



การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
และแปรงดัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช

โดย

นางสาวชวนชม อ่วมเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
และแปรงดัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช

โดย

นางสาวชวนชม อ่วมเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE PREPARATION OF DEGRADABLE LDPE FILLED WITH MODIFIED STARCH
FILM FOR GREENHOUSE COVERING

By
Chuanchom Aumnate

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
MASTER OF ENGINEERING
Department of Materials Science and Engineering
Graduate School
SILPAKORN UNIVERSITY
2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งดัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช ” เสนอโดย นางสาวชวนชม อ่วมเนตร เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น
2. อาจารย์ ดร.จิตติพร เครือเนตร

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อุทัย วิชัย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.จิตติพร เครือเนตร)

...../...../.....

49402203 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : แป้ง/แป้งดัดแปร/ย่อยสลายทางชีวภาพ/พลาสติกคลุมโรงเรือน

ชวชนม อ่วมเนตร : การพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งดัดแปรเพื่อผลิตวัสดุคลุมโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกพืช. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และ อ.ดร.จิตติพร เครือเนตร. 130 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดัดแปรโมเลกุลแป้งโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งและออกตะโนอิล คลอไรด์ ได้เป็นแป้งออกตะโนเอต เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีน สำหรับนำไปพัฒนาเป็นพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีสมบัติย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหาอันเนื่องมาจากการกำจัดขยะพลาสติก โดยมุ่งเน้นที่จะพัฒนาพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการย่อยสลายได้โดยยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานคลุมหลังคาโรงเรือนเพาะปลูกพืช จากการศึกษาพบว่า สมบัติเชิงกลทั้งค่าความต้านทานแรงดึง และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแป้งดัดแปรเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากแป้งดัดแปรซึ่งมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของโมเลกุลแป้งที่ลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ส่งผลให้แป้งมีความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้นและสามารถผสมเข้ากันกับพอลิเอทิลีนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการดัดแปรแป้งด้วยวิธีการดังกล่าวไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของแป้ง อย่างไรก็ตามการผสมแป้ง 30% โดยน้ำหนักในพอลิเอทิลีน ส่งผลให้ค่า % การส่องผ่านของแสงลดลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

49402203 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : STARCH/MODIFIED STARCH/BIODEGRADABLE/GREENHOUSE COVERING FILM

CHUANCHOM AUMNATE : THE PREPARATION OF DEGRADABLE LDPE FILLED WITH MODIFIED STARCH FILM FOR GREENHOUSE COVERING. THESIS ADVISORS : ASST.PROF. CHANCHAI THONGPIN, Ph.D.,AND JITTIPORN KRUEANATE, Ph.D. . 130 pp.

In this research, the chemical modification of hydrophilic cassava starch to become partially hydrophobic was performed in order to enlarge the compatibility between starch and low density polyethylene (LDPE). Cassava starch was chemically modified by esterification with octanoyl chloride to obtain octanoated starch. The blends of LDPE with the octanoated starch show better mechanical property than in LDPE blended with unmodified cassava starch. The result can be attributed to the increasing of hydrophobicity of the octanoated starch leading to the compatibility of the polymers. Increasing octanoated starch content led to higher mechanical properties of LDPE/starch blends. In this study, we found that the thermal stability of starch has not been affected by esterification.

The study of effect of esterified starch on LDPE/starch blends showed that octanoated starch could enhance the compatibility between starch molecule and LDPE matrix. It was found that the incorporating of octanoated starch into LDPE matrix caused the slightly decreasing in light transmission. However, the light transmitted through the blend films are in the acceptable range for being used as greenhouse covering film.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เป็นเพราะความเอื้อเฟื้อ ด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ สถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ และได้รับคำแนะนำด้านวิชาการจาก ผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และ อาจารย์ ดร. จิตต์พิภร เครือเนตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. อุทัย วิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบ การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการอำนวยความสะดวก ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์

และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือกันตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
แนวคิดงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป.....	4
ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เจริญนโยบาย เชิงสาธารณะและการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์.....	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
แป้ง.....	8
ส่วนประกอบของแป้ง.....	9
โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	11
ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง.....	11
การเกิดเจลาตินไนซ์.....	13
การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง.....	14
แป้งดัดแปร.....	15
แป้งดัดแปรที่มีใช้ทั่วไปในท้องตลาด.....	15
พอลิเมอร์ผสม.....	18
กลไกของการเข้ากันได้ (Compatibilization mechanisms).....	19
กรรมวิธีในการทำให้เข้ากันได้ (Method of compatibilization).....	19
สมบัติของพอลิเมอร์ผสม (Properties of polymer blends).....	23

บทที่		หน้า
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	62
	ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแป้ง.....	62
	การเตรียมแป้งดัดแปร(Octanoated starch, OST)จากแป้งมันสำปะหลัง..	63
	การหาค่า Degree of substitution.....	68
	ศึกษาลักษณะพื้นฐานของแป้ง ST และ OST.....	69
	การทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อนของแป้งดัดแปร.....	70
	การผสมแป้งดัดแปร OST กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (twin screw extruder).....	72
	ความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Melt Flow Index).....	73
	สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม.....	74
	ความสามารถในการดูดซึมความชื้น.....	76
	พื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (LDPE/ST/OST).....	77
	ความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST.....	78
	ความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST.....	79
	การเตรียม Thermoplastic starch (TPS) จากแป้ง OST.....	80
	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเจลาตินไนซ์ของแป้งมันสำปะหลัง (ST)...	81
	การเตรียม thermoplastic starch (TPS) จากแป้งดัดแปร OST.....	84
	สมบัติเชิงความร้อนของ TPS จาก OST.....	85
	ลักษณะพื้นฐานของ TPS.....	86
	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS.....	88
	ความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST.....	90
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
	สรุปผลการทดลอง.....	92
	ข้อเสนอแนะ.....	94

	หน้า
บรรณานุกรม.....	95
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้วิจัย.....	130

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่า degree of substitution ที่สภาวะการทดลองต่างๆ	34
2	แสดงปริมาณ Octanoyl chloride ที่ใช้ในการทดลอง.....	65
3	องค์ประกอบภายในสูตรพอลิเมอร์ผสมสำหรับเตรียมพลาสติกคลุมโรงเรือน .	73
4	ค่าดัชนีการไหลของสูตรพอลิเมอร์ผสมสำหรับเตรียมพลาสติกคลุมโรงเรือน ..	74
5	ส่วนผสมในการเตรียม TPS	81
6	แสดงปริมาณ Octanoyl chloride ที่ใช้ในการทดลองเตรียม Octanoated starch	101
7	แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึ่มความชื้นของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST	119
8	แสดงการหาค่า Degree of substitution ของแป้งดัดแปร.....	119
9	แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ในรูปเม็ดแป้งที่ อัตราส่วน OST ต่างๆ.....	120
10	แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ในรูป Thermoplastic starch ที่อัตราส่วน OST ต่างๆ	121

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	6
2	โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง	8
3	โครงสร้างของอะมิโลส	9
4	โครงสร้างอะมิโลเพกติน	10
5	ลักษณะเม็ดแป้ง	11
6	การเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้ง	13
7	การเกิด retrogradation ของแป้ง	14
8	การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน	18
9	แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST	20
10	แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST.....	21
11	บล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟส A และ B.....	21
12	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม	24
13	ลักษณะต่างๆ ของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม	25
14	โครงสร้างแป้งที่ผ่านการบำบัดแปรให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกด้วยออกทีนิล ซัคซินิคแอนไฮไดรด์ (OSA)	32
15	FTIR spectra ของแป้งธรรมชาติ และ MCS ที่มี DS 0.275	35
16	กลไกการเกิดปฏิกิริยา chemical modified starch ด้วย hexamethylene diisocyanate derivatives.....	36
17	ภาพถ่าย SEM ของ starch/SBR composites หลังเกิดการขาดเนื่องจากแรงดึง (a) ไม่ผ่านการดัดแปร, (b) ผ่านการดัดแปรด้วย RF, (c) ผ่านการดัดแปรด้วย RF และ KH792.....	37
18	Catalytic synthesis of substituted starch ด้วย saturated alkyl chain	38
19	ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของแป้งธรรมชาติ(a), แป้งดัดแปรที่ 50°C (b) และ แป้งดัดแปรที่ 90°C.....	39
20	แป้งดัดแปรที่เตรียมได้จากเทคนิค Acid-alcohol modification.....	40

ภาพที่	หน้า
21	IR spectra ของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ: แป้งมันสำปะหลัง(a), แป้งกราฟท์พอลิอะไครลิก แอซิด (b), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต(c), แป้งเอสเทอร์กราฟท์ พอลิอะไครเลตบริเวณ side chain (d), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต (e) 42
22	¹³ C-NMR spectra ของ แป้งกราฟท์พอลิอะไครลิก แอซิด (a), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต (b), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต (c) 43
23	¹ H-NMR spectra ของแป้งมันสำปะหลัง(a), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิ อะไครเลต (b), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลตบริเวณ side chain(c), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต(d) 43
24	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของแป้ง 44
25	โครงสร้างของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ I: แป้งกราฟท์พอลิอะไครเลต, II: แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต, III: แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต 45
26	ภาพถ่าย SEM ของแป้งธรรมชาติ (A) และ แป้งดัดแปรด้วยพลาสมา (B) 47
27	โครงสร้างเคมีของ Pyridine 49
28	โครงสร้างเคมีของ Octanoyl Chloride 49
29	แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม 51
30	การเตรียม Octanoated Starch (OST) 53
31	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70 54
32	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5410) 55
33	เครื่อง METTLER TOLEDO (TGA/SDTA851) 56
34	เครื่อง DSC (Diamond DSC) 57
35	ลักษณะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ 59
36	โครงสร้างของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ 59

ภาพที่	หน้า
37	เครื่องมือวัดค่าดัชนีการไหลของโพลีเมอร์ (Melt Flow Indexer) รุ่น Davenport model10 จากบริษัท Lloyd Instruments 60
38	เครื่องเป่าฟิล์มขนาด Lab scale ยี่ห้อ Haake รุ่น Rheomix3000 60
39	เครื่อง Tensile Testing Machine รุ่น Instron 5542 61
40	ลักษณะสัณฐานของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ 64
41	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ OST และ ST ด้วยเทคนิค FTIR 65
42	กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้ง 66
43	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ OST ที่เตรียมที่เวลาต่างๆ กัน ด้วยเทคนิค FTIR..... 67
44	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่า Degree of substitution (DS) ของ OST.. 68
45	ลักษณะสัณฐานของแป้ง ST และ OST 69
46	TGA Thermogram ของแป้งมันสำปะหลังทั่วไป (ST) และแป้งออกตะโนเอต (OST)..... 71
47	DSC thermogram ของแป้ง ST..... 72
48	เม็ดพลาสติกผสม OST 73
49	TGA thermogram ของพอลิเมอร์ผสม 75
50	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม 76
51	เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้นต่างๆ 77
52	ลักษณะสัณฐานของ LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้น OST 0, 10, 20 และ 30%wt..... 78
53	สมบัติเชิงกลของ LDPE/ST/OST 79
54	ค่าความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม LDPE/ST/OST 80
55	เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (TSE) 81
56	ลักษณะแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ 82
57	ค่า % Haze ของแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ 83
58	TPS จากแป้งดัดแปร OST 84
59	ค่า T_g ของ TPS ที่มี OST เป็นองค์ประกอบ 85

ภาพที่		หน้า
60	ลักษณะพื้นฐานของ TPS.....	87
61	ค่า % Haze ของแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	88
62	สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS (70/30) ที่ประกอบด้วย OST ที่ความเข้มข้น 0-30%wt.....	89
63	ค่าความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS.....	90
64	DSC thermogram ของแผ่นฟิล์ม LDPE, LDPE/TPS30:70/30 และ LDPE/ST/TPS:70/0/30.....	91
65	ลักษณะการเตรียมแป้งดัดแปร OST	101
66	กราฟ FTIR ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร	101
67	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0.4 มล....	102
68	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0.8 มล....	102
69	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 1.2 มล....	103
70	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0 มล. (ST), 0.4 มล. (OST1), 0.8 มล. (OST2) และ 1.2 มล. (OST3).....	103
71	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง	104
72	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง	104
73	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง	105
74	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	105
75	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง	106
76	กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง	106
77	DSC thermogram ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....	107
78	DSC thermogram ของ Octanoated starch	107
79	DSC thermogram ของ LDPE	108
80	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST0	108
81	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST10	109
82	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST20	109
83	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST30	110

ภาพที่		หน้า
84	DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม	110
85	DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST0.....	111
86	DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST5.....	111
87	DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST10.....	112
88	DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST15.....	112
89	DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST20.....	113
90	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST0	113
91	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST10	114
92	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST20	114
93	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST30	115
94	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST	115
95	กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST0.....	116
96	กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST10.....	116
97	กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST20.....	117
98	กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST30.....	117
99	กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST	118
100	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST0.....	122
101	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST10.....	122
102	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST20.....	123
103	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST30.....	123
104	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม พอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST	124
105	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST0 (TPS).....	124
106	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST10 (TPS).....	125
107	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST20 (TPS).....	125
108	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST30 (TPS).....	126
109	ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม พอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST (TPS).....	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันบทบาทของพอลิเมอร์สังเคราะห์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถพบเห็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการใช้พลาสติกเพื่อประโยชน์ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรือ ชิ้นส่วนยานยนต์ โดยคิดเป็นมูลค่าการใช้พลาสติกทั่วโลก มากถึง 150 ล้านตันต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางเกษตรกรรม ได้มีการใช้พลาสติกสังเคราะห์ ในรูปแบบต่างๆ เช่น พลาสติกคลุมแปลงเพาะปลูก อุโมงค์หลังคาต่ำ และ คลุมโรง เรือนเพาะชำ โดยมีปริมาณการใช้สูง ถึง 2 ล้านตันต่อปี [1] แม้ว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์จะเป็นวัสดุที่มีความคงทนแข็งแรง ไม่เป็นสนิม มีน้ำหนักเบา สามารถแต่งเติมสีสັນได้ และสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย แต่พอลิเมอร์ดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในระยะเวลาอันสั้น ไม่ว่าเป็นการย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) หรือเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) จึงเกิดการสะสมของขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์ และมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งถ้านำขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์นี้ไปทำลายโดยการเผา จะได้แก๊สที่เป็นพิษและมีความร้อนสูง หากนำไปทิ้งในมหาสมุทรก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล นอกจากนี้ การขยายอัตราการใช้พลาสติกที่สูงขึ้น ยังก่อให้เกิดขยะพลาสติกเป็นจำนวนมากที่ไม่สามารถกำจัดได้หมด ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำลายระบบนิเวศวิทยาของโลก และยังเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดสภาวะโลกร้อน

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ได้มีความพยายามในการ ผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยนำเอาพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้แทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์ธรรมชาติมักมีความแข็งแรงต่ำ และไม่ทนต่อความชื้น จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ แป้ง เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่ายและสามารถนำมาขึ้นรูปในแม่แบบได้

แป้ง (flour) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติด้วยจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งแป้งนั้นผลิตได้จากธัญพืชที่มีอยู่ในธรรมชาติและมีหลากหลายชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (cassava flour) แป้งข้าวเหนียว (glutinous flour) แป้งข้าวโพด (corn flour) แป้งข้าวเจ้า (rice flour) และแป้งสาลี (wheat flour) เป็นต้น ซึ่งในโครงสร้างของแป้งนั้นจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็น พอลิเมอร์เชิงกิ่ง โดยแป้ง แต่ละชนิดมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันด้วย โครงสร้างทางเคมีของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งทำให้เกิดการเข้ากันได้ยากเมื่อผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่งผลให้เกิดปัญหาความไม่เข้ากัน (incompatibility) ของส่วนผสมทั้งสอง ความไม่เข้ากันหรือการแยกส่วนกันอย่างชัดเจนระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นนอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลงแล้ว ยังส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลและความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ลดลงด้วย การดัดแปรแป้งเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการเพิ่มความเข้ากันได้ในการผสมระหว่างแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยแป้งที่ผ่านการดัดแปรจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์และแป้ง การดัดแปรแป้งสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ออกซิเดชัน อีเทอร์ฟิเคชัน และการทำให้เกิดการเชื่อมโยง [2]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นถึงประโยชน์ของการนำแป้งมาใช้ผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อีกทั้งลดปริมาณขยะพลาสติกในปัจจุบัน แต่ยังคงข้อจำกัดในการนำไปใช้งานอันเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์โดยการดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน รวมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังกล่าว เพื่อนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานในด้านเกษตรกรรม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 พัฒนา/ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene)

1.2.2 พัฒนาพลาสติกที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งแป้งดัดแปร

1.3 แนวคิดงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อใช้ในงานด้านเกษตรกรรม โดยทั่วไปแล้วพลาสติกที่ใช้ในทางการเกษตรส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนหรือ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ ทางชีวภาพ ประกอบกับปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกที่ไม่สามารถกำจัดได้เป็นจำนวนมากและเกิดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำแป้งซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อเพิ่มสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้กับพอลิเมอร์ผสม

เนื่องจากแป้งมีความเป็น hydrophilic สูง ในขณะที่พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนมากมีความเป็น hydrophobic จึงเกิดปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างแป้งและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ การใช้สารช่วยผสม ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้สารพวกกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น แต่สารเหล่านี้มีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาเทคนิคการดัดแปรแป้งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านเกษตรกรรม ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาที่เกิดจากปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทั้งนี้การดัดแปรแป้งจะสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพอลิเมอร์และโมเลกุลของแป้ง ส่งผลให้แป้งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อให้สามารถนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ในอุตสาหกรรมพลาสติก และส่งผลให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกสังเคราะห์ลดลงได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การเตรียมแป้งดัดแปรจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้งมันสำปะหลังและออกตะโนอิล คลอไรด์

1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของแป้งดัดแปรที่มีต่อสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งดัดแปร แป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1.4.3 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งดัดแปรและแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างแป้งรวมทั้งหมด (แป้งดัดแปร: แป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 30 ส่วน ต่อ 70 ส่วน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป

1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมแป้งดัดแปรจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้งมันสำปะหลังและออกตะโนอิลคลอไรด์ เพื่อเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเตรียมแป้งดัดแปรจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ตอนที่ 2 ทำการเตรียมแป้งดัดแปรจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้งมันสำปะหลังและออกตะโนอิล คลอไรด์ จากนั้นติดตาม การเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิค ฟลูออโรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) และวิเคราะห์สมบัติด้านความร้อนของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมตริก อะนาลิซิส (TGA) และเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC)

ตอนที่3 ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (OST/ST/PE) ด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) ที่ปริมาณแป้งดัดแปรต่างๆ กัน คือ 0, 10, 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิการผสม 150 °C และความเร็วรอบในการผสมเท่ากับ 100 รอบต่อนาที โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างแป้งทั้งหมดและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 30 ส่วน ต่อ 70 ส่วน

จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อน (compression molding)

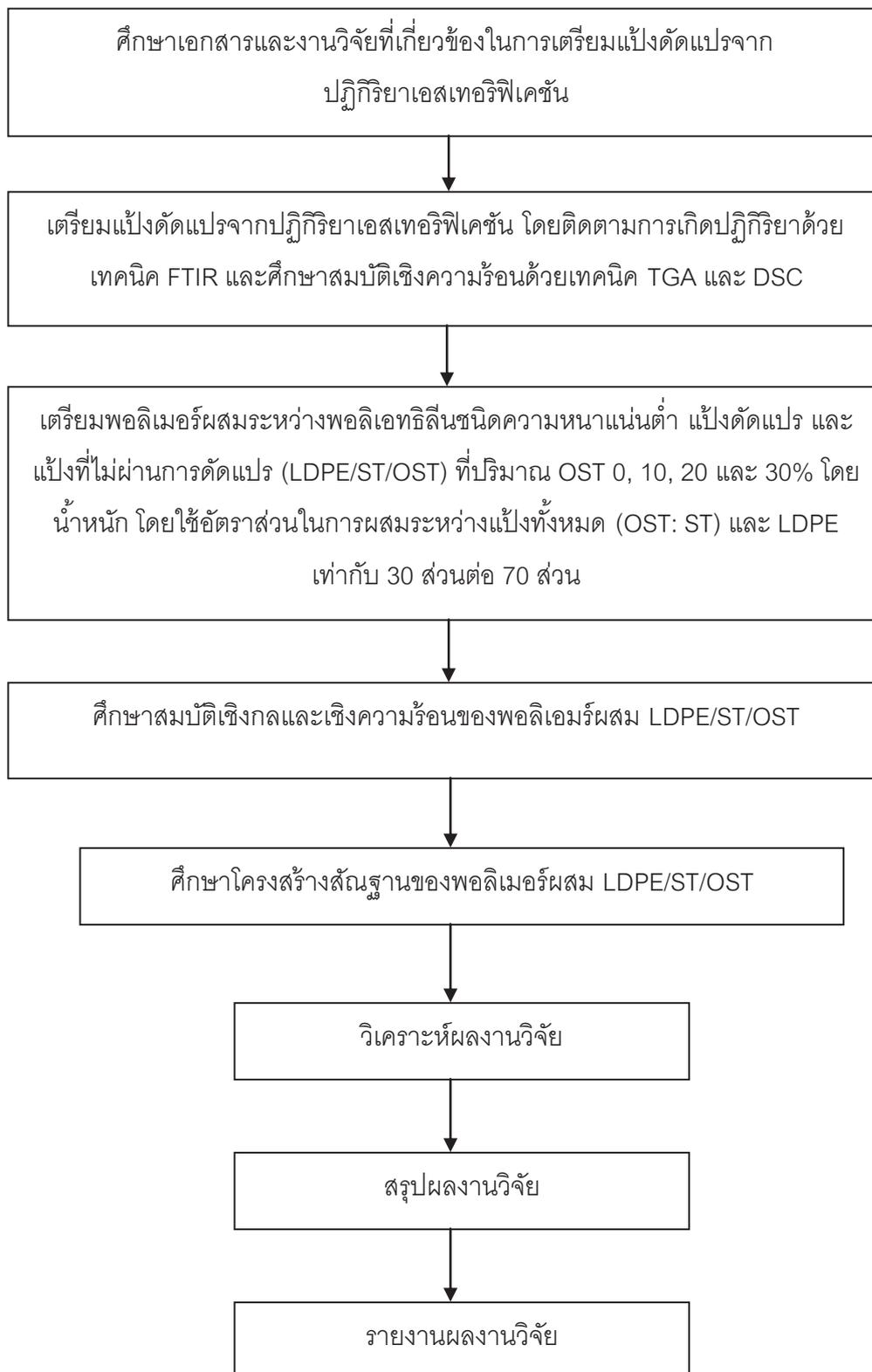
ตอนที่4 ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติต้านทานแรงดึงยืด (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D882 เพื่อตรวจหาปริมาณแป้งดัดแปรที่ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมพร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิค เทอร์โมแกรวิเมตริก อะนาลิซิส (TGA) และเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC)

ตอนที่5 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม (OST/ST/PE) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวและความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1.5.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัย

1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.5.7 รายงานผลงานวิจัย



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เชิงนโยบาย เชิงสาธารณะ และการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

สามารถพัฒนาเทคนิคการดัดแปรแป้งให้คุณสมบัติเข้ากันได้กับโพลีเมอร์ ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาที่เกิดจากปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทั้งนี้การดัดแปรแป้งจะสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างโพลีเมอร์และโมเลกุลของแป้ง นอกจากนี้ยังพัฒนาแป้งให้มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปได้ใกล้เคียงกับพลาสติกสังเคราะห์ สามารถนำแป้งมาใช้ทดแทนใน อุตสาหกรรมพลาสติกส่งผลให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกสังเคราะห์ลดลงได้

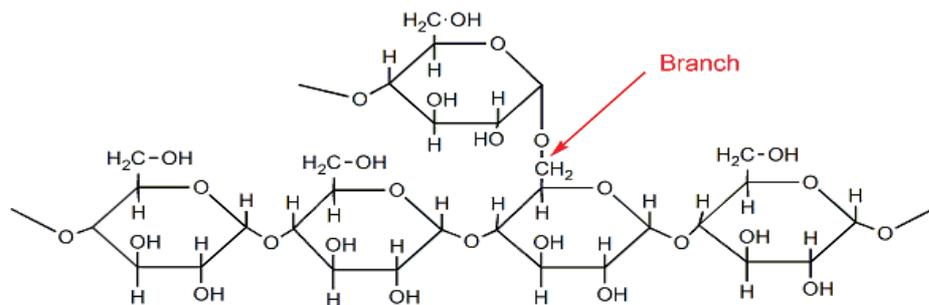
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย หน่วยย่อยแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ด้านปลายของสายพอลิเมอร์ มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ เรียกว่า reducing end group

แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์กิ่ง (อะมิโลเพกทิน) แป้งที่มาจากแหล่งต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดต่างกัน โครงสร้างโมเลกุลของแป้งแสดงดังภาพที่ 2

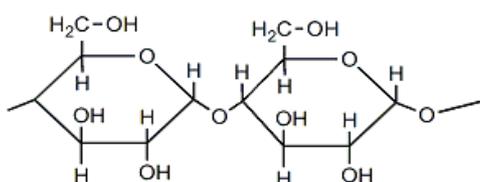


ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง [2]

2.1.1 ส่วนประกอบของแป้ง

2.1.1.1 อะมิโลส (อะมิโลส)

อะมิโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage ดังภาพที่ 3



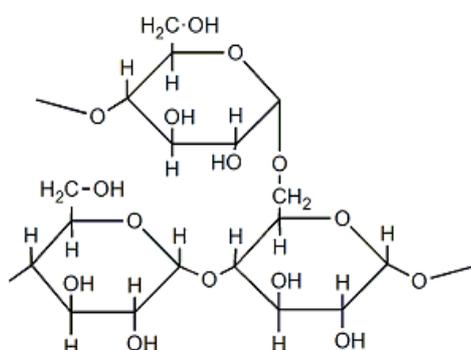
ภาพที่ 3 โครงสร้างของอะมิโลส [2]

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูง ประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ มี ปริมาณอะมิโลสประมาณ 20 % แป้งจากอะมิโลแมส (amylomaize) มีอะมิโลสสูงถึง 80% ในขณะที่ waxy starch ไม่มีอะมิโลสเลย นำหนักโมเลกุลของอะมิโลส อยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน แป้งแต่ละชนิดจะมี Degree of polymerization (DP) ของอะมิโลสต่าง กัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดการเสื่อมสภาพ (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งบ้างแต่ไม่มาก

ตำแหน่งของอะมิโลสในเม็ดแป้งขึ้นกับสายพันธ์ของแป้ง สามารถพบอะมิโลสกระจาย อยู่ทั้งในส่วน อสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) โดยอะมิโลสที่มี ขนาดโมเลกุลใหญ่จะขดเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกตินอยู่ที่ใจกลางเม็ดแป้ง ส่วนที่มีขนาด โมเลกุลเล็กจะพบบริเวณขอบเม็ดแป้ง โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมี หลายรูปแบบ คือ ลักษณะ เป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวคดขาดตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil)

2.1.1.2 อะมิโลเพกติน (อะมิโลเพกติน)

อะมิโลเพกตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วย α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วย α -1,6-glucosidic linkage ซึ่งหน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1,6-glucosidic linkage มีประมาณ 5% ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ในอะมิโลเพกตินทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 3



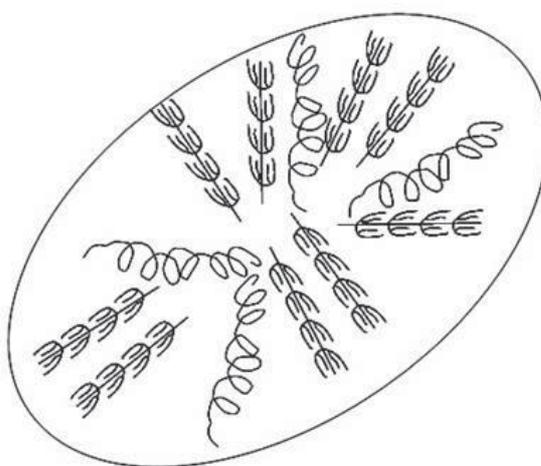
ภาพที่ 4 โครงสร้างอะมิโลเพกติน [2]

ขนาดของโมเลกุลอะมิโลเพกตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก ซึ่งมีหน่วยย่อย 15 หน่วย ประกอบด้วยสายโซ่ A และสายโซ่ B ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งมีหน่วยย่อยประมาณ 45 หน่วยประกอบด้วยสายโซ่ B สายยาว ซึ่งรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนี้กิ่งอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งยังสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

อะมิโลเพกตินมีความสำคัญมากกว่าอะมิโลส ทั้งทางด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้น เมื่อมีอะมิโลเพกตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน

2.1.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก โดยจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็น แบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) โดยลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดแป้งแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะเม็ดแป้ง [2]

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง

2.1.3.1 ชนิดของแป้ง

แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐานของแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะมากที่สุด แต่มีลักษณะการพองตัวและการละลายต่ำสุด เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสสูง ทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น จึงพองตัวได้ต่ำ

แป้งจากส่วนราก เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีการพองตัวขึ้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้งจากส่วนรากจะเกิดเจลาตินไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช

แป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง จะมีการพองตัวสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมันฝรั่งยังทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจาก

สามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าได้ การพองตัวในแป้งจากส่วนหัวจะเกิดเพียงชั้นเดียว และเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของแป้งที่เป็นพอลิอิเล็กโตรไลต์

2.1.3.2. ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง

ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหในเม็ดแป้ง หรือเรียกว่าเป็น จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง ในระดับโมเลกุลมีหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนของพันธะ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบและการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว ความยาวของสาขาในอะมิโลเพกติน

2.1.3.3. สิ่งเจือปนในเม็ดแป้ง

เนื่องจากสิ่งเจือปน เช่น กรดไขมันจากธรรมชาติของแป้งอาจยับยั้งการพองตัวของแป้ง เนื่องจากเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลสได้ นอกจากนี้การใส่สารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง

2.1.3.4. คุณสมบัติหลังการดัดแปรทางเคมี

การดัดแปรด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชันด้วยไฮโปคลอไรต์ จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดแป้งแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชัน (etherification) จะเกิดการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในซึ่ต่ำลง และมีการพองตัวเพิ่มขึ้น

2.1.3.5. ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะการพองตัว

สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่า 20 % จะมีค่าความสามารถในการละลายจะสูงกว่าเมื่อมีแป้งอยู่สูงกว่า 20% การพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งถ้าในสภาวะดังกล่าวมีน้ำน้อย

2.1.4. การเกิดเจลลิตีในซึ่

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นจำนวนมาก ยึดเกาะกัน ด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำและอยู่ในรูปร่างแหไมเซลล์ ซึ่งการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เพียงเล็กน้อย แต่ เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจะส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งคลายตัวลง ทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้ดีขึ้น ส่วนผสมของ

น้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น โดยอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากว่างระหว่าง micelles ยึดหยุ่นได้จำกัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ birefringence ได้

ระยะที่ 2 เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเริ่มให้อุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ว่างระหว่าง micelles ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิด gelatinization เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างโครงสร้าง birefringence ความหนืดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น

ระยะที่ 3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น



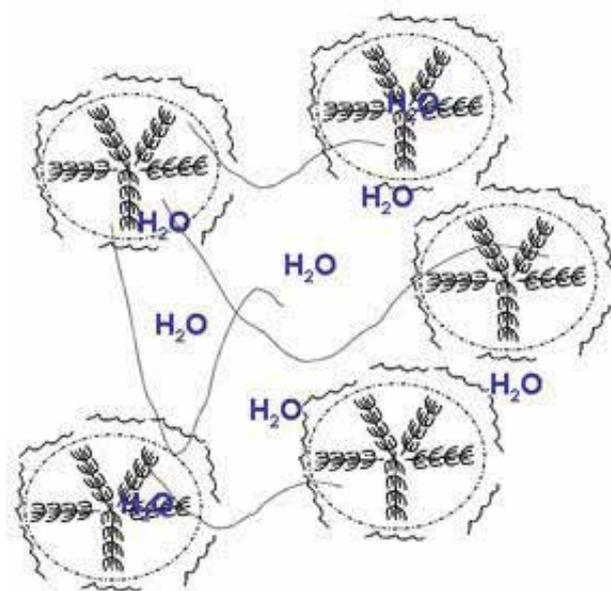
ภาพที่ 6 การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง [3]

การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง ทำให้แป้งสูญเสียความเป็นผลึก โดยโมเลกุลแป้งเปลี่ยนเป็นของเหลว จนเมื่อหยุดให้ความร้อน โมเลกุลแป้งจะเริ่มแข็งตัว ซึ่งอะมิโลสอาจจะยังอยู่ใกล้กัน เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรง ถ้าแป้งเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะเกิดเป็นส่วนอสัณฐาน

มากกว่าเป็นผลึก เมื่อเวลาผ่านไป น้ำ ที่ถูกดูดซับโดยอะมิโลเพกตินในเม็ดแป้ง จะถูกปล่อยออกมาทำให้โมเลกุลแป้งมีความเป็นระเบียบมากขึ้น แป้งก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเกือบทั้งหมด อย่างไรก็ตามน้ำจะไม่ถูกดูดซับถ้ายังไม่ถึงอุณหภูมิการเกิดเจลาตินไนซ์

2.1.5 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง

เมื่อแป้งได้รับความร้อนกับแป้งต่อเนื่องจนเลยอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ จะ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็ กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น และเกิดลักษณะเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึกปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือ การคืนตัวของแป้ง และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลง จะทำให้ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล เรียกว่า syneresis ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น



ภาพที่ 7 การเกิด retrogradation ของแป้ง [3]

การคืนตัวของแป้งขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด -เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆในแป้ง ที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งจะสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืน

ตัวได้เร็วที่สุด ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้ สาร anion หรือ cation เช่น แคลเซียม ในเตรต และยูเรีย เป็นต้น

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีอะมิโลเพกตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุดที่หน่วยของอะมิโลสเท่ากับ 100-200 การทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายอีกครั้งต้องใช้อุณหภูมิ 100-160 °C อะมิโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิด จะมีอัตราการคืนตัวต่างกัน

2.2. แป้งดัดแปร

แป้งดิบที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไปจะยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม จึงต้องนำแป้งมาผ่านกระบวนการดัดแปรต่างๆ เพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเหมาะสมก่อน ซึ่งกรรมวิธีในการดัดแปรแป้งมี 3 วิธีหลัก ดังนี้

2.2.1 ย่อยสลายโมเลกุลให้เล็กลง

โมเลกุลแป้งสามารถถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงได้ ด้วย กรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจางที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส หรือ ใช้กระบวนการที่เรียกว่า เดกซ์ทริไนเซชัน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่แป้งที่อยู่ในสภาพที่แห้งและเป็นกรด จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างตัวแป้งกับตัวออกซิไดซ์ นอกจากนี้ยังสามารถย่อยโมเลกุลแป้งด้วยเอนไซม์ได้อีกด้วย

2.2.2 พรีเจลาติไนเซชัน (Pregelatinization)

กรรมวิธีนี้เป็นการดัดแปรแป้งด้วยกระบวนการทางกายภาพ กล่าวคือ การนำแป้งที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 20-50 เกลบนพื้นผิวที่มีความร้อน จากนั้นแป้งจะแห้งและสุกเป็นแผ่นบางๆ เมื่อแห้งแล้วจึงลอกออกแล้วนำไปบด ซึ่งแป้งที่เตรียมได้จะสามารถละลายน้ำเย็นได้ จึงมีชื่อเรียกว่าอัลฟา

2.2.3 การเตรียมอนุพันธ์ของแป้ง (Starch derivatives)

คือการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของ หน่วยย่อยแอนไฮโดรกลูโคส ทำให้ได้แป้งที่มีสมบัติตามชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาด้วย

2.3 แป้งดัดแปรที่มีใช้ทั่วไปในท้องตลาด

2.3.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starches)

แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรแบบง่ายๆ ทำโดยการให้ความร้อนกับแป้งที่แขวนลอยในน้ำ จากนั้นทำให้แห้งโดยอาจใช้ Spray-dryer หรือ heated roll แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งที่

สะดวกสำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีอุปกรณ์ในการเตรียมแป้งสุก ตัวอย่างการใช้เช่น ใช้เป็น bodying agent ในการขุดเจาะน้ำมัน ใช้เป็น sizing agent ในสิ่งทอและใช้เป็น binder เป็นต้น แป้งฟรีเจลาติไนซ์ จะมีความหนืดและ adhesiveness ต่ำกว่าแป้งสุกที่เตรียมใหม่ๆ

2.3.2. แป้งที่ดัดแปรโดยใช้กรด (acid-modified thin-cooking starches)

เตรียมโดยใช้กรดอินทรีย์เจือจางทำปฏิกิริยากับแป้งในน้ำอุ่น ซึ่งจะทำให้พันธะบางส่วนในเม็ดแป้ง ถูกทำลาย ทำให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติดังนี้

