 400	90	-	-	10	9.0	10	9.0	10	9.0
Anox [®] 20	430	-	-	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215
Anox [®] 240	370	-	-	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185
		รวม	140	รวม	92.9	รวม	100.2	รวม	93.4
				ราคาต่อ 1 kg	84.45	ราคาต่อ 1 kg	91.1	ราคาต่อ 1 kg	84.90
				ประหยัด (%)	39.45	ประหยัด (%)	34.9	ประหยัด (%)	39.36

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งดัดแปร (Modified starch) ในอัตราส่วน 50:50 โดยเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เช่น ชนิดของแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งเอสเทอร์ (Ester modified starch; EMS) แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch; OXS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch; PGS) นอกจากนี้ยังทำการศึกษากลของชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม (Compatibilizer) ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาลิกแอนไฮดไรด์ (PLA-g-MA) และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) ที่มีต่อสมบัติและกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 การศึกษาผลของชนิดแป้งดัดแปร

- จากการศึกษาฐานฐานวิทยา พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) พบเม็ดแป้งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในวิภาคของพอลิแลคติก โดยพบช่องว่างรอยต่อระหว่างวิภาคระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและแป้งเล็กน้อย แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) พบว่า แป้งไม่มีลักษณะเป็นเม็ด แต่ผสมกันได้ดียิ่งขึ้น
- จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength), ความแข็งกด (Hardness) ที่ใกล้เคียงกัน แต่พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งกด (Hardness) ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ที่สูงกว่าทั้งสองสูตร แต่อย่างไรก็ดีทั้งสามสูตรนี้มีค่ามอดุลัส (Modulus) ที่ใกล้เคียงกัน
- ในการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่า การเติมแป้งลงในพอลิแลคติกแอซิด ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงแรกของการแช่น้ำชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วต่อมาจะสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ โดยที่แป้งพรีเจลสามารถดูดซับน้ำมากกว่าแป้งเอสเทอร์และแป้งออกซิไดซ์ ซึ่งทั้งแป้งเอสเทอร์และแป้งออกซิไดซ์สามารถดูดซับน้ำได้ใกล้เคียงกัน

- จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าการเติมแป้งลงในพอลิแลคติกแอซิด ทำให้ค่าองศาความเป็นผลึกน้อยลง ซึ่งพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) มีค่าองศาความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน ส่วนพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) มีค่าองศาความเป็นผลึกมากที่สุด
- จากการศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า การใส่แป้งลงไปพอลิเมอร์ผสมทำให้ความสามารถในการย่อยสลายดีขึ้น โดยที่พอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งออกซิไดซ์ (PLA/OXS) สามารถย่อยสลายได้ดีที่สุด ต่อมาพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเอสเทอร์ (PLA/EMS) และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับแป้งพรีเจล (PLA/PGS) ตามลำดับ

5.2 การศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารช่วยผสม

- จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า สารเติมสารช่วยผสมไม่ส่งผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ซึ่งการเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ไม่ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมผสมกันได้ดีขึ้น แต่การเติมสารช่วยผสม MDI ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมได้ดียิ่งขึ้น
- ในการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ไม่ส่งผลต่อให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเติมในปริมาณเท่าใด ซึ่งแตกต่างกับสารช่วยผสม MDI ซึ่งการเติมสารช่วยผสม MDI ยิ่งเติมในปริมาณมากขึ้นก็ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลดีขึ้น
- จากการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ พบว่า การเติมสารช่วยผสมไม่ว่าจะเป็น PLA-g-MA หรือ MDI ไม่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม
- ในการศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้ Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่า การเติมสารช่วยผสม ไม่ว่าจะเติมเป็น PLA-g-MA หรือ MDI ไม่ส่งผลต่อการเกิดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม
- จากการศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย พบว่า เติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถย่อยสลายมากกว่าการไม่ใส่สารช่วยผสมและการเติมสารช่วยผสม MDI ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องผสมขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ อาจทำให้ประสิทธิภาพการผสมต่างจากการผลิตเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงควรเลือกบางสูตรไปทดลองผสมเพื่อผลิตเชิงพาณิชย์ และเปรียบเทียบความแตกต่าง
2. ศึกษาชนิดและปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมเพิ่มเติม
3. ทดลองเปลี่ยนวิธีและสารเคมีในการตอก MA บน PLA ในขั้นตอนการเตรียมสารช่วยผสม PLA-g-MA
4. ทดสอบสมบัติทางความร้อน นอกจาก DSC ควรมีการวิเคราะห์อื่นเพิ่มเติม เช่น DMTA เพื่อหาค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่ง DSC ไม่สามารถหาได้
5. ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D5338-98
6. ทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และใช้งาน เช่น กระถางต้นไม้ ถาดเพาะชำ ฯลฯ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