- มีความหนืดลดลงทำให้สามารถใช้แป้งในความเข้มข้นที่สูงขึ้นประมาณ 5 เท่าของ แป้งที่ไม่ดัดแปร
- มีความหนืดของแป้งสุกต่ำและเกิดแตกหักได้ง่าย
- น้ำแป้งที่ความเข้มข้นสูงพบว่าแป้งจะเกิดการคืนตัวสูงมากและเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 95 °C ทั้งนี้อาจเนื่องจากการจับตัวกันของโมเลกุลแป้งสายตรงที่มีขนาดเล็ก ที่อยู่ใกล้ชิดกันมากเนื่องจากแป้งมีความเข้มข้นสูง

แป้งดัดแปรด้วยกรดมักใช้เป็นสารเคลือบ เช่น ในสิ่งทอจะใช้เคลือบเส้นด้ายเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และป้องกันการพันกันของด้ายระหว่างทอ คุณสมบัติในก ารละลายได้ดีและให้ความหนืดต่ำ จะทำให้ได้ฟิล์มที่แข็งแรงเคลือบบนผิวด้าย

2.3.3 แป้งดัดแปรโดยเอนไซม์ (enzyme-thinned starches)

เตรียมโดยใช้เอนไซม์อะมิเลสย่อยแป้งสุกทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ดังนั้นความหนืดจะลดลง และละลายได้ง่ายขึ้น มีการใช้แป้งดัดแปรนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ

2.3.4 แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starches)

เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลคาไรด์ ไฮโปคลอไรท์ ในสารแขวนลอยแป้ง ทำให้โมเลกุล แป้งเปลี่ยนแปลงไป โดยมีการเติมหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลเข้าไปในโมเลกุลแป้ง ทำให้แป้งที่ได้เกิดการคืนตัวน้อย หรือไม่เกิดการคืนตัวเลย ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของแป้งจะถูกตัดด้วยทำให้มีความหนืดลดลง แป้งออกซิไดซ์ละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะ ภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลงมาก แป้งออกซิไดซ์มีการคืนตัวต่ำและให้สารละลายแป้งที่ใส และเมื่อนำไปเคลือบจะได้ฟิล์มที่โปร่งแสง มีการใช้แป้งออกซิไดซ์ในการเคลือบกระดาษที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังมีคุณสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลจำนวนมาก ดังนั้นจึงอาจใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารได้

2.3.5 แป้งอีเทอร์และเอสเทอร์

แป้งไฮดรอกซีเอทิลและแป้งอะซีเตต เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง สารแขวนลอยแป้ง ในสภาพต่างกับเอทิลีน ออกไซด์ หรือ อะซิติก แอนไฮไดรด์ที่ระดับการแทนที่ต่ำ (0.03-0.10) โดย

ในกรณีนี้โมเลกุลแข็งจะไม่ถูกทำลาย ดังนั้นจึงยังคงมีความหนืดสูง แป้งอีเทอร์และเอสเทอร์จะให้ฟิล์มที่แข็งแรง ใส มักใช้เป็น สารเคลือบผ้าฝ้ายและเคลือบกระดาษ ถ้าระดับ การแทนที่สูงขึ้น ($DS > 0.2$) จะยับยั้งการคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์และได้สารละลายที่ใส ในทางการแพทย์ ใช้แป้งไฮดรอกซีเอทิลเป็นตัวยืดพลาสมาในเลือด (blood plasma extender) โดยหน้าที่ของ extender คือรักษาความหนืดและแรงดันออสโมติกในเลือด เอนไซม์ย่อยแป้งที่อยู่ในเลือดจะย่อยแป้ง ไฮดรอกซีเอทิลได้ช้า ดังนั้นแป้งดัดแปรนี้จะอยู่ได้นานจึงมี ประสิทธิภาพที่ดี

2.4 โพลีเมอร์ผสม [4]

โพลีเมอร์ผสม คือ การนำ โพลีเมอร์ต่างชนิดกันมาผสมกันเพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์ โพลีเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น และที่สำคัญเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต แต่การที่จะนำโพลีเมอร์มาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นนั้นจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของโพลีเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย อาทิ เช่น โครงสร้างและคุณสมบัติของโพลีเมอร์แต่ละชนิด รวมทั้งความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ของโพลีเมอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของโพลีเมอร์ผสมที่เตรียมได้

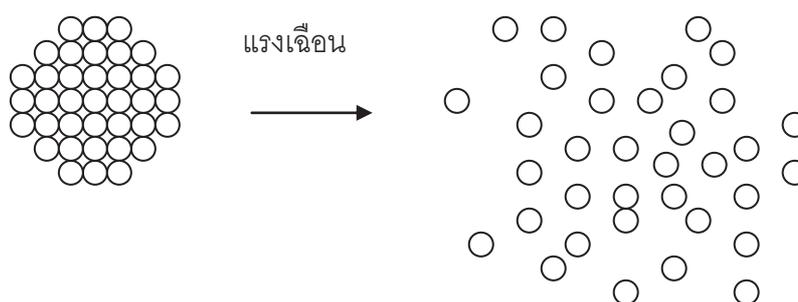
การผสมกันของโพลีเมอร์สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

2.4.1 การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending)

ในวิธีการนี้ โพลีเมอร์ที่นำมาผสมกันต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน เช่น โพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและพอลิเอไมด์ โพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีนออกไซด์ เป็นต้น

2.4.2 การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non-reactive blending)

การผสมวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและไม่ยุ่งยาก โดยใช้เครื่องมือในการผสม เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) หรือ เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) ซึ่งเครื่องมือประเภทนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสมแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้โพลีเมอร์ที่นำมาผสมกันเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การกระจายตัวของโพลีเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน [4]

2.3.1 กลไกของการเข้ากันได้ (Compatibilization mechanisms) [4]

การนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมาผสมกันเพื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการนั้น ส่วนใหญ่จะมีสมบัติด้อยลง โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเปราะ และไม่แข็งแรง เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของเฟสกระจายตัว (disperse phase) กับเมทริกซ์ (matrix) ต่ำ และมีความเค้นสะสม (stress concentration) เกิดขึ้น ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนั้น จึงนิยมใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) หรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสมเพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม โดยทั้งสัณฐานวิทยาและแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสจะมีความสำคัญมากในการช่วยถ่ายโอนแรงในระหว่างการใช้งาน ทั้งนี้ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับภาวะที่ได้รับในระหว่างกระบวนการผสม เช่น เครื่องผสม อัตราการผสม อุณหภูมิของการผสม นอกจากนี้ ยังขึ้นกับสมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบในการผสม รวมถึง แรงตึงผิวขององค์ประกอบในขณะหลอมเหลวอีกด้วย

2.3.2 กรรมวิธีในการทำให้เข้ากันได้ (Method of compatibilization) [4]

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อให้พอลิเมอร์เข้ากันได้ และทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติตามความต้องการมีด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้จึงขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลักซึ่งจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้ คือ

2.3.2.1 ความเข้ากันทางอุณหภูมิก่อนผลศาสตร์ (Thermodynamic miscibility) [4]

โดยหลักการจะขึ้นกับสมดุลระหว่างเอนทาลปี (enthalpy) และเอนโทรปี (entropy) ของการผสมที่มีต่อพลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing) โดยที่เอนโทรปีเป็นการวัดระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) หรือความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเมื่อมีการผสมเกิดขึ้น โดยการผสมจะทำให้เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ($S_2 > S_1$) สำหรับโมเลกุลใหญ่ๆ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้น การเข้ากันได้จึงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสมจะแสดงไว้ในสมการที่ 2.1

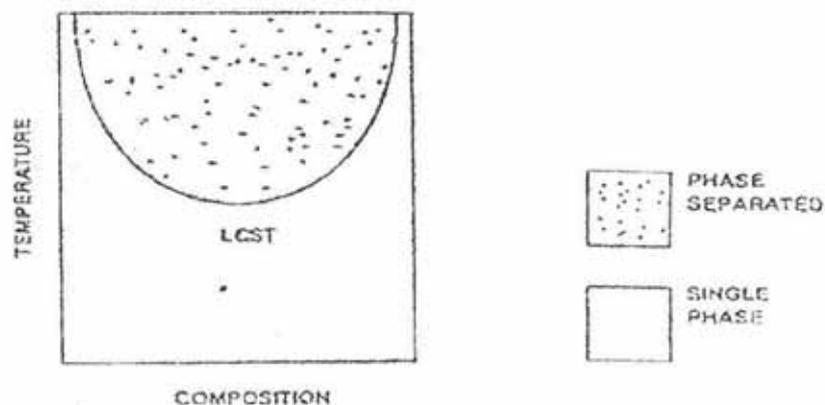
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

โดยที่ ΔG = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม

ΔH	=	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม
ΔS	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
T	=	อุณหภูมิ (K)

โดยการผสมที่สามารถเข้ากันได้ นั้น ΔG ต้องมีค่าเป็นลบ หรือ $\Delta H - T\Delta S < 0$ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

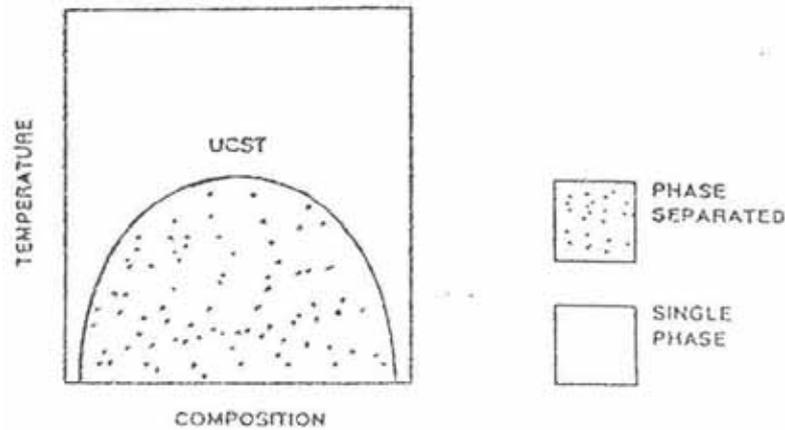
กรณีที่ 1 การผสมที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic mixture) คือ ภายในระบบจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เช่น การที่โมเลกุล A กับโมเลกุล B ดึงดูดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าเป็นลบ ($\Delta H < 0$) นั่นคือ การผสมสามารถเข้ากันได้ และเมื่อสร้างเป็นแผนภาพเฟส ดังแสดงในภาพที่ 2.8 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ มีผลทำให้ของผสมมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟสขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลมีการสั่นเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง และอุณหภูมิต่ำสุดที่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการแยกเฟส เรียกว่า lower critical solution temperature (LCST)



ภาพที่ 9 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง LCST [4]

การผสมที่เป็นการปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic mixture) คือ ภายในระบบ จะไม่มีแรงดึงดูดต่อกัน ซึ่งมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta H > 0$) ดังนั้น การผสมจะสามารถเข้ากันได้เมื่อ $T\Delta S$ มีค่ามากกว่า ΔH เพื่อให้ ΔG มีค่าเป็นลบ นั่นคือ การผสมที่

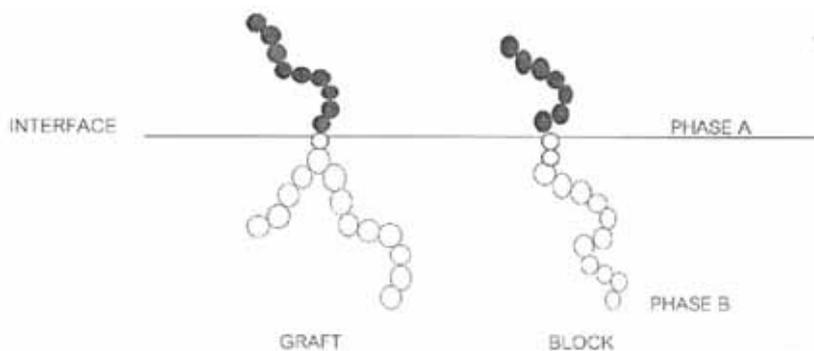
เข้ากันได้จะเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง หรือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นอุณหภูมิสูงสุดที่พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเฟส ที่เรียกว่า upper critical solution temperature (UCST)



ภาพที่ 10 แผนภาพเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่แสดง UCST [4]

2.3.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymer) [4]

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่า กราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะที่ประกอบด้วยบล็อกที่เหมือนกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่ง โคพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพบว่าสายโซ่ของพอลิเมอร์ต้องยาวพอที่จะจับกับพอลิเมอร์ที่ผสม แต่ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงเกินไป เพราะจะแพร่ไปที่ผิวระหว่างเฟสได้ช้ากว่าโคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งกลไกของการเป็นสารช่วยผสมแสดงไว้ในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 บล็อกและกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างเฟส A และ B

ทั้งนี้โครงสร้างทางเคมี และ น้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสมอย่างมาก จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสมโดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไตบล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไตบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกสั้นสลับยาวจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

การผสมพอลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันได้ บ่อยครั้งขึ้นกับความสามารถของสารช่วยผสม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารช่วยผสมจะมีหน้าที่ดังต่อไปนี้ คือลดแรงดึง ผิวระหว่างผิวสัมผัสในภาวะหลอมเหลว ทำให้ดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ ช่วย เพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนแรงระหว่างเฟส และเพิ่มความคงขนาดของดิสเพอร์สเฟส ภายใต้ภาวะของการอบเหนียว (annealing)

2.3.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymer) [4]

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม อาจได้จากการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยหมู่ฟังก์ชันต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮดรอกซิลกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ ซึ่งการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือโดยผ่านเครื่องอัดรีด เช่น การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ บนสายโซ่ตรงของพอลิโอฟีนส์ โดยหมู่แอนไฮไดรด์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทำให้พอลิโอฟีนส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมในทางการค้า และมีราคาไม่แพงมากนัก

2.3.2.4 การเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต (In-situ grafting copolymerization) [4]

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิด

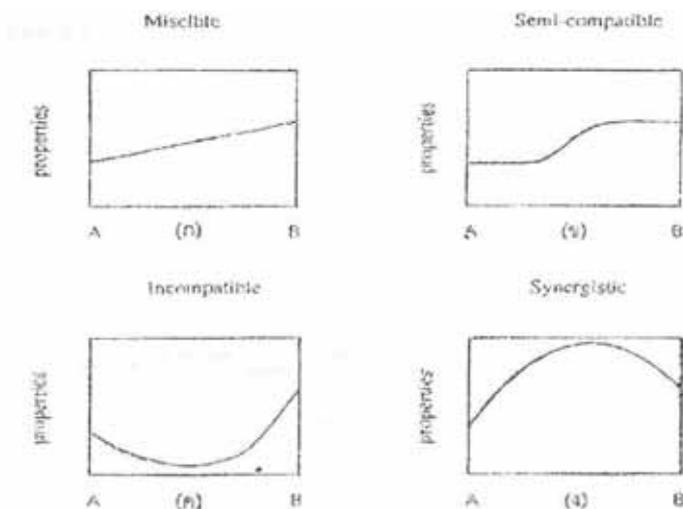
ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเตอร์ กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสมอาจมีได้ ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมสารริเริ่มในระหว่างการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดกับพอลิเมอร์แบบควบแน่น
3. เกิดการขาดหรือรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อที่จะสร้างบล็อกหรือกราฟต์ โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่มีความเค้นเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม (Properties of polymer blends) [4]

สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นกับอัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบ รวมทั้งสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ ลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละองค์ประกอบ (ลักษณะคล้ายแก้ว หรือยาง หรือพอลิเมอร์กึ่งผลึก) สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการผสม และการจัดเรียงโมเลกุล

การผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จะแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาเพียงเฟสเดียว ซึ่งเป็นการง่ายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 12



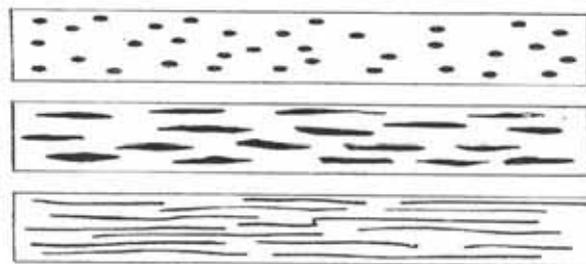
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและอัตราส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสม [4]

ภาพที่ 12 แสดงระบบการผสมที่สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ เห็นได้ว่าอัตราส่วนการผสมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังแสดงในภาพที่ 12 (ก) แต่ในการผสมส่วนใหญ่มักไม่เกิดความเข้ากันได้สมบูรณ์ โดย จะมีความเข้ากันได้บางส่วน (semi-compatible) กล่าวคือ อนุภาคของดีสเฟอริสเฟสที่หนา ดเล็กจะกระจายอยู่ในเมทริกซ์โดยจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างเฟส และเมื่อทำการ พลิตทกราฟระหว่างสมบัติและอัตราส่วนการผสมจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส ดังแสดงใน ภาพที่ 12 (ข) โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสหลักหรือดเมทริกซ์ และควบคุมสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน ส่วนบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกราฟจะมีสาเหตุมาจากการกลับเฟสของระบบการผสม

ในระบบที่มีความเข้ากันน้อยมากหรือไม่เข้ากันจะมีการแยกเฟสเกิดขึ้น โดยดีสเฟอริสเฟสจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กระจายอยู่ในเฟสหลัก และระหว่างเฟสจะมีแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ หรือไม่มีเลย จากลักษณะดังกล่าวสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ไม่นิยมนำไปใช้งานและจะได้กราฟระหว่างอัตราส่วนการผสมและสมบัติเป็นรูปตัวยู ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ค) ส่วนระบบสุดท้ายจะพบเห็นได้น้อย โดยการผสมจะปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่าระบบอื่นๆ กล่าวคือ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมากกว่า หรือเท่ากับ พอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ง)

2.3.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (Morphology of polymer blends) [4]

การจัดเรียงตัวหรือสัณฐานวิทยาของแต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสมจะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง สัณฐานวิทยาอาจมีลักษณะของดิสเพอร์สเฟสกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยดิสเพอร์สเฟสจะมีลักษณะเป็นทรงกลม แผ่น หรือเส้นใย ดังในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ลักษณะต่างๆ ของดิสเพอร์สเฟสที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม [4]

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม จะขึ้นกับอัตราส่วนของการผสม อัตราส่วนของความหนืดในแต่ละองค์ประกอบ แรงตึงผิว และภาวะของการผสม โดยองค์ประกอบที่มีเป็นจำนวนมากกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเมทริกซ์หรือเป็นเฟสหลัก โดยขนาดของดิสเพอร์สเฟสจะถูกควบคุมจากการแตกตัวเป็นหยดของดิสเพอร์สเฟส (drop breakup) และการรวมกลุ่ม (coalescence) ของดิสเพอร์สเฟส โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม แรงตึงผิว ระหว่างผิวสัมผัส ลักษณะการไหลของแต่ละ องค์ประกอบ นอกจากนี้ รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสยังสามารถควบคุมได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างเช่น รูปร่างของดิสเพอร์สเฟสอาจถูกเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมเป็นเส้นใยจากการไหลแบบยืดดึงที่บริเวณหัวดาย หรือจากทรงกลมเป็นแผ่นจากการยืดดึง 2 ทิศทาง ในกระบวนการเป่า เป็นต้น

ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด เข้าด้วยกันนั้น ส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ดังกล่าวมักไม่เข้ากันโดยจะแยกเป็น 2 เฟส ตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะขึ้นกับอัตราส่วนการผสม สมบัติการไหลของแต่ละองค์ประกอบ และภาวะในการผสม กล่าวคือ เมื่อผสมดิสเพอร์สเฟสในอัตราส่วนน้อย ดิสเพอร์สเฟสจะกระจายอยู่ในเฟสหลัก โดยอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ทั้งนี้ขึ้นกับภาวะของการขึ้นรูป และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมขึ้น ดิสเพอร์สเฟส และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมต่อไป ดิสเพอร์สเฟสเกิดการกลับเฟส (phase inversion) เปลี่ยนเป็นเฟสหลัก โดยก่อนถึงจุดนี้ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการกลับเฟสทั้ง 2 เฟส เรียกรูปการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ว่า co-continuous ตัวอย่างของการกลับเฟสนี้

สามารถเห็นได้จากการสังเคราะห์ (high impact polystyrene, HIPS) โดยในช่วงแรกเฟสของยางจะเป็นเฟสหลัก แต่เมื่อสิ้นสุดการสังเคราะห์แล้วพอลิสไตรีนจะเป็นเฟสหลัก

2.4 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [5,6]

เนื่องจากปริมาณการใช้งานของพลาสติกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมากเรื่อยๆ จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดี เหนือกว่าวัสดุอื่น คือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมี สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และยังมีราคาถูก ด้วยสมบัติที่ดีหลายประการจึงทำให้การใช้งานของพลาสติกเป็นไปอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น ด้วยเช่นกัน จนก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความทนทานต่อการย่อยสลายและใช้เวลานานนับร้อยปีกว่า จะมีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วน พลาสติกส่วนมากมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์สูงเพราะโมเลกุลของพลาสติกไม่ยอมให้น้ำผ่านเข้าออก จึงทำให้ออกาสที่จุลินทรีย์ที่ปล่อยเอนไซม์ออกมากที่เข้าย่อยสลายได้น้อยลง ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น หากกำจัดไม่ถูกวิธีจะเกิดเป็นปัญหาที่สำคัญของสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น จึงมีการศึกษาการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. การปรับปรุงพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นการนำเอาพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมาปรับปรุงโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือทางเคมี เพื่อทำการผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น ใช้ทำชิ้นส่วนยึดอวัยวะที่เป็นกระดูกในร่างกาย หรือใช้ทำฟิล์มสำหรับห่อผลิตภัณฑ์

2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น พลาสติกสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ แต่ต้องมีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกเอสเทอร์เท่านั้น เช่น พอลิคาร์โพลแลกโตน (carnpolactone) เรียกว่า PCL และพอลิไกลโคลิก แอซิด เป็นต้น

3. การนำสารเติมแต่งใส่ลงในพลาสติกเพื่อปรับปรุงให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น การเติมแป้งในพลาสติก โดยแป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติกและมีกลไกการสลายตัวของพลาสติก คือ ชั้นแรกที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติก

ทางตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์นี้จะย่อยโมเลกุลของแป้งให้มีขนาดเล็กลง จนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อถูกย่อยสลายต่อไป ทำให้เม็ดแป้งหายไปจากเนื้อของพลาสติก เกิดเป็นรูพรุน (porus) ขนาดเล็กในเนื้อพลาสติก ส่งผลให้เนื้อพลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นในขั้นที่สอง น้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในธรรมชาติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (auto-oxidation) ได้สารเปอร์ออกไซด์ สารดังกล่าวจะเข้าไปกระตุ้นโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้เกิดการแตกตัว ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ต่อไปได้ เกิดเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้อัตราเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นกับ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ เกลือของโลหะ สารอาหารที่อยู่ในดิน รวมไปถึงความหนาของผลิตภัณฑ์ พลาสติกที่ใช้ส่วนมากเป็นเทอร์โมพลาสติก

จะเห็นได้ว่า แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและมีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสสามารถพองตัวขึ้นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะที่เปลี่ยนรูปได้ นำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ มีราคาถูก และมีความบริสุทธิ์สูง จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัสดุใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งาน อย่างไรก็ตามพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์จะมีความเข้ากันได้ต่ำ เนื่องมาจากคุณสมบัติความชอบน้ำสูง (hydrophilic) ของแป้งและความชอบน้ำต่ำ (hydrophobic) ของพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนหรือ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติด้านต่างๆ ต่ำลง เช่น คุณสมบัติเชิงกลลดต่ำลงนำไปสู่ข้อจำกัดในการนำไปใช้งานด้านต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์จึงมีการศึกษาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ได้แก่

2.4.1. การใช้พลาสติกไซเซเซอร์ (plasticizer)

พลาสติกไซเซเซอร์ที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ กลีเซอรอล มีความสามารถในการทำให้แป้งเกิดเจลาติไนซ์ก่อนที่จะนำไปผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มสมบัติการไหลหรือเพิ่มลักษณะความเป็นพลาสติกให้กับแป้ง

2.4.2. การทำกราฟท์ โคโพลิเมอไรเซชัน (graft copolymerization)

การทำปฏิกิริยา graft copolymerization ของแป้งนั้น ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) บนสายโมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ที่นำมาทำปฏิกิริยา ทั้งนี้วิธีทางเคมีที่เป็นที่นิยมที่สุดได้แก่ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีรีค โดยซีรีคไอออนจะถูกรีดิวซ์ได้เป็นซีรีล จากนั้น

อะตอมไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ซึ่งเป็นการเริ่มต้นปฏิกิริยากราฟท์ โคพอลิเมอร์ไรส์ ส่วนกระบวนการทำให้เกิดอนุมูลอิสระโดยวิธีการฉายรังสี สามารถทำได้โดย การทำให้ สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน และเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งนอกจาก 2 วิธีนี้แล้วยังมีวิธีอื่นๆ ในการเตรียมกราฟท์ โคพอลิเมอร์ไรส์ได้อีก ตัวอย่างเช่น การให้มอนอเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุพันธ์ จากสารแอลคาไลน์ โลหะเมทัลแอลคอกไซด์ของแป้ง สาย โซ่กราฟท์โคพอลิเมอร์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีส่วนนำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้การนำไปใช้ประโยชน์จำกัด. การนำแป้งไปทำปฏิกิริยากับไอโซน-ออกซิเจน จากนั้นนำไปให้ความร้อนหรือเติมสารรีดิวซ์ในสภาวะที่มีมอนอเมอร์ เป็นต้น

2.4.3. การดัดแปรทางเคมี (chemical modified starch)

สามารถทำได้โดยการเติมโมเลกุลที่มีความเป็น hydrophobic ลงบนสายโซ่ของแป้ง เพื่อแทนที่ hydroxyl group ของแป้ง หรืออาจทำการดัดแปรหรือเพิ่มความเป็นขั้วให้กับโพลิเมอร์ เพื่อให้เกิดการผสมเข้ากับแป้งก็ได้เช่นกัน หรืออาจใช้เทคนิคการใช้สารจับยึด (Coupling agent) โดยจะผสมสารจับยึด (coupling agent) ลงในระบบการผสม โดยสารจับยึด (coupling agents) ที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride), โพลีไวนิล แอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol), สารจับยึดประเภทซิลิโคน (silane coupling agent) เป็นต้น Chandra (1997) [3] กล่าวถึงการใช้สารจับยึดประเภทซิลิโคน (silane coupling agent) มาใช้ร่วมกับแป้งข้าวโพด พบว่า ตัวซิลิโคนจะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน มันจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของแป้งข้าวโพดกับพลาสติกได้เป็นอย่างดี

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

van Soest และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของแป้งต่อคุณสมบัติในการอัดรีดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากการศึกษาพบว่า ทั้งแป้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและต่ำต่างก็มีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก แต่จะมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่สะสมอยู่ วัสดุที่มี ความชื้นสูงจะมีลักษณะเหนียว เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งมีปริมาณน้อยลง การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยทำให้เกิดไฮโดรลิกซิสด้วยกรด ทำให้สายโซ่ส่วนอะไมโลสสั้นลง และอะไมโลเพกตินที่เป็นสายโซ่กิ่งที่มีปริมาณลดลง ทำให้การดูดน้ำของแป้งลดลงได้

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความเป็นผลึกของฟิล์มชนิดต่างๆ ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง อะไมโลส และอะไมโลเพกติน ด้วยกระบวนการหล่อจากสารละลาย (solution casting) โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction เทคนิค Light microscopy เทคนิค transmission electron

microscopy และเทคนิค differential scanning calorimetry พบว่าฟิล์มอะไมโลสมีปริมาณผลึกประมาณ 30% โดยน้ำหนัก ฟิล์มอะไมโลเพกตินเป็นอสัณฐานทั้งหมด และฟิล์มผสมระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกติกมีปริมาณผลึกสูงกว่าที่คาดไว้ เนื่องจากผลของการเกิดผลึกร่วม (co crystallization) ระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกติน นอกจากนี้ฟิล์มผสมที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ จะพบการแยกเฟสของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน และฟิล์มที่มีปริมาณอะไมโลสสูง สามารถลดการแยกเฟสได้โดยการเกิดเจลของอะไมโลสและการเกิดโครงข่ายของอะไมโลส โดยความสามารถในการดูดน้ำของฟิล์มขึ้นกับโครงสร้างภายในและความเป็นผลึกของฟิล์ม

นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล:ซอพิทอล อัตราส่วน 1:1) ต่อความสามารถในการดูดน้ำของฟิล์มที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ จากการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่พลาสติกไซส์ด้วยกลีเซอรอล สามารถดูดความชื้นได้เร็วในช่วงแรก และฟิล์มที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์สูงกว่า จะสามารถดูดความชื้นได้สูงกว่าด้วย และความชื้นมีผลต่อค่า young's modulus ของวัสดุ กล่าวคือที่ปริมาณความชื้นสูง วัสดุจะมีค่า young's modulus สูงขึ้นด้วย

Ioannis Arvanitoyannisa และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ความสามารถในการซึมผ่านและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลิเอสเตอร์ผสมระหว่าง LDPE และแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการอัดรีดในสภาวะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่างๆ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน พบว่าโพลิเอสเตอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมากกว่า 30%โดยน้ำหนัก จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่ความสามารถในการยอมให้ก๊าซและไอน้ำซึมผ่านสูงขึ้น และอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดได้ดีขึ้นเมื่อโพลิเอสเตอร์ผสมมีปริมาณแป้งสูงถึง 10%โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังทำการศึกษาคูณสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากการผสม LDPE กับแป้งสาลี พบว่าได้ผลในลักษณะเดียวกับแป้งมันสำปะหลังดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

Mani และ Bhattacharya [9] ได้ทำการศึกษาสมบัติของแป้งที่ผสมกับ aliphatic biodegradable polyester ซึ่งจะใช้ poly ϵ -caprolactone, polybutylene succinate และ butanediol-adipate-terephthalate copolymer แล้วเติมตัวเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ซึ่งส่งผลให้แป้งและโพลิเอสเตอร์ผสมเข้ากันได้ดี สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในที่นี้ได้แก่ มาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดดยทำการผสมแป้งในสัดส่วนต่างๆ จาก 10-70 %โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (twin-screw extruder) จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้มีผลต่อค่าค่าแข็งแรงเชิงกล โดยจะเห็นได้จากค่า tensile strength ที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Perra และคณะ [10] เตรียมฟิล์มกินได้ (edible film) โดยนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์ เป็นสารเชื่อมโครงข่าย จากนั้นศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการแพร่ผ่านของน้ำผ่านแผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้น จากผลการศึกษาพบว่าฟิล์ม ที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูงจะยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้ต่ำ

การผสมแป้งกับพอลิเอทิลีนโดยไม่มีการใช้สารช่วยผสม จะส่งผลให้เกิดการแยกส่วนกัน ระหว่างเฟสของแป้งและเฟสของพอลิเอทิลีน การผสมที่ไม่เข้ากันนี้จะทำให้เหลือส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เป็นจำนวนมาก และเป็นสาเหตุของมลพิษที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป นอกจากนี้ ความไม่เข้ากันยังเป็นสาเหตุให้มีคุณสมบัติเชิงกลต่ำด้วย ดังนั้นจึงมีการดัดแปรแป้ง เพื่อให้สามารถผสมกับพลาสติกได้โดยการกราฟมอนอเมอร์ เช่น อะคริลาไมด์, อะคริโลไนไตรล์ และ เมธิล เมทาคริเลต บนโมเลกุลของแป้งโดยใช้เซอริก ไอออนเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา [11]

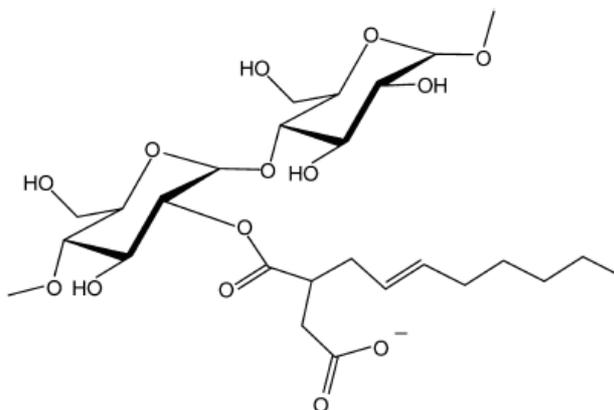
จากการศึกษาของ Akaranta [12] พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึงยืดของโพลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อมีปริมาณแป้งสูงขึ้น และการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังเพื่อให้เกิดความเป็น ไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้น สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและโพลิเอทิลีน

Nakamura และคณะ [13] ได้นำแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งธรรมชาติ แป้งอะไคเปต แป้งอะเซทิลเลต และแป้งมันสำปะหลัง มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องเครื่องผสมที่ให้แรงเฉือนสูง โดยผสมน้ำมันพืช และแคลเซียม สเตียเรต ความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาลักษณะการผสมกันที่เข้ากันได้ดีเพียงใด และศึกษา ความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกที่ได้ โดยมีปริมาณแป้งเป็นส่วนต่างๆกัน คือ 5,10,20 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาให้ผลว่า ยิ่งเพิ่มปริมาณแป้งมากขึ้น จะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะความเข้ากันของโพลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและพลาสติก พบว่าการผสมกันของ แป้งธรรมชาติและพอลิเอทิลีนนั้น มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้ต่ำ เนื่องจากพอลิเอทิลีนมี ความเป็นไฮโดรโฟบิก ในขณะที่แป้งเป็นสารที่มี ความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง ส่วนแป้งอะเซทิลเลตนั้น สามารถผสมเข้ากับพอลิเอทิลีนได้ดี เนื่องจากหมู่อะเซทิลในโมเลกุลแป้งจะช่วยลดความเป็นขั้วของแป้งลง ทำให้สามารถผสมเข้ากับพอลิเอทิลีนได้ดีขึ้น ส่วนในกรณีของแป้งอะไคเปตพบว่า สามารถผสมเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนได้ดีกว่าแป้งธรรมชาติและแป้งอะเซทิลเลต แต่จะให้คุณสมบัติทางกลที่ไม่ดีนัก

การดัดแปรแป้งมันฝรั่งที่ประกอบด้วยอะมิโลส 19% และ อะมิโลเพกติน 81% ด้วยออกตะโนอิล คลอไรด์ โดยมีพรีดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสารละลายเอทานอลสามารถทำได้โดย

ใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ Mullen และ Pacsu ซึ่งในปฏิกิริยาใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์เพื่อให้แป้งเกิดการสลายตัวน้อยที่สุด ในที่นี้นอกจาก พีรีดีนจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายด้วย [14]

นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรแป้งให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกด้วยสาร ออกทีนิล ซัคซินิค แอนไฮไดร (OSA) ในรูปของอิมัลชันเพื่อลดความสามารถในการดูดน้ำของแป้ง ซึ่งการดัดแปรแป้งด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้แป้งแอโอออนิค ซึ่ง ระบบอิมัลชันในการศึกษานี้สามารถเตรียมได้จาก ไดโอดีล ซิล ไดเมธิลแอมโมเนียม โบรไมด์ (DDAB) พบว่าการดัดแปรทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งสูงขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นประจุที่ผิวแป้งซึ่งขึ้นกับปริมาณการแทนที่ ขนาดอนุภาคน้ำหนักโมเลกุล และอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นประจุที่ผิวของ พอลิเมอร์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ DDAB ที่ใช้เตรียมอิมัลชัน ความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการดัดแปรแป้งทำให้เกิดชั้นการดูดซับที่หนาขึ้น โดยแป้งที่ได้จากการดัดแปร (OSA-starch) สามารถนำไปใช้ใน งานด้าน encapsulation สารพวกไฮโดรโฟบิกได้ ซึ่งความเป็นไฮโดรโฟบิกของหมู่แทนที่มี ความสำคัญมากต่อการดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของ ionic surfactants หรือโมเลกุลที่มีประจุ



ภาพที่ 14 โครงสร้างแป้งที่ผ่านการทำดัดแปรให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกด้วยออกทีนิล ซัคซินนิค แอนไฮไดรด์ (OSA) [14]

Waliszewska และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแป้งธรรมชาติเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งเจลาตินไนซ์ แป้งฟอสโฟริเลต แป้งครอสลิงค์ฟอสโฟริเลต และแป้งไฮดรอกซีโพรพิเลต เนื่องจากการดัดแปรทางเคมีสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆของแป้งได้ ซึ่งการการศึกษาพบว่า แป้งฟอสโฟริเลต และแป้งไฮดรอกซีโพรพิเลต มีความใสมากขึ้น มีความเสถียรต่อการแช่แข็งที่ดีขึ้นและมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ต่ำลง นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงผิวแป้งด้วย สารเชื่อมประสานประเภทซิลเลน (silane coupling agent) เพื่อให้มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการงานด้านการพิมพ์อีกด้วย [16]

Konig และ Huang [17] ทำการเตรียมอนุพันธ์ของแป้งอะซิเตต โดยทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งด้วยอะเซติกแอนไฮไดรด์ในกรดอะเซติกที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้กรดซัลฟิวริก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากการทำรีฟลักซ์เม็ดแป้งในตัวทำละลายผสมระหว่างไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (10%v, DMSO) และน้ำกลั่น อย่างน้อย 1 ชั่วโมงเพื่อให้เม็ดแป้งแตกออก งานวิจัยนี้ได้ทำการผสม PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง 40000-80000g/mol กับ แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (HA-CS, 70% อะมิโลส) หรืออนุพันธ์ของแป้งอะซิเตต เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค DSC, DMTS, Tensile testing เปรียบเทียบกับฟิล์มผสมที่เตรียมจาก poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)(PHBV, 11.6%HV content) จากการศึกษพบว่า ทั้งฟิล์มผสมที่เตรียมจาก PCL และ PHBV ซึ่งผสมกับแป้ง เกิดการแยกเฟสขึ้น โดย PPHBV/starch acetate blend เกิดการแยกเฟสและมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า PCL/starch blend ซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่อการดึงยืด (tensile strength) ลดลงจาก PCL เพียง 15% และมี modulus เพิ่มขึ้น 50%

เมื่อเทียบกับ PCL และจากเทคนิคการดัดแปรแป้งด้วยเทคนิคการเตรียม starch acetate derivatives นี้ทำให้สามารถผสมแป้งลงใน blends ได้สูงถึง 25% โดยน้ำหนักโดยยังคงคุณสมบัติที่ตั้งใจได้กล่าวมาแล้ว

biodegradable starch/poly(vinyl alcohol) (PVA) film มีสมบัติการชอบน้ำ (hydrophilicity) และมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี จากข้อด้อยนี้จึงทำการดัดแปรแป้งข้าวโพดด้วยเมธิเลต โดยผสมแป้งเมธิเลต (MCS) กับ PVA จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ความต้านทานน้ำ (water resistance) และความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติ (biodegradability) ของ MCS/PVA film จากการศึกษาค้นพบว่า MCS/PVA film มีความต้านทานน้ำสูงกว่า native starch/PVA film อย่างไรก็ตามตามสมบัติความต้านทานน้ำของ MCS/PVA films ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ (DS) ของ methylated starch จาก 0.096 เป็น 0.864 ผลการย่อยสลายโดยใช้เทคนิค Enzymatic, microbiological และ soil burial biodegradation พบว่า ความสามารถในการย่อยสลายของ MCS/PVA film ขึ้นกับปริมาณแป้งใน matrix อัตราการสลายตัวของแป้งใน starch/PVA film เกิดช้าลงโดยการผสมแป้งกับ PVA ทั้ง tensile strength และ percent elongation at break ของ MCS/PVA film มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ DS ของ methylated starch ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มส่วนของ methylated starch ใน film matrix ทำให้ tensile strength และ percent elongation at break ของ film ลดลง[18]

ปัญหาที่พบในการผสมแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ คือ ความสามารถในการย่อยสลายของแป้งจะลดลงตามปริมาณพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้

Poly (vinyl alcohol) (PVA) เป็นโพลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ละมีคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic biodegradable polymer) ซึ่งประกอบด้วย C-C bonds อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเกิด ไฮโดรลิซิส (degree of hydrolysis) น้ำหนักโมเลกุล และการดัดแปรทางเคมี [19]

แป้งเมธิเลตสามารถเตรียมได้จากการกระจายเม็ดแป้งในสารแขวนลอยซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 โดยใช้สารไดเมทิล ซัลเฟตเป็นสารดัดแปร หลังจากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลาง แล้วทำให้แห้ง สภาวะการทดลองดังตั้งในตารางที่ 1

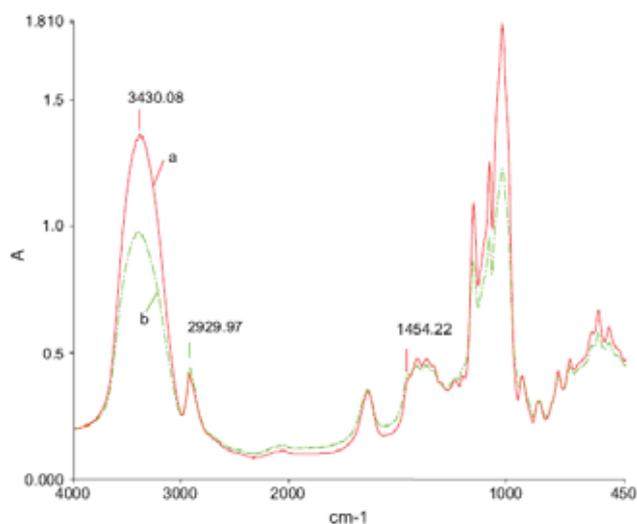
ตารางที่ 1 ค่า degree of substitution ที่สภาวะการทดลองต่างๆ [19]

Temperature (°C)	Concentration of starch slurry (%)	Dimethyl sulphate addition (g/g starch)	Time (h)	DS
45	20	0.4	1.0	0.096
50	15	0.4	2.5	0.275
50	15	0.8	1.5	0.581
50	15	0.8	2.0	0.864

ค่า Degree of substitution หรือ DS เป็นค่าที่บอกถึงจำนวนหมู่แทนที่ต่อ anhydroglucose unit เนื่องจากแป้งธรรมชาติมีหมู่ hydroxyl groups อีกระ 3 หมู่ในแต่ละ anhydroglucose unit ดังนั้นค่า DS ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้คือ 3

ค่า DS หาได้จากวิธีของ Morgan-Zeisel method โดยอาศัยการเกิด ether-cleavage โดยใช้ hydrogen iodide จะเกิดเป็น iodomethane ซึ่งจะถูกพาเข้าไปใน Ag (I)-ethanol trap โดยอาศัยการพาของ nitrogen ทำให้ได้ Ag(I) ซึ่งเป็นของแข็ง

เติม methylated starch (25 mg) และ phenol 0.5 ml ลงใน conical flask จากค่อยๆหยด propionic anhydride (AR grade) 0.2 ml หลังจากแป้งเกิดการกระจายตัวเต็มที่นำไปทำให้เย็นโดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง แล้วเติม hydrogen iodide 5 ml ลงไป ทำในสภาวะ nitrogen โดยให้ nitrogen ผ่านเข็มเล็กๆ ที่อัตราเร็ว 60-70 bubbles ต่อนาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 90 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้การหมู่ methyl group เปลี่ยนเป็น iodomethane อย่างสมบูรณ์ นำ iodomethane ที่ได้ออกจาก flask โดยดูดซับไว้โดยใช้ AgNO₃-alcohol solution เข้มข้น 0.05 M เพื่อให้เกิด Ag(I) solid ใช้ reflux-condenser เพื่อป้องกันการสูญเสีย iodomethane ค่า DS ที่คำนวณได้อาศัยน้ำหนักของ Ag(I) ที่เกิดขึ้น

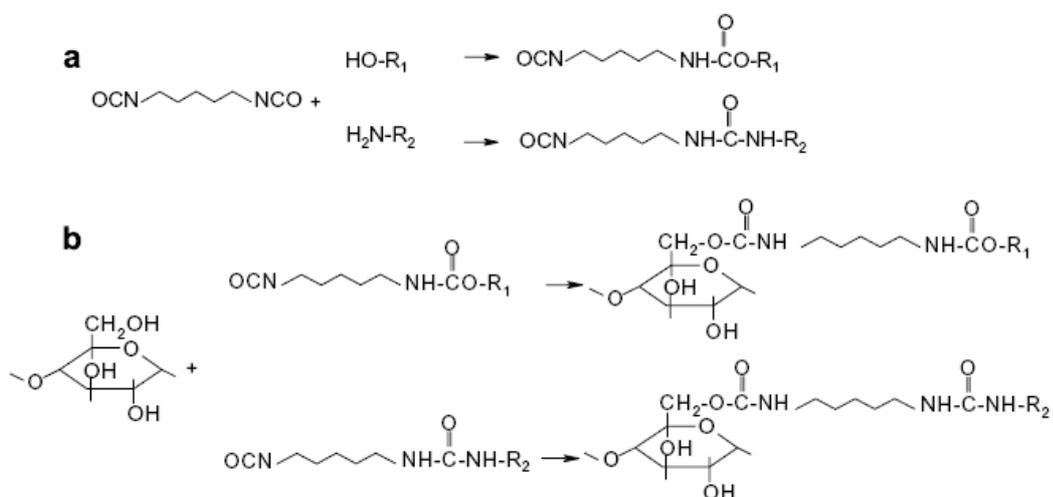


ภาพที่ 15 FTIR spectra ของแป้งธรรมชาติ และ MCS ที่มี DS 0.275

แป้งดัดแปรที่มีปริมาณการแทนที่ (DS) 0.275 มีพีคบริเวณ 3430 cm^{-1} แคบลงและต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ได้จากการวิเคราะห์แป้งธรรมชาติ และพีคที่ 1454 cm^{-1} มีความ broad และชัดเจนยิ่งขึ้น การเปลี่ยนแปลงของแต่ละพีคที่เห็นได้ อย่างชัดเจน คือ ความแตกต่างของพื้นที่ใต้พีค ซึ่งไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ แสดงให้เห็นว่า แป้งข้าวโพด เกิดการ methylate แล้ว

starch-based plastics โดยทั่วไปจะมีความว่องไวต่อน้ำและมีสมบัติเชิงกลต่ำ [20, 21] สมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง อะมิโลส/อะมิโลเพกติน อย่างไรก็ตาม thermoplastic starch ยังคงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้ทดแทนโพลีเมอร์สังเคราะห์ การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) ของแป้งคือการลดปริมาณ hydroxyl groups ของ polysaccharide chains โดยเกิดเป็น low molecular branches ผ่านปฏิกิริยาการเกิด ester, ether, หรือ urethane bonds สมบัติของแป้งดัดแปรขึ้นกับ degree of substitution (DS) และความยาวของ alkyl chain ที่เติมบนโมเลกุลแป้ง การมี DS และ aliphatic chain ที่ยาวกว่าจะมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic properties) สูงกว่า

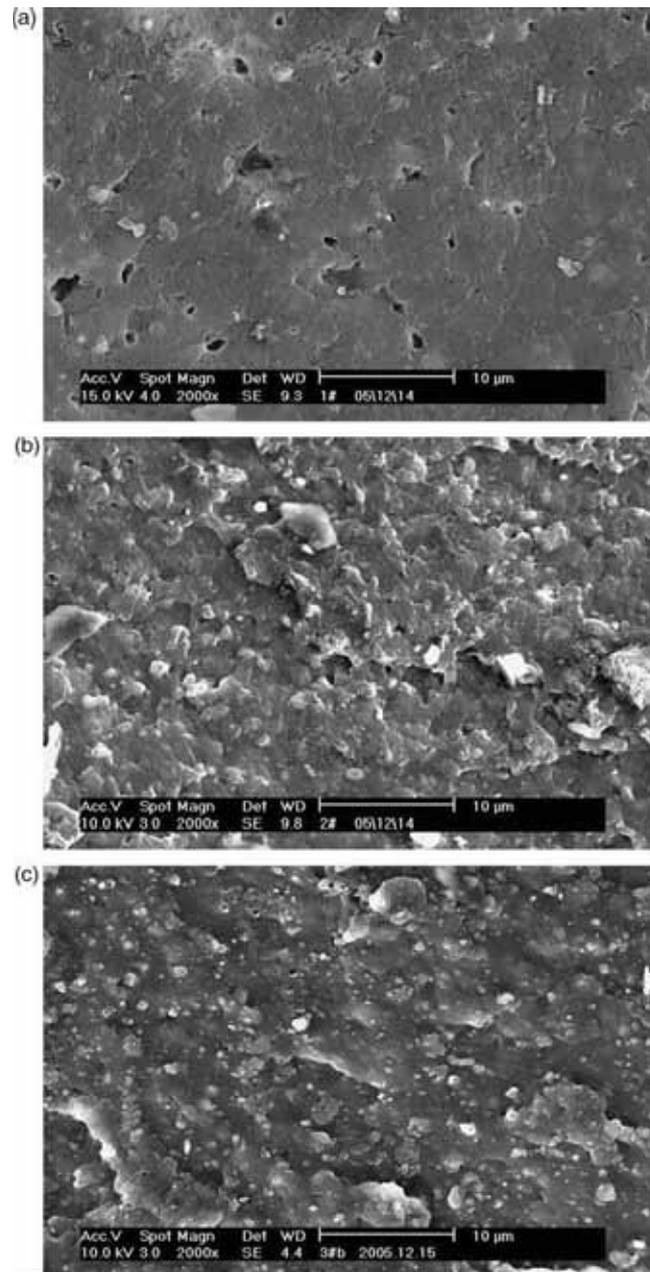
การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรแป้งด้วย isocyanates แต่การทำ chemical modified starch ด้วยเทคนิคนี้ โดยทั่วไปยังคงได้ DS ต่ำอยู่ ต่ำกว่าที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยานี้ ได้แก่ สารพวก inert organic solvent เช่น benzene, toluene, pyridine หรือ dimethylene sulfoxide [22-25]



ภาพที่ 16 กลไกการเกิดปฏิกิริยา chemical modified starch ด้วย hexamethylene diisocyanate derivatives [22]

You-Ping Wu และคณะ [26] ได้ทำการเตรียม Starch/styrene butadiene rubber (SBR) composites, co-coagulating rubber latex และ starch paste ด้วยเทคนิค in situ modified ด้วย resorcinol-formaldehyde (RF) และ N-b (aminoethyl)-g-aminopropyl trimethoxy silane (KH792) จากการศึกษาพบว่าคอมโพสิตที่ได้จากแป้งที่ผ่านการดัดแปร (modified starch) มีสมบัติดีกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากแป้งที่ไม่ดัดแปร โดยมี interfacial adhesion ที่ดีขึ้น นอกจากนี้ starch/SBR composites ของ pure SBR มี glass transition temperature ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณี modified starch/SBR composites

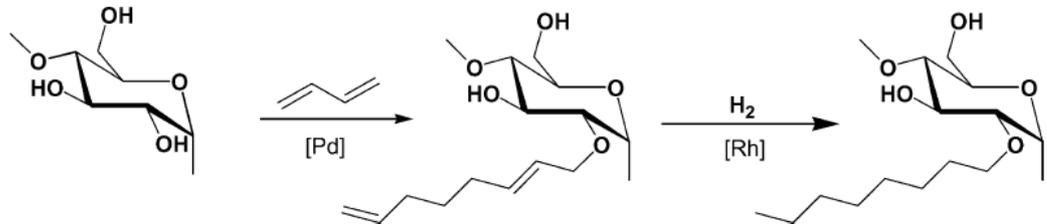
วิธีการเตรียม in situ modified starch paste และ starch/SBR composites สามารถทำได้โดยการละลายแป้งที่ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ที่ 95 °C เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สารละลายใส จากนั้นเติม base-catalyzed resorcinol และสารละลาย formaldehyde (RF) (pH 9) ในอัตราส่วนโมลของ formaldehyde : resorcinol เท่ากับ 3:1 กวนสารละลายให้เข้ากันที่ 95 °C อีก 0.5 ชั่วโมง ลักษณะคอมโพสิตที่เตรียมจาก modified starch ที่เตรียมได้ แสดงในภาพที่ 10



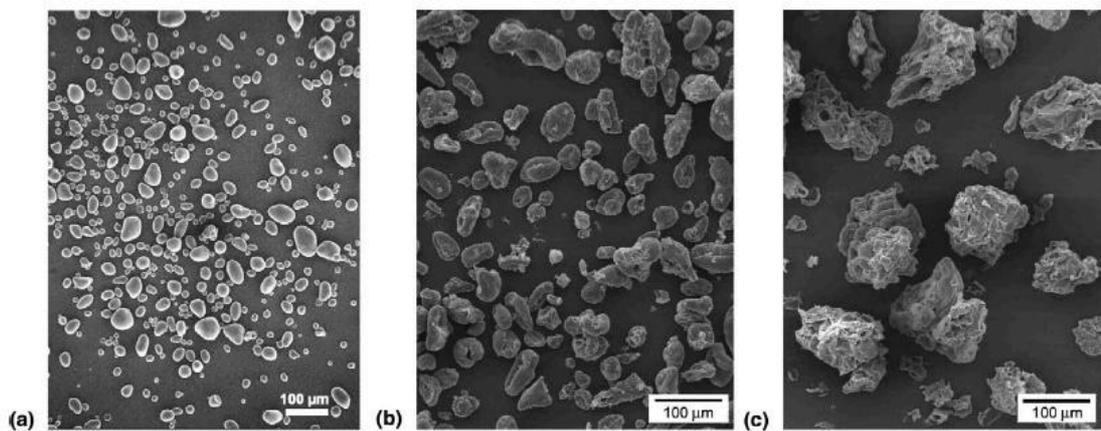
ภาพที่ 17 ภาพถ่าย SEM ของ starch/SBR composites หลังเกิดการขาดเนื่องจากแรงดึง (a) ไม่ผ่านการตัดแปร, (b) ผ่านการตัดแปรด้วย RF, (c) ผ่านการตัดแปรด้วย RF และ KH792 [26]

แป้งตัดแปรสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางหลายรูปแบบ การตัดแปรแป้งด้วยเทคนิคการเติมสายโซ่ alkyl ในโมเลกุลแป้ง ทำให้แป้งตัดแปรที่ได้มีความเป็น hydrophobic สูงขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการเคลือบกระดาษได้ ปริมาณหมู่แทนที่ (degree of substitution) ในแป้งจะทำการตัดแปรแป้งตัดแปรมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งตัดแปรที่ได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการตัด

แปรแป้งด้วยปฏิกิริยา palladium-catalysed telomerisation ระหว่างแป้งและ butadiene พบว่าค่า DS ที่ได้ขึ้นกับสภาวะในการเกิดปฏิกิริยา [27]



ภาพที่ 18 Catalytic synthesis of substituted starch ด้วย saturated alkyl chain [27]



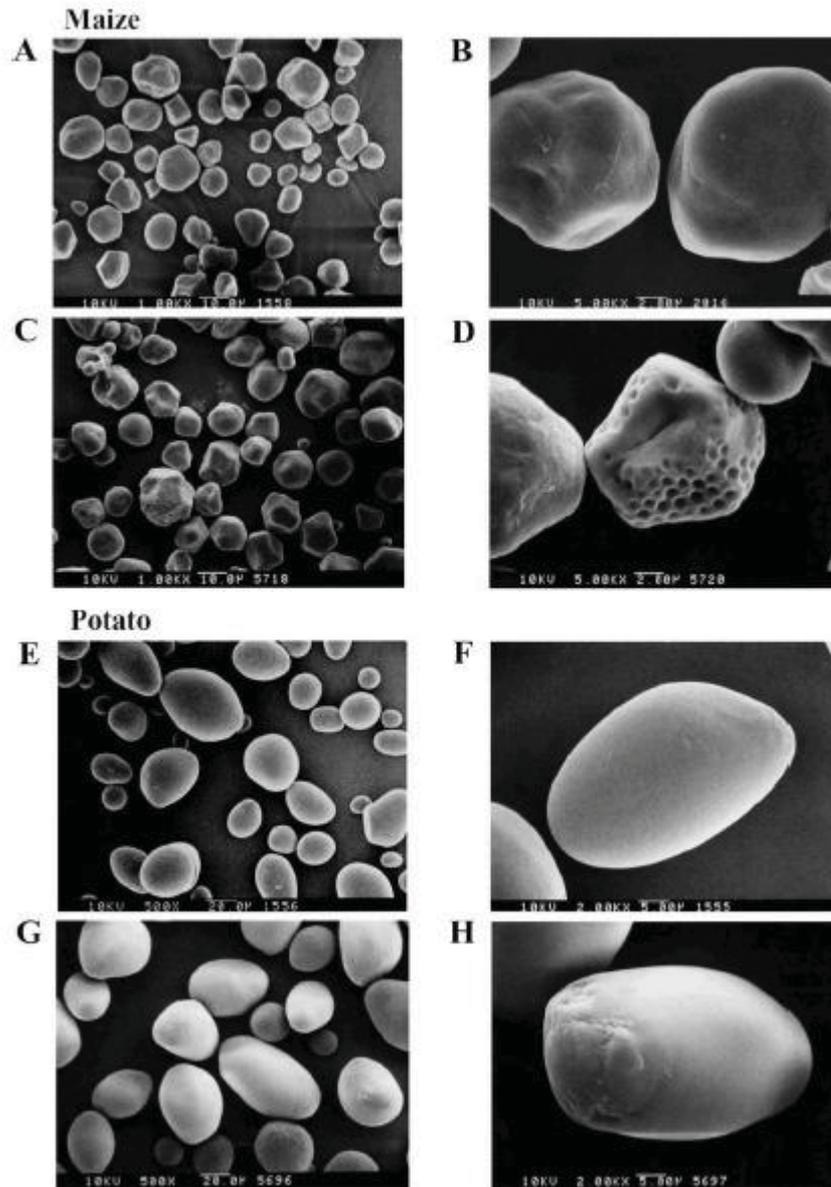
ภาพที่ 19 ภายถ่ายจากเทคนิค SEM ของแป้งธรรมชาติ(a), แป้งดัดแปรที่ 50°C (b) และ แป้งดัดแปรที่ 90°C [27]

นอกจากนี้เทคนิค Acid hydrolysis ยังเป็นเทคนิคหนึ่งในการดัดแปรโครงสร้างแป้ง เพื่อให้ได้ soluble starch ทำได้โดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด HCl หรือ H_2SO_4 เจือจางที่ 25-55°C ที่เวลาต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เส้นใย และกระดาษ จากการศึกษพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรด ทำให้การดัดแปรแป้งเกิดลดลง [28]

นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรแป้งชนิดต่างๆ เช่นแป้งมันฝรั่งด้วย anhydrous alcohols เช่น methanol, ethanol, 2-propanol และ 1-butanol ที่มี 36%HCl ที่ 65°C เป็นเวลา 60 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งที่มี degree of polymerization (DP) ต่างๆกัน และได้แป้งที่มีการกระจาย

ของน้ำหนักริโมเลกุลแคบลง นอกจากนี้พบว่า การตัดแปรด้วย methanol ทำให้ได้แป้งที่มี DP สูงสุด และการตัดแปรด้วย 1-butanol ได้แป้งที่มี DP ต่ำสุด เนื่องจาก alcohol ชนิดต่างๆ ทำให้ปริมาณกรดเข้าถึงโมเลกุลแป้งได้ต่างกัน การเกิด hydrolysis ของ glucosidic linkage ซึ่งเกิดขึ้นภายใน granule ของแป้งจึงต่างกัน โดยเกิดขึ้นที่บริเวณ granule-bound water นอกจากนี้พบว่าค่า DP ของแป้งตัดแปรลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 72 ชั่วโมงขึ้นไป [29]

การเตรียม Acid-alcohol starch สามารถทำได้โดยกระจายแป้งใน methanol ที่มีสารละลายกรด HCl แล้วให้ทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ จากนั้นเติม 1M NaHCO₃ เพื่อหยุดปฏิกิริยา นำสารที่ได้แช่น้ำแข็งและแยกแป้งออกด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง จากนั้นล้างแป้งที่ได้ด้วย ethanol 50% อบแป้งให้แห้งที่ 40°C ปริมาณการตัดแปรที่เกิดขึ้นหาได้จากน้ำหนักของแป้งตัดแปรที่ได้เทียบกับน้ำหนักแป้งที่เริ่มต้นปฏิกิริยา



ภาพที่ 20 แป้งดัดแปรที่เตรียมได้จากเทคนิค Acid-alcohol modification [29]

Graft copolymerization ของ vinyl monomer บน starch backbone เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการดัดแปรแป้ง Fanta และ Bagley ได้ทำการผสมแป้งกับโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับแป้งได้ เพื่อช่วยให้แป้งและโพลีเมอร์ผสมเข้ากันได้มากขึ้น [30] Otey และคณะ มดลองเตรียมฟิล์มที่ประกอบด้วยแป้งและ poly (ethylene-co-acrylic acid) (EAA) ซึ่งมีแป้งเป็นองค์ประกอบ >50% โดยน้ำหนัก พบว่าได้ฟิล์มที่มีความใสสูง และมีสมบัติ elasticity และกันน้ำได้ ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มได้จากเทคนิค casting,

extrusion, Blowing และ milling ได้ โดยฟิล์มที่ได้มีสมบัติเป็น biodegradable ด้วย สามารถใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ พลาสติกคลุมดินหรืออื่นๆได้ [31]

เนื่องจาก internal bonding ที่อยู่ภายในโมเลกุลแป้งจะลดลงในระหว่างการเกิด gelatinization และ extrusion ซึ่งจะทำให้เกิด H-bond ขึ้นระหว่าง EAA carboxylic groups และ starch hydroxyls ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นในระบบผสม ทำให้ค่า %elongation ลดลงและการแพร่ของน้ำผ่านแผ่นฟิล์มลดลงได้ ดังนั้นโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น carboxylic acid anhydride, epoxy หรือ urethane สามารถเกิดปฏิกิริยากับ hydroxyl หรือ carboxyl groups ใน modified starch เกิดเป็นระบบผสมที่มี morphology ที่เสถียรได้

Kiatkamjornwong และคณะ ศึกษาการดัดแปรทางเคมี (chemical modification) ของแป้งด้วยเทคนิค radiation grafting โมเลกุลแป้งด้วย acrylic acid ได้ผลิตภัณฑ์เป็น cassava starch graft poly(acrylic acid) ซึ่งแป้งดัดแปรที่ได้นี้จะถูกดัดแปรอีกครั้งด้วยปฏิกิริยา esterification และ etherification กับ poly(ethylene glycol) 4000 และ propylene oxide [32] ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดัดแปรแป้งด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่

Graft copolymerization [32]

Cassava starch-g-poly (acrylic acid) สามารถเตรียมได้จากเทคนิค γ -ray irradiation graft copolymerization ของ gelatinized cassava starch ในสภาวะที่มี acrylic acid monomer อยู่ด้วย

โดย gelatinized cassava starch เตรียมจากการละลายแป้งในน้ำที่ 85 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจาก gelatinized cassava เย็นตัวแล้ว นำไปผสมกับ acrylic acid solution (20 g of acrylic acid และ 2% w w₋₁ of maleic acid) กวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง 45 นาที ภายใต้บรรยากาศ N₂ จากนั้นเป่าด้วย N₂ อีก 5 นาที แล้วนำไปฉาย gamma-ray irradiator (Gamma beam 650 Unit, Serial No.18R, Nordian International, Canada) ที่ 2 kGy h₋₁ จนได้รับรังสีครบ 10 kGy

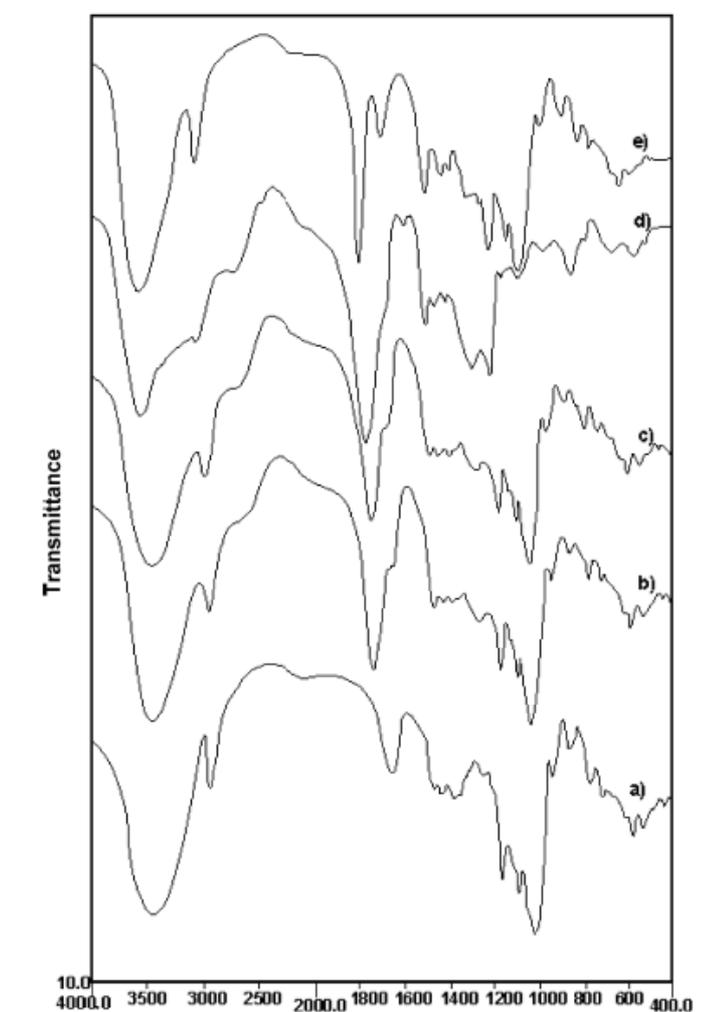
Esterification [32]

การทำปฏิกิริยา Esterification ของ cassava starch-g-poly(acrylic acid) กับ poly(ethylene glycol) 4000 นั้นเตรียมในสารละลายของ p-toluene sulfonic acid ที่ 70°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยเริ่มจากการกระจาย cassava starch-g-poly(acrylic acid) ใน methanol ก่อน แล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและ PEG 4000 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้วทิ้งให้สารเย็นตัวลงและกรองผลิตภัณฑ์ที่ได้ ล้างตะกอนที่ได้ด้วย methanol แล้วอบแห้งที่ 50°C ใน vacuum oven เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า esterified cassava starch-g-polyacrylate

โดยปริมาณ PEG 4000 ใน esterified cassavastarch-g-polyacrylate หาได้จากการ hydrolyze ด้วย 1 N HCl (37%) นาน 6 ชั่วโมง

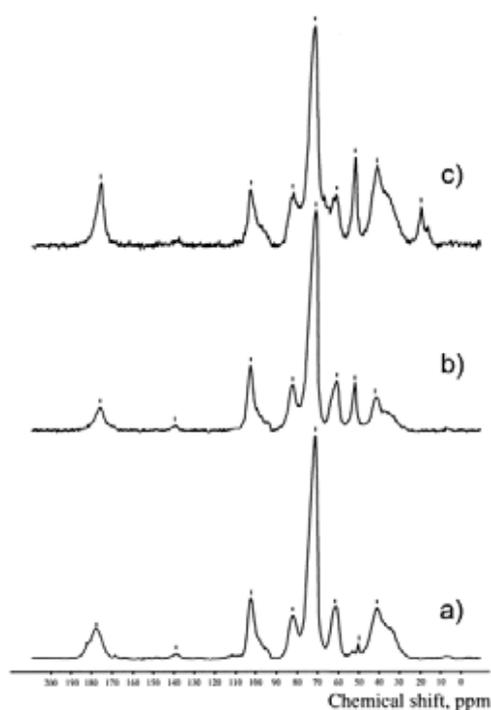
Etherification [32]

esterified cassava starch-g-polyacrylate ทำขึ้นหลังจากกระบวนการ etherified โดยทำปฏิกิริยากับ propylene oxide ในสถานะที่มี sodium hydroxide น้ำ และ iso-propanol ได้เป็นสารแขวนลอยซึ่งจะถูกทำให้เป็นกลางด้วยการเติม acetic acid ลงไป กรองตะกอนที่ได้ ล้างด้วย methanol แล้วอบให้แห้งที่ 50°C เรียกผลิตภัณฑ์ ที่ได้ว่าแป้งดัดแปร (modified starch)

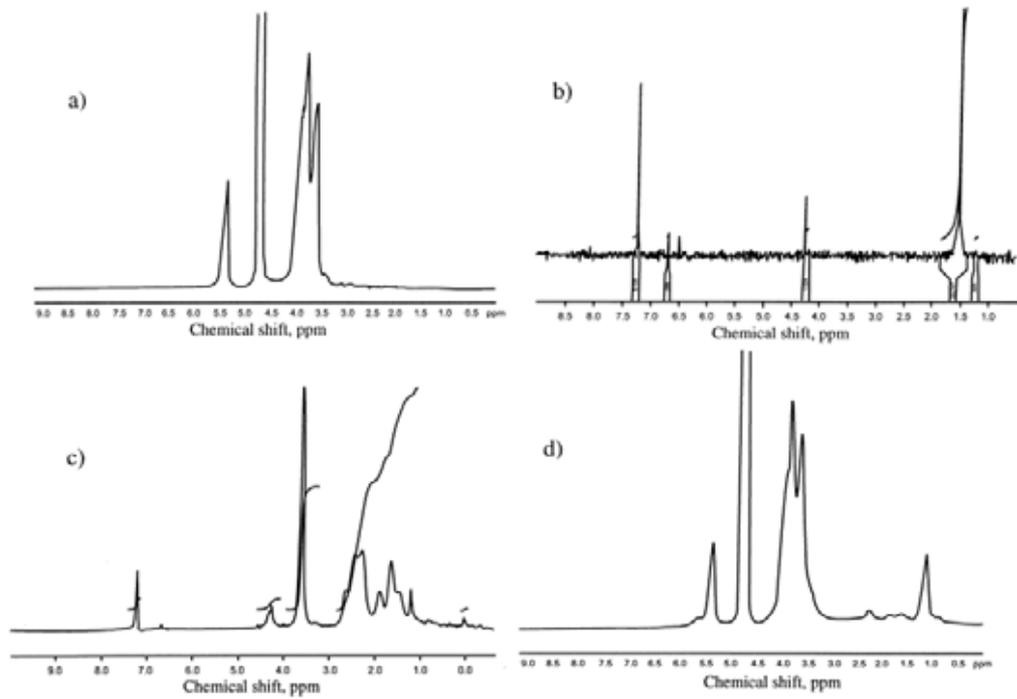


ภาพที่ 21 IR spectra ของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ:

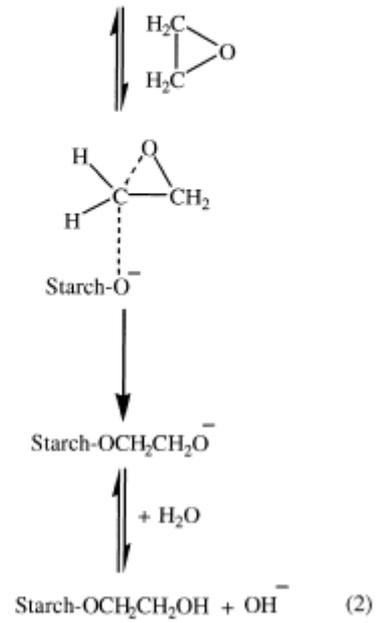
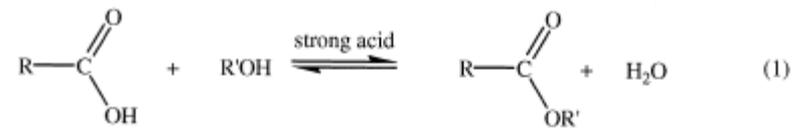
น้ำมันสำปะหลัง(a), แป้งกราฟท์พอลิอะไครลิก แอซิด (b), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต (c), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลตบริเวณ side chain (d), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต (e) [32]



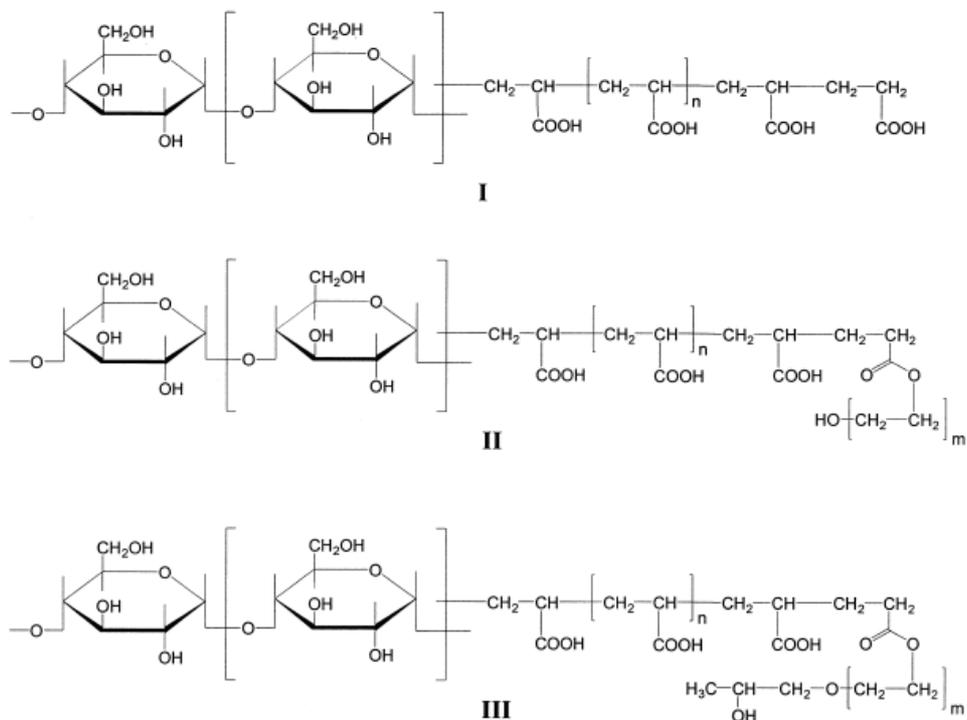
ภาพที่ 22 ^{13}C -NMR spectra ของ แป้งกราฟท์พอลิอะไครลิก แอซิด (a), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต (b), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต (c) [32]