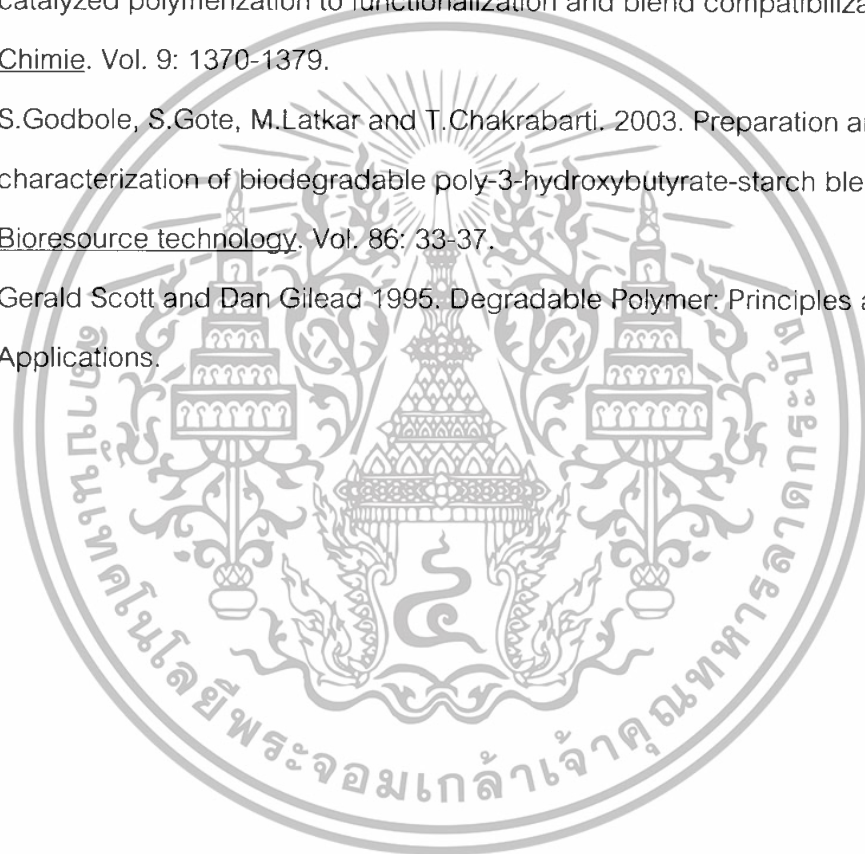
1. ธนาวดี ลีจากภักย์. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ปทุมธานี:ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid
3. <http://oaspub.epa.gov/eims/eimsapi.dispdetail?deid=80150>
4. Jian-Feng Zhang and Xiuzhi Sun. 2004. Mechanical Properties of Poly(lactic acid)/Starch Composites Compatibilized by Maleic Anhydride. Biomacromolecule. Vol. 5: 1446-1451
5. กรรณิการ์ ไพโรตรี และกิงกาญจน์ พิษณุลักษณะณ์. 2549. การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเพล็กซ์และพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งตัดแปรเอสเทอร์. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6. <http://www.ecofriendlyfrog.co.uk>
7. Masud S. Huda, Lawrence T. Drzal, Amar K. Mohanty and Maisra. 2006. Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) composites: A comparative study. Compos. Sci Technol. Vol. 66: 1813-1824.
8. Niju Narayanan, Pradip K. Roychoudhury and Aradhana Srivastava. 2004. L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization. Electronic Journal of Biotechnology. Vol. 7: 167-179
9. Slawomir Dutkiewicz and Daniela Grochowska – Lapienis. 2003. Synthesis of the poly (L (+) lactic acid) by polycondensation method in solution. Fibres and Textile in Eastern Europe. Vol. 11: 66-70
10. <http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=277>
11. <http://www.scs.uiuc.edu/chem/gradprogram/chem435/spring06/04%20Porter>
12. <http://www.cem.msu.edu/~smithmr/Lactide.htm>
13. <http://www.ch.ic.ac.uk-vgibson-research5.htm>
14. กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Blanshard and J.M.V. 1987. Starch granule structure and function: A physicochemical approach. *In* T. Gaillard (Ed.). Starch: Properties and Potential. Jone Wiley and Sons.
16. <http://www.biorama.ch/biblio/b20gfach/b35bchem/b10kh/kh040.htm>
17. http://docencia.izt.uam.mx/epa/quim_alim/tareas/almidon.pdf
18. Ir. J.J.M. Swinkels. 2006. Industrial Starch Chemistry Properties, Modifications and Applications of Starches. AVEBE group.
19. Klanarong Sriroth, Kuakoon Piyachomwan, Kunruedee Sangseethong and Christopher Oates. 2002. Modification of cassava starch. Paper presented at X International Starch Convention.
20. จิราพร เมฆบริสุทธิ์, นรินทร์ สาระภิมย์ และศศิวิมล เรืองสา. 2539. การใช้สารช่วยผสมในการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างผิวของพอลิเมอร์ผสม. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
21. วุฒิชัย ตริยศิลานันท์ และศรีัญญา ศัขมาตย์. 2545. ยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้พอลิเมอร์ร่วมของเอทิลีน – ออกทีน และยางธรรมชาติชนิดเหลวเป็นสารช่วยผสม. โครงการพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
22. http://en.wikipedia.org/wiki/Maleic_anhydride
23. <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search/ProductDetail/ALDRICH/531715>
24. http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_diphenyl_diisocyanate
25. Ricardo Aciolimoura. 2006. The effect of physical, starch particle size and starch oxidation on thermal mechanical properties of Poly(lactic acid)/starch composite. Department of Grain Science and Industry College of Agriculture. Kansas State University.
26. มาลินี ชัยศุกภกิจสินธ์. 2546. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
27. http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol
28. L. Moghaddam, L. Rintoul, P.M. Fredericks and P.J. Halley. 2006. Infrared microspectroscopic mapping of the homogeneity of extruded blends: application to starch/polyester blends. PM: (In press).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. Woo Yeul Jang, Boo Young Shin, Tae Jin Lee and Ramaui Navayan. 2007. Thermal properties and morphology of biodegradable PLA/starch compatibilized blends. J. Ind. Eng. Chem. Vol. 13: 457-464.
30. Hua Wang, Xiuzhi Sun and Paul Seib. 2001. Strengthening blends of poly(lactic acid) and starch with methylenediphenyl diisocyanate. Journal of applied polymer science. Vol. 82: 1761-1767.
31. Jean-Marie Raquez, Philippe Degee, Philippe Dubois, Yogaraj Nabar and Ramani Narayan. 2006. Biodegradable materials by reactive extrusion: from catalyzed polymerization to functionalization and blend compatibilization. C.R. Chimie. Vol. 9: 1370-1379.
32. S.Godbole, S.Gote, M.Latkar and T.Chakrabarti. 2003. Preparation and characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate-starch blend films. Bioresource technology. Vol. 86: 33-37.
33. Gerald Scott and Dan Gilead 1995. Degradable Polymer: Principles and Applications.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก Datasheet แสดงสมบัติบางประการของพอลิแลคติกแอซิด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