ภาพที่ 23 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันสำปะหลัง(a), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต (b), แป้งเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลตบริเวณ side chain (c), แป้งเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต(d) [32]



ภาพที่ 24 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของแป้ง [32]



ภาพที่ 25 โครงสร้างของแปรงตัดแปรชนิดต่างๆ

I: แปรงกราฟท์พอลิอะไครเลต, II: แปรงเอสเทอร์กราฟท์พอลิอะไครเลต,
 III: แปรงเอสเทอร์/อีเทอร์ กราฟท์พอลิอะไครเลต[32]

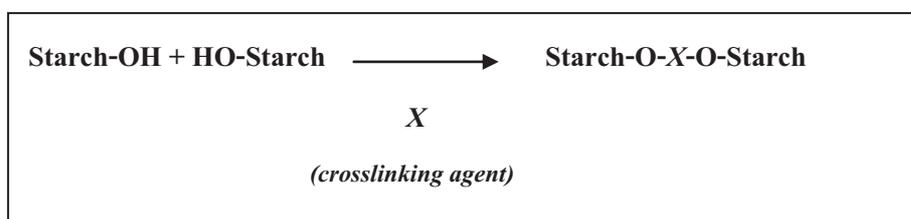
R.Chandra,Renu Rustgi [33] ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก LLDPE โดยกราฟต์ด้วย Maleicanhydride ใน Xylene และใช้ dicumyl peroxide (DCP) เป็น initiator เพื่อเป็นตัวประสานให้พลาสติกเข้ากับแป้งข้าวโพดได้ การ blend แป้งข้าวโพดกับ MA-g-LLDPE จะมีการ vary ปริมาณแป้งเป็นส่วนต่างๆ(10-60 %Wt) ผสมโดยใช้ torque rheometer แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบการดูดซึมน้ำ จากนั้นก็ศึกษาการย่อยสลายตัวทางชีวภาพ ในสภาวะฝังดินและ ย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาจากน้ำหนักที่สูญหายและภาพถ่าย ชี้นงานด้วย SEM พบว่าชี้นงานทดสอบที่ผสมตัวประสานจะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าชี้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผสมตัวประสาน และชี้นงานทดสอบภายใต้สภาวะฝังดินธรรมชาติจะเสื่อมสภาพมากกว่าที่ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และพลาสติกผสมแป้งข้าวโพดและตัวประสานจะสามารถดูด ความชื้นจากสิ่งแวดล้อมทำให้มีโอกาสสลายตัวในธรรมชาติได้

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุที่เตรียมจากการ ผสมแป้งเข้ากับ polyolefin โดยใช้ compatibilizer โดยทำการ graft หมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับแป้ง ซึ่งมี hydroxyl groups เช่น ทำการ graft maleic anhydride(MA) และ oxazoline บนสายโซ่

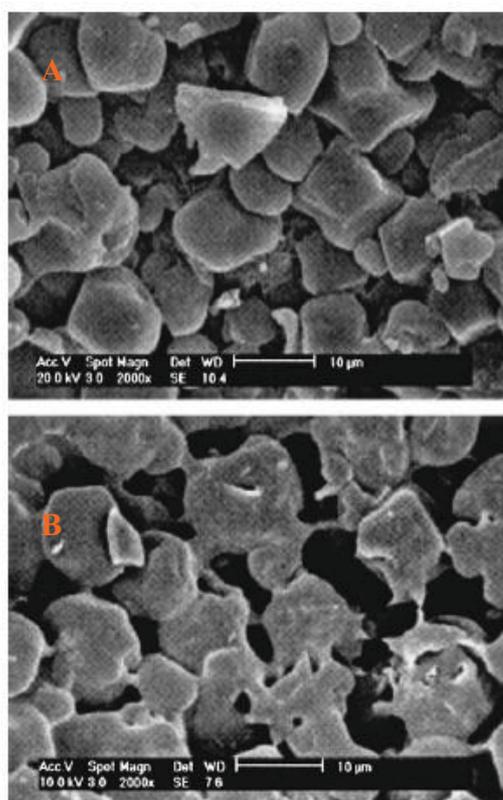
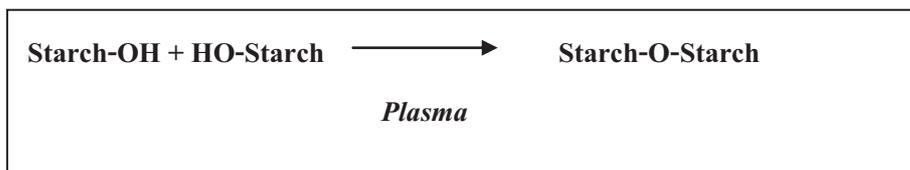
polyester จากการศึกษา พบว่าการ graft หมู่ฟังก์ชันลงบนสายโซ่ diphatic, aromatic/aliphatic copolymer แล้วนำไปอัดรีดในสภาวะที่มี free radical initiator ความสามารถในการ graft ขึ้นกับเวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และความเข้มข้นของ initiator

นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาวิธีการเพิ่มโพลิเมอร์สายโซ่ตรงลงในโพลิเมอร์ที่มีสายโซ่แบบกิ่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยทำการศึกษาคู่สมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง และ PVA (ปริมาณสูงสุด 5%โดยน้ำหนัก) ทั้งในสภาวะที่มีการเกิดพันธะเชื่อมโยง (crosslink) และไม่มี การ crosslink จากการศึกษาพบว่าค่า elongation ของโพลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นโดยไม่ส่งผลให้ความแข็งแรงของโพลิเมอร์ทั้งกรณีที่ได้จากกระบวนการหล่อ (cast) และการอัดรีด (extrusion) ลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการดูดน้ำและการเกิด photocrosslink ของโพลิเมอร์ผสม แสดงให้เห็นความสามารถในการเข้ากันได้เป็นอย่างดีของส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน ได้แก่ PVA และ แป้ง สำหรับระบบผสมที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ เพียงอย่างเดียว มีอัตราการเกิด photocrosslink ค่อนข้างต่ำ และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่า elongation at break ของวัสดุสูงขึ้น เป็นผลมาจากการปรับปรุงการกระจายของน้ำหนักรโมเลกุล (หรืออัตราส่วนของโครงสร้างสายโซ่ตรงเช่น PVA) ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglements)

Chang- Jun Liu และคณะ [34] ได้ทำการดัดแปรแป้งด้วยเทคนิคการฉาย plasma เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เทคนิคนี้มีประโยชน์ต่อระบบการดัดแปรแป้งที่ปริมาณสูงๆ โดยปกติการเตรียมแป้งที่เกิดการเชื่อมโยง (crosslinked starch) สามารถทำได้โดยใช้ crosslinking agent ทำให้เกิดการเชื่อมโยงใน heterogeneous media เช่น sodium trimetaphosphate, epichlorohydrin และ phosphoryl chloride โดยกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



การใช้พลาสติกมาในการดัดแปรแป้ง เป็นเทคนิคที่อาศัยการให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงหรือสปีชีส์ที่มีพลังงานสูงที่อุณหภูมิห้องกับแป้ง ทำให้เกิดหมู่ที่ว่องไวหรือหมู่ว่องไวในแป้งและเกิดการเชื่อมขวางโครงสร้างทางเคมีเป็นแป้งดัดแปรได้โดยไม่ต้องอาศัยสารเคมี การเชื่อมขวางโครงสร้างทางเคมีของแป้งมีกลไกดังนี้



ภาพที่ 26 ภาพถ่าย SEM ของแป้งธรรมชาติ (A) และ แป้งดัดแปรด้วยพลาสมา (B) [34]

จากการศึกษาพบว่า การดัดแปรแป้งด้วยเทคนิคการให้พลาสมา ทำให้ได้แป้งที่มีการเชื่อมขวางโครงสร้างทางเคมีสูง โดยไม่ต้องอาศัยสารเคมีทำให้เกิด by product ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อความสามารถในการสลายตัวของฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเอทิลีน คือ อุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการเกิดการสลายตัวแบบ thermo-oxidative degradation ในขณะที่ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่มีผลเท่าใดนัก โดยที่ความเข้มข้นของออกซิเจน 5-20% สามารถเกิดการสลายตัวได้ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้สารเติมแต่งประเภท Prooxidant สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยา photo- และ thermo-oxidation ของพอลิเอทิลีน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แตกออก และเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพผ่านการทำงานของจุลินทรีย์ได้ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง

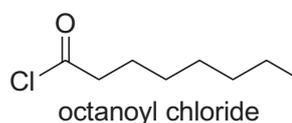
3.1.2 พิวรีดีน (Pyridine) จากบริษัท Fluka



pyridine

ภาพที่ 27 โครงสร้างเคมีของ Pyridine

3.1.3 ออกตะโนอิล คลอไรด์ (Octanoyl Chloride) จากบริษัท Fluka



octanoyl chloride

ภาพที่ 28 โครงสร้างเคมีของ Octanoyl Chloride

3.1.4 เอทานอล (Ethanol)

3.1.5 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรด JJ4324 จากบริษัท ทีพีไอ

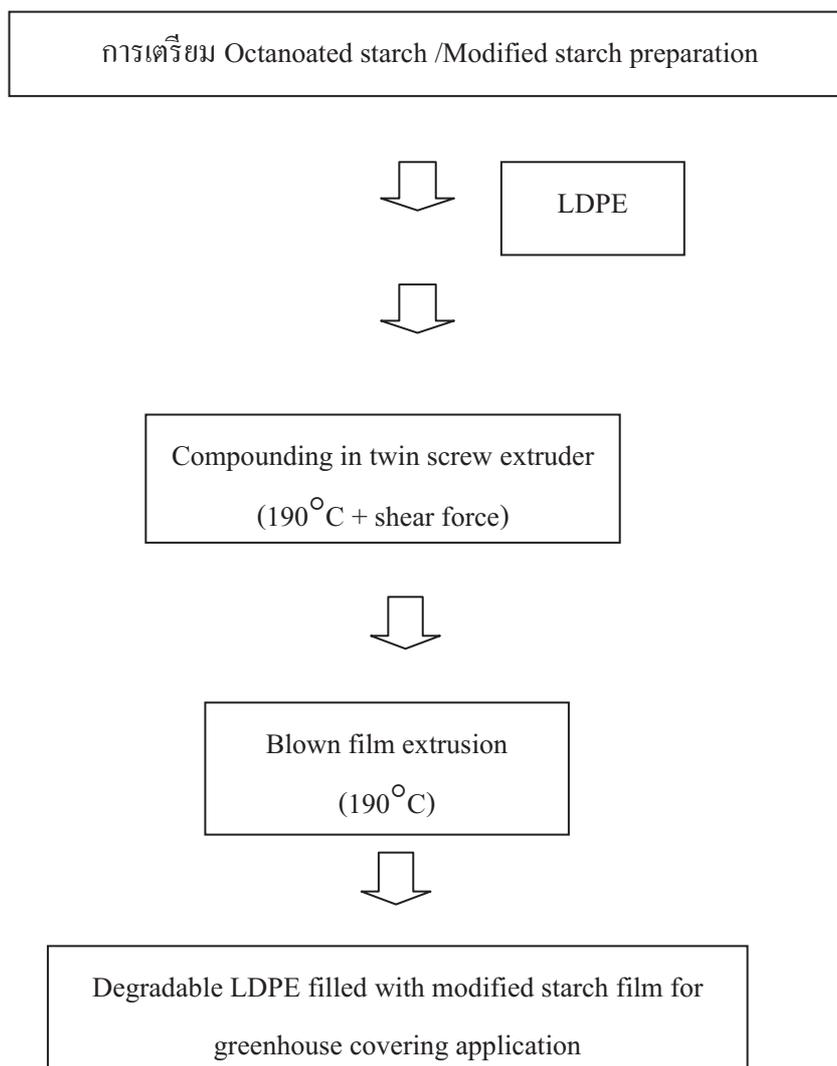
โพลีเอทิลีน จำกัด มหาชน

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- 3.2.1 เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวทวนคู่ (twin screw extruder) screw diameter ขนาด 35:1 จากบริษัท Labtech
- 3.2.2 เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก (Blown film extruder) ยี่ห้อ Haake รุ่น Rheomix3000
- 3.2.3 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile Tester Machine) รุ่น Instron 5542
- 3.2.4 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงความร้อน Thermal Gravimetric Analyzer จากบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA 7HT
- 3.2.5 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM 5400
- 3.2.6 เครื่องทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70
- 3.2.7 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงความร้อน Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีสมบัติเป็นพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้ง เพื่อลดปัญหาอันเนื่องมาจากการกำจัดขยะพลาสติก โดยพัฒนาพลาสติกคลุมโรงเรือนที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการย่อยสลายได้โดยยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานคลุมหลังคาโรงเรือนเพาะปลูกพืช โดยการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การพัฒนา/ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และการพัฒนาวัสดุคลุมโรงเรือนเพาะปลูกพืชที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงสูงเพียงพอกับความต้องการของพืช จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และแป้งดัดแปร



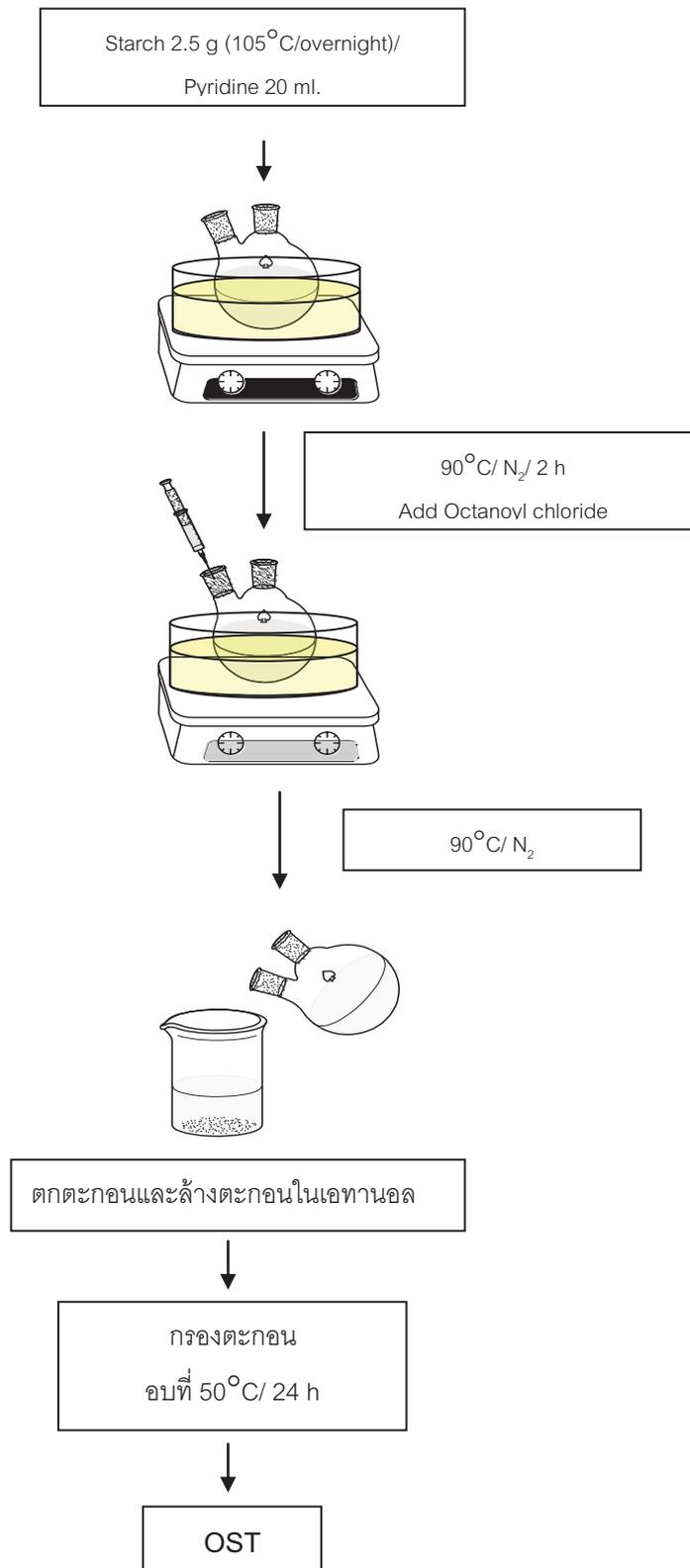
ภาพที่ 29 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

3.3.1 การเตรียมแป้งดัดแปร Octanoated Starch

เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของแป้งที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) สูง ซึ่งส่งผลให้มีความเข้ากันได้กับโพลีเอทิลีนได้ต่ำ งานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปรโมเลกุลของแป้งเพื่อมีความสามารถในการเข้ากันได้กับโพลีเอทิลีนได้ดีขึ้น โดยการเกิด ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งและ ออกตะโนอิล คลอไรด์ (Octanoyl Chloride) ซึ่งแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ เรียกว่า Octanoated Starch (OST)

Octanoated starch (OST) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างโมเลกุลแป้ง กับ octanoyl chloride โดยใช้ pyridine เป็นตัวทำละลาย ภายใต้บรรยากาศ

ไนโตรเจน สามารถเตรียมได้โดยเริ่มจากอบแป้งมันสำปะหลังที่ต้องการดัดแปรที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่สะสมอยู่ จากนั้นนำแป้งที่ผ่านการอบแล้วประมาณ 2.5 กรัม ผสมกับไพรีดีน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้ว 2 คอสำหรับทำปฏิกิริยา โดยให้ความร้อนในอ่างน้ำมันที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่ 90°C พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา ดังแสดงใน ภาพที่ 4 เพื่อเตรียมโมเลกุลแป้งให้พร้อมเกิดปฏิกิริยา (pre-activate) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นค่อยๆหยด Octanoyl Chloride ในปริมาณที่มากเกินไป (0.0070 โมล) ลงในสารผสมระหว่างแป้งและไพรีดีน ให้ความร้อนต่อ พร้อมกับกวนต่อไปให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปตกตะกอนในเอทานอล 200 มิลลิลิตร โดยกวนตะกอนในเอทานอล ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกรอง และล้างตะกอนด้วยเอทานอลอีก 2 รอบ จากนั้นอบตะกอนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 30 การเตรียม Octanoated Starch (OST)

3.3.2 การตรวจสอบผลของการเตรียม Octanoated starch

การตรวจสอบผลของการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังเป็น Octanoated starch สามารถตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70 ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยมีช่วงของการวิเคราะห์คือ $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ความละเอียดในการเก็บข้อมูล (Resolution) 4 cm^{-1} จำนวนรอบของการสแกน 16 รอบ โดยตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใหม่จากการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 31 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70

3.3.3 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-5410 ดังภาพที่ 32 โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดสอบทำได้โดยการหักชิ้นงานตัวอย่างภายใต้ไนโตรเจนเหลว แล้วเคลือบผิวภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกหักด้วยทอง ทั้งนี้เพื่อดูการกระจายตัวของแป้ง และการยึดเกาะระหว่างพอลิเอทิลีน แป้งและแป้งดัดแปร



ภาพที่ 32 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5410)

3.3.4 การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA)

เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA851 โดยใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 3-10 มิลลิกรัม ใส่ในที่ใส่ตัวอย่างซึ่งทำจากอะลูมินา (alumina 70 ul) ตั้งภาวะทดสอบโดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 °C แล้วเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C ต่อนาที จนถึง 700 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



ภาพที่ 33 เครื่อง METTLER TOLEDO (TGA/SDTA851)

3.3.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)

เป็นการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่อง Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุในช่องอะลูมิเนียมที่มีฝาปิด โดยในขั้นตอนแรกใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที ตั้งแต่ 30°C ถึง 200°C จากนั้น ในขั้นตอนที่สอง ทำให้ขึ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิลดลงจาก 200 ถึง 30°C องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเย็นตัว 10°C ต่อนาที และในขั้นตอนที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย ให้ความร้อนขึ้นตัวอย่างจาก 30°C ถึง 200°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิในการหลอมเหลว

นอกจากนี้ เทคนิค DSC ยังสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย โดยอาศัยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิการหลอมเหลว จากสมการที่ 3.1

$$\text{Degree of crystallinity}(\%) = \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \quad (3.1)$$

โดย

H_f^* = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (จูล/กรัม)

H_f^0 = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับเอทิลีน คือ 293 จูล/กรัม



ภาพที่ 34 เครื่อง DSC (Diamond DSC)

3.3.6 การหาค่า Degree of substitution (DS)

ค่า Degree of substitution หรือ DS หมายถึง ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ต่อ 1 หน่วยกลูโคส สามารถหาได้จากการไตเตรตตามกรรมวิธีดังนี้ คือ ทำการละลาย OST ปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 โมล/ลิตรในไอโซโพรพานอล เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมสารละลายไอโซโพรพานอลความเข้มข้น 90%(v/v) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการกรองตะกอนออกและล้างตะกอนด้วยสารละลายไอโซโพรพานอลความเข้มข้น 90%(v/v) จนแน่ใจว่าไม่มีคลอไรด์ไอออนเหลืออยู่ (ตรวจสอบได้โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร) จากนั้นนำตะกอนแห้งที่ได้ไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงทำการไตเตรตสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร โดยใช้ฟีนอล์ฟธาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์

3.3.6 การทดสอบการดูดซึมความชื้น (% Humidity)

การทดสอบความสามารถในการดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสม สามารถทำได้โดยตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดกว้าง 2.5 ซม.X2.5 ซม. แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ทำการชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้น ทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปวางบนตะแกรงในตู้กระจกซึ่งทำการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ โดยความสามารถในการดูดซึมความชื้นของชิ้นงานทดสอบสามารถหาได้จาก

$$\%Humidity = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ M_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบ

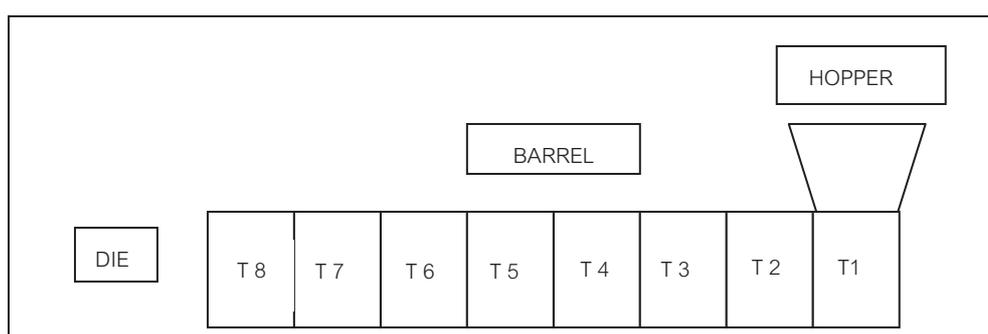
M_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบ

3.3.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน แปนึ่งที่ไม่ผ่านการตัดแปรร และแป็งตัดแปรร (LDPE/ST/OST)

ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน แปนึ่งที่ไม่ผ่านการตัดแปรรและแป็งตัดแปรร (LDPE/ST/OST) โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและแป็งรวมทั้งหมด (ST: OST) เท่ากับ 70 ส่วน ต่อ 30 ส่วน ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมขึ้นมีปริมาณ OST เท่า 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) โดยใช้อุณหภูมิการผสม 150-180°C (T1-T8) และมีอุณหภูมิหัวตายเท่ากับ 180°C โดยใช้ความเร็วรอบสกรูผสมเท่ากับ 200 rpm ภาพที่ 35 และ 36 แสดงลักษณะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และโครงสร้างของเครื่องดังกล่าว ตามลำดับ



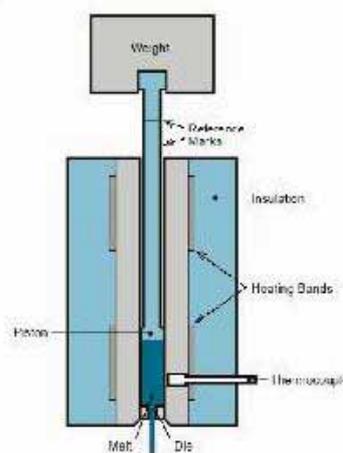
ภาพที่ 35 ลักษณะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่



ภาพที่ 36 โครงสร้างของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

3.3.9 การวิเคราะห์ความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ด้วย เทคนิค Melt Flow Index

ดัชนีการไหล (MFI) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ซึ่งวัดในหน่วยของน้ำหนักพอลิเมอร์ (กรัม) ที่ไหลผ่านท่อ capillary ในช่วงเวลา 10 นาที ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์นั้นๆ ใน งานวิจัยนี้จะทำการทดลองหาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ที่อุณหภูมิ 190°C และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ตาม ASTM D1238 โดยใช้เครื่อง Melt Flow Indexer จากบริษัท Lloyd Instruments รุ่น Davenport model10



ภาพที่ 37 เครื่องมือวัดค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Indexer) รุ่น Davenport model10 จากบริษัท Lloyd Instruments

3.3.10 การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์พอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป ด้วยเครื่องเป่าฟิล์มขนาด Lab scale ยี่ห้อ Haake รุ่น Rheomix3000 โดยใช้ช่วงอุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากับ 150-180°C เพื่อเตรียมฟิล์มที่มีความหนา 100-150 ไมโครเมตร



ภาพที่ 38 เครื่องเป่าฟิล์มขนาด Lab scale ยี่ห้อ Haake รุ่น Rheomix3000

3.3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่อง Instron Tensile Testing Machine รุ่น Instron 5542 โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มหนา 0.1 มิลลิเมตร ความยาวของเกต (Gate Length) 40 มิลลิเมตร ขนาดของโหลดเซลล์ที่ใช้คือ 1 กิโลนิวตัน ใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานทดสอบ 100 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 39 เครื่อง Tensile Testing Machine รุ่น Instron 5542

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

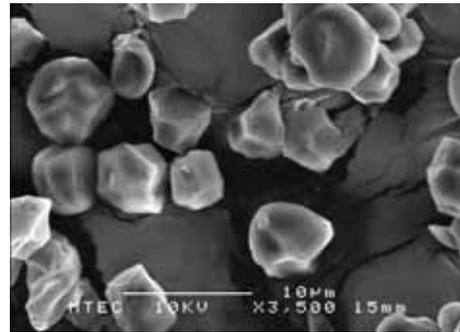
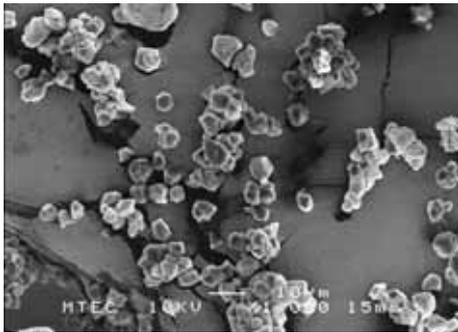
งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาพลาสติกเพื่อใช้ในงานด้านเกษตรกรรมที่มีสมบัติเป็นพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้ง เพื่อลดปัญหาอันเนื่องมาจากกา รกำจัดขยะพลาสติก โดยพัฒนาพอลิเมอร์ผสมที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการย่อยสลายได้โดยยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานคลุมหลังคาโรงเรือนเพาะปลูกพืช ในงานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การพัฒนา/ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และการพัฒนาฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งดัดแปร ที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) เพื่อใช้ในงานด้านเกษตรกรรม

เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของแป้งที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูง ส่งผลให้มีความเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนได้ต่ำ งานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของแป้งเพื่อให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนได้ดีขึ้น ผ่าน การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งและ ออกตะโนอิล คลอไรด์ (Octanoyl Chloride) โดยแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ เรียกว่า Octanoated Starch

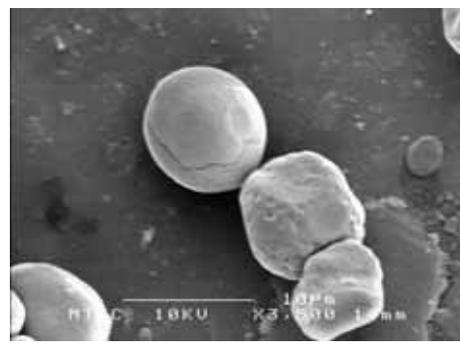
4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแป้ง

4.1.1 แป้งธรรมชาติที่มีทั่วไปในท้องตลาด

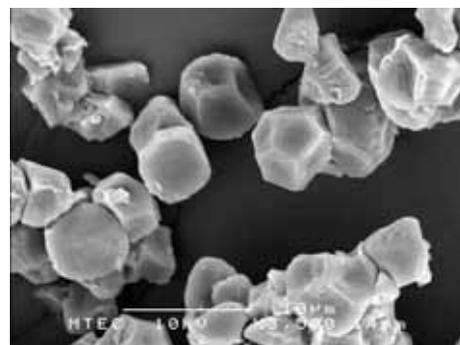
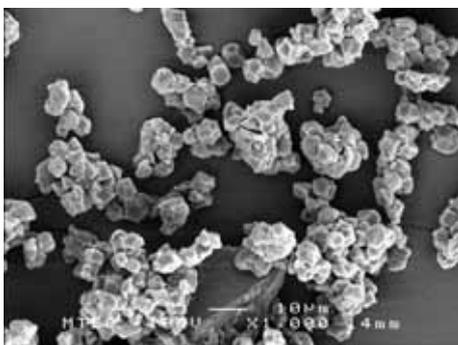
แป้งที่พบในธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งลักษณะเม็ดแป้งที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด แสดงดังภาพที่ 40



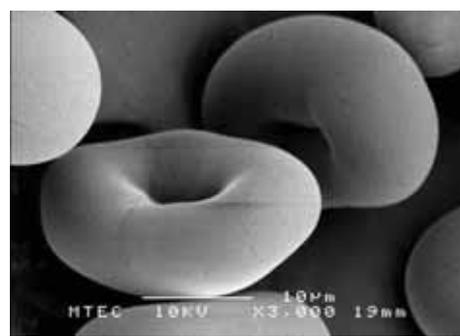
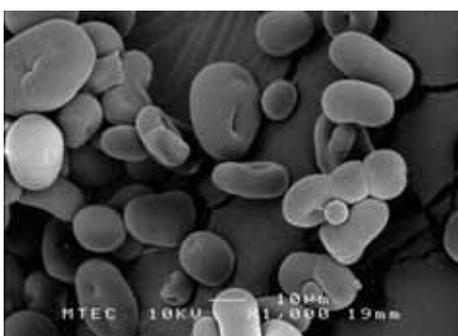
ก. แป้งข้าวเจ้า



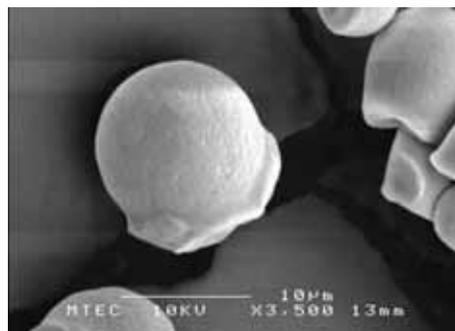
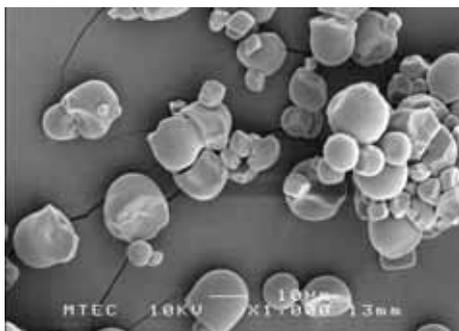
ข. แป้งข้าวโพด



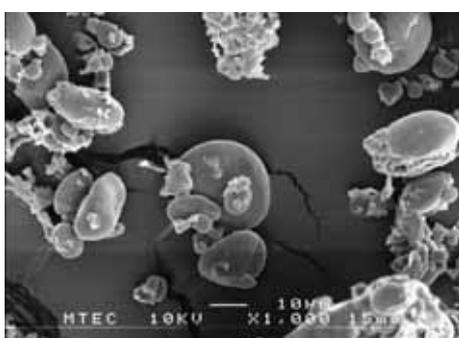
ค. แป้งข้าวเหนียว



ง. แป้งถั่วเขียว



จ. แป้งมันสำปะหลัง



ฉ. แป้งสาลี

ภาพที่ 40 ลักษณะพื้นฐานของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 40 พบว่าแป้งแต่ละชนิดมีลักษณะพื้นฐานของเม็ดแป้งแตกต่างกัน ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณไขมัน โปรตีน อะไมโลส และอะไมโลเพกติน เป็นต้น [3] โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แป้งมันสำปะหลังเนื่องจากเป็นพืชที่มีการปลูกมากในประเทศไทย สามารถจัดหาได้ง่ายและมีราคาถูก

4.2 การเตรียมแป้งดัดแปร (Octanoated starch, OST) จากแป้งมันสำปะหลัง (ST)

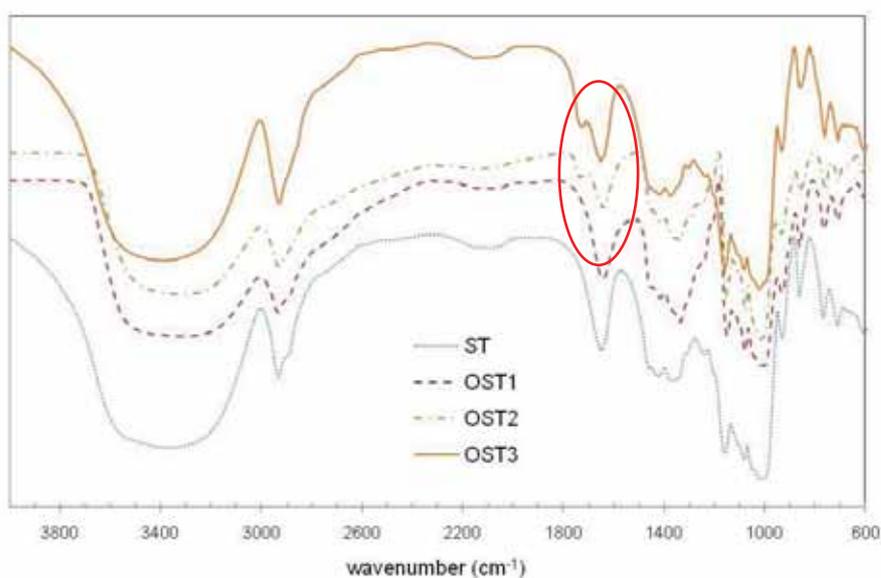
สำหรับการเตรียมแป้งดัดแปร Octanoated starch ในงานวิจัยนี้ อาศัย การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งและออกตะโนอิล คลอไรด์ โดยมีพิริดินเป็นตัวทำละลาย โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

4.2.1 ศึกษาปริมาณ Octanoyl chloride ที่เหมาะสมในการเตรียม Octanoated starch (OST)

การเตรียม Octanoated starch (OST) เริ่มต้นจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างแป้ง มันสำปะหลัง (ST) และออกตะโนอิล คลอไรด์ (Octanoyl Chloride) โดยใช้แป้ง 2.5 กรัมต่อปริมาณ Octanoyl Chloride 0.0023 0.0047 และ 0.0070 โมล ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 2 โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 24 ชั่วโมง

ตาราง 2 แสดงปริมาณ Octanoyl chloride ที่ใช้ในการทดลอง

แป้งดัดแปร	น้ำหนักแป้ง (ST) (g)	ปริมาณ Octanoyl chloride (ml)	ปริมาณ Octanoyl chloride (mol)
OST1	2.503	0.4	0.0023
OST2	2.516	0.8	0.0047
OST3	2.503	1.2	0.0070



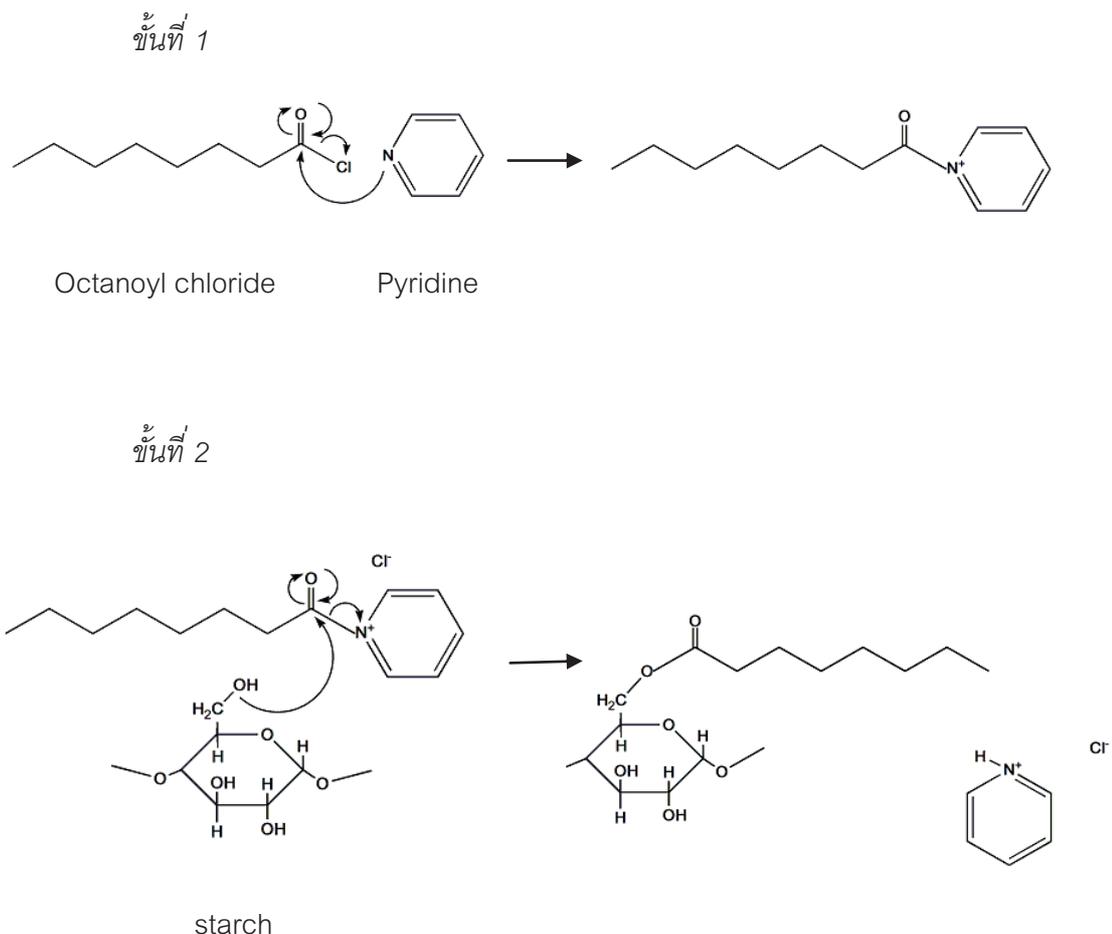
ภาพที่ 41 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ OST และ ST ด้วยเทคนิค FTIR