NatureWorks® PLA Polymer 4042D
Biaxially Oriented Films – General Purpose

**Film Characteristics/
 Applications**

NatureWorks® PLA (polylactide) polymer 4042D – a product from NatureWorks LLC – can be converted into a biaxially oriented film with use temperatures up to 265°F (130°C). This film has excellent optics, good machinability and excellent twist and deadfold. These properties make 4042D film an ideal candidate for candy twistwrap and other packaging applications. Additional properties include advantageous barrier to flavor and grease and superior oil resistance.

Polymer Characteristics

PLA polymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

PLA polymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. PLA resins will process on conventional cast tenter equipment. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks LLC technical support.

Process Details

Startup and Shutdown

PLA polymer 4042D is not compatible with a wide variety of polyolefin resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination
3. Introduce PLA polymer into the extruder at the operating

Processing Temperature Profile		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	360°F	200°C
Adapter	380°F	200°C
Die	375°F	190°C
Spew Screwed	20-100 rpm	
MD Draw Temp	140-160°F	60-70°C
TD Draw Temp	160-175°F	70-80°C
Heat Set Oven	205-285°F	120-140°C

conditions used in Step 1

4. Once PLA polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of 30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

Typical Material Application Properties (1.5 mil)			
Film Properties		Value	ASTM Method
Density		1.25 g/cc	D1505
Tensile Strength MD	TD	16 kpsi 21 kpsi	D882 D882
Tensile Modulus MD	TD	480 kpsi 560 kpsi	D882 D882
Elongation at Break	MD TD	160% 100%	D882 D882
Elmendorf Tear MD	TD	15 g/mil 13 g/mil	D1922 D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen Carbon Dioxide Water Vapor	550 cc-mil/m ² /24 hr atm 3,000 cc-mil/m ² /24 hr atm 325 g-mil/m ² /24 hr atm	D1434 D1434 E96
Optical Characteristics	Haze Gloss, 20°	2.1% 90	D1003 D1003
Thermal Characteristics	Glass Transition Temperature Melting Point	126°F (52°C) 275°F (135°C)	D3418 D1003

⁽¹⁾ Typical properties; not to be construed as specifications. ⁽²⁾ All properties measured on 1.0 mil film. ⁽³⁾ Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NatureWorks[®] PLA Polymer 4042D

Compostability

Composting is a method of waste disposal that allows organic materials to be recycled into a product that can be used as a valuable soil amendment. PLA is made primarily of polylactic acid, a repeating chain of lactic acid, which undergoes a 2-step degradation process. First, the moisture and heat in the compost pile attack the PLA polymer chains and split them apart, creating smaller polymers, and finally, lactic acid. Microorganisms in compost and soil consume the smaller polymer fragments and lactic acid as nutrients. Since lactic acid is widely found in nature, a large number of organisms metabolize lactic acid. At a minimum, fungi and bacteria are involved in PLA degradation. The end result of the process is carbon dioxide, water and also humus, a soil nutrient. This degradation process is temperature and humidity dependent. Regulatory guidelines and standards for composting revolve around four basic criteria: Material Characteristics, Biodegradation, Disintegration, and Ecotoxicity. Description of the requirements of these testing can be found in the appropriate geographical area: DIN V 54900-1 (Germany), EN 13432 (EU), ASTM D 6400 (USA), GreenPla (Japan). This grade of NatureWorks[®] PLA meets the requirements of these four standards with limitation of maximum layer thickness of 1650 µm and for coating layers up to 37 µm thick.

FDA Status

U.S. Status-

This is to advise you that on January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list

currently maintained on FDA's website at

<http://www.cfsan.fda.gov/~dms/opa-fcn.html>. This grade of Nature-

Works[®] PLA may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced NatureWorks[®] PLA formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

European Status

This grade of NatureWorks[®] PLA complies with Commission Directive 2002/72/EC as amended by 2004/19/EC. No SML's for the above referenced grade exist in Commission Directive 2002/72/EC or as amended by 2004/19/EC. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU-Directive 2002/72/EC, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with EU-Directive 2002/72/EC the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in EU-Directives 93/8/EEC (amending 82/711/EEC)

and 85/572/EEC. Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements. This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11. It is recoverable in the form of material recycling, energy recovery, composting, and biodegradable per Annex II point 3, subject to the standards of the local community. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy lined steel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine)

Description	Value (Unit)	Description	Value (Unit)
PRESSURE	(Bar)	TIME	(Sec)
DIE CLS	55	3 RD STG INJ	18
CLS LOW	55	EJE FWD DLY	0
CLS HI	55	MELTING DLY	0
DIE OPN	50	EJE BKD DLY	0
1 ST INJ	XX*	MELTING	200
2 ND INJ	XX*	DECOMPRS	0
3 RD INJ	XX*	COOLING	100
MELTING	50	EJECTOR COUNT	1
DECOMP	55	SCW FWD	0
PLUNGER	50	SCW BWD 1	0
EJECTOR	40	SCW BWD 2	0
SCW - IN	35	ALARM TIME	500
DIE ADJ	60	FLOW SPEED	(RPM)
CURRENT TEMPERATURE	(°C)	RAPID CLS	30
NOZZLE	180	HIGH CLS	55
ZONE 1	175	CLAMPING	50
ZONE 2	170	DIE OPN SLW 1	30
ZONE 3	155	RAPID OPN SPD	40
ZONE 4	155	DIE OPN SLW 2	30
ZONE 5	150	PLUNGER	40
ZONE 6	150	DIE ADJ	40
TIME	(Sec)	1 ST STG INJ	50
DIE CLS / OPN	50	2 ND STG INJ	50
SID COR ACT	50	3 RD STG INJ	50
1 ST STG INJ	18	MELTING	50
2 ND STG INJ	18	DECOMP	50
Description	Value (Unit)	Description	Value (Unit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLOW SPEED	(RPM)	FLOW SPEED	(RPM)
EJECTOR	18	DIE CHANG	10
SCREW – IN	0		

ตารางที่ ข2 ความดันของหน่วย injection ที่ปรับจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์

อัตราส่วนผสม	Pressure (Bar)		
	1 ST INJ	2 ND INJ	3 RD INJ
EMS	48	46	46
OXS	48	46	46
PGS	48	46	46
EMS-M0.5	48	45	45
EMS-M1	48	45	45
EMS-M2	47	45	45
EMS-D0.5	47	45	45
EMS-D1	60	58	58
EMS-D2	78	76	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

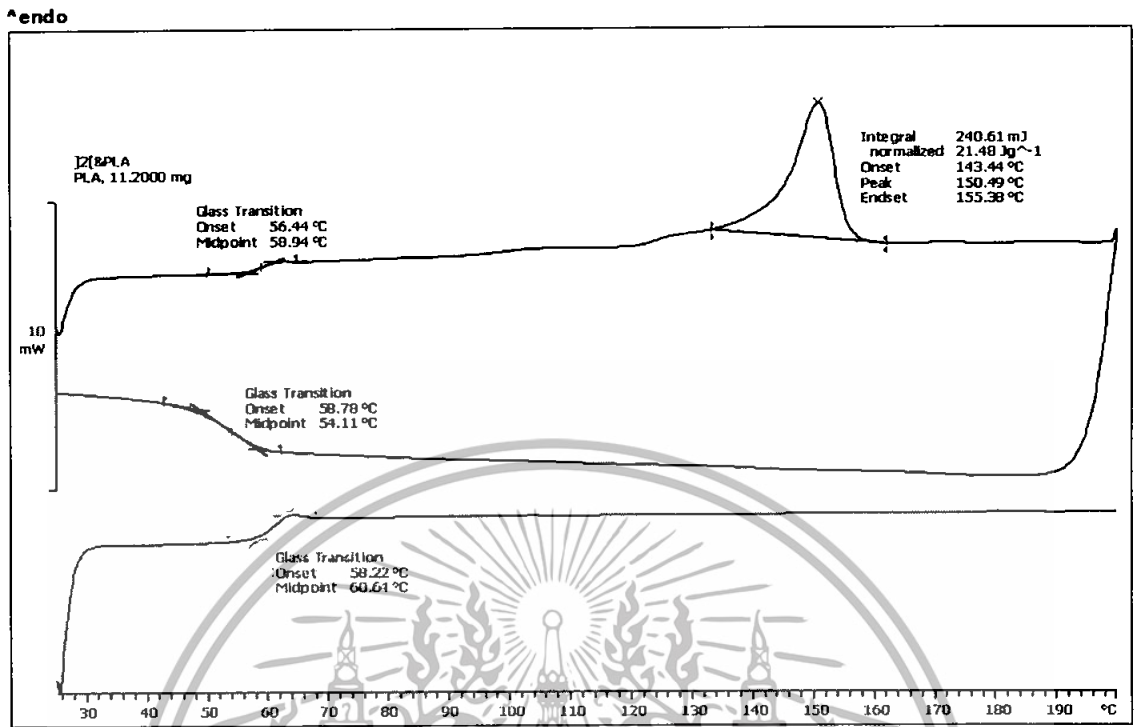
ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด
ผสมแป้งดัดแปร

อัตราส่วนผสม	ผลการทดลอง				
	ความ แข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็ง กด (Shore D)	ความ แข็งแรง กระแทก (KJ/m ²)
PLA/EMS	8.9	43.6	1734.9	50.0	2.4
PLA/OXS	9.7	42.4	1795.2	52.0	4.2
PLA/PGS	6.0	98.7	1709.5	44.0	7.8
PLA/EMS-M0.5	11.6	26.2	3781.5	60.4	2.6
PLA/EMS-M1	8.9	32.1	2624.3	69.5	2.3
PLA/EMS-M2	9.2	27.1	2600.5	64.0	9.9
PLA/EMS-D0.5	11.2	20.1	3234.8	62.2	11.7
PLA/EMS-D1	16.3	13.4	4416.7	62.5	3.6
PLA/EMS-D2	19.5	13.4	5332.1	72.1	2.2

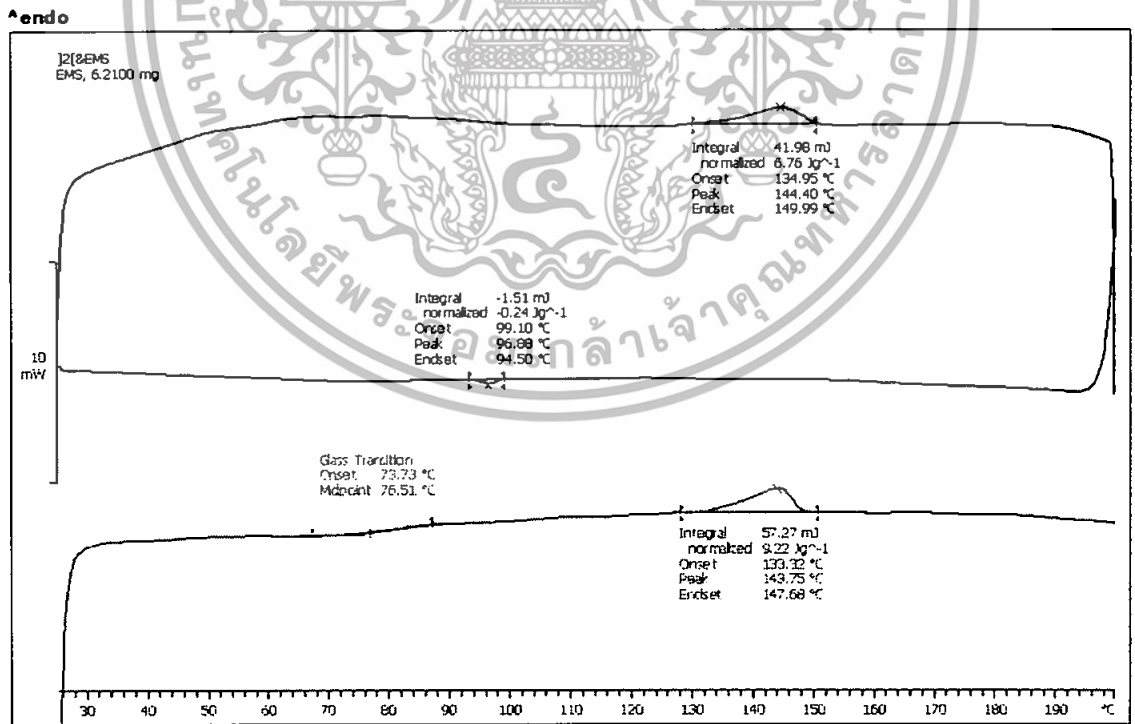
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

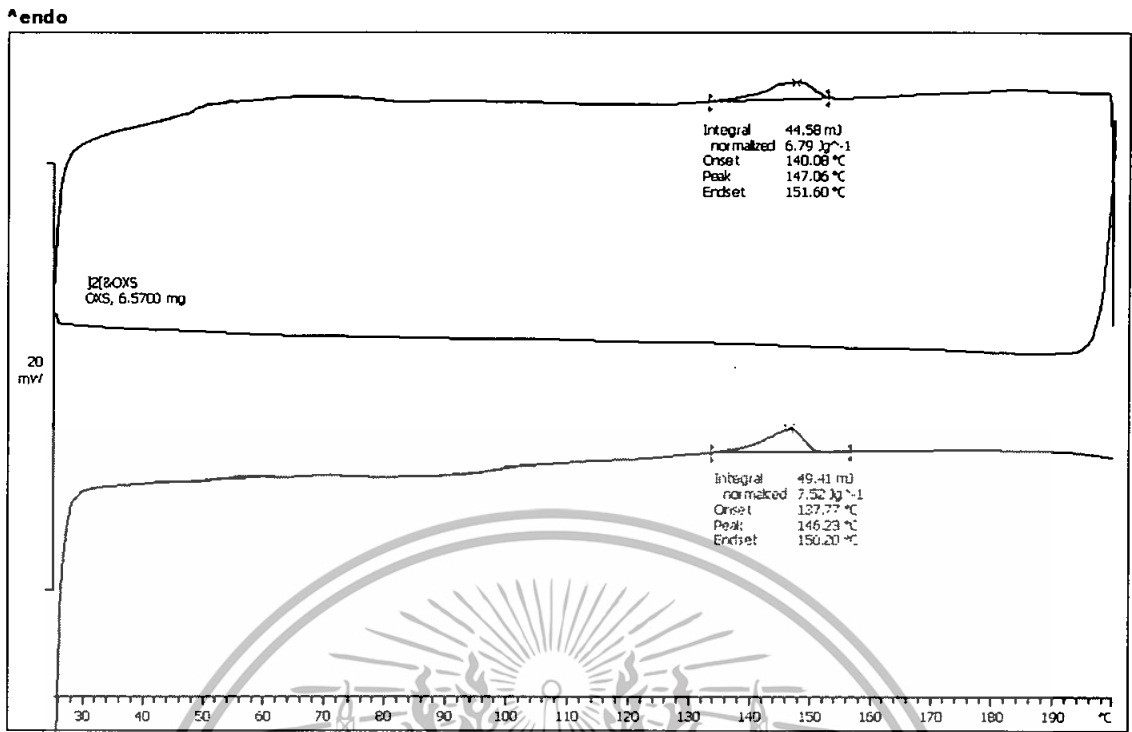
ภาพที่ ง1 DSC Thermogram ของ PLA ปริมาณ



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

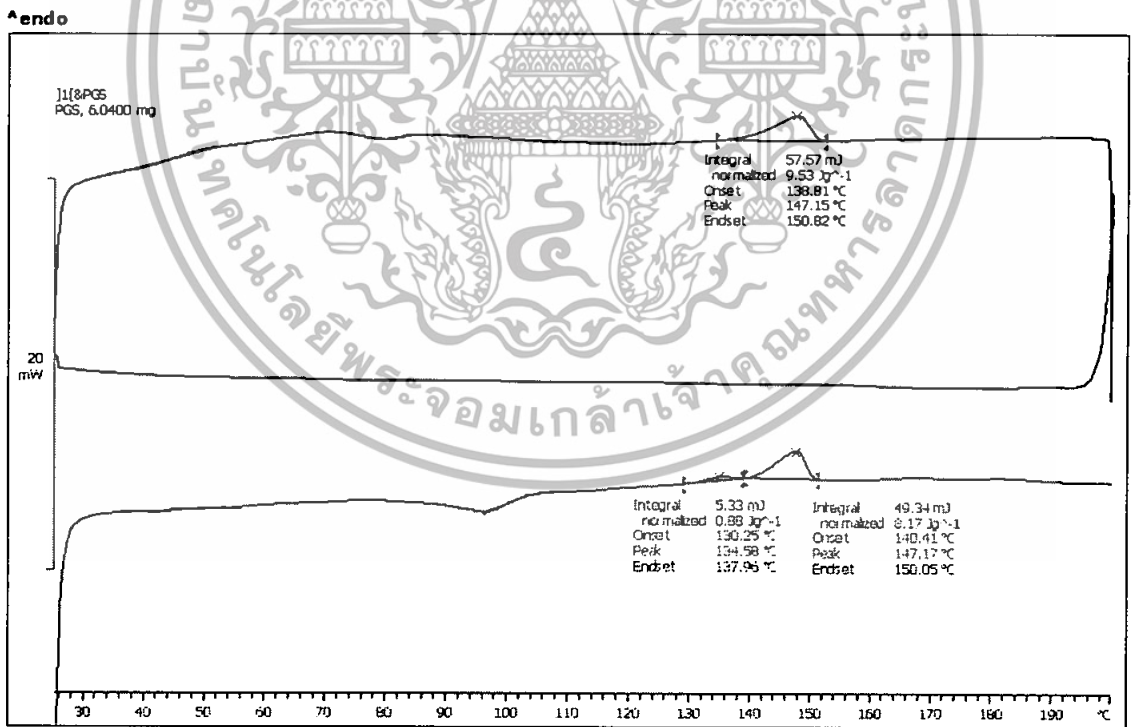
ภาพที่ ง2 DSC Thermogram ของ PLA/EMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