ภาพที่ 41 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลัง (ST) และแป้งดัดแปร OST ที่ปริมาณ octanoyl chloride 0.0023 0.0047 และ 0.0070 โมล ตามลำดับ ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า แป้งทุกชนิดมีพีคก่อนข้างกว้างเกิดขึ้นที่ประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการมี

หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แป้งมีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูง ซึ่งในกรณีแป้งดัดแปร พบว่า OST1 แสดงลักษณะหมู่ฟังก์ชันเหมือนกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ST) ส่วน OST2 และ OST3 ปรากฏพีคใหม่ขึ้นที่ 1721.65 cm^{-1} และ 1726.85 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) ซึ่งน่าจะมาจากพันธะเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นใหม่ภายหลังการดัดแปรแป้ง สอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้ง ซึ่งเกิดผ่าน 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 pyridine จะทำหน้าที่เป็น nucleophile เข้าจับที่ carbonyl carbon ของ octanoyl chloride เกิดเป็นสารเชิงซ้อนขึ้น

ขั้นที่ 2 หมู่ Hydroxy ในโมเลกุลแป้งทำหน้าที่เป็น nucleophile เข้าทำปฏิกิริยาที่ carbonyl carbon ของ สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากขั้นที่ 1 ได้เป็น octanoated starch ดังแสดงในภาพที่ 42

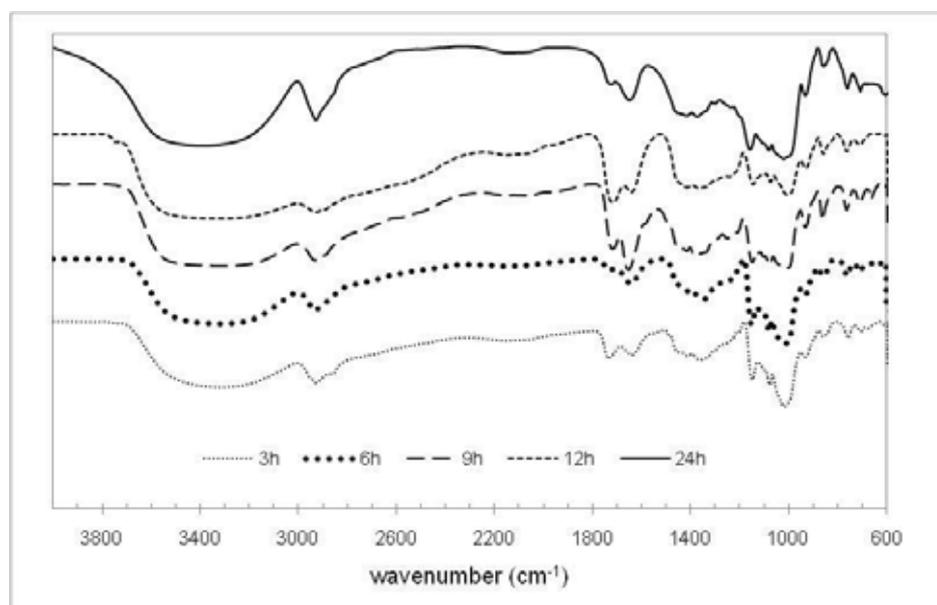


ภาพที่ 42 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแป้ง

จากการศึกษาพบว่า แป้งดัดแปรที่เตรียมจาก Octanoyl chloride 0.0047 และ 0.0070 โมลต่อแป้ง 2.5 กรัม โดยใช้อุณหภูมิตลอดการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90°C สามารถพบพีคคาร์บอนิลซึ่งน่าจะมาจากการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่คาร์บอกซิลิกของ Octanoyl chloride อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัตราส่วนระหว่าง Octanoyl chloride และแป้ง เท่ากับ 0.0070 โมล ต่อแป้ง 2.5 กรัม เพื่อให้มั่นใจว่ามีปริมาณ Octanoyl chloride มีมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับแป้งได้

4.2.2 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเตรียม Octanoated starch (OST)

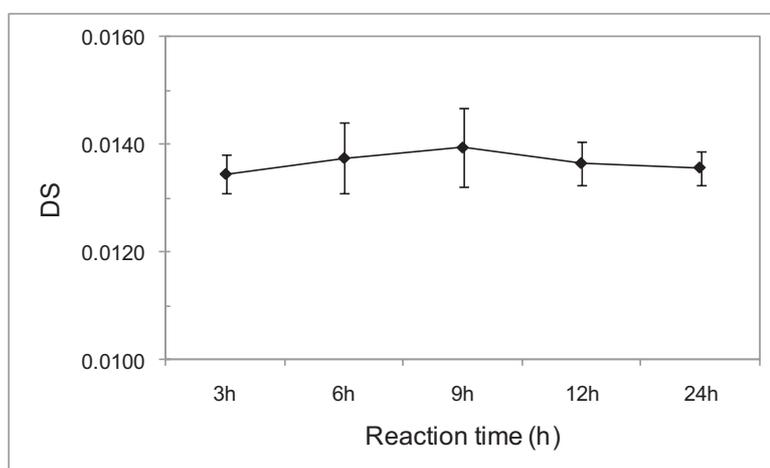
ทำการเตรียม OST โดยใช้ปริมาณ Octanoyl chloride 0.0070 โมล ต่อแป้ง 2.5 กรัม (ตาราง 2) ที่อุณหภูมิ 90°C โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลา 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับจากการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3-24 ชั่วโมง ให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 43 โดยสามารถพบพีคที่แสดงถึงฟังก์ชันคาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) จากการเกิดพันธะเอสเทอร์ภายหลังการดัดแปรแป้งที่ทุกช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยา



ภาพที่ 43 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ OST ที่เตรียมที่เวลาต่างๆ กัน ด้วยเทคนิค FTIR

4.2.3 การหาค่า Degree of substitution

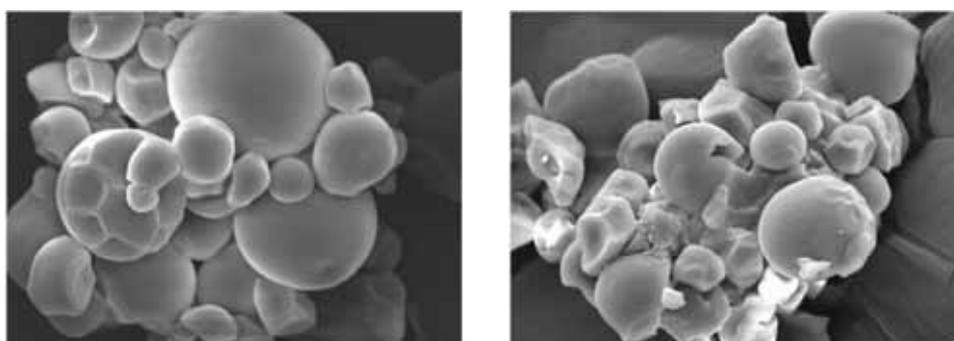
ค่า degree of substitution หรือ DS หมายถึง ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ต่อ 1 หน่วยกลูโคส ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่า DS ของ OST [51] เพื่อติดตามความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งและออกตะโนอิล คลอไรด์ จากการทดลองพบว่าค่า DS ของ OST ที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 0.013 ดังแสดงในภาพที่ 44 ซึ่งค่า DS ที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะมีค่า DS ค่อนข้างสูงประมาณ 1.50-2.67 [14] ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้แป้ง (flour) ซึ่งยังไม่ได้ผ่านกระบวนการคัดแยกให้มีความบริสุทธิ์ จึงยังคงมีสารจำพวกโปรตีนและไขมันต่างๆผสมอยู่ [2] ซึ่งสารเหล่านี้อาจเข้าไปรบกวนกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งและออกตะโนอิล คลอไรด์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์หรือความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งและออกตะโนอิล คลอไรด์ลดลง ค่า DS ของ OST ที่เตรียมได้จึงค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าปฏิกิริยาระหว่างแป้งและ Octanoyl chloride สามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 44 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่า Degree of substitution (DS) ของ OST

4.2.4 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของแป้ง ST และ OST

โดยทั่วไป การตัดแปรแป้งจะหมายรวมถึง การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีชีวภาพของพื้นผิวของเม็ดแป้ง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้ง (granule) ที่ผ่านการตัดแปรด้วยเทคนิค SEM เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้งอันเนื่องมาจากผลของการตัดแปรทางเคมี ดังแสดงใน ภาพที่ 45



ST

OST

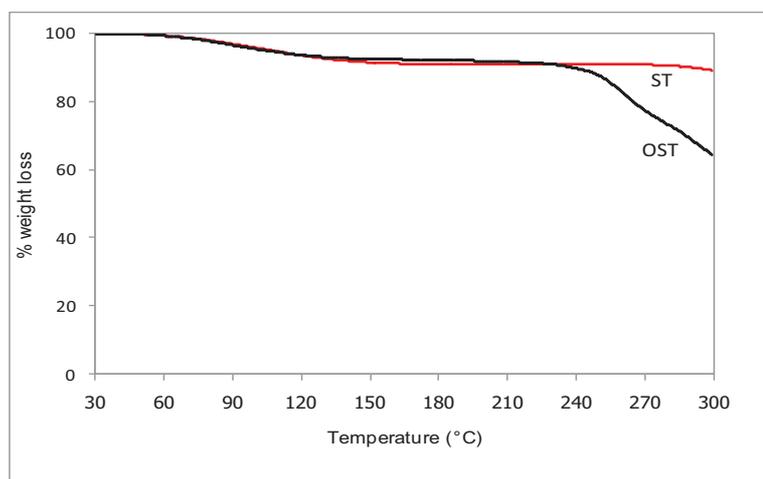
ภาพที่ 45 ลักษณะพื้นฐานของแป้ง ST และ OST

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของแป้ง ST และ OST จะเห็นได้ว่าเม็ดแป้ง ST และ OST มีหลายขนาดผสมกัน ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร จนถึงขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร ซึ่งจากภาพ เห็นได้ว่า แป้ง ST มีลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้งค่อนข้างสมบูรณ์ ในขณะที่ แป้ง OST พบการแตกของเม็ดแป้งบางส่วน และผิวหน้าของเม็ดแป้งมีแนวโน้มเกิดการเชื่อมต่องานเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันนี้ โดยปกติจะเกิดได้ดีบริเวณผิวหน้าของเม็ดแป้ง [14] OST มีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเกิดการเชื่อมต่องานของหมู่ออกตะโนเอต เข้ากับโมเลกุลแป้งบริเวณผิวหน้า ดังภาพที่ 45

4.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อนของแป้งดัดแปร OST

เนื่องจากการผลิตฟิล์มพลาสติกคลุมโรงเรือน วัสดุที่นำมาผลิตนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อนและได้รับแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผลิตขั้นต่อนต่างๆ ดังนั้นแป้งดัดแปรที่พัฒนาขึ้น จำเป็นต้องมีความสามารถในการต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตได้ จากการทดสอบความสามารถในการต้านทานความร้อนของ แป้ง ST และแป้งดัดแปร OST ด้วยเทคนิค TGA พบว่า แป้ง ST และ OST มีการสลายตัว 2 ระยะ โดยระยะที่ 1 น่าจะเป็นการสลายตัวของความชื้นที่สะสมในแป้ง และระยะที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้ง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าแป้ง OST มีอัตราการสลายตัวมากกว่า ST ที่อุณหภูมิประมาณ 240°C ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลจากปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล OST ลดลง ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งลดลง ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแป้งลดลง OST จึงเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ST ดังแสดงในรูปที่ 46

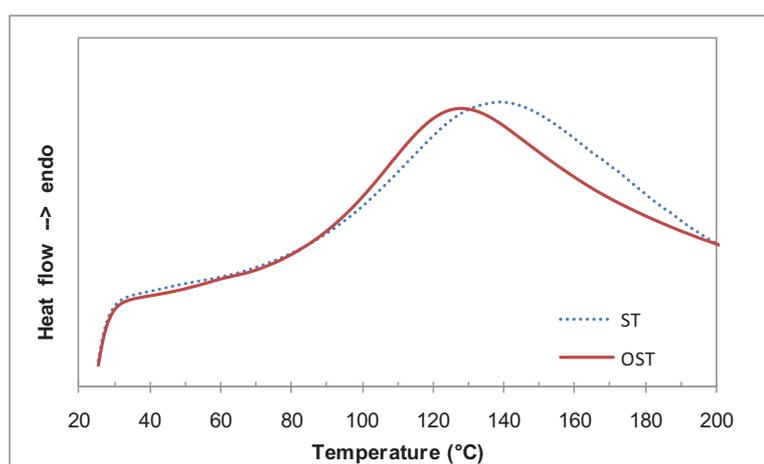
จากข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง ST และ OST ด้วยเทคนิค TGA พบว่าสามารถนำแป้ง ST และ OST ไปใช้ในกระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติกคลุมโรงเรือนในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการผสมและขึ้นรูปแผ่นฟิล์มที่ $150\text{-}180^{\circ}\text{C}$ ได้ โดยที่แป้ง ST และ OST ไม่เกิดการสลายตัว



ภาพที่ 46 TGA Thermogram ของแป้งมันสำปะหลังทั่วไป (ST) และแป้งออกตะโนเอต (OST)

ในธรรมชาติแป้งจะมีโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินมีการจัดเรียงตัวกันโดยสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัว (melting temperature) ที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิหลอมตัวของเม็ดแป้งจะสูงกว่าอุณหภูมิ การสลายตัว (decomposition temperature) ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือถ้าได้รับความร้อนสูงเพียงพอแป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัวทำให้ยากต่อการนำมาใช้ร่วมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์รวมทั้งเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกทั่วไปได้

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้ง ST และแป้ง OST ด้วยเทคนิค DSC พบว่าแป้งทั้งสองชนิดมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิในลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเกิดพีคดูดความร้อนที่ค่อนข้างกว้างในช่วงอุณหภูมิ 80-200 °C ดังแสดงในภาพที่ 47



ภาพที่ 47 DSC thermogram ของแป้ง ST

4.4 การผสมแป้งดัดแปร OST กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (twin screw extruder)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง (ST) เป็น octanoated starch (OST) ผ่านการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งมันสำปะหลังและ ออกตะโนอิล คลอไรด์ เพื่อเพิ่มสมบัติ hydrophobic ให้กับแป้ง ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีน

สำหรับการพัฒนาสูตรพลาสติกสำหรับคลุมโรงเรือนที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำได้โดยผสม LDPE, ST และ OST ในอัตราส่วนต่างๆกัน ดังแสดงในตาราง 3 ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (twin screw extruder) โดยใช้อุณหภูมิการผสม 150-180°C (T1-T8) และความเร็วรอบสกรูผสมเท่ากับ 200 รอบต่อนาที

ตาราง 3 องค์ประกอบภายในสูตรพอลิเมอร์ผสมสำหรับเตรียมพลาสติกคลุมโรงเรือน

สูตร	องค์ประกอบ (%)		
	LDPE	ST	OST
LDPE/ST/OST:70/30/0	70	30	0
LDPE/ST/OST:70/20/10	70	20	10
LDPE/ST/OST:70/10/20	70	10	20
LDPE/ST/OST:70/0/30	70	0	30



ภาพที่ 48 เม็ดพลาสติกผสม OST

4.4.1 ความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Melt Flow Index)

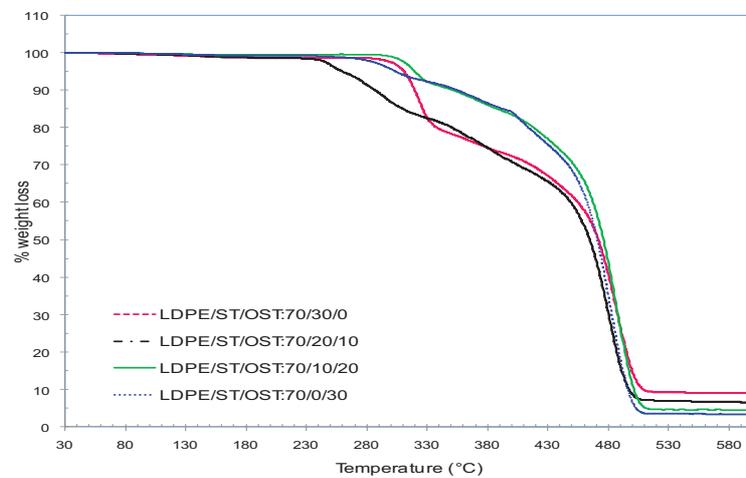
ดัชนีการไหล(MFI) เป็นค่าที่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของของโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิและความดันจำเพาะ ซึ่งถ้าดัชนีการไหลมีค่าต่ำ หมายความว่าโพลิเมอร์มีความหนืดมากขึ้น คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกวิธีการทำผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์นั้นๆ จากการทดลองหาดัชนีหลอมไหลที่อุณหภูมิ 190°C และน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม จากการทดสอบได้ค่าดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า OST มีผลทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งที่ลดลงเนื่องจากการการแทนที่ด้วยหมู่ออกซิเจนเอต ทำให้แรงกระทำ (interaction) ระหว่างโมเลกุลแป้งลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมสามารถไหลได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มข้นของ OST ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าดัชนีการไหลที่วัดได้

ตาราง 4 ค่าดัชนีการไหลของสูตรพอลิเมอร์ผสมสำหรับเตรียมพลาสติกคลุมโรงเรือน

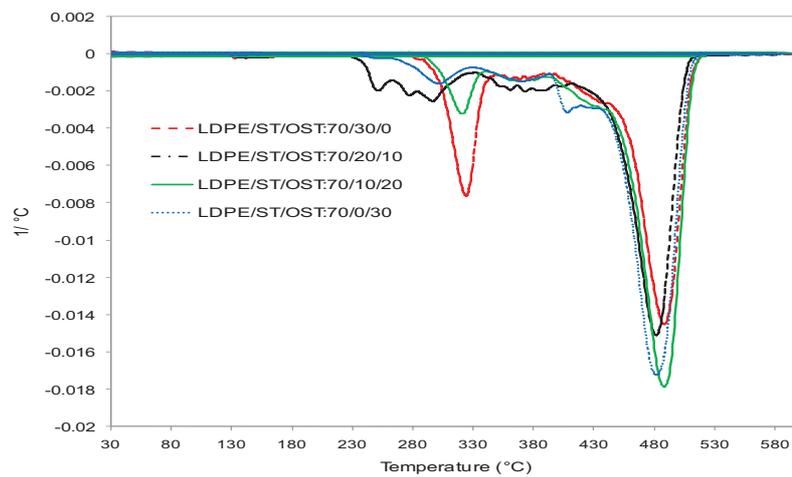
สูตร	Melt Flow Index (g/10 min)
LDPE/ST/OST:70/30/0	1.1 ± 0.3
LDPE/ST/OST:70/20/10	2.0 ± 0.1
LDPE/ST/OST:70/10/20	2.2 ± 0.1
LDPE/ST/OST:70/0/30	2.3 ± 0.2

4.4.2 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ภาพที่ 49 ก และ 49 ข แสดง % weight loss และ derivative ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA จากกราฟ derivative (รูป 49 ข) พบว่าที่อุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature) สูงสุดแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีน ซึ่งจากรูปเห็นได้ชัดว่า OST เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า ST หรืออาจกล่าวได้ว่า OST เกิดการสลายตัวได้เร็วกว่า ST ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจากปริมาณพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแบ่งที่ลดลงเนื่องมาจากการดัดแปรแป้ง ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวลดลงด้วย



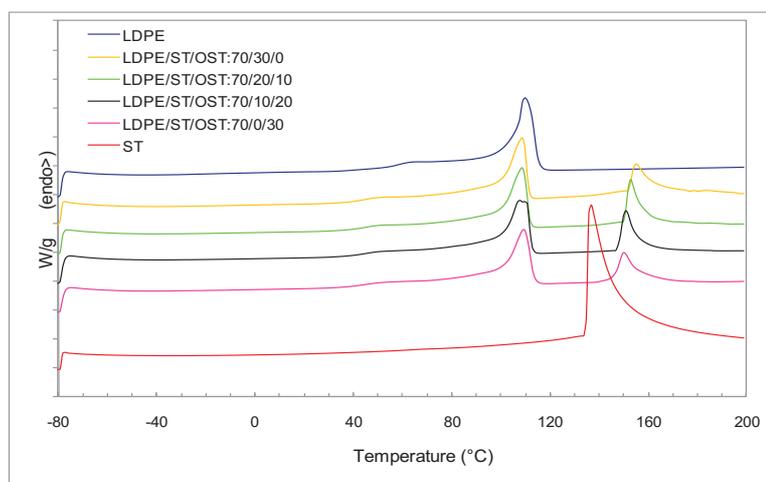
ก



ข

ภาพที่ 49 TGA thermogram ของพอลิเมอร์ผสม

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ LDPE และพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ด้วยเทคนิค DSC พบว่า LDPE มีอุณหภูมิการหลอมผลึกค่าเดียวที่ประมาณ 110°C ในขณะที่ LDPE/ST/OST ปรากฏค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) มากกว่า 1 ค่า คือที่อุณหภูมิประมาณ 110°C ซึ่งน่าจะมาจาก LDPE ที่ยังคงมีลักษณะผลึกเช่นเดิม และที่อุณหภูมิประมาณ 160°C โดยอุณหภูมิหลอมผลึกนี้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ OST ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากโมเลกุลของแป้ง (ทั้ง ST และ OST) เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ LDPE ส่งผลให้มีโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นอกจากนี้ยังสังเกตได้ถึงความแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิหลอมผลึกของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ทั้ง 2 ค่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ OST ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นไปได้ว่า OST และ LDPE มีความสามารถในการผสมเข้ากันได้มากกว่ากรณีการผสม ST และ LDPE จึงส่งผลให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลอมผลึกทั้ง 2 ค่า ลดลงดังแสดงในภาพที่ 50

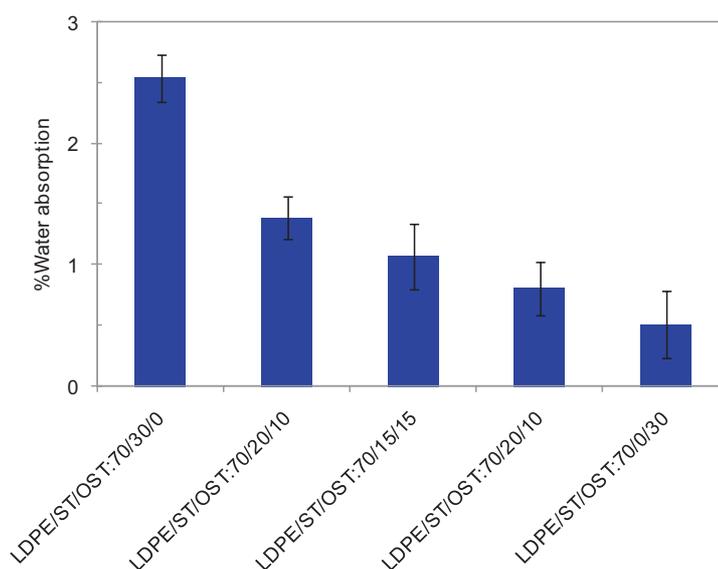


ภาพที่ 50 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม

4.4.3 ความสามารถในการดูดซึมความชื้น

จากการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสม

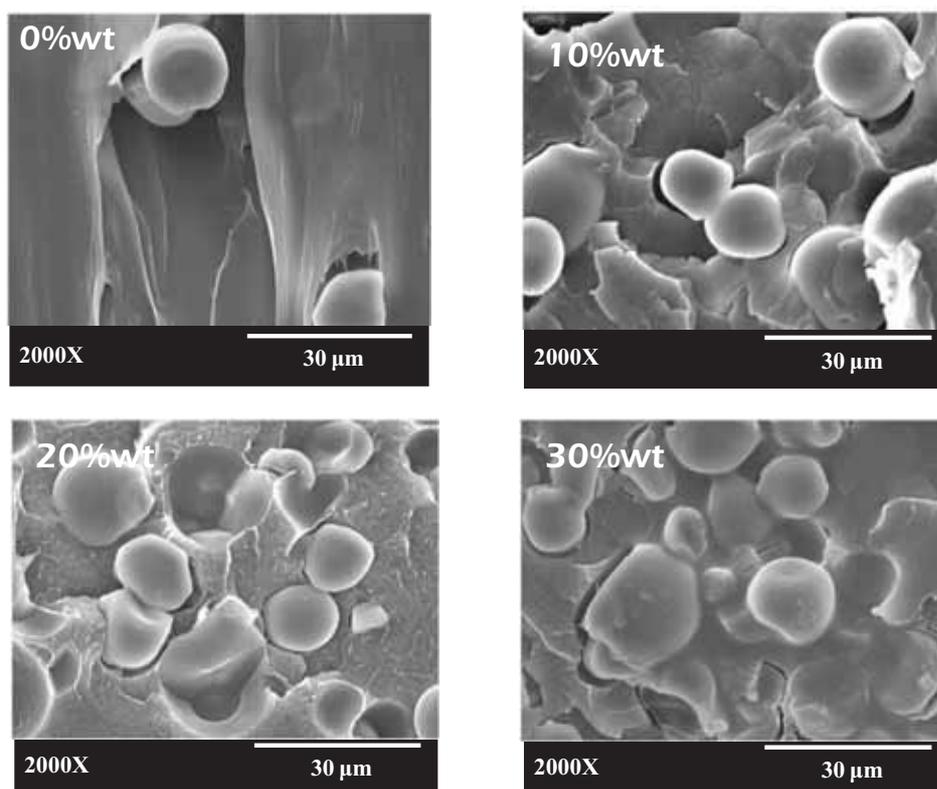
LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้น OST เท่ากับ 0, 10, 15, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST:70/30/0 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นสูงสุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากในสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง (ST) มีหมู่ที่ชอบน้ำคือ หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดูดซึมความชื้นได้ในปริมาณสูง ในขณะที่ OST ซึ่งเป็นแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรทางเคมี ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจากเดิม โดยค่าความสามารถในการดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ OST ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 % เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม (LDPE/ST/OST)

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้น OST เท่ากับ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 52 เห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม OST (OST0) พบช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างเม็ดแป้งและ LDPE เมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ OST ในระบบพอลิเมอร์ผสมจะเห็นได้ว่าการแยกเฟสระหว่างโมเลกุลของแป้งและ LDPE เมทริกซ์ลดลง เนื่องจากความเป็น hydrophobic ของ OST ช่วยเพิ่มความสามารถในการผสมเข้ากันได้กับ LDPE เมทริกซ์

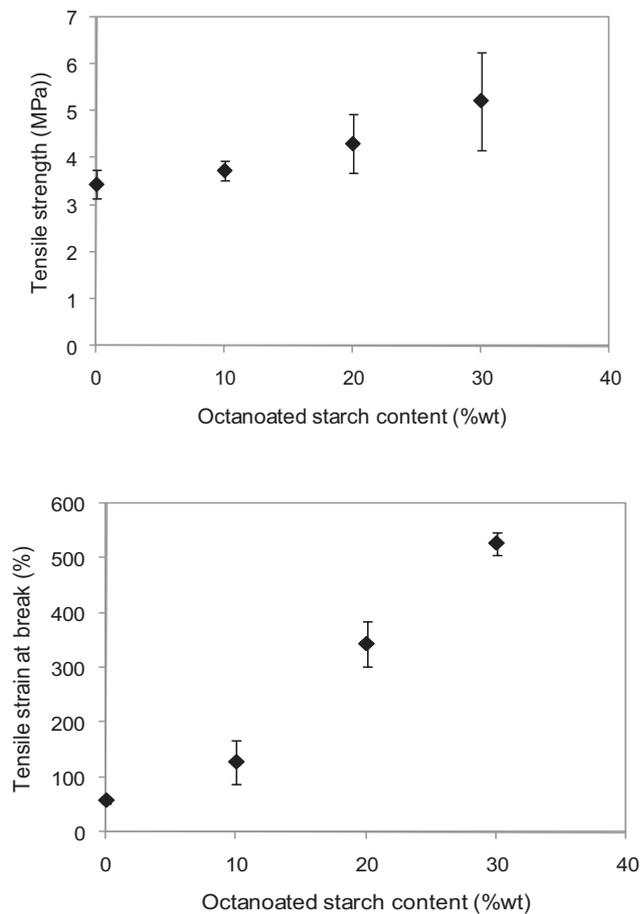


ภาพที่ 52 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ LDPE/ST/OST ที่ความเข้มข้น OST 0, 10, 20 และ 30%wt

--	--

4.4.5 ความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

จากการวิเคราะห์สมบัติการดึงยืดของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST พบว่า OST ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมได้ ดังจะเห็นได้จากค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และ ค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) เพิ่มขึ้นตามปริมาณ OST ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความเป็น hydrophobic หรือปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลระหว่างโมเลกุลแบ่งที่ลดลง

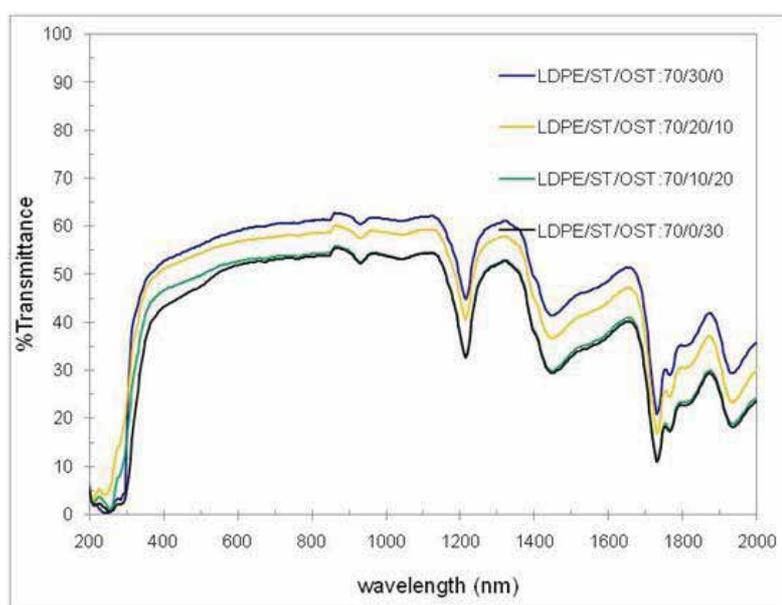


ภาพที่ 53 สมบัติเชิงกลของ LDPE/ST/OST

4.4.6 ความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาพลาสติกสำหรับคลุมโรงเรือนเพาะชำที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงประการหนึ่งก็คือความสามารถในการยอมให้แสงส่องผ่านของแผ่นฟิล์มที่พัฒนาขึ้น ซึ่งพลาสติกควรต้องยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (400-800 นาโนเมตร) ผ่านได้อย่างน้อย 60% เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของพืชในการสังเคราะห์แสง

จากการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการยอมให้แสงส่องผ่านของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่า OST มีแนวโน้มทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าการส่องผ่านของแสงลดลง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.16 อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST มีค่าอยู่ระหว่าง 50-60 %T ซึ่งอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช



ภาพที่ 54 ค่าความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม LDPE/ST/OST

4.5 การเตรียม Thermoplastic starch (TPS) จากแป้ง OST

กระบวนการเตรียมแป้งพลาสติกไซส์ (TPS) คือการทำให้เม็ดแป้ง (granular starch) แยกออก โดยแป้งจะเปลี่ยนสภาพจาก semi-crystalline granule เป็นโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจากการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้ง กระบวนการนี้สามารถเกิดได้โดยการให้ความร้อนร่วมกับการให้แรงเชิงกล เช่น กระบวนการอัดรีดพลาสติก เป็นต้น ซึ่งการเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 เม็ดแป้งดูดซึมน้ำและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซล (micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด เม็ดแป้งจึงยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ birefringence ได้ ระยะที่ 2 เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเริ่มให้อุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์ เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่าง micelles ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลายเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำมากขึ้นและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาตินไนซ์ขั้นทำให้เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง birefringence ซึ่งในระยะนี้ความหนืดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นในระยะที่ 3 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้งยังทำให้อะมิโลสสูญเสียความเป็น helix ของตัวเองอีกด้วย

4.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเจลาตินไนซ์ของแป้งมันสำปะหลัง (ST)

ทำการผสมแป้งและส่วนประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 5 จากนั้นนำไปอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการผสม 100-110 °C (T1-T8, hopper-die) ที่ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 50 รอบ/นาที



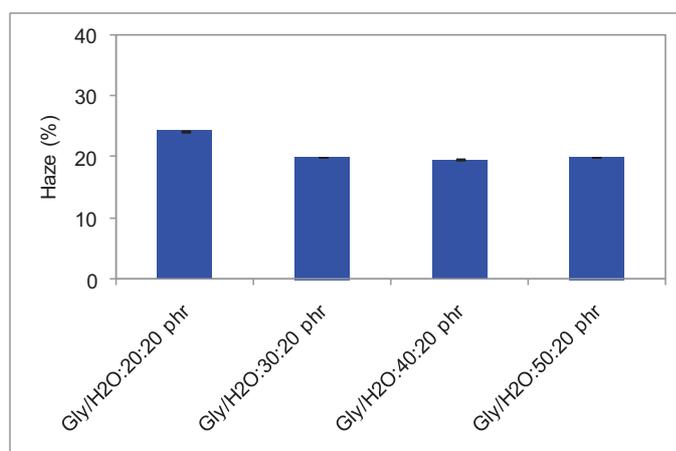
ภาพที่ 55 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (TSE)

ตาราง 5 ส่วนผสมในการเตรียม TPS

สูตร	ส่วนประกอบ		
	แป้งมันสำปะหลัง	กลีเซอรอล (phr)	น้ำ (phr)
Gly/H ₂ O:20/20	100	20	20
Gly/H ₂ O:30/20	100	30	20
Gly/H ₂ O:40/20	100	40	20
Gly/H ₂ O:50/20	100	50	20

ก Gly/H₂O:20/20ข Gly/H₂O:30/20ค Gly/H₂O:40/20ง Gly/H₂O:50/20

ภาพที่ 56 ลักษณะแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่



ภาพที่ 57 ค่า % Haze ของแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

เนื่องจากแป้งที่เกิดเจลลาตินในซ้อย่างสมบูรณ์จะเปลี่ยนสภาพจากการเป็นเม็ดแป้งสีขาวเป็นของหนืดใส ซึ่งจากการทดลองพบว่าสูตรแป้งที่มีการผสมน้ำ 20 phr และกลีเซอรอล 20-50 phr สามารถเกิดเจลลาตินในซ้ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงใน ภาพที่ 56 จากการทดลองพบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่สูงขึ้นส่งผลให้แป้งเจลลาตินในซ้ที่ได้มีความหนืดสูงและมีความคงรูปต่ำ จากการวิเคราะห์ลักษณะความใสของแป้งเจลลาตินในซ้ที่เตรียมได้โดยวิเคราะห์ค่า %Haze ซึ่งค่า %Haze นี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความใสของวัตถุ ซึ่งวัตถุที่มีความใสมากจะให้ค่า %Haze สูง จากภาพที่ 57 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน แป้งเจลลาตินในซ้ยังคงมีค่า %Haze ที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดเจลลาตินในซ้ของแป้งได้แก่ปริมาณน้ำ ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์หลักในระบบการเตรียมแป้งเจลลาตินในซ้ จากการทดลองพบว่าแป้งที่ผสมน้ำ 20 phr และกลีเซอรอล 20 phr สามารถเกิดเจลลาตินในซ้ได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งมีความคงตัวสูงสามารถอัดรีดได้ดีที่สุด

4.5.2 การเตรียม thermoplastic starch (TPS) จากแป้งดัดแปร OST

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม TPS โดยใช้สภาวะตามข้อ 4.9.1 โดยผสม OST ที่ความเข้มข้น 0-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าแป้งสามารถเกิดเจลาตินไนซ์ได้เป็น TPS ที่มีลักษณะใส ดังแสดงในภาพที่ 58



ก. OST 0%wt



ข. OST 5%wt



ค. OST 10%wt



ง. OST 15%wt



จ. OST 20%wt

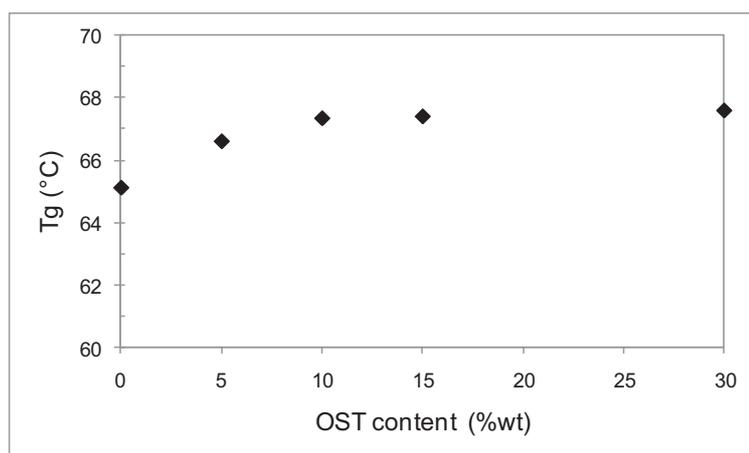


ฉ. OST 30%wt

ภาพที่ 58 TPS จากแป้งดัดแปร OST

4.5.3 สมบัติเชิงความร้อนของ TPS จาก OST

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของ TPS ที่เตรียมได้ พบว่าการอีทรีดแ่งด้วยความร้อน โดยมีน้ำและกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ สามารถปรับสมบัติของแ่งให้มีความเป็น thermoplastic ได้

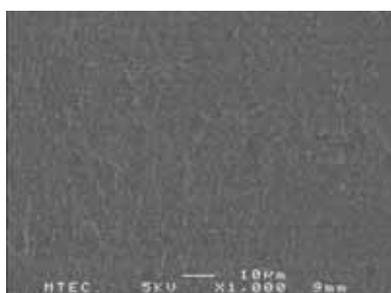


ภาพที่ 59 ค่า T_g ของ TPS ที่มี OST เป็นองค์ประกอบ

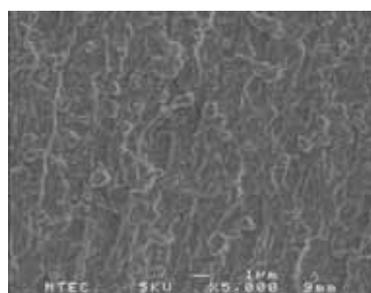
ภาพที่ 59 แสดงค่า T_g ของ TPS ที่มีแ่ง OST เป็นองค์ประกอบ 0-30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่า แ่ง OST มีแนวโน้มทำให้ค่า T_g ของ TPS สูงขึ้นประมาณ 2-3°C อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณ OST เพิ่มขึ้น ค่า T_g ของ TPS เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.5.4 ลักษณะพื้นฐานของ TPS

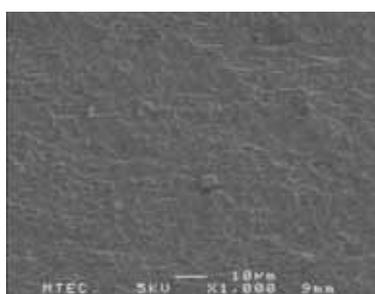
กระบวนการเตรียมแป้งพลาสติกไฮสหรือ TPS หมายถึง คือการทำให้เม็ดแป้ง (granular starch) แตกออก ซึ่งจะทำให้แป้งเปลี่ยนจากสภาพกึ่งผลึก (semi-crystalline granule) เป็นโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจาก การพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งถูกทำลาย จาก การศึกษาลักษณะพื้นฐานของ TPS ที่มีส่วนผสมของ OST ที่ความเข้มข้น 0-30 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก พบว่า แป้งสามารถเกิดเจลาติในข้ออย่างสมบูรณ์โดยจะเห็นได้ว่าแป้งเปลี่ยนสภาพ กลายเป็นเฟสต่อเนื่องทั้งหมดโดยไม่พบสภาพที่เป็นเม็ดกึ่งผลึก (semi-crystalline granule) ผสม ในโครงสร้างของ TPS ดังแสดงในภาพที่ 60



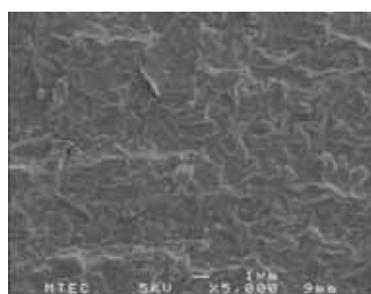
OST 0%wt (1000X)



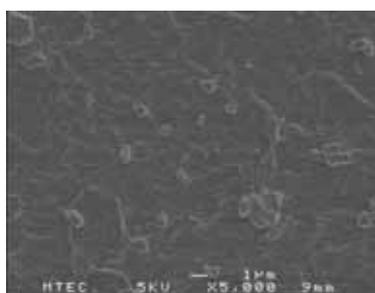
OST 0%wt (5000X)



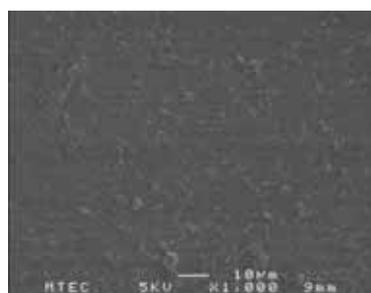
OST 5%wt (1000X)



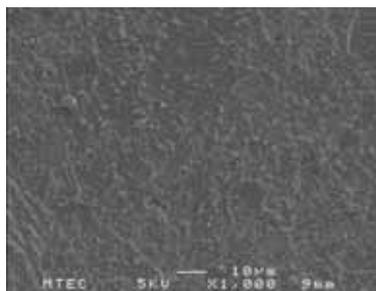
OST 5%wt (5000X)



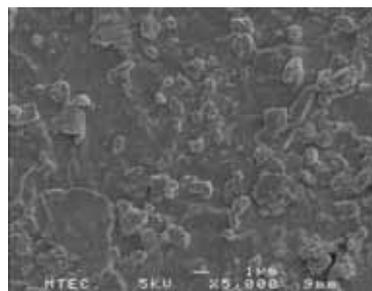
OST 10%wt (1000X)



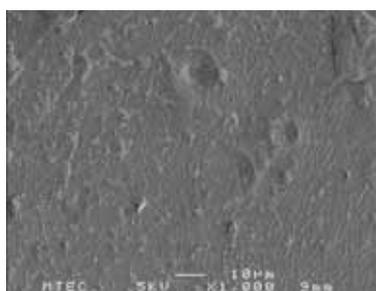
OST 10%wt (5000X)



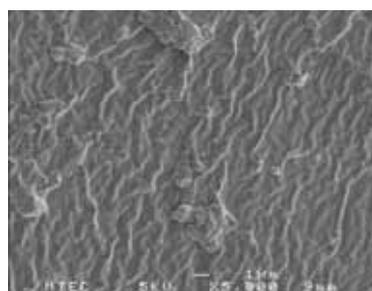
OST 15%wt (1000X)



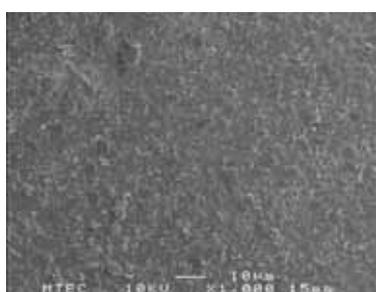
OST 15%wt (5000X)



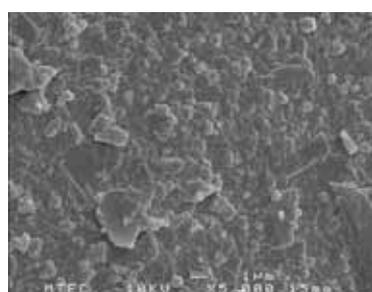
OST 20%wt (1000X)



OST 20%wt (5000X)

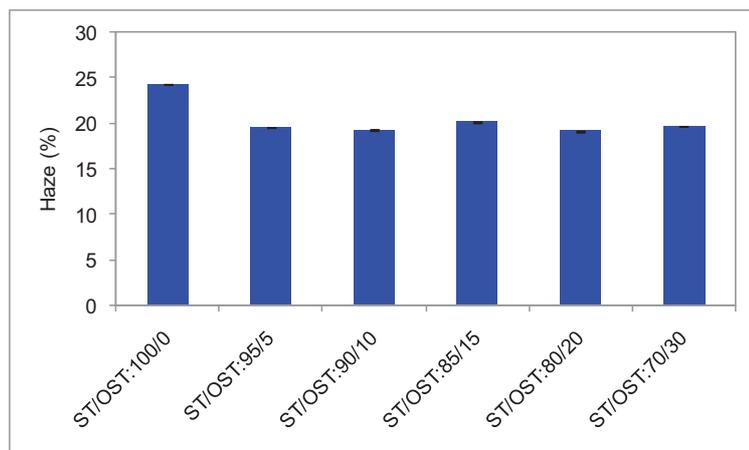


OST 30%wt (1000X)



OST 30%wt (5000X)

ภาพที่ 60 ลักษณะพื้นฐานของ TPS



ภาพที่ 61 ค่า % Haze ของแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคนคู่

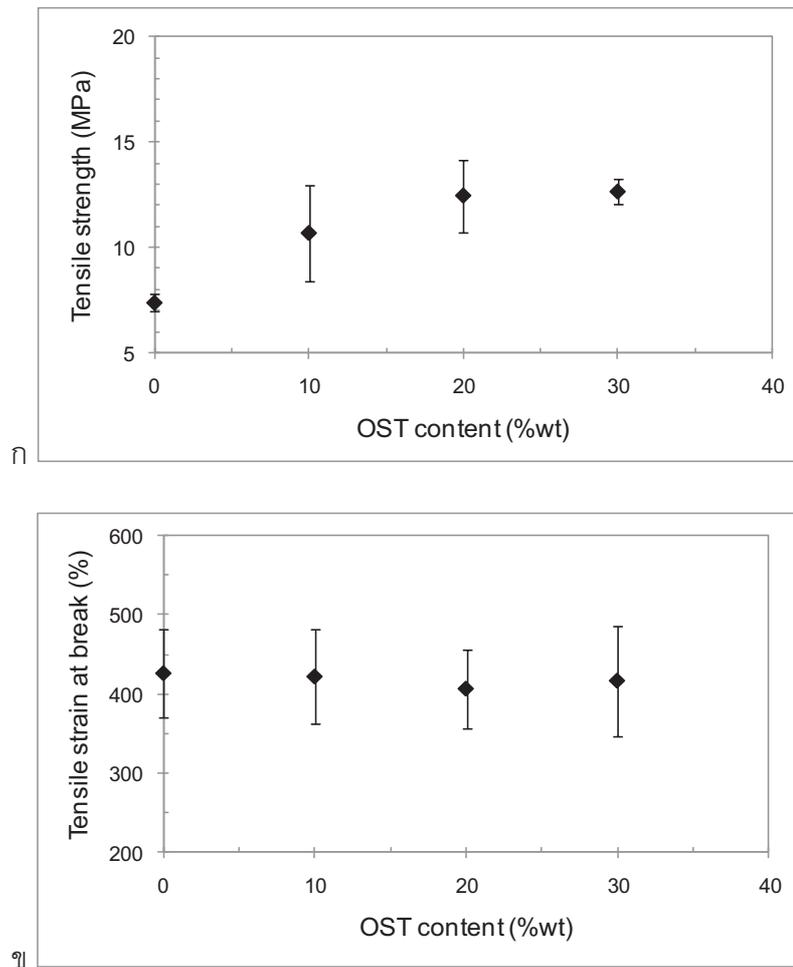
จากการวิเคราะห์ค่า%Haze ของแป้งที่ผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีด (TPS) พบว่า ค่า %Haze ลดลงเมื่อผสม OST ซึ่งค่า %Haze ที่ลดลง หมายถึงวัตถุดิบมีความขุ่นมากขึ้นหรือสามารถยอมให้แสงผ่านได้น้อยลง ซึ่งกรณีนี้น่าจะมีสาเหตุมาจาก TPS ที่มี OST เป็นองค์ประกอบไม่สามารถเกิดเจลาตินไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยยังคงหลงเหลือแป้งที่ยังอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) อยู่บางส่วน ส่งผลให้ เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณเม็ดแป้งดังกล่าวจะเกิดการสะท้อนกลับ แสงจึงไม่สามารถส่องผ่านทะลุบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่า %Haze ที่วิเคราะห์ได้มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่

61

4.5.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS

จากการวิเคราะห์ค่าสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS พบว่า OST ไม่ส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และ ค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS ที่ความเข้มข้น OST ต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้่าจะมีสาเหตุมาจากการเตรียมแป้งให้อยู่ในรูป TPS นั้น โครงสร้างเม็ดแป้ง จะถูกเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์สัณฐาน (amorphous) ที่ถูกทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลไปแล้ว โดยพลาสติกไซเซอร์จะแพร่เข้าไปในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งบวมตัว จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการอัดรีดด้วยความร้อน ในขั้นตอนนี้ เม็ดแป้งจะถูกทำให้แตกออกและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (destructured) หรืออาจเกิด depolymerised ร่วมด้วย และได้เป็นแป้งพลาสติกไซส์ที่หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงใน ภาพที่

62



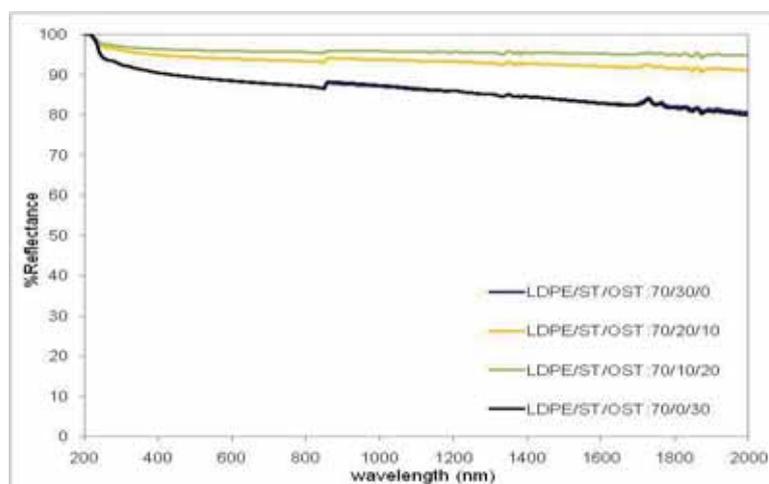
ภาพที่ 62 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS (70/30) ที่ประกอบด้วย OST ที่ความเข้มข้น 0-30%wt

จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า แม้ว่าแป้งดัดแปร OST จะมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเหลืออยู่น้อยกว่าในแป้ง ST ก็ตาม แต่เมื่อ แป้งทั้ง 2 ชนิด ผ่านการพลาสติกไซส์ด้วยพลาสติกไซเซอร์ที่มากเกินไป ซึ่งทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลถูกทำลายไป จึงทำให้แป้งพลาสติกไซส์ที่ได้มีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST และ LDPE/TPS พบว่าการผสม OST 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) ใกล้เคียงกับกรณีเตรียมจาก TPS อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจาก TPS มีค่าสูงกว่ากรณีเตรียมจาก OST ในรูปเม็ดแป้งเล็กน้อย

4.5.6 ความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

จากการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการยอมให้แสงส่องผ่านของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS ที่ความเข้มข้น OST 0-30 % โดยน้ำหนัก พบว่าแผ่นฟิล์มทั้งหมดมีค่าการส่องผ่านของแสงอยู่ในช่วง 90-100 % Reflectance ที่ทุกช่วงความยาวคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 63

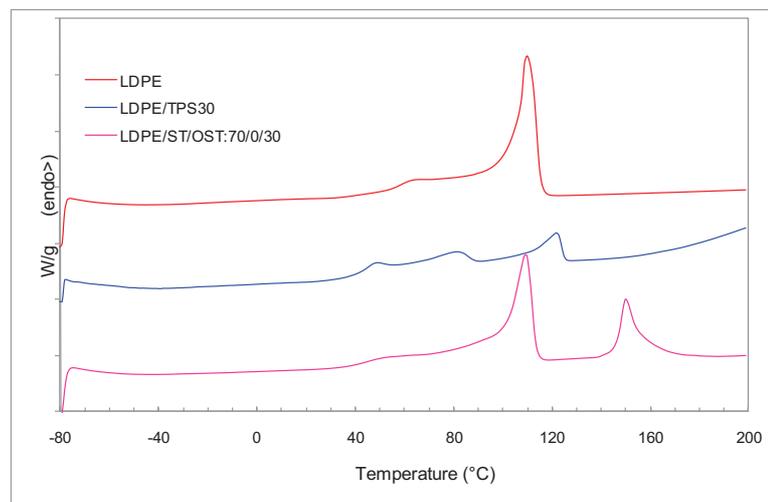


ภาพที่ 63 ค่าความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS

จากภาพที่ 63 เห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS มีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในระดับที่สูงมาก กล่าวคือสามารถสะท้อนแสงที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มได้เกือบทั้งหมด 100% ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจาก TPS ซึ่งอยู่ในรูปของพอลิเมอร์อสัณฐานเข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ LDPE ซึ่งอาจจะเข้าไปแทรกหรือขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ LDPE ส่งผลให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ทำให้แสงที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มไม่สามารถส่องผ่านแผ่นฟิล์มไปได้ จึงเกิดการสะท้อนออกจากผิวหน้าของแผ่นฟิล์มดังผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์ม 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดที่ 2 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/TPS:70/30 และชนิดที่ 3 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST:70/0/30 ด้วยเทคนิค DSC พบว่า แผ่นฟิล์ม LDPE แสดงค่า T_m ที่ประมาณ 110°C โดยแผ่นฟิล์ม LDPE/ST/OST สามารถพบค่า T_m ค่า คือที่ประมาณ 110°C และประมาณ

150°C ซึ่งน่าจะเป็น T_m ของ LDPE และ ST ตามลำดับ แต่ในกรณีแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS นั้น เห็นได้ว่าพบค่า T_m 3 ค่า คือที่ประมาณ 50°C 80°C และ 120°C ตามลำดับ โดยมีลักษณะเป็นพีคค่อนข้างกว้าง ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเกิดผลึกของ LDPE ในแผ่นฟิล์ม LDPE/TPS ถูกรบกวนจาก TPS ทำให้ลักษณะหรือโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไป เห็นได้จาก DSC thermogram ของแผ่นฟิล์ม ทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 64



ภาพที่ 64 DSC thermogram ของแผ่นฟิล์ม LDPE, LDPE/TPS30:70/30 และ LDPE/ST/TPS:70/0/30

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองตอน คือ ตอนที่หนึ่ง เป็นการพัฒนา/ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และตอนที่สองเป็นการพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งดัดแปร โดยทำการศึกษาอิทธิพลของแป้งดัดแปรที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งทั่วไป แป้งดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทั้งในรูปแบบที่เป็นเม็ดแป้งและในรูปแบบเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (thermoplastic starch) เพื่อพัฒนาเป็นพลาสติกคลุมโรงเรือนเพาะชำที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองต่างๆ ได้ดังนี้

ตอนที่ 1 การพัฒนา/ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังให้มีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

แป้งมันสำปะหลังสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับออกตะโนอิลคลอไรด์ได้ เป็นแป้งออกตะโนเอต (Octanoated starch) โดยมีค่า Degree of substitution (DS) ประมาณ 0.013 แป้งออกตะโนเอตที่เตรียมได้นี้สามารถทนความร้อนได้ถึง 260°C จึงสามารถไปผสมกับพอลิเอทิลีนโดยใช้กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนตามปกติซึ่งใช้อุณหภูมิ $150-180^{\circ}\text{C}$ ได้ โดยที่แป้งไม่เกิดการสลายตัว

ตอนที่ 2 การพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งดัดแปร เพื่อพัฒนาเป็น

พลาสติกคลุมโรงเรือนเพาะชำที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การผสมแป้งลงในพอลิเอทิลีน ทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับความไม่เข้ากันของแป้งและพอลิเอทิลีน ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวต่ำเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นทดสอบ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีน

การเติมแป้งดัดแปร ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลขึ้น โมเลกุลของพอลิเอทิลีนและแป้งมีความเข้ากันได้มากขึ้น ส่งผลค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าการเชื่อมขวางโมเลกุลที่เกิดขึ้นยังไม่เพียงพอที่จะชดเชยผลของปริมาณและโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิเอทิลีน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) ยังคงมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีน

การผสมแป้งดัดแปรในพอลิเอทิลีน ส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของเม็ดแป้งประกอบกับโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิเอทิลีน อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง แป้งดัดแปร และพอลิเอทิลีนยังคงมีความสามารถในการยอมให้แสงส่องผ่านได้ประมาณ 60% ซึ่งยังอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

การผสมแป้งดัดแปรในรูป Thermoplastic starch ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่า % การดึงยืด ณ จุดขาด (tensile strain at break) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีการผสมเม็ดแป้ง ปริมาณแป้งดัดแปรไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ เนื่องจากแป้งผ่านการพลาสติกไซส์ด้วยพลาสติกไซเซอร์ที่มากเกินไป ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลถูกทำลายไป ส่งผลให้แป้งพลาสติกไซส์ที่ได้มีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกัน

การผสมแป้งดัดแปรในรูป Thermoplastic starch ส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มอยู่ในระดับที่ต่ำเกินไป ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช เนื่องจากแป้งเข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนส่งผลให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าการส่องผ่านของแสงลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่น เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้หลากหลาย เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. DITEC, University of Basilicata
2. www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect20/starch.gif
3. cdavies.files.wordpress.com/2006
4. ชลดา ฤทธิวิรุฬห์ . เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม.
กรุงเทพมหานคร ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2544.
5. Pimpan, V.; Ratanarat, K.; and Pongchawanakul, M. Preliminary study on preparation of biodegradable plastic from modified cassava starch. Journal of Scientific Research Chulalongkorn University 26(2): 117-125.
6. สมพร รุ่งสัมพันธ์กุล และสุพิชญา ชื่นชนม์. ภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวเหนียว
เพื่อใช้ในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544
7. J. J. G. van Soest, K. Benes, D. de Wit and J. F. G. Vliegenthart, The influence of starch molecular mass on the properties of extruded thermoplastic starch, Polymer, 3(1996) 3543-3552.
8. Ioannis Arvanitoyannis and Costas G. Biliaderis, Physical properties of polyol-plasticized edible films made from sodium caseinate and soluble starch blends, Food Chemistry,62(1998) 333-342.
9. R. Mani, M. Bhattacharya, Properties of injection moulded blends of starch and modified biodegradable polyesters, European Polymer Journal 37(2001) 515-526.
10. D.F. Parra, C.C. Tadini, P. Ponce, A.B. Lugao, Mechanical properties and water vapor transmission in some blends of cassava starch edible films, Carbohydrate Polymers 58(2004) 457-481.
12. O. Akaranta and G. E. Oku, Erratum to “Some properties of cassava mesocarp carbohydrates–low density polyethylene blends, Carbohydrate Polymers 34 (1997) 403–405.

13. E.M. Nakamura, L. Cordi, G.S.G. Almeida, N. Duran, L.H.I. Mei, Study and development of LDPE/starch partially biodegradable compounds, Journal of Materials Processing Technology 162-163 (2005) 236-241.
14. I.M. Thakore, Sonal Desai, B.D. Sarawade, Surekha, Biodegradation of octanoated starch and its blends with LDPE, European Polymer Journal 37(2001) 151-160
15. Krzysztof N. Waliszewskia et al, Changes of banana starch by chemical and physical modification, Carbohydrate Polymers 52 (2003) 237–242.
16. Lars Nilsson and Björn Bergenståhl, Adsorption of hydrophobically modified anionic starch at oppositely charged oil/water interfaces, Journal of Colloid and Interface Science 308 (2007) 508-513
17. M.F. Koenig and S.J. Huang, Biodegradable blends and composites of polycaprolactone and starch derivatives, Polymer 36(1995) 1877-1882.
18. Zhao Guohua, Liu Ya, Fang Cuilan, Zhang Min, Zhao Caiqiong, Chen Zongdao, Water resistance, mechanical properties and biodegradability of methylated-corn starch/poly(vinyl alcohol) blend film, Polymer Degradation and Stability 91(2006)703-711.
19. Mrinal Bhattachaya, Ramaswamy Mani, Properties of injection mould blends of starch and modified biodegradable polyesters, European Polymer Journal 37(2001) 515-526
20. Ma, W. P., & Robyt, J. F., Preparation and characterization of soluble starches having different molecular sizes and composition, by acid hydrolysis in different alcohols, Carbohydrate Research 166(1987) 283–297.
21. Fanta, G. F. and Bagley, E. B., In Encyclopedia of Polymer Science, ed. H.F. Mark and N.M. Bikalas and Sons, New York, 1976
22. Spychaj, T. and Wilpiszewska, K., Chemical modification of starch with hexamethylene diisocyanate derivatives, Carbohydrate Polymers 70(2007) 334-340.

23. Wilpiszewska, K. and Spychaj, T., Thermoplastic urethane derivatives of starch and aliphatic isocyanate, Polish Society of Food Technologists'(2007) 373-381.
24. Cavallho, A. J. F, Cavelo, A. A. S., and Gandini, A., Surface chemical modification of thermoplastic starch: reactions with isocyanates, epoxy functions and stearyl chloride, Industrial Crops and Products 21(2005) 331-336.
25. De Graaf, R. A., Karman, A.P., and Janssen, L. P. B. M., Material properties and glass transition temperatures of different thermoplastic starches after extrusion processing, Starch 55(2003) 80-86.
26. You-Ping Wu, Qing Qi, Gui-Hua Liang, Li-Qun Zhang, A strategy to prepare high performance starch/rubber composites: In situ modification during latex compounding process, Carbohydrate Polymers 65(2006) 109–113.
27. Lu, Y., Tighzert, L., Dole, P., & Erre, D. , Preparation and properties of starch thermoplastics modified with waterborne polyurethane from renewable resources, Polymer 46(2005) 9863–9870.
28. Chang, Y., Lin, J., Lee, S., Effect of acid-alcohol treatment on the molecular structure and physiochemical properties of maize and potato starch, Carbohydrate Polymers 53(2003) 475-482.
29. Fox, J. D., & Robyt, J. F., Modification of starch granules by hydrolysis with hydrochloric acid in various alcohols, and the formation of new kinds of limit dextrans, Carbohydrate Research 227(1992) 163–170.
30. Fanta, G. F. and Bagley, E. B., In Encyclopedia of Polymer Science, ed. H.F. Mark and N.M. Bikalas and Sons, New York, 1976
31. Otey, F.H., Westhoff, R. P. and Doane, W.M., Ind. Engng Chem. Prod. Res. Dev., 1987, 26, 1659
32. Suda Kiatkamjornwong, Prodepan Thakeow, Manit Sonsuk, Chemical modification of cassava starch for degradable polyethylenen sheets, Polymer Degradation and Stability 73(2001) 363-375.

33. R. Chandra, R. Rustgi, Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends, Polymer Degradation and Stability, 56(1997) 185-202.
34. Ji-Jun Zou, Chang-Jun Liu, Baldur Eliasson, Modification of Starch by glow discharge plasma, Carbohydrate Polymers 55(2004) 23-26

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ก

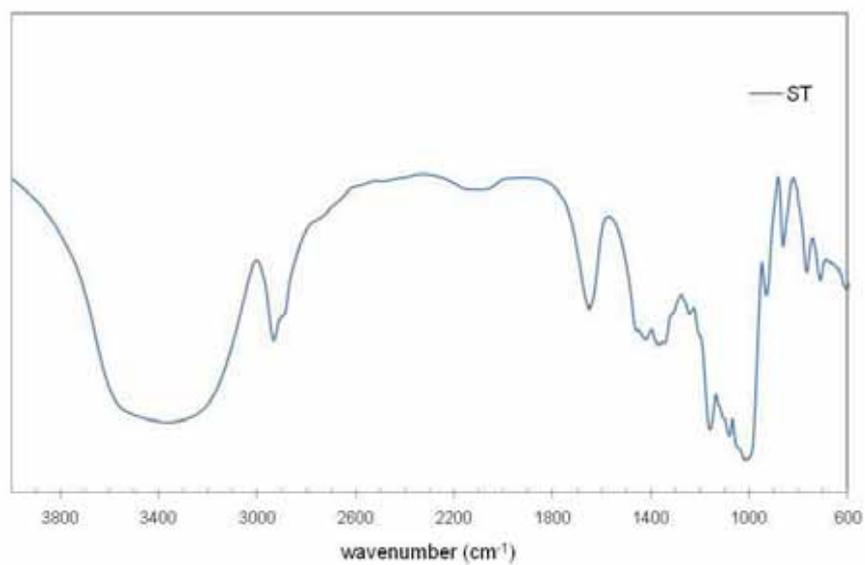
ข้อมูลการทดลองจากเทคนิคต่างๆ

ตาราง 6 แสดงปริมาณ Octanoyl chloride ที่ใช้ในการทดลองเตรียม Octanoated starch

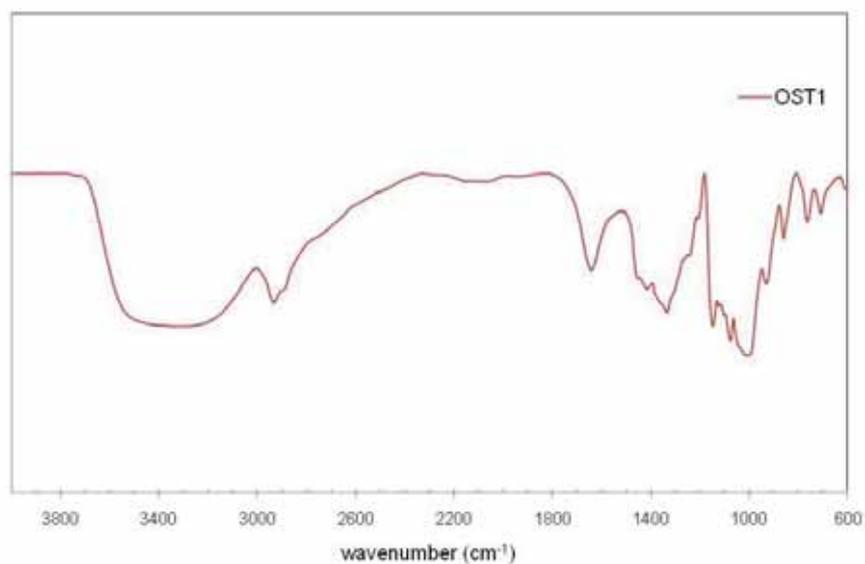
แป้งดัดแปร	น้ำหนักแป้ง (ST) (g)	ปริมาณ Octanoyl chloride (ml)
OST1	2.503	0.4
OST2	2.516	0.8
OST3	2.503	1.2



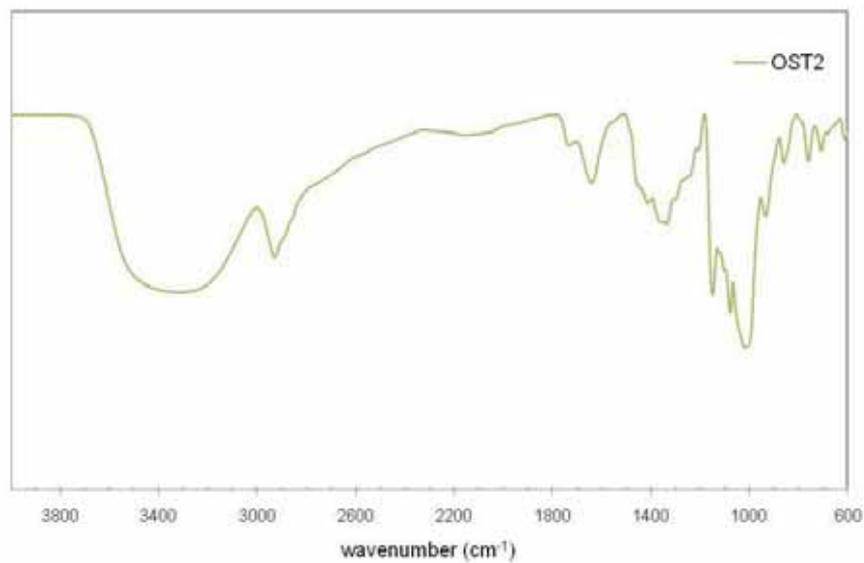
ภาพที่ 65 ลักษณะการเตรียมแป้งดัดแปร OST



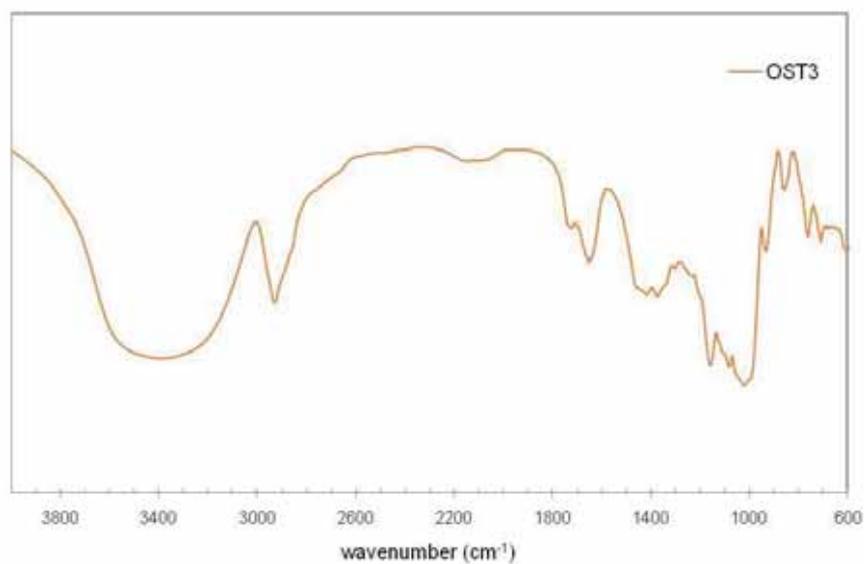
ภาพที่ 66 กราฟ FTIR ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร



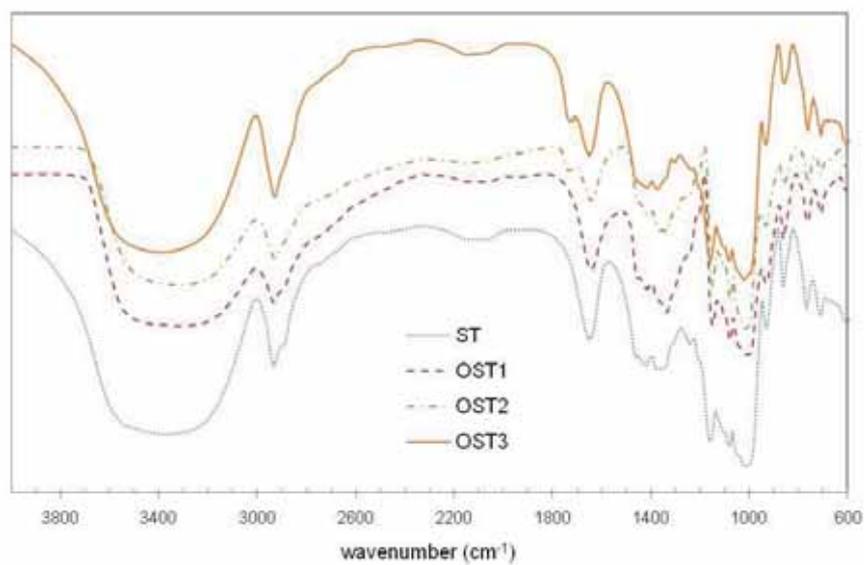
ภาพที่ 67 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0.4 มล.



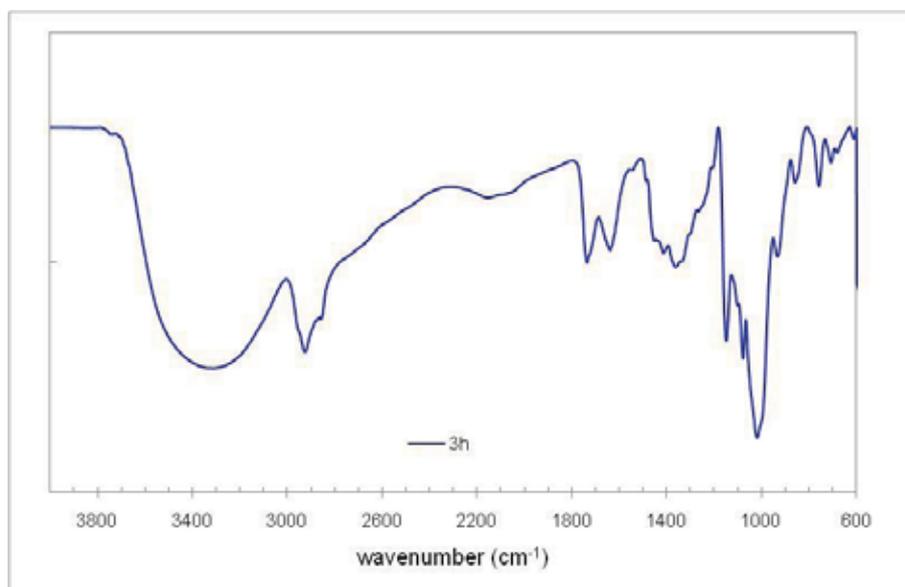
ภาพที่ 68 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0.8 มล.