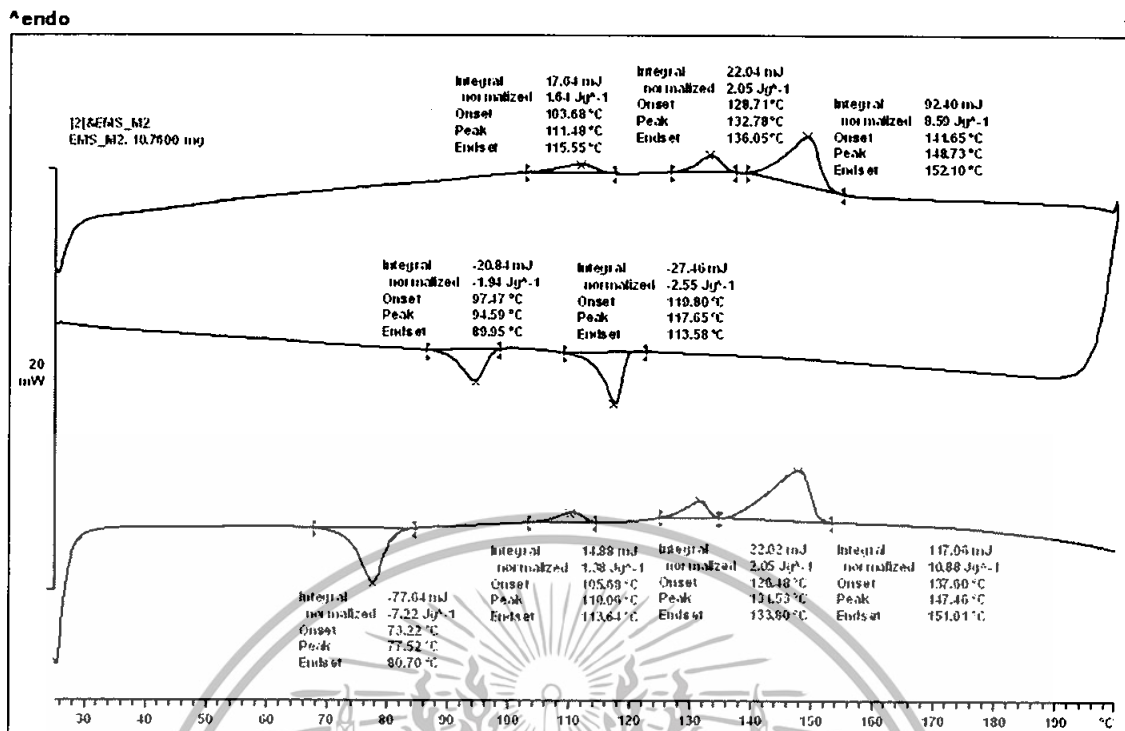
ภาพที่ 33 DSC Thermogram ของ PLA/OXS



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

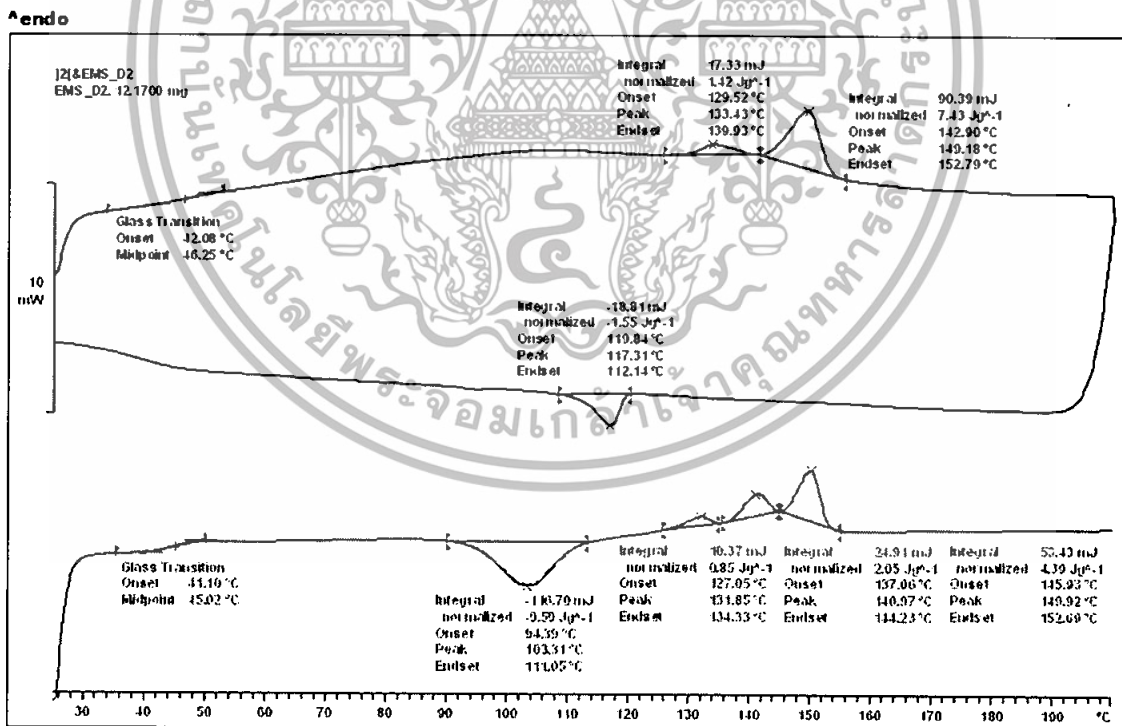
ภาพที่ 34 DSC Thermogram ของ PLA/PGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

ภาพที่ ๓5 DSC Thermogram ของ PLA/EMS-M2

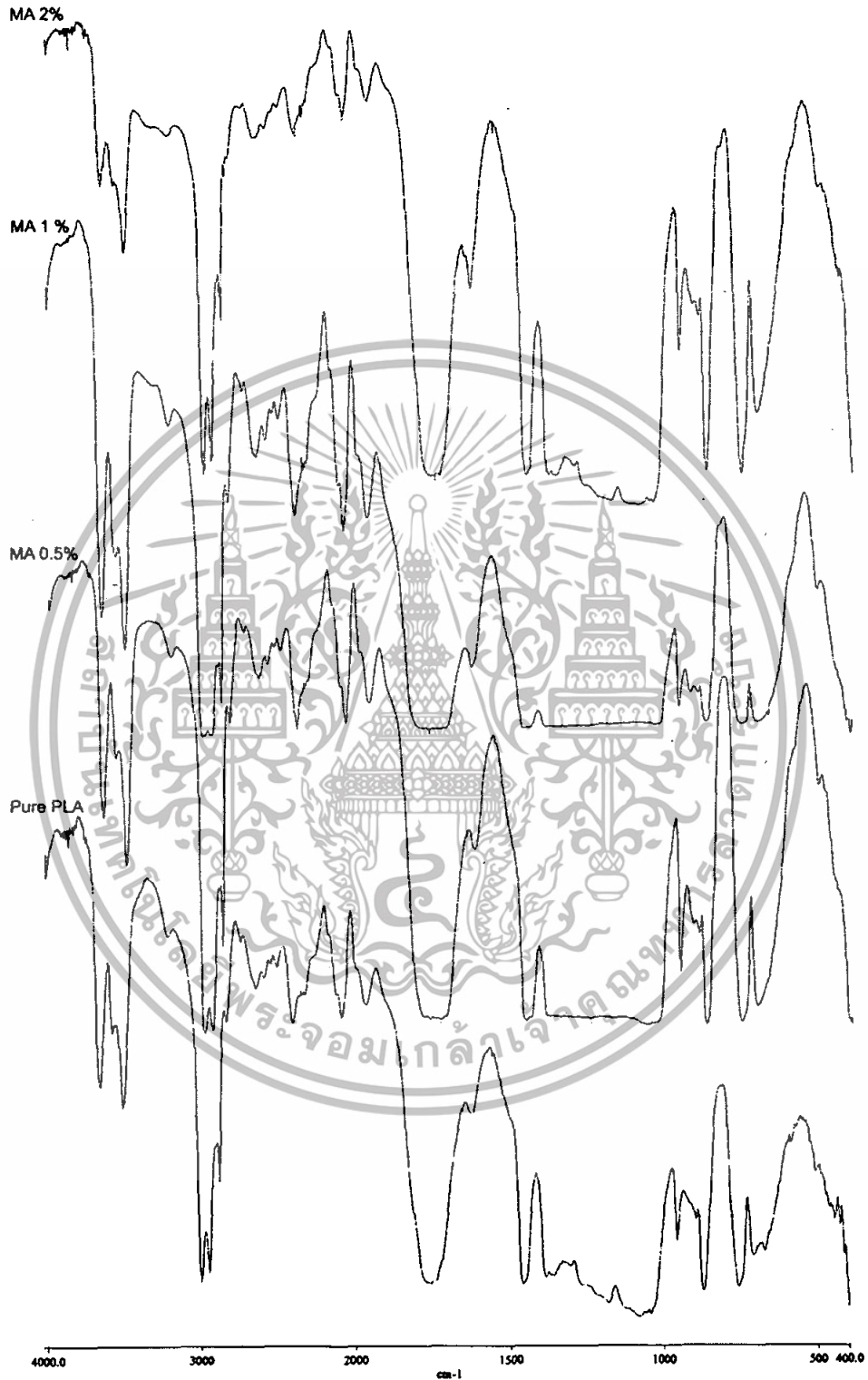


DEMO Version Not signed STAR® SW 9.10

ภาพที่ ๓5 DSC Thermogram ของ PLA/EMS-D2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ



ภาพที่ จ ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ IR-spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้