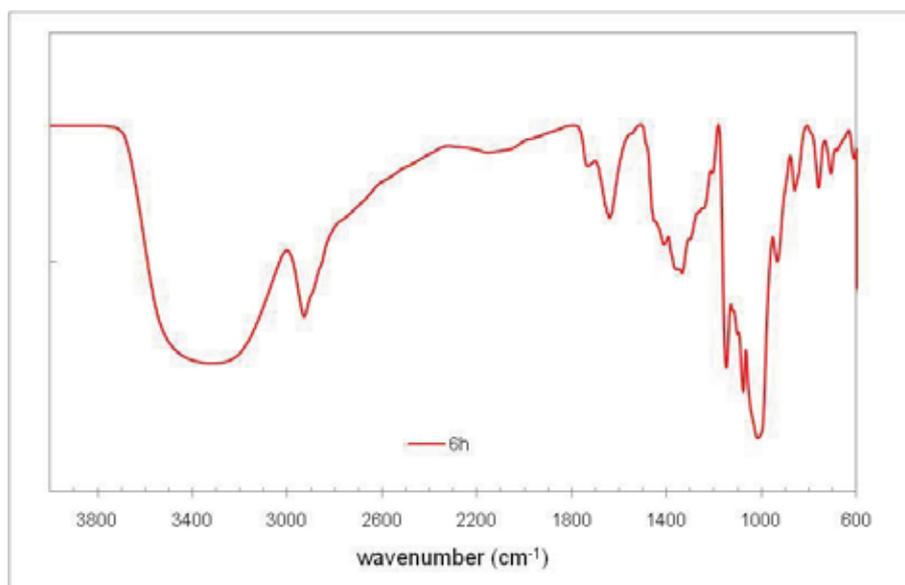
ภาพที่ 69 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 1.2 มล



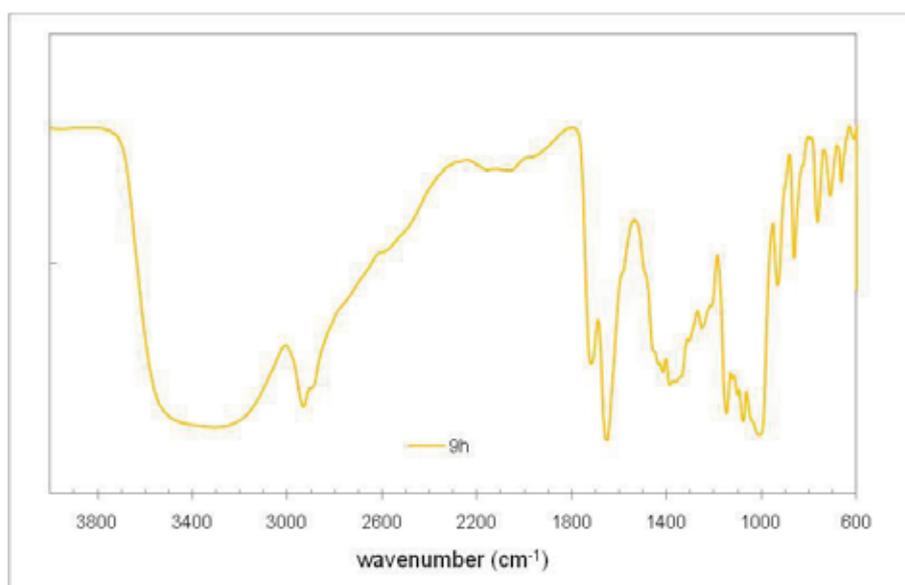
ภาพที่ 70 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่ปริมาณ Octanoyl chloride 0 มล. (ST), 0.4 มล. (OST1), 0.8 มล. (OST2) และ 1.2 มล. (OST3).



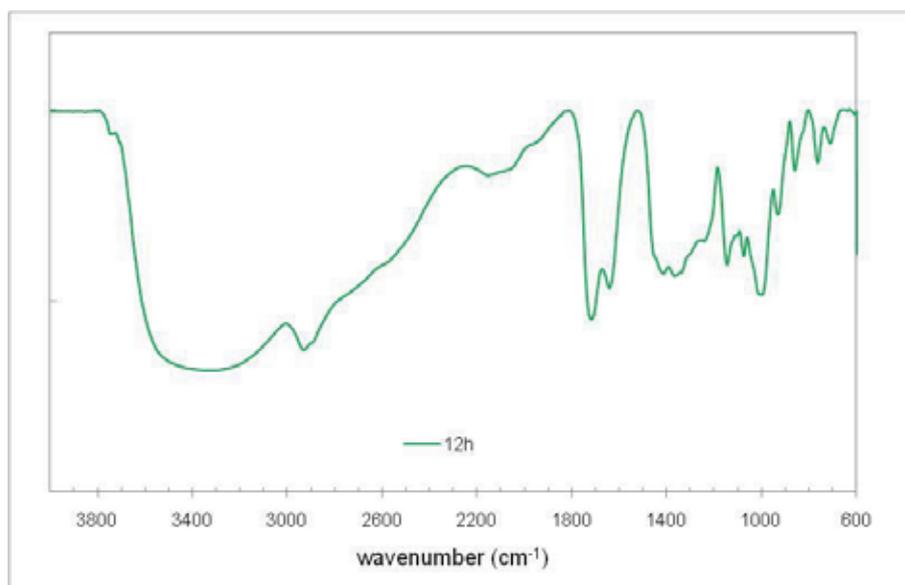
ภาพที่ 71 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง



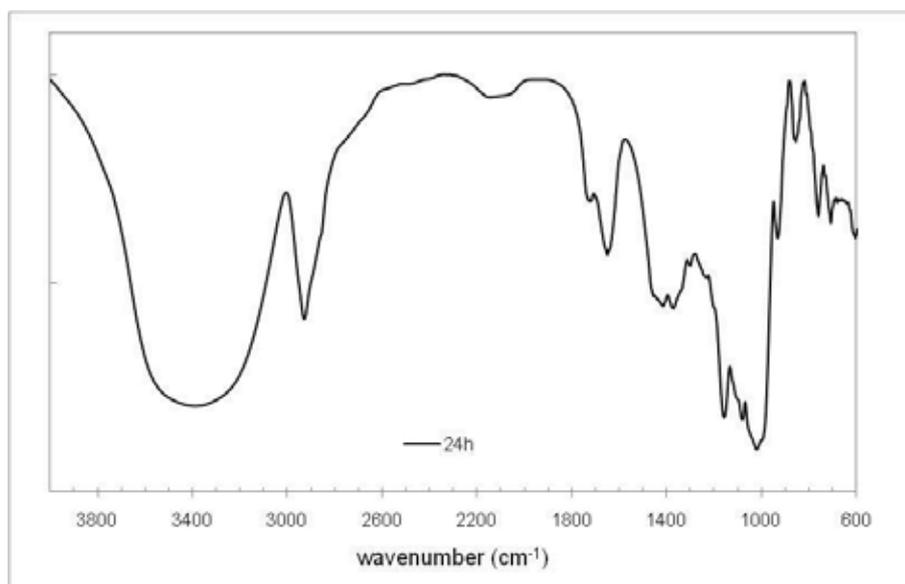
ภาพที่ 72 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง



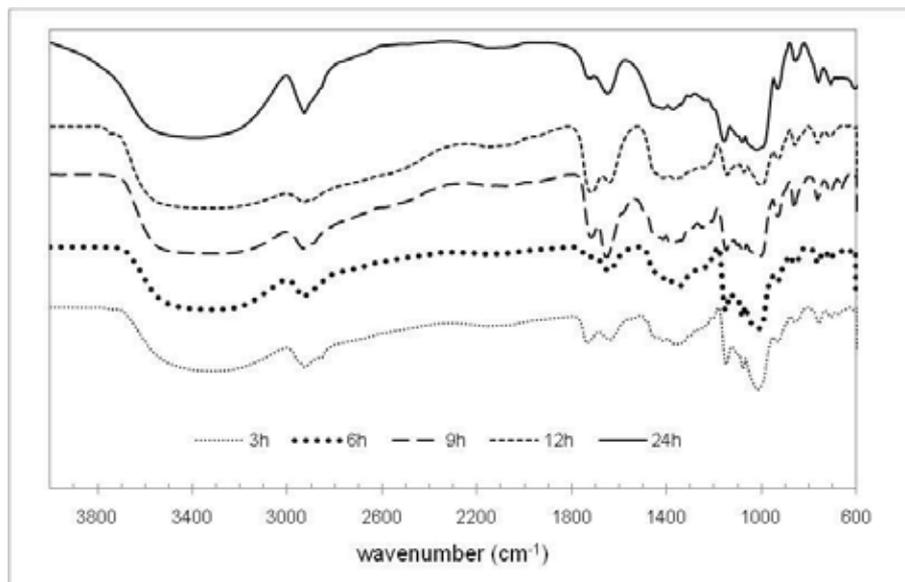
ภาพที่ 73 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง



ภาพที่ 74 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง

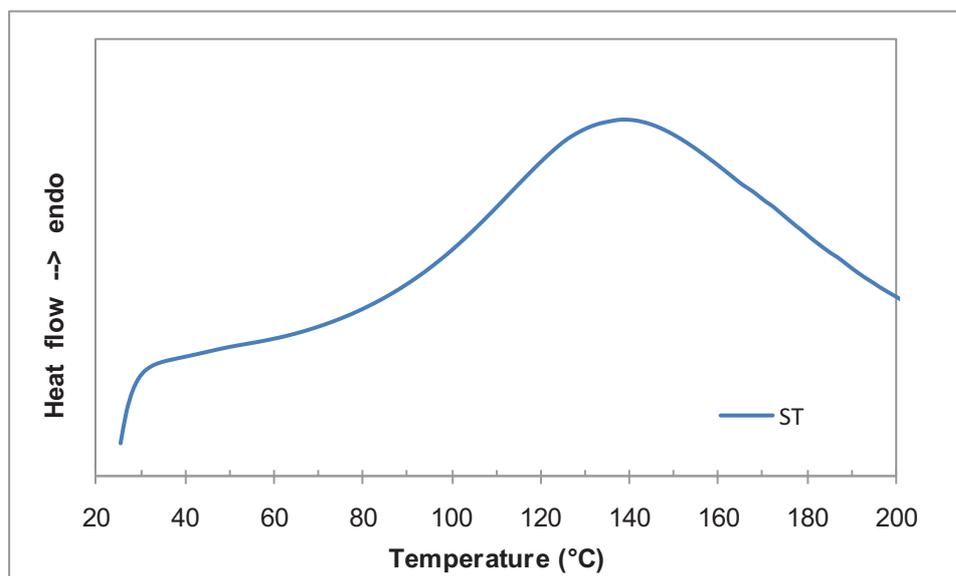


ภาพที่ 75 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง

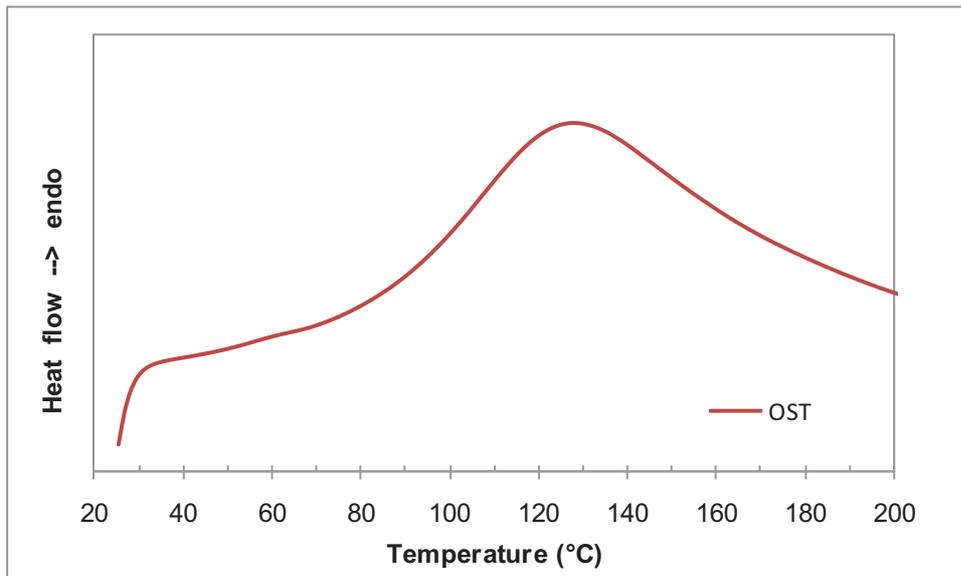


ภาพที่ 76 กราฟ FTIR ของ Octanoated starch ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3, 6, 9, 12 และ 24 ชั่วโมง

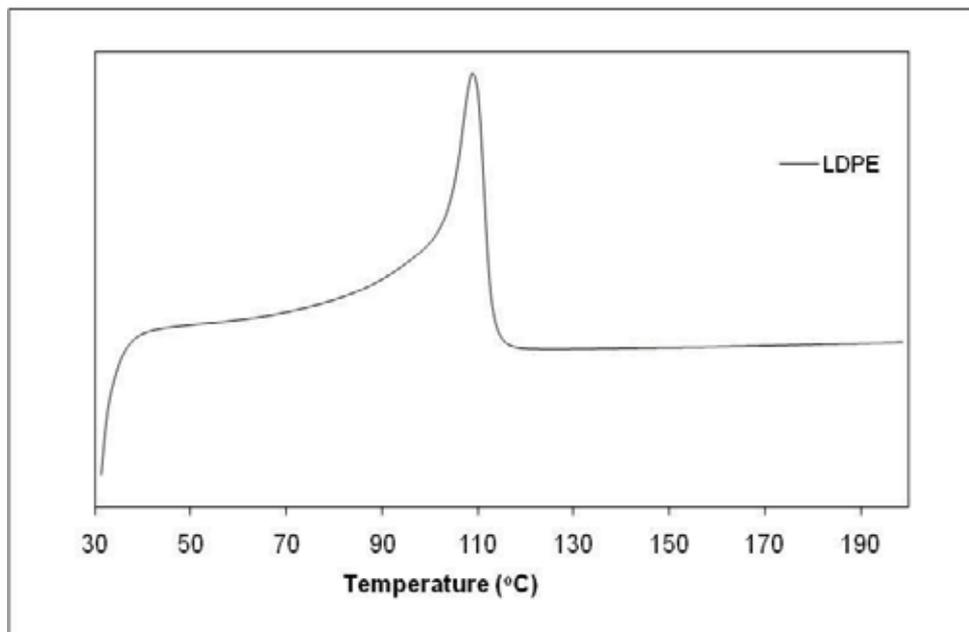
กราฟแสดงการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



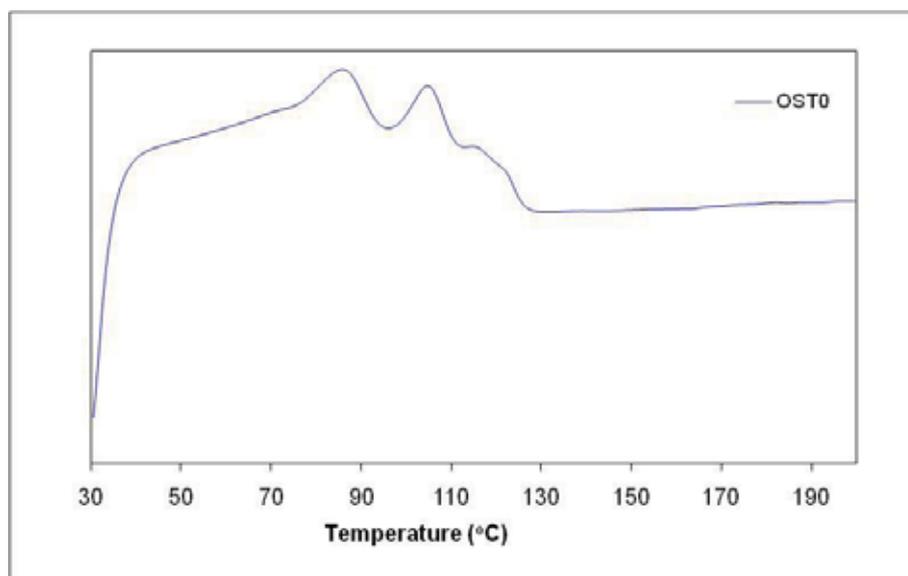
ภาพที่ 77 DSC thermogram ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร



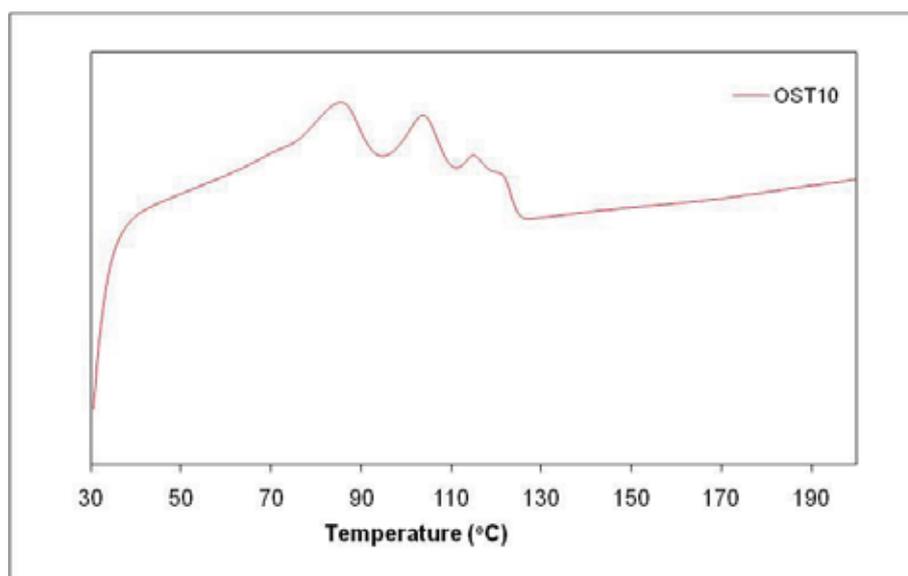
ภาพที่ 78 DSC thermogram ของ Octanoated starch



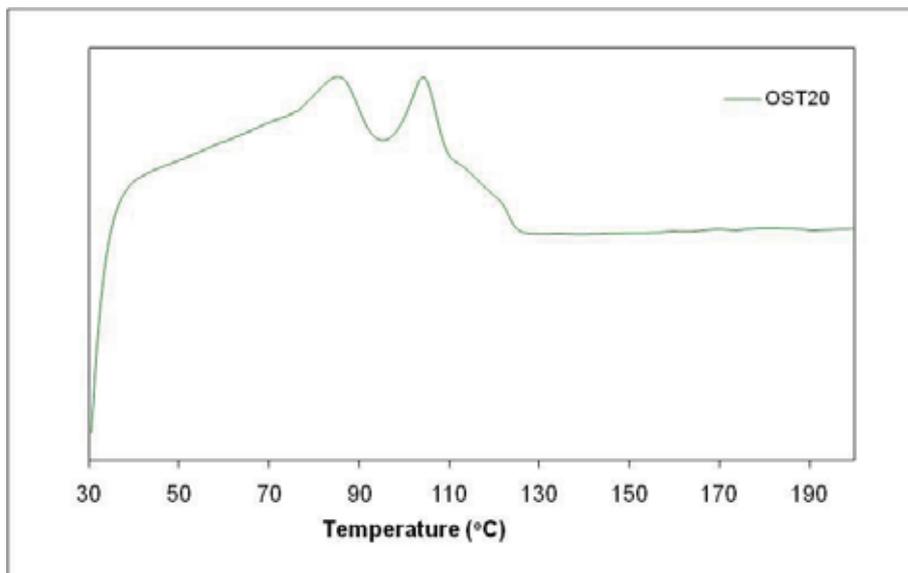
ภาพที่ 79 DSC thermogram ของ LDPE



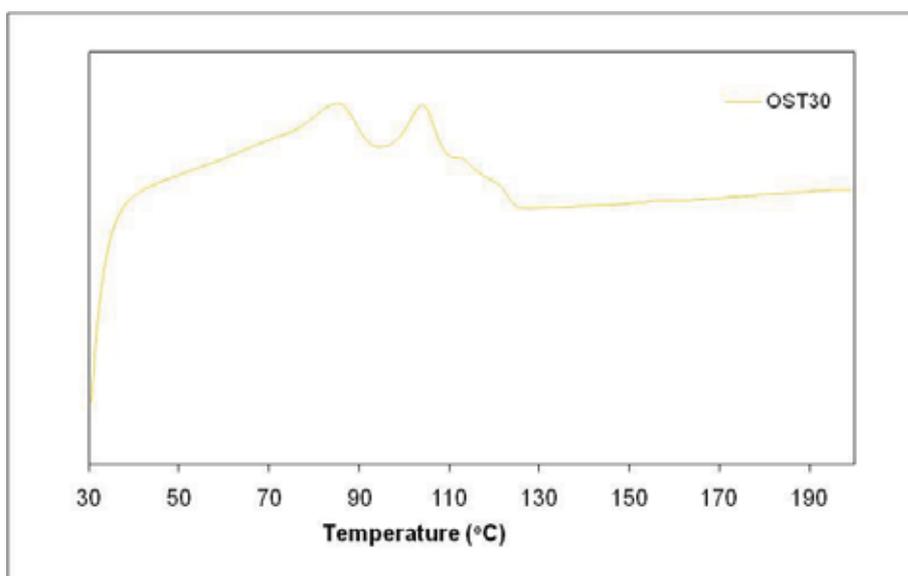
ภาพที่ 80 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST0



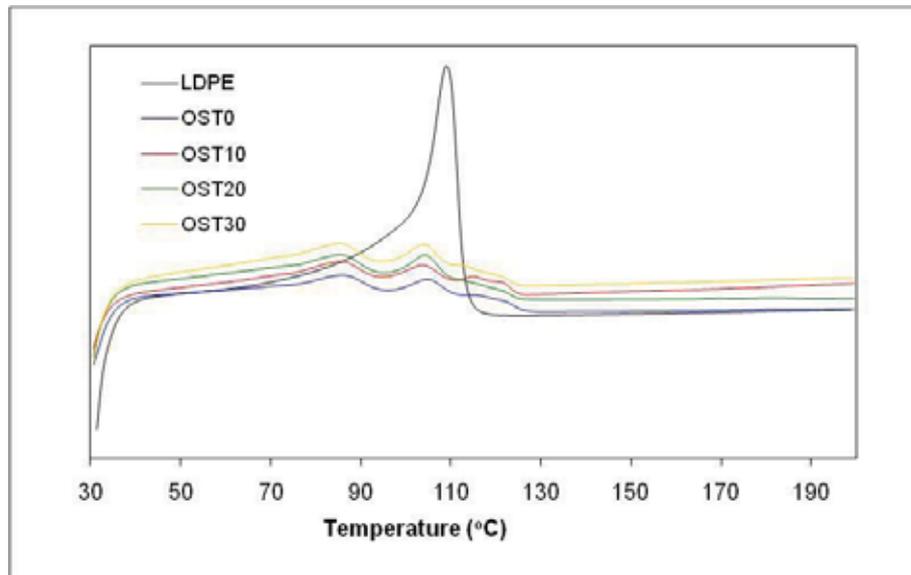
ภาพที่ 81 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST10



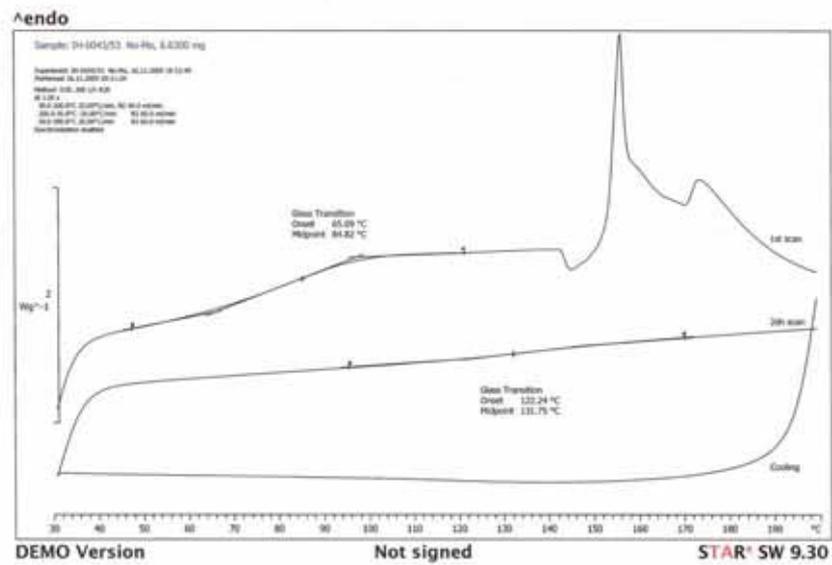
ภาพที่ 82 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST20



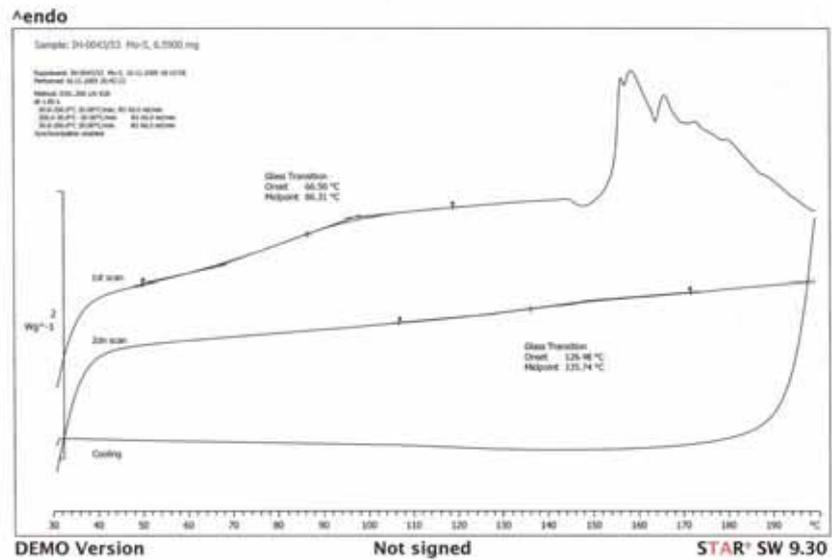
ภาพที่ 83 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม OST30



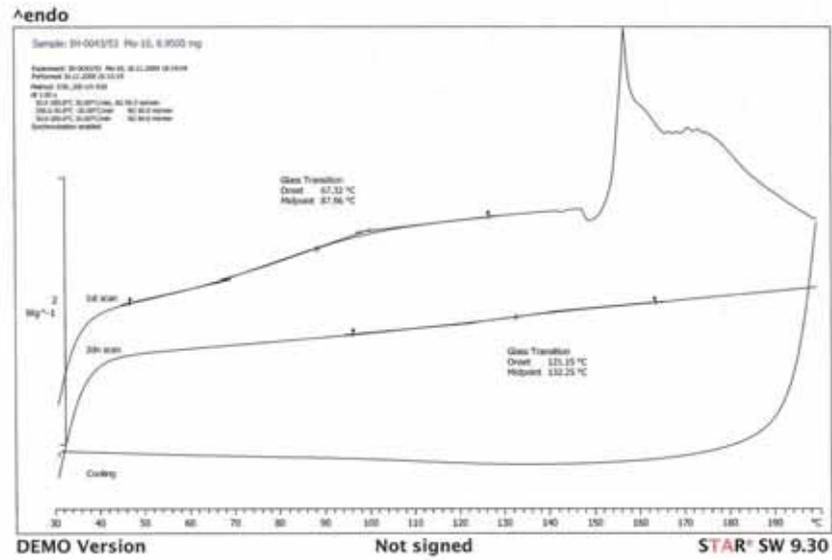
ภาพที่ 84 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม



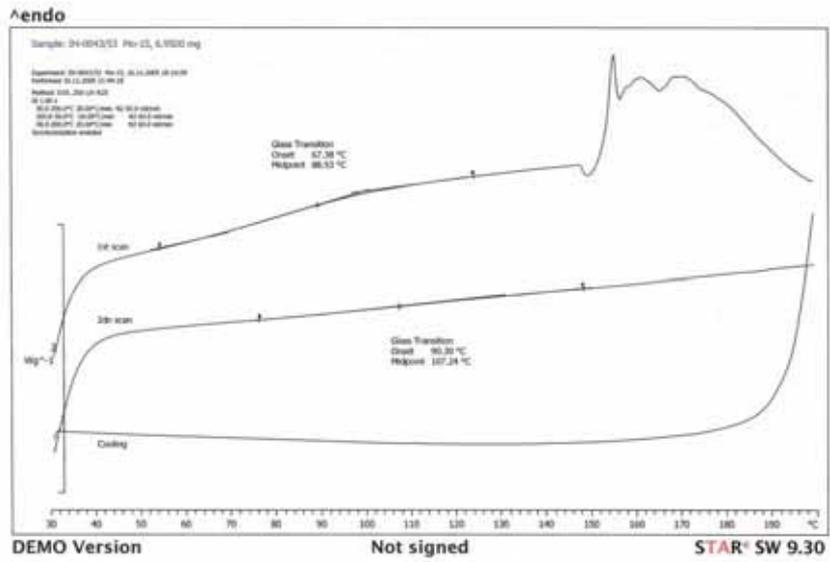
ภาพที่ 85 DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST0



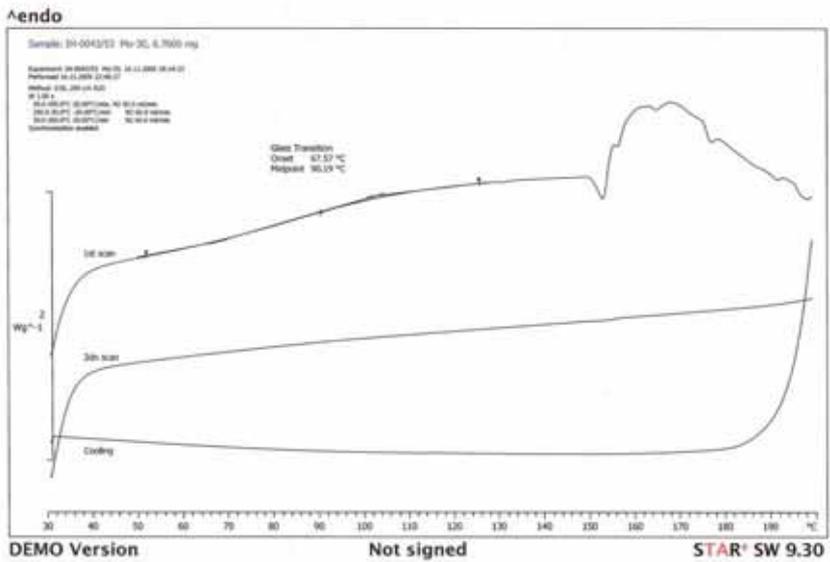
ภาพที่ 86 DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST5



ภาพที่ 87 DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST10

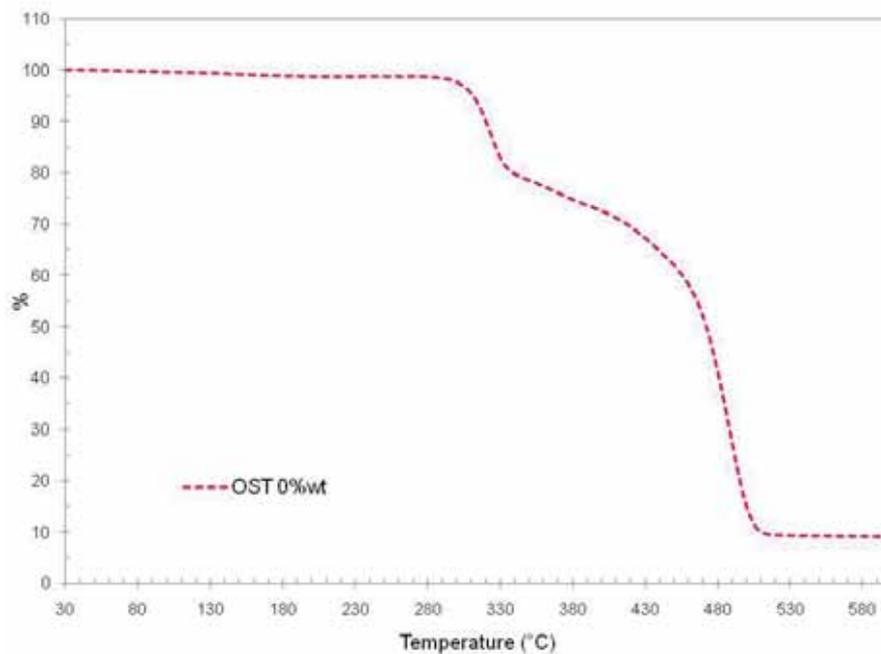


ภาพที่ 88 DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST15

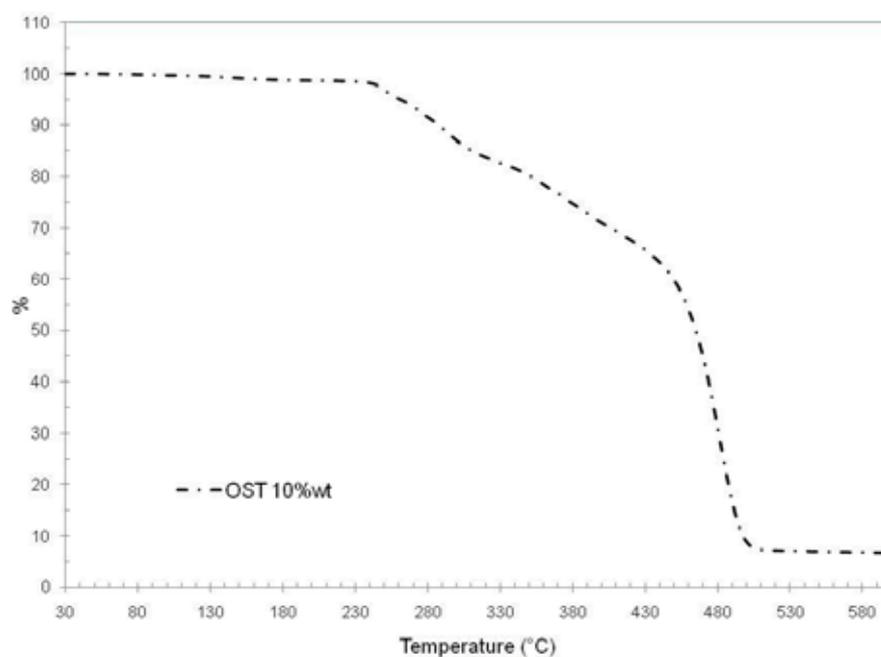


ภาพที่ 89 DSC thermogram ของ thermoplastic starch จาก OST20

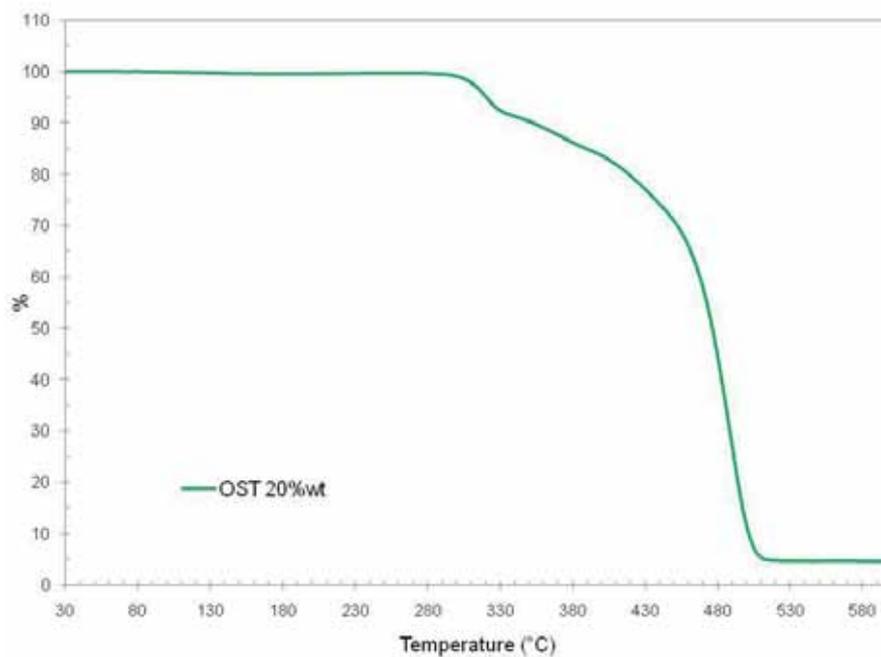
กราฟแสดงการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA



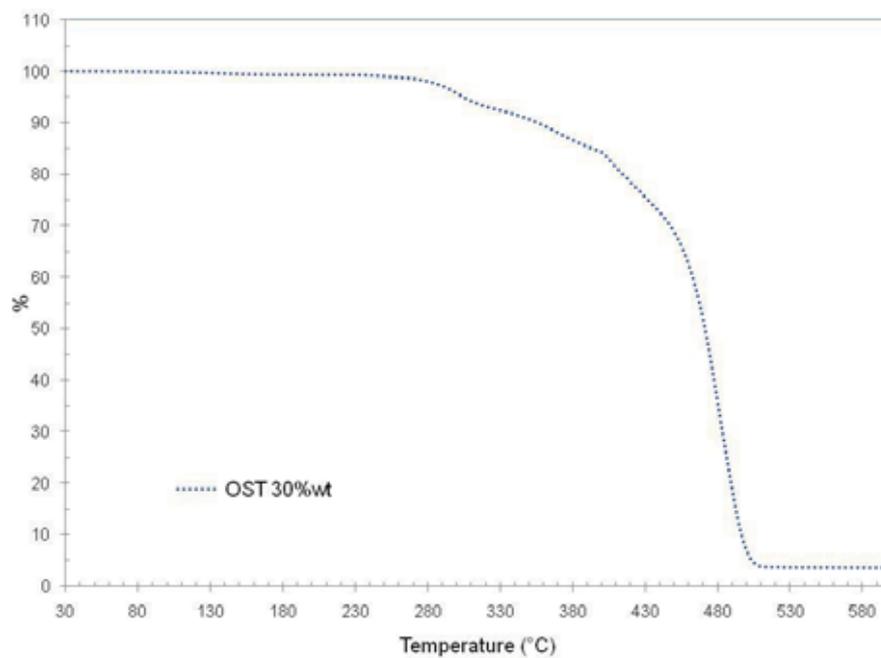
ภาพที่ 90 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST0



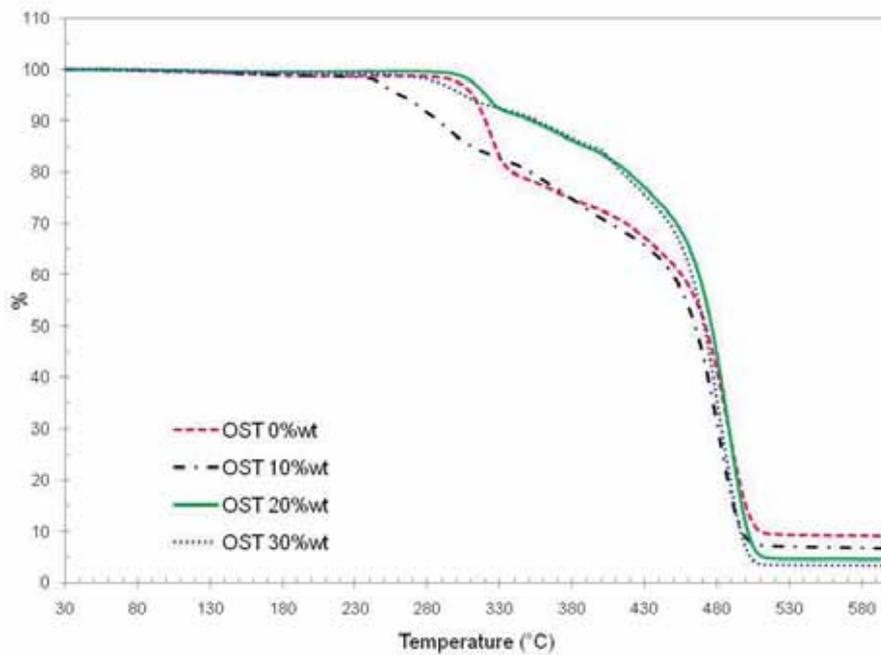
ภาพที่ 91 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST10



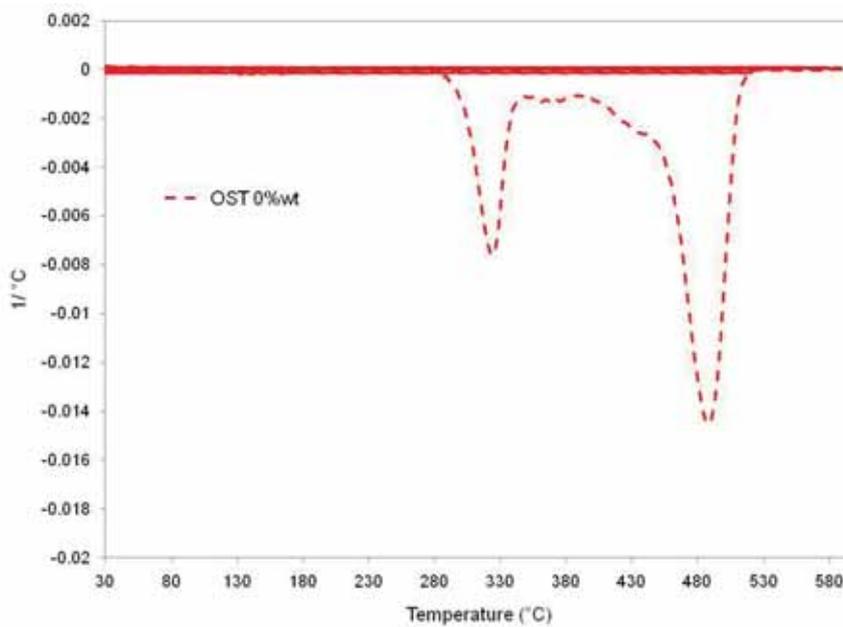
ภาพที่ 92 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST20



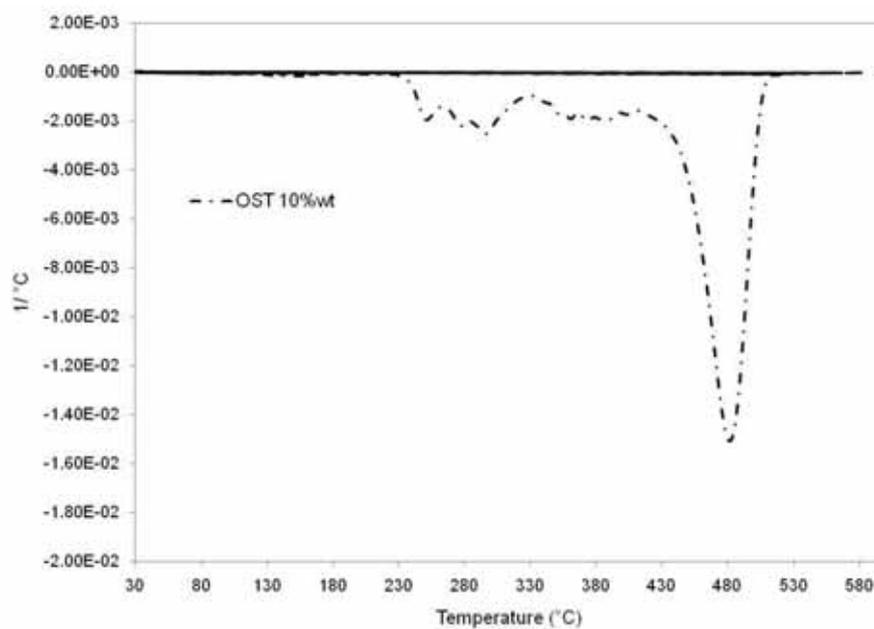
ภาพที่ 93 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม OST30



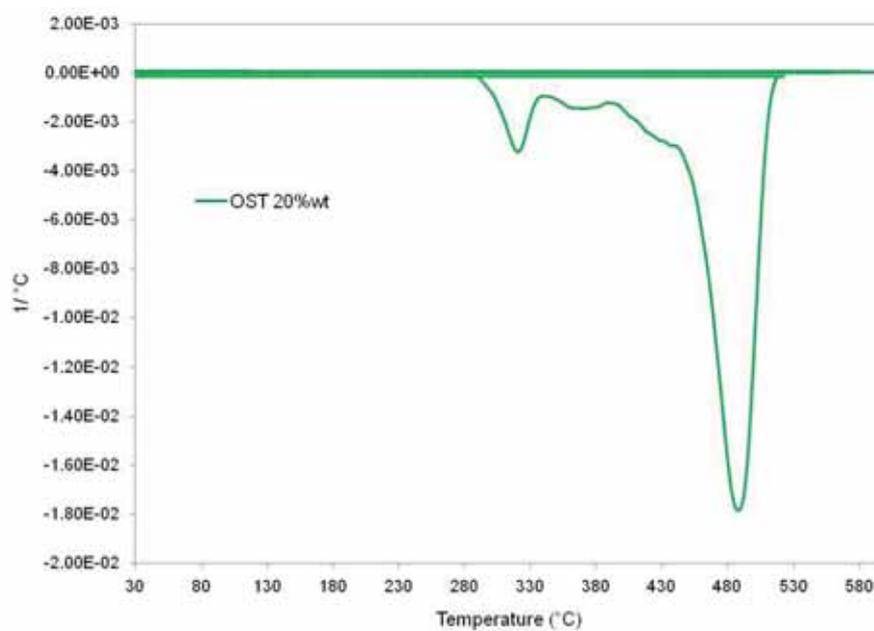
ภาพที่ 94 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST



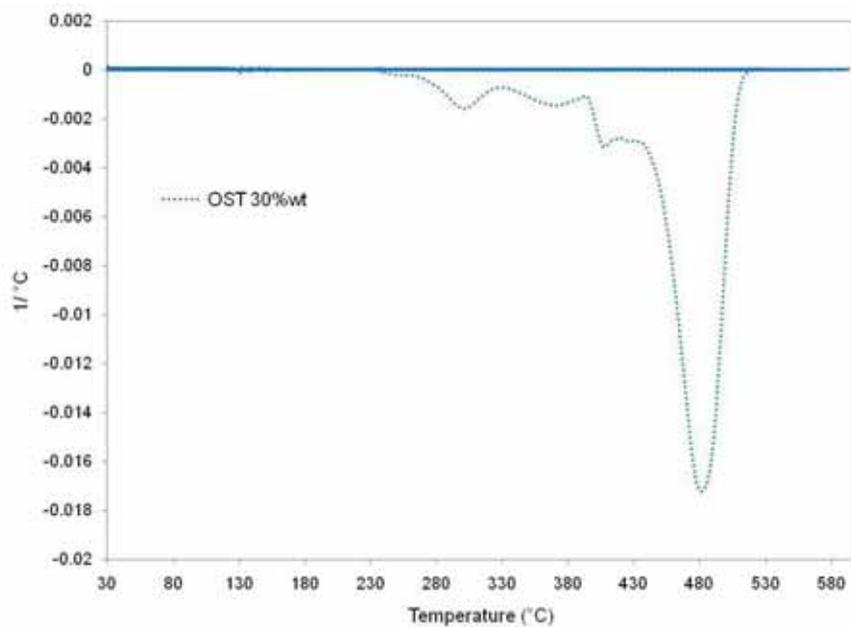
ภาพที่ 95 กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST0



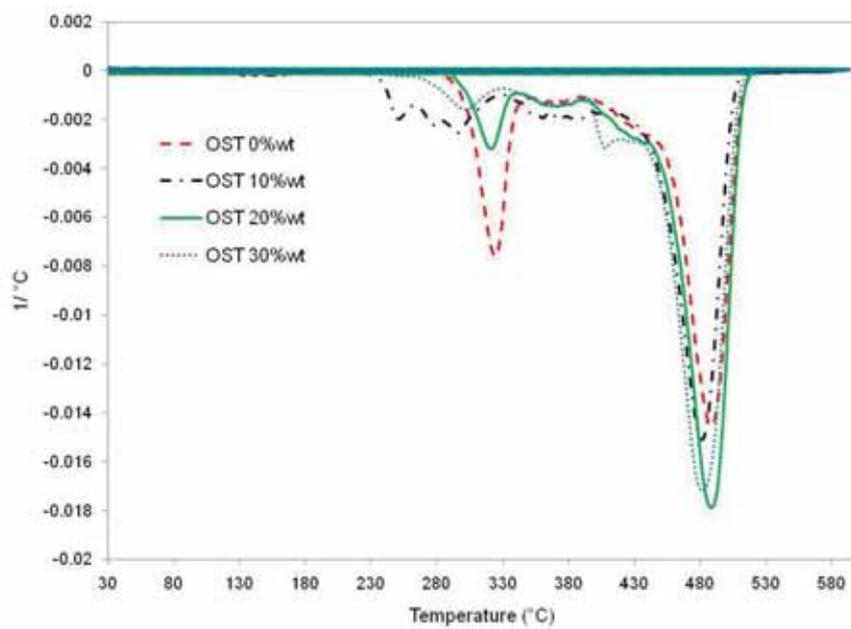
ภาพที่ 96 กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST10



ภาพที่ 97 กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST20



ภาพที่ 98 กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม OST30



ภาพที่ 99 กราฟ TGA derivative ของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

ตาราง 7 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึ่มความชื้นของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST

ตัวอย่าง	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
LDPE/ST/OST:70/30/0	2.2763	2.4359	2.7193	2.5124	2.7551	2.5398±0.1997
LDPE/ST/OST:70/20/10	1.2806	1.2646	1.4433	1.6788	1.2960	1.3927±0.1752
LDPE/ST/OST:70/10/15	1.0641	0.7462	1.1409	1.4797	0.9285	1.0719±0.2729
LDPE/ST/OST:70/0/20	0.9283	0.5128	0.6892	0.8008	1.1005	0.8063±0.2243
LDPE/ST/OST:70/0/30	0.2244	0.2239	0.5757	0.7738	0.7520	0.5099±0.2720

ตาราง 8 แสดงการหาค่า Degree of substitution ของแป้งดัดแปร

เวลาในการเกิดปฏิกิริยา	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	NaOH 0.1M (ml)	DS	ค่าเฉลี่ย
3h	1	2.515	2.0	0.0131	0.0134±0.0004
	2	2.583	2.1	0.0134	
	3	2.505	2.1	0.0138	
6h	1	2.513	2.2	0.0144	0.0137±0.0007
	2	2.51	2.0	0.0131	
	3	2.535	2.1	0.0137	
9h	1	2.512	2.0	0.0131	0.0139±0.0007
	2	2.534	2.2	0.0143	
	3	2.523	2.2	0.0144	
12h	1	2.512	2.1	0.0138	0.0136±0.0004
	2	2.480	2.1	0.0140	
	3	2.498	2.0	0.0132	
24h	1	2.524	2.1	0.0137	0.0136±0.0003
	2	2.496	2.0	0.0132	
	3	2.514	2.1	0.0138	

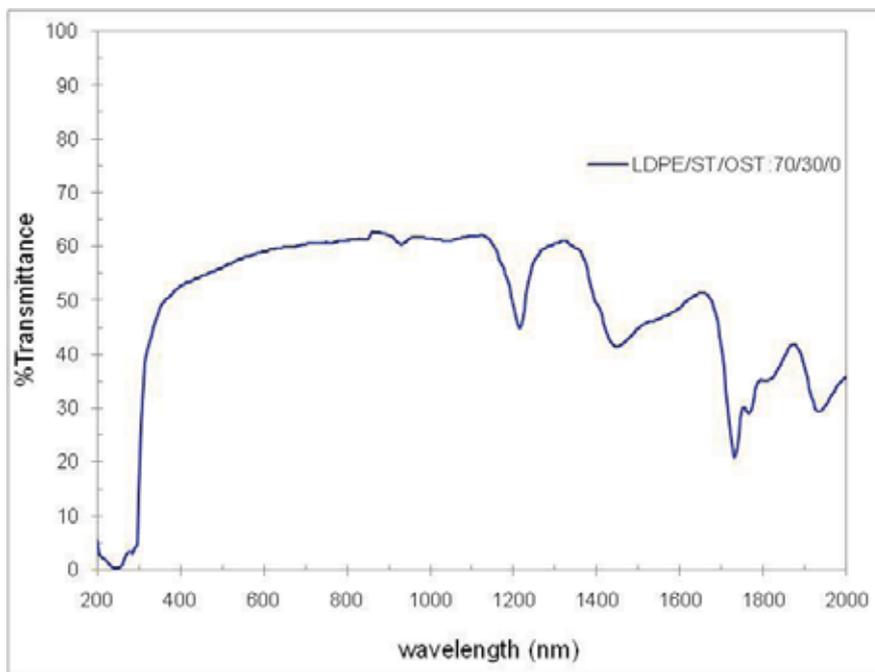
ตาราง 9 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ในรูปเม็ดแป้งที่อัตราส่วน OST ต่างๆ

ตัวอย่าง	Tensile strength (MPa)	Tensile strain at break (%)
LDPE/ST/OST:70/30/0	5.08	312.08
LDPE/ST/OST:70/30/0	4.54	304.58
LDPE/ST/OST:70/30/0	3.74	369.58
LDPE/ST/OST:70/30/0	3.88	386.67
avg	4.31	343.23
sd	0.62	41.01
LDPE/ST/OST:70/20/10	3.79	58.75
LDPE/ST/OST:70/20/10	3.21	51.67
LDPE/ST/OST:70/20/10	3.34	61.67
avg	3.45	57.36
sd	0.30	5.14
LDPE/ST/OST:70/10/20	6.16	549.58
LDPE/ST/OST:70/10/20	5.42	522.5
LDPE/ST/OST:70/10/20	4.09	509.17
avg	5.22	527.08
sd	1.05	20.59
LDPE/ST/OST:70/0/30	3.76	123.33
LDPE/ST/OST:70/0/30	3.93	169.58
LDPE/ST/OST:70/0/30	3.53	89.58
avg	3.74	127.50
sd	0.20	40.16

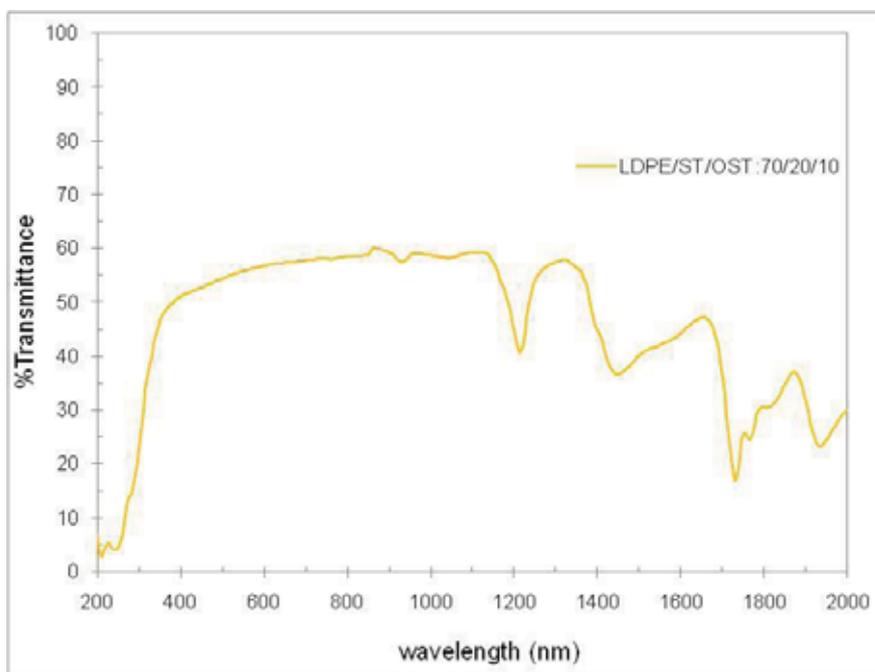
ตาราง 10 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST ในรูป Thermoplastic starch ที่อัตราส่วน OST ต่างๆ

ตัวอย่าง	Tensile strength (MPa)	Tensile strain at break (%)
LDPE/ST/OST:70/30/0	7.61	486.00
LDPE/ST/OST:70/30/0	6.93	418.00
LDPE/ST/OST:70/30/0	7.64	374.67
avg	7.39	426.22
SD	0.40	56.12
LDPE/ST/OST:70/20/10	8.20	402.00
LDPE/ST/OST:70/20/10	11.21	375.33
LDPE/ST/OST:70/20/10	12.66	488.67
avg	10.69	422.00
SD	2.28	59.26
LDPE/ST/OST:70/10/20	10.58	464.67
LDPE/ST/OST:70/10/20	12.85	376.67
LDPE/ST/OST:70/10/20	13.95	378.00
avg	12.46	406.45
SD	1.72	50.43
LDPE/ST/OST:70/0/30	12.61	497.33
LDPE/ST/OST:70/0/30	12.08	376.00
LDPE/ST/OST:70/0/30	13.25	376.67
avg	12.65	416.67
SD	0.59	69.86

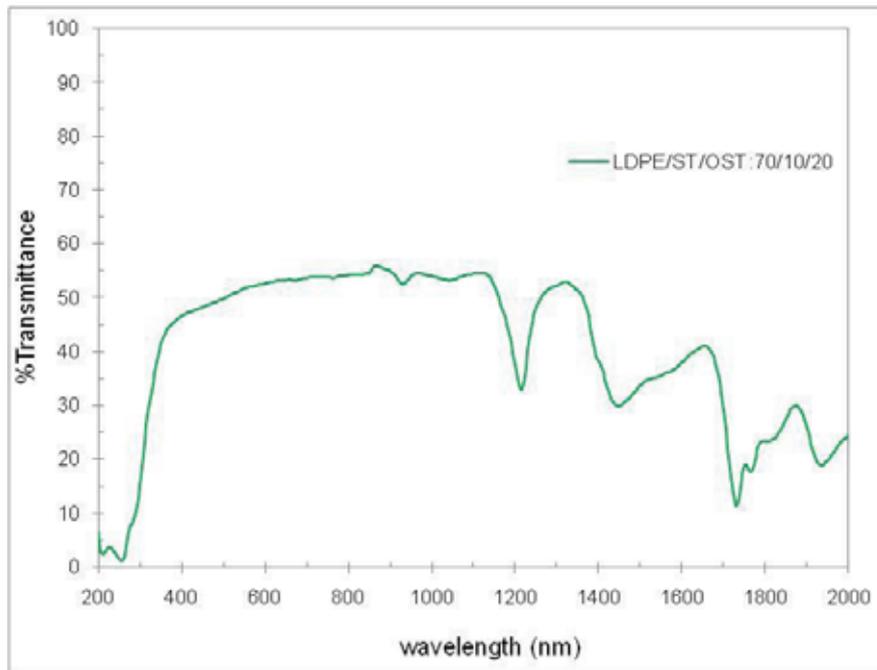
กราฟแสดงค่าการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



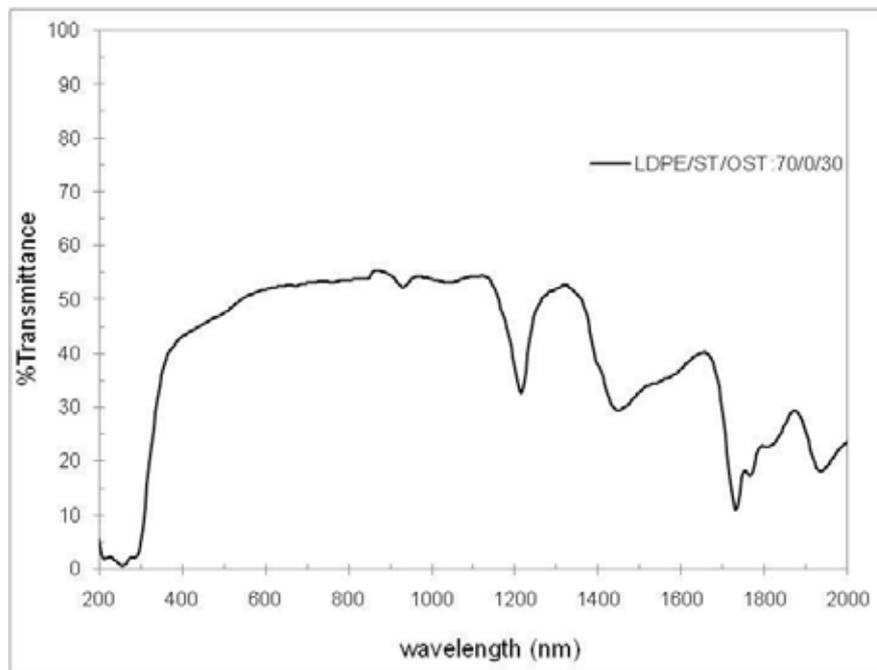
ภาพที่ 100 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST0



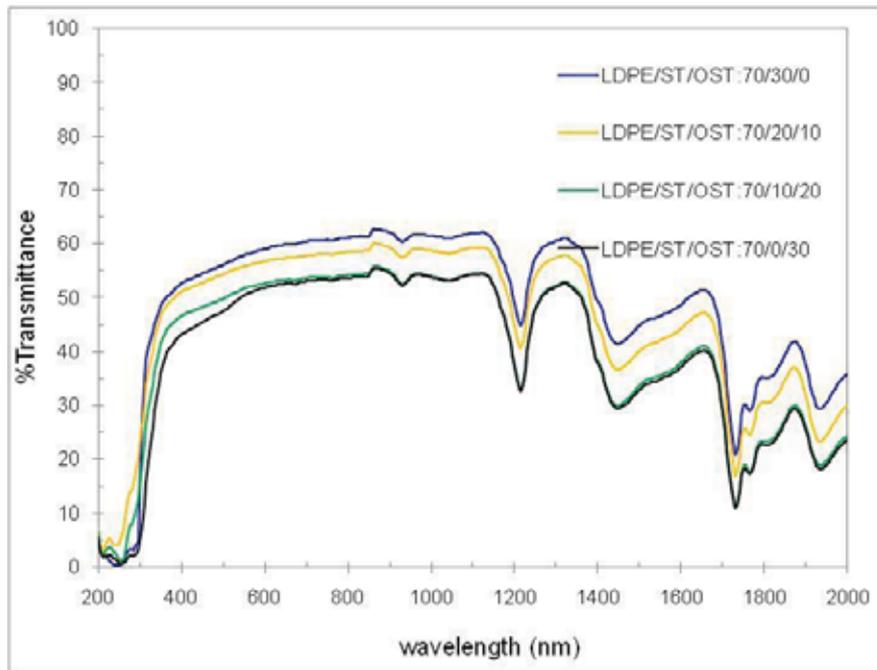
ภาพ 101 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST10



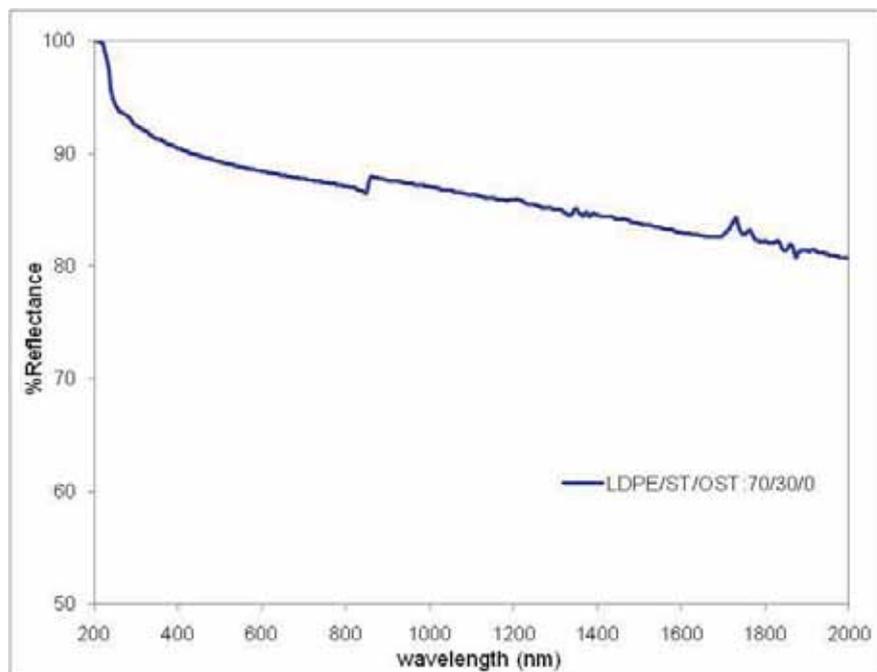
ภาพที่ 102 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST20



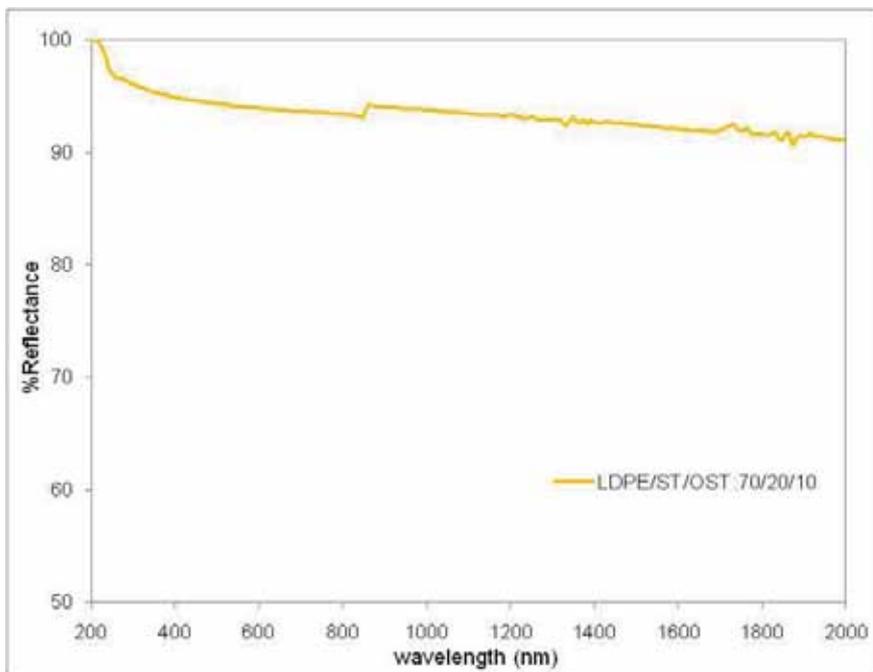
ภาพที่ 103 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST30



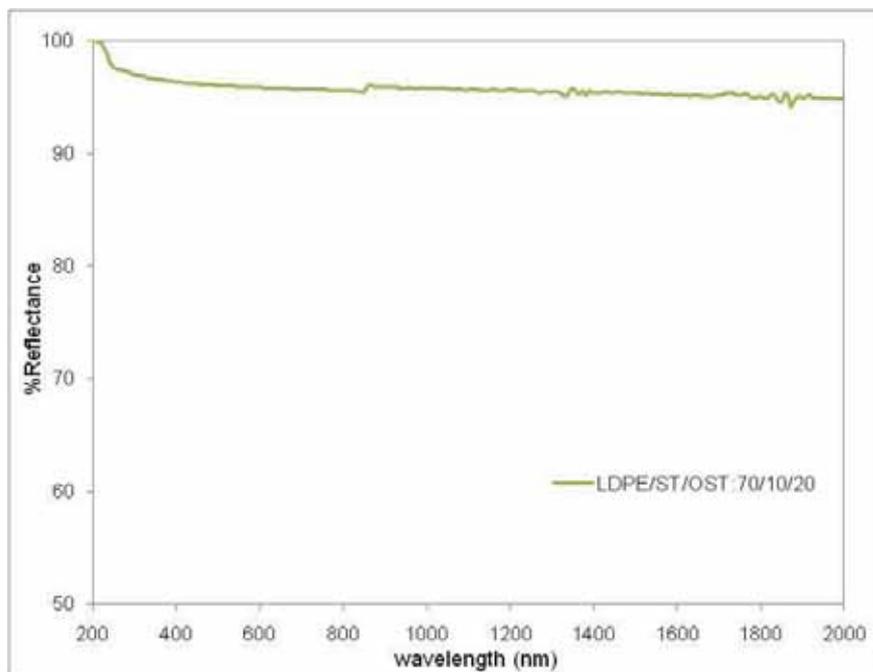
ภาพที่ 104 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม พอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST



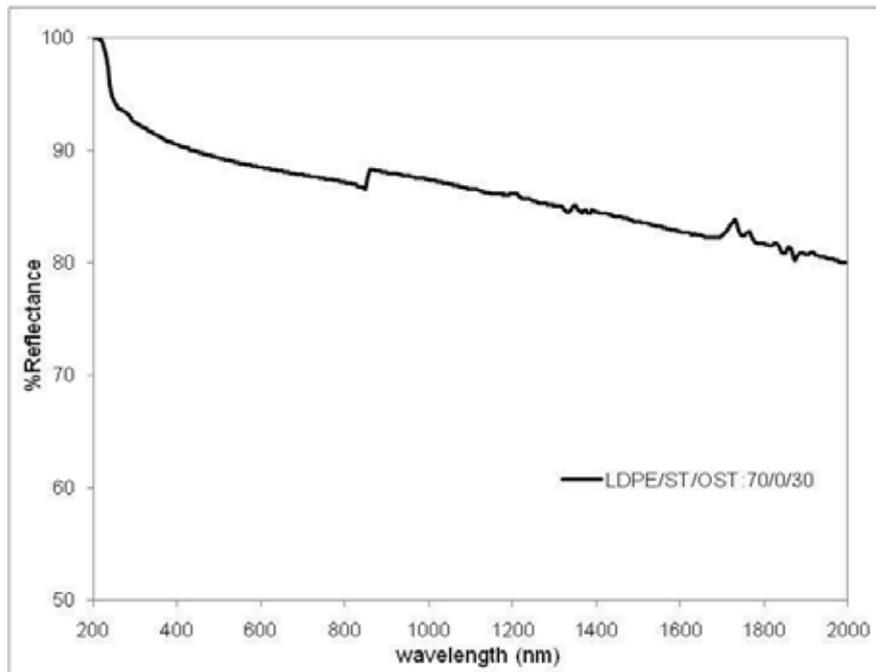
ภาพที่ 105 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST0 (TPS)



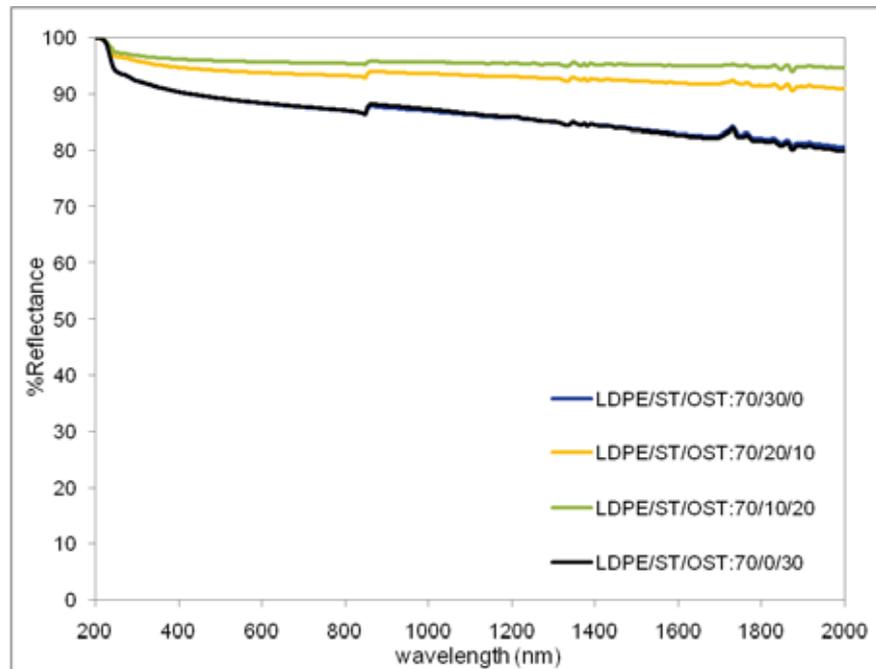
ภาพที่ 106 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST10 (TPS)



ภาพที่ 107 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST20 (TPS)



ภาพที่ 108 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม OST30 (TPS)



ภาพที่ 109 ค่า % การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นฟิล์ม พอลิเมอร์ผสม LDPE/ST/OST (TPS)

ภาคผนวก ข**การนำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ**

ผลงานการนำเสนอ Oral Presentation จากการเข้าร่วมประชุมวิชาการในงาน Pure and Applied Chemistry Conference 2010 (PACCON 2010) ที่โรงแรม สุณีย์ แกรนด์ ไฮเทล จังหวัด อุบลราชธานี ระหว่างวันที่ 21-23 มกราคม พ.ศ. 2553



PACCON 2010

Pure and Applied Chemistry Conference 2010

Jan 21-23, 2010, Sunee Grand Hotel and Convention Center, Ubonratchathani, Thailand

24 November 2009

Acceptance Letter for PACCON 2010

Dear Ms. Chuanchom Aumnate ,

E-mail: a_aong029@hotmail.com

The submission of your scientific contribution (MSN243) titled

Studies on thermal, morphological and mechanical properties of LDPE/modified starch blends

is acknowledged and its abstract accepted as oral presentation. More information of abstract acceptance will be noticed in the PACCON 2010 website (<http://www.paccon2010.sci.ubu.ac.th/>) via your account.

We look forward to welcoming you to the PACCON 2010 ,Ubon Ratchathani ,Thailand.

With the best wishes,

Yours sincerely,

Janpen Intaraprasert

Chairperson, PACCON2010 Organizing Committee

Dean, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Pure and Applied Chemistry Conference 2010

Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubonratchathani, Thailand, 34190

Tel: (+66)-45-353401-4 ext. 4422, 4124, Fax (+66)-4535-3422

E-mail: paccon2010@gmail.com

Website: <http://www.paccon2010.sci.ubu.ac.th/>

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวชวนชม อ่วมเนตร
ที่อยู่	6 หมู่ 2 ต. หนองกะป๋อ. บ้านลาด จ. เพชรบุรี 76150 E-mail: aaumnate@gmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2549	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร