

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



นายนรศิษฐ์ จันทรวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1976-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF MODIFIED GLUTINOUS STARCH AND LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS



Mr. Norasit Chantharakul

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1976-7



นายนครศิษฐ์ จันทร์กุล : การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. (PREPARATION OF MODIFIED GLUTINOUS STARCH AND LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์, 87 หน้า. ISBN 1974-53-1976-7

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา และน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรคือ 50 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 30 นาที แล้วนำแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปรไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งข้าวเหนียวเป็น 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ สำหรับที่ปริมาณแป้ง 0-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติด้านความทนการดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกลดลง ในขณะที่การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณแป้งเท่ากัน พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีสมบัติเชิงกลดีกว่า แต่มีการดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4672293023 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: BIODEGRADABLE PLASTIC/ POLYMER BLEND / GLUTINEOUS STARCH / LDPE

NORASIT CHANTHARAKUL : PREPARATION OF MODIFIED GLUTINOUS STARCH AND LOW DENSITY POLYETHYLENE BLENDS: THESIS ADVISOR : ASST. PROF. VIMOLVAN PIMPAN, Ph.D, 87 pp. ISBN 974-57-1976-7.

This research presents the preparation of biodegradable plastic from polymer blends between modified and unmodified glutinous starch (MGST and GST) with low density polyethylene (LDPE). MGST can be prepared from the reaction between glutinous starch and 35% of maleic anhydride using sodium hydroxide as a catalyst, water as a solvent at 50°C and the reaction time of 30 minutes. MGST and GST were mixed with LDPE using two-roll mill followed by compression molding at 180°C for 5 minutes to form polymer blend sheets. The amounts of starch were varied from 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 and 100% w/w. It was found that as the amount of starch higher than 50%, polymer blend sheets exhibited brittleness; therefore, they cannot be prepared into test specimens. At 0-50% of starch, it was found that as the amount of starch increased, tensile properties, flexural properties and impact strength of polymer blends decreased but their %moisture absorption and biodegradability increased. At the same amount of starch, polymer blends prepared from GST exhibited better mechanical properties but lower %moisture absorption and biodegradability than those prepared from MGST.

Department Materials Science

Student's signature.....

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature.....

Academic year 2004

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ไพพรรณ สันติสุข รศ. อรุษา สรวารี และ ผศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อ. ดร. ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบลล์มีลล์ชนิดความเร็วสูง

ขอขอบพระคุณบริษัทไทยวา ที่ให้ความอนุเคราะห์แบ่งข้าวเหนียวที่ใช้ในงานวิจัย ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยปิโตรเลียม และ ปิโตรเคมีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการขึ้นรูป ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์สมบัติชิ้นงานที่เตรียมได้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องสาว ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรควิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์	
2.1 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ.....	3
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	5
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	6
2.4 แป้ง.....	7
2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง.....	8
2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	8
2.4.3 สมบัติของแป้ง.....	12
2.5 แป้งดัดแปร.....	12
2.5.1 ประเภทของแป้งดัดแปร.....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
3. วิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	21
3.1.1 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว.....	21
3.1.1.1 การเตรียมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร.....	21
3.1.1.2 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน.....	21



3.1.2	การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	22
3.1.2.1	การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม.....	22
3.1.2.2	การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม.....	22
3.2	ขั้นตอนการทดลอง.....	25
3.2.1	การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว.....	26
3.2.2	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว.....	27
3.2.3	การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม.....	28
3.2.4	การทดสอบสมบัติต่างๆ.....	31
3.2.4.1	การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	31
3.2.4.2	การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง.....	32
3.2.4.3	การทดสอบความทนแรงกระแทก.....	33
3.2.4.4	การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	34
3.2.4.5	การทดสอบการดูดซึ่มความชื้น.....	35
3.2.4.6	การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	36
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1	ลักษณะของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ดัดแปร.....	37
4.2	โครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรและไม่ดัดแปร.....	37
4.3	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสม.....	39
4.4	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	41
4.4.1	สมบัติด้านแรงดึง.....	41
4.4.2	สมบัติด้านแรงดัดโค้ง.....	43
4.4.3	ความทนแรงกระแทก.....	46
4.5	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	47
4.6	การดูดซึ่มความชื้น.....	49
4.7	ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	50



5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
6. รายการอ้างอิง.....	54
7. ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	77
8. ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพลาสติกแต่ละชนิด.....	4
ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด.....	11
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร.....	29



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	6
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของอะไมโลส.....	9
รูปที่ 2.4 การจัดตัวในรูปโครงสร้างแบบเกลียวของอะไมโลส.....	9
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการรีโพรเกรเดชันของอะไมโลส.....	10
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของอะไมโลเพกติน.....	10
รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้ง.....	13
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	14
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งไดสตาร์ชฟอสเฟต.....	15
รูปที่ 2.10 โครงสร้างแป้งครอสลิงก์ .....	15
รูปที่ 2.11 แผนภาพการย่อยสลายของแป้งผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์.....	16
รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง.....	25
รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการตัดแปรรูป.....	26
รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีโตมิเตอร์.....	28
รูปที่ 3.4 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill, LRM 110).....	30
รูปที่ 3.5 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding, V508-18-CX).....	30
รูปที่ 3.6 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model LR 100K.....	31
รูปที่ 3.7 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638-82a (type IV).....	31
รูปที่ 3.8 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model 500.....	32
รูปที่ 3.9 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790-81.....	32
รูปที่ 3.10 เครื่อง Zwick 5102 Pendulum Impact tester.....	33
รูปที่ 3.11 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256-04 (type Izod).....	33
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6400.....	36
รูปที่ 4.1 ลักษณะของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูปที่ผ่านการอบ.....	37
รูปที่ 4.2 ลักษณะของผงแป้งข้าวเหนียวไม่ตัดแปรรูป (ก) และผงแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูป (ข).....	37

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร.....	38
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปร.....	38
รูปที่ 4.5 ซึ้นงานพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ก) แป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (ข) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ค).....	39
รูปที่ 4.6 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	40
รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	42
รูปที่ 4.9 ยัγκมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	42
รูปที่ 4.10 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.11 ระยะเวลาดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.12 มอดูลส์ตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.13 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	46
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียว ไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ที่ปริมาณแป้ง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	47
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียว ไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ที่ปริมาณแป้ง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	48
รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การดูดซึ่มความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

พลาสติก จัดเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในชีวิตประจำวัน และในงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดีเหนือกว่าวัสดุอื่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมี สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย อีกทั้งยังมีราคาถูก ส่งผลให้ความต้องการใช้พลาสติกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ทำจากพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นกำจัดได้ยาก กล่าวคือ ในการกำจัดด้วยการนำไปฝังดิน จะเกิดการสะสมของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้เวลาในการย่อยสลายที่ยาวนาน ทั้งนี้เป็นเพราะพลาสติกไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้หรือย่อยสลายได้ยาก สำหรับการกำจัดขยะพลาสติกด้วยการเผาในเตาปฏิกรณ์ จัดเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพแต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูง ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้เกิดแนวคิดในการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้แทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาศึกษา ได้แก่ แป้ง เนื่องจากผลผลิตหลักทางการเกษตรที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ข้อเสียของแป้งในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ คือ จะไม่หลอมเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่มีความเป็นระเบียบสูง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นพันธะไฮโดรเจน อีกทั้งการขึ้นรูปโดยใช้แป้งเพียงอย่างเดียวนั้น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงต่ำและไม่ทนต่อความชื้น ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน จึงได้มีการวิจัยเพื่อเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้ง โดยอาจเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ หรือนำแป้งมาดัดแปรด้วยสารเคมีที่เหมาะสมก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น การนำแป้งมันสำปะหลัง [1-3] และแป้งข้าวเหนียวมาดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำแป้งดัดแปรที่ได้มาขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ด้วยวิธีการหล่อ พบว่าฟิล์มที่ได้มีแนวโน้มที่จะใช้งานได้ และสามารถย่อยสลายได้เอง ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

อย่างไรก็ดี ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากแป้งดัดแปรยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประเภท เช่น ความทนทานต่อน้ำ ความคงตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ เป็นต้น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมจึงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากกว่าเพราะยังคงสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์สังเคราะห์ไว้ด้วย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแป้งมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) สามารถละลายน้ำได้ การนำแป้งไปผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์

ซึ่งส่วนใหญ่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงเกิดปัญหาคือ ความไม่เข้ากัน (incompatibility) ของส่วนผสมทั้งสอง วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ คือการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง ให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ จากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ พร้อมทั้งทดลองขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติก ตลอดจนศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ว่ามีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานได้จริง และสามารถย่อยสลายได้หรือไม่ หากพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ได้จริง ก็จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณขยะให้กับสิ่งแวดล้อม และเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ [3,4]

พลาสติก จัดเป็นผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มนุษย์นำมาใช้เป็นระยะเวลาาน โดยเฉพาอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติกซึ่งมีปริมาณการการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่เหนือกว่าวัสดุอื่น คือ มีความทนทาน น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง กันน้ำ ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ สามารถกำหนดสีสันทได้ตามต้องการ และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด ด้วยสมบัติที่ดีหลายอย่างจึงทำให้การใช้งานของบรรจุภัณฑ์พลาสติกเป็นไปอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต ก็ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นด้วย จนก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้ใช้เวลาย่อยสลายทางธรรมชาติที่ยาวนาน หรืออาจไม่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่า พลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

จะเห็นได้ว่าพลาสติกเหล่านี้ส่วนมากมีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์สูง ซึ่งทำให้พลาสติกเหล่านี้ยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงเกิดแนวคิดในการกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ขึ้นหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมากมี 3 วิธีคือ

1. การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (recycle) แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานคือพลาสติกที่ใช้แล้วจะมีสิ่งเจือปนอยู่ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นไม่สามารถนำไปใช้กับงานที่สัมผัสกับอาหารและน้ำดื่มได้ นอกจากนี้ พลาสติกดังกล่าวยังผ่านความร้อนจากกระบวนการผลิตครั้งก่อนๆ มาแล้วหลายครั้ง ดังนั้น ในการผลิตครั้งต่อไปสมบัติเชิงกลของพลาสติกนั้นลดลง ซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลงด้วย

2. การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) แทนพลาสติก เนื่องจากพอลิเมอร์ธรรมชาติจะสามารถย่อยสลายได้เองด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมใช้ได้แก่ โปรตีน เซลลูโลส แป้ง (starch) ลิกนิน (lignin) เป็นต้น แต่ปัญหาของการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติแทนพลาสติก คือ มีความแข็งแรงต่ำ และมีอายุการใช้งานสั้น

3. การนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาผสมกับพลาสติกคือ แป้ง โดยที่แป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างพลาสติกและมีกลไกการสลายตัวของพลาสติก คือ ชั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ทำให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งเมื่อดแป้งจะหายไปจากเนื้อของพลาสติก ทำให้เนื้อพลาสติกเกิดเป็นรูพรุน (porous) ขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้พลาสติกอ่อนลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ในขั้นที่สอง โลหะและน้ำที่อยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (auto oxidation) ได้เป็นสารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ให้สั้นลง ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อไปได้เกิดเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณของออกซิเจน ความเป็นกรด-เบส และชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน รวมถึงความหนาของพลาสติกนั้นด้วย

#### ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพลาสติกแต่ละชนิด [3,4]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ *
Polyethylene	Packaging films, insulation container	VH
Polypropylene	Packaging films	VH
Poly(vinyl alcohol)	Packaging films foam	VH
Poly (vinylidene chloride)	Packaging films of high chemical stability	H
Poly (vinyl acetate)	Packaging films, varnish, fabrics	M
Poly (vinylalcohol)	Packaging films	H
Polystyrene	Films, foam	H
Poly (methyl methacrylate)	Plexiglas	H
Polytetrafluoroethylene	Insulation	H
Cellulose acetate	Acetate rayon	H
Polyamide	Fabrics	L
Poly (ethylene terephthalate)	Fabrics	H
Silicone	Coating	H

\* VH = very high, H = high, M = moderate, L = low, F = fair

จะเห็นได้ว่าการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมกับพลาสติก น่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยวิธีการอื่น เนื่องจากพลาสติกที่ได้ยังมีความแข็งแรงพอที่จะใช้งานได้ อีกทั้งยังย่อยสลายได้เองด้วยกระบวนการทางธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

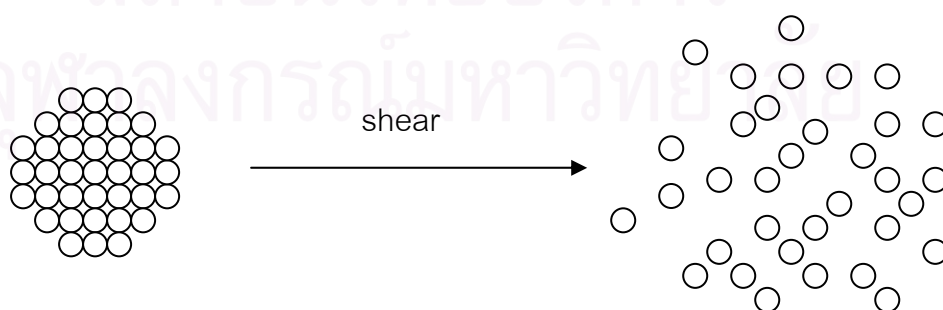
## 2.2 พอลิเมอร์ผสม [5]

พอลิเมอร์ผสม คือ การนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น แต่การที่จะนำพอลิเมอร์มาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นนั้น จำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันด้วย อาทิเช่น โครงสร้างสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด และความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ หากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันไม่สามารถเข้ากันได้ดี จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ต่ำลงด้วย

การผสมกันของพอลิเมอร์มี 2 ลักษณะ คือ

1. การผสมโดยมีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Reactive blending) ในวิธีการนี้ พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันต้องมีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและพอลิเอไมด์ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีนและพอลิโพรพิลีนออกไซด์ จะเห็นว่าพอลิเมอร์ทุกชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันสำหรับทำปฏิกิริยา

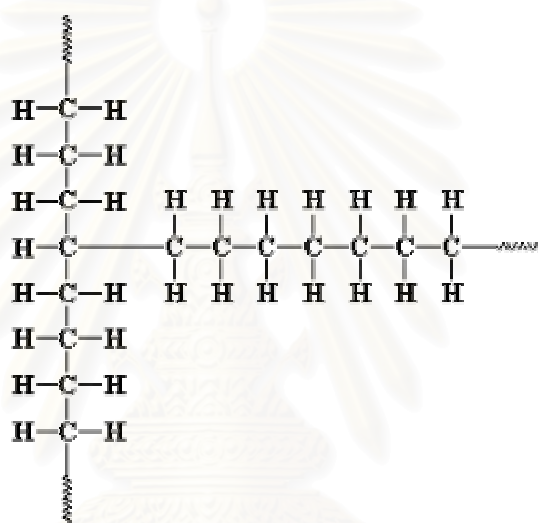
2. การผสมโดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง (Non-reactive blending) การผสมวิธีนี้ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก โดยใช้เครื่องมือในการผสม เช่น เครื่องอัดรีด (extruder) หรือ เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill) ซึ่งเครื่องมือประเภทนี้จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสม แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเฉือน

### 2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [6]

เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ได้มีการผลิตขึ้นทางการค้า มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 0.91-0.94 กรัม/ซม.<sup>3</sup>) สามารถละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างมีกิ่งสาขาแยกออกมามาก กิ่งส่วนใหญ่สั้น มีคาร์บอน 2 ถึง 4 อะตอมเท่านั้น ประมาณทุกๆ กิ่งที่ 50 จะมีโมเลกุลเป็นสายโซ่หลัก (main chain) ทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันแบบหลวมๆ และไม่มีระเบียบ ลักษณะค่อนข้างใส ไม่เหนียวมากนัก และมีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้งหรือเทียนไข



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ในทางการค้า สามารถผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยกระบวนการความดันสูง (high pressure process) ประมาณ 1,000-3,000 บรรยากาศและอุณหภูมิ 80-300 องศาเซลเซียสใช้ตัวริเริ่มเป็นฟรีแรดิคคัล เช่น เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ ถ้าใช้ออกซิเจน (ประมาณ 0.03-0.1 เปอร์เซ็นต์) จะใช้ความดันประมาณ 1,500 บรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจากแก๊สเอทิลีนด้วยกระบวนการนี้ คายความร้อนออกมาสูงมาก จึงต้องมีระบบทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงมาก เช่น อาจใช้น้ำ หรือเบนซีนระบายความร้อน โดยปกติมีมอนอเมอร์ 10-30 เปอร์เซ็นต์ เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ การใช้พอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นมากๆ และความดันสูง จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขาและน้ำหนักโมเลกุลสูง

สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

1. ความหนาแน่นประมาณ 0.91-0.94 กรัม/ซม<sup>3</sup>
2. จุดหลอมเหลว (melting point) ประมาณ 108 องศาเซลเซียส
3. น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW.) ประมาณ 22,000-25,000
4. เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%crystallinity) 60 เปอร์เซ็นต์
5. ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) ที่อุณหภูมิห้อง และละลายในสารละลายอินทรีย์บางชนิดที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เช่น เตตระคลอไรด์ (tetrachloride) ไชลีน (xylene) ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene)
6. ไม่มีขั้ว (non-polar) ทำให้มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
7. สามารถยืดออกได้โดยไม่คืนสภาพเดิม (elastic with a lazy recovery)

ตลาดใหญ่ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพวกบรรจุภัณฑ์ โดยมีการนำไปแปรเป็นฟิล์ม (2 ใน 3 ของผลผลิตทั้งหมด) สำหรับทำเป็นถุงเย็น ถุงบรรจุสินค้าทั่วไป ฟิล์มหดรัศรูป (shrink film) และฟิล์มยืดรัศรูป (stretch film) เป็นต้น ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีด (injection molding) เช่น ขวด ถ้วย ถาดสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารและยา ของเด็กเล่น และของใช้ในบ้านมีประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ทำฉนวนหุ้มสายไฟและเคเบิลประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำวัสดุเคลือบผิวประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่า (blow molding) ทำขวดอ่อนพลาสติกชนิดบีบได้ ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเมื่อเก็บไว้นานๆ โดยได้รับแสงและออกซิเจนจะมีผลต่อการขยายตัวทางความยาว และความต้านทานต่อแรงดึงลดลง การใส่ผงสี (pigmentation) จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้บ้าง

## 2.4 แป้ง [7]

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยหน่วยกลูโคส กระบวนการผลิตแป้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ หลักการทั่วไปคือ แยกเม็ดแป้งออกจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เส้นใย โปรตีน เกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ด้วยการล้างน้ำ ทำการปั่นแยกและอบให้แห้งในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น



ประเภทของแป้งสามารถแยกได้ตามสมบัติเป็น 2 ประเภท คือ

1. starch ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องใช้แบบเปียก (wet grinding) ซึ่งจะทำให้แยก starch ออกมาได้
2. flour ผลิตได้จากการโม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างๆไปจาก starch

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งประเภท starch เม็ดแป้ง (starch granule) ไม่ละลายในน้ำเย็น รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับแหล่งของพืชที่ให้แป้ง

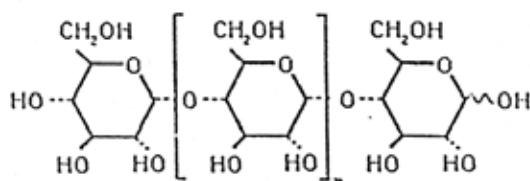
#### 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ( $C_6H_{10}O_5$ ) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต หน่วยกลูโคสในสายโซ่สามารถแสดงได้เป็นหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU) หรือหน่วยกลูโคไพราโนซิล (glucopyranosyl unit) ซึ่งเกิดจากพันธะโควาเลนต์เชื่อมโยงระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วย และทำให้โมเลกุลของน้ำถูกกำจัดออกไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น เนื่องจากแป้งที่พบอยู่ในต้นพืชได้จากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ ดังนั้น ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลแป้งจึงเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หน่วยกลูโคสจะต่อกันผ่านอะตอมของออกซิเจนที่ติดกับอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคส กับอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสถัดไป เกิดเป็นพอลิเมอร์สายยาวขึ้น พันธะเชื่อมโยงระหว่างหน่วยกลูโคสนี้เรียกว่า “พันธะกลูโคไซด์” (glucoside bond)

#### 2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ

1. อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นสายตรง (linear polymer) ประกอบด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$ -1,4 ( $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage) ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสจะขึ้นกับแหล่งที่ให้แป้งและภาวะของกระบวนการที่ใช้แยกแป้ง อะไมโลสประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย โดยแป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



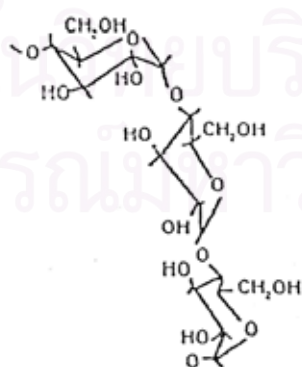
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของอะไมโลส [7]

นอกจากนี้ อะไมโลสอาจจัดตัวอยู่ในรูปโครงสร้างแบบเกลียว (helical structure) โดยประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส 6 หน่วยย่อยต่อ 1 เกลียว และแต่ละเกลียวจะเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 2.4)

เนื่องจากอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก จึงส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก(hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของอะไมโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสจัดเรียงตัวขนานกันและใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหขึ้น และมี

สมบัติไฮโดรฟิลิก

ลดลง สารละลายที่ได้จะมีลักษณะขุ่น

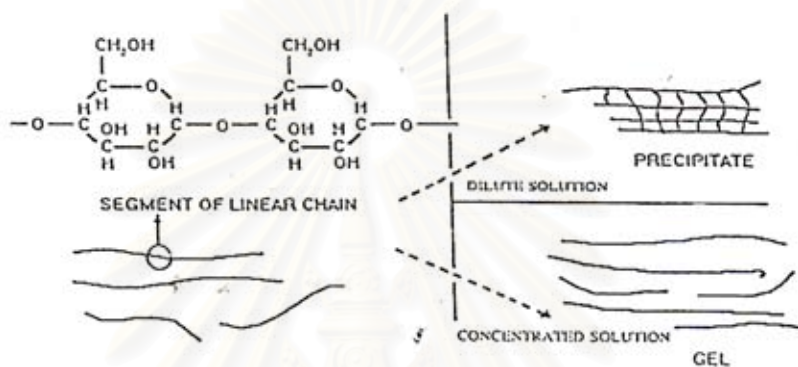


รูปที่ 2.4 การจัดตัวในรูปโครงสร้างแบบเกลียวของอะไมโลส [7]



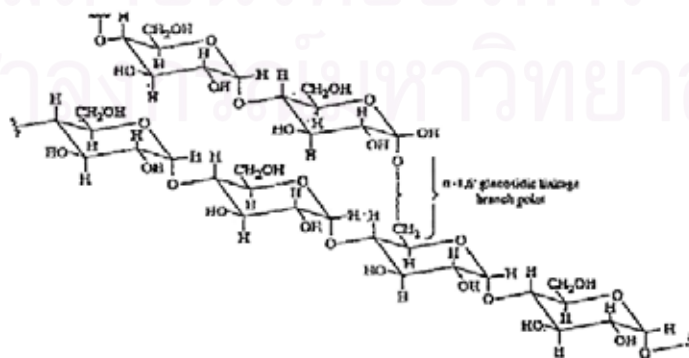
ในสารละลายเจือจางจะเกิดการรวมตัวกันของอะไมโลสที่ติดกันเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ แต่สำหรับที่ความเข้มข้นสูงๆ ผลของความเกะกะ (steric hindrance) ขัดขวางการรวมตัว แต่มีการจัดตัวเพียงบางส่วนระหว่างช่วงของสายไซโมเลกุล ทำให้ได้เจลที่มีร่างแหสามมิติที่ยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปมักทำให้เกิดฟิล์มที่มีความแข็งแรง

ปรากฏการณ์ยึดติดกันระหว่างโมเลกุลอะไมโลสเรียกว่า "รีโทรเกรดชัน" (retrogradation) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์รีโทรเกรดชันของอะไมโลส [7]

2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin) เป็นส่วนของกลูโคสที่ต่อกันเป็นสาย ซึ่งมีกิ่งก้านสาขา แตกแขนงออกไป โครงสร้างที่เป็นสายประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสที่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$ -1,4 ( $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage) ส่วนรอยต่อระหว่างไซหลักกับกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$ -1,6 ( $\alpha$ -1,6 glycosidic linkage) ดังรูปที่ 2.6 โดยโครงสร้างในส่วนที่เป็น อะไมโลเพกตินจะคิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของแป้ง



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของอะไมโลเพกติน [15]

อะไมโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส และการที่มีโซ่สาขาของโมเลกุลอะไมโลเพกตินทำให้ลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่ให้ใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้สารละลายของอะไมโลเพกตินจึงมีลักษณะใส พิล์มที่ได้จากอะไมโลเพกตินไม่มีความแข็งแรง และไม่สามารถโค้งงอได้เหมือนฟิล์มที่ได้จากอะไมโลส

สายโซ่หลักของอะไมโลเพกตินและอะไมโลสที่อยู่ขนานติดกันมีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนที่ติดกันได้ ทำให้เกิดกลุ่มของโครงผลึก (micellar crystallites) ซึ่งเป็นตัวยึดให้แบ่งอยู่เป็นเม็ด และมีสมบัติไบรฟริงเจนซ์ (birefringence) ซึ่งสามารถแสดงให้ทราบได้โดยการเกิดโพลาไรเซชันครอส (polarization cross)

ส่วนของแป้งที่เื้อ้อำนวยต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างที่เป็นสายตรงโดยจุลินทรีย์ย่อยสลายด้วยเอนไซม์เบตาอะไมเลส ( $\beta$ -amylase) ทำลายเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$ -1,4 เท่านั้น ส่วนพันธะไกลโคซิดิกแบบ  $\alpha$ -1,6 ไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้น การย่อยแป้งซึ่งส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะไมโลเพกติน จึงได้เป็นสายสั้นของแป้งที่เรียกว่า เดกซ์ทริน (dextrin) เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิด [3]

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณอะไมโลเพกติน (เปอร์เซ็นต์)
ข้าวโพด	28	72
มันฝรั่ง	21	79
ข้าวสาลี	28	72
มันสำปะหลัง	17	83
ข้าวเหนียว	0	100
ข้างฟาง	28	72
ข้าว	17	83
สาคุ	27	73
ข้าวยายม่อม	20	80
ข้าวโพด (amylose maize)	50-80	20-50

### 2.4.3 สมบัติของแป้ง [7]

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสม และใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างมากมาย เช่น สารยัดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ยารักษาโรค และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น การที่สามารถนำแป้งไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากสมบัติของแป้งในด้านความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยัดติด และการเกิดเป็นฟิล์ม นอกจากนี้ แป้งยังมีราคาถูก สามารถควบคุมคุณภาพได้ และหาได้ง่าย

แป้งสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ได้ โดยผ่านกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ เพื่อทำการผลิตแป้งที่มีสมบัติต่างๆตามที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง

อย่างไรก็ดี การใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์พลาสติกก็ยังมีข้อจำกัดจากโครงสร้างของแป้งดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จะเห็นได้ว่า แป้งมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอและมีพันธะไฮโดรเจนเป็นแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแป้งเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้สามารถเรียงตัวกันได้ อย่างใกล้ชิดและยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง ส่งผลให้แป้งไม่อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะเป็นปัญหาในการขึ้นรูป ประกอบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทางกายภาพไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น เปราะ นอกจากนี้แป้งยังมีความหนืดขณะร้อนสูง ทำให้มีอุปสรรคต่อการนำแป้งไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีความหนืดขณะร้อนลดลง นอกจากนี้ โครงสร้างของแป้งเอง ไม่ทนต่อสภาพกรด อุณหภูมิสูงและแรงเฉือนจากเครื่องมือ จึงต้องมีการดัดแปรแป้งให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ด้วยการทำให้พันธะไฮโดรเจนลดลง หรือทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง

### 2.5 แป้งดัดแปร (Modified starch) [3,8]

แป้งดัดแปร โดยทั่วไปหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี แป้งข้าวเหนียว มาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และ/หรือทางเคมีด้วยวิธีทางกายภาพ และ/หรือทางเคมี เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมต่างๆ

### 2.5.1. ประเภทของแป้งดัดแปร

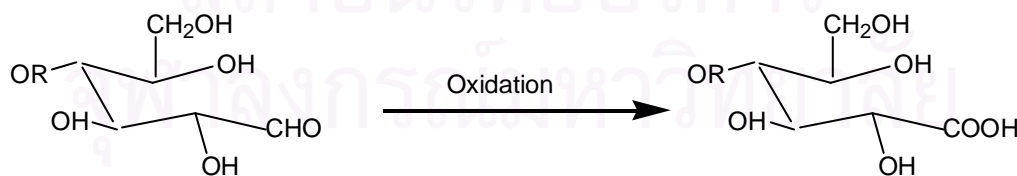
แป้งดัดแปรที่นิยมศึกษามีหลายประเภท ได้แก่

#### 1. แป้งอีเทอร์ (starch ethers) [8]

เป็นการนำแป้งมาทำปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน เป็นวิธีการที่ค่อนข้างไม่แพง เมื่อเทียบกับการดัดแปรแป้งด้วยวิธีการอื่น แป้งอีเทอร์ประเภทที่ผลิตมากที่สุด คือ แป้งไฮดรอกซีอัลคิล (hydroxylalkyl starch) เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับเอทิลีนออกไซด์ ที่อุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส ระดับการแทนที่ (degree of substitution, D.S.) ประมาณ 0.05-0.10 เมื่อนำไปทำเป็นฟิล์มแล้ว ได้ฟิล์มที่โปร่งแสง มีความยืดหยุ่น ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ

#### 2. แป้งออกซิไดส์ (oxidized starch) [8]

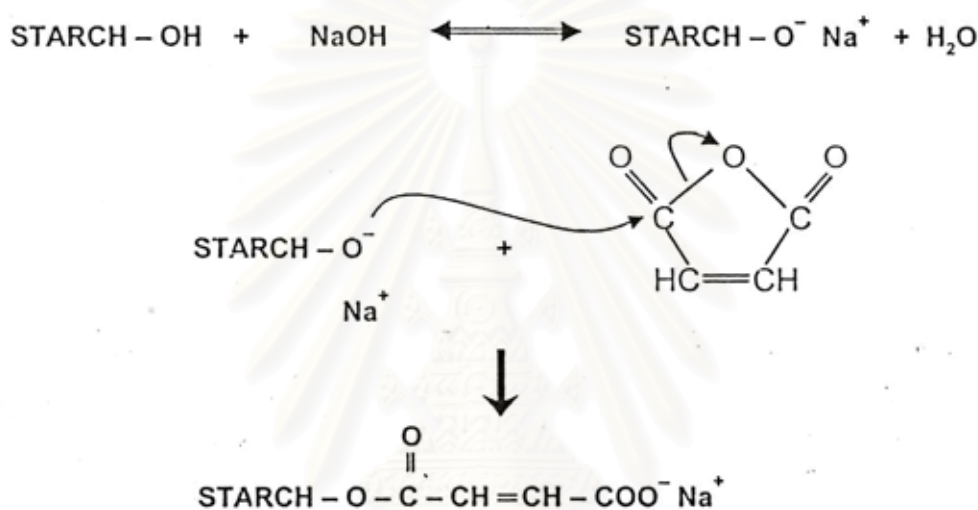
เป็นการนำแป้งไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้สารออกซิไดส์ (oxidizing agent) เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite) แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไฮโปคลอไรต์ออกซิเดชัน แป้งที่ได้จะมีหมู่คาร์บอนิลกับหมู่คาร์บอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ทั้งนี้อัตราส่วนปริมาณหมู่คาร์บอนิลต่อหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของระบบ โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักทำที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 10 ทั้งนี้เพื่อให้ได้หมู่คาร์บอกซิลมากๆ อย่างไรก็ตาม จะเกิดการออกซิเดชันที่พันธะไกลโคซิดิก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมีขนาดสั้นลงด้วย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้ง [8]

### 3. แป้งเอสเทอร์ (starch esters) [8]

มีมากมายหลายประเภทเช่นกัน โดยทั่วไปได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับแอซิดคลอไรด์ (acid chloride) หรือ แอซิดแอนไฮไดรด์ (acid anhydride) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เช่น แป้งแอสเทต ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับแอสติกแอนไฮไดรด์ หรือ แป้งมาเลอีนต (starch maleinate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [8]

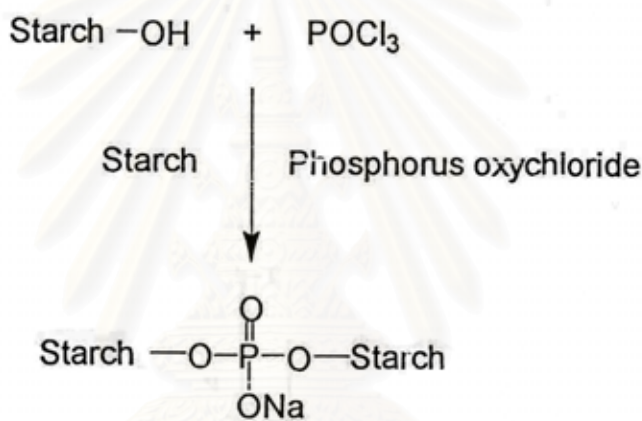
ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เอสเทอร์ นั่นคือการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างแป้งและเกิดเป็นหมู่เอสเทอร์จากปฏิกิริยา วิธีการนี้เป็นการลดหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแป้ง ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งลดลง ทำให้แป้งสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานในลักษณะที่เป็นพลาสติกได้

### 4. ไดสตาร์ชอะดิเปต (distarch adipate) [15]

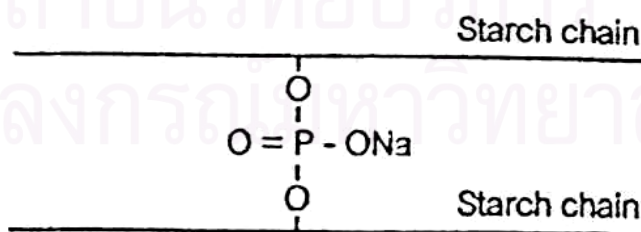
การผลิตไดสตาร์ชอะดิเปต จะใช้แอสติกแอนไฮไดรด์ผสมกับ กรดอะดิปิก เป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับสารแขวนลอยของเม็ดแป้งในภาวะเบสอ่อน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางภายในโมเลกุลแป้ง ได้แป้งที่ทนต่อกรด แต่ถูกย่อยสลายได้ง่ายในภาวะที่เป็นด่างอ่อน

5. ไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate) [15]

การผลิตไดสตาร์ชฟอสเฟต ทำได้โดยการตัดแปรงแขนงด้วยฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตในภาวะที่เป็นเบส ดังรูปที่ 2.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์จะดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตจะเป็นไปอย่างช้าๆ สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นได้ โดยทำปฏิกิริยาในภาวะที่อุณหภูมิสูง ไดสตาร์ชฟอสเฟตมีพันธะเชื่อมขวางที่ดีกว่าไดสตาร์ชอะดิเปต ดังรูปที่ 2.10 จึงมีความสามารถในการต้านความเป็นกรดอ่อนและด่างอ่อนได้ แต่สามารถย่อยสลายในภาวะที่เป็นด่างปานกลางได้



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แปรงไดสตาร์ชฟอสเฟต [15]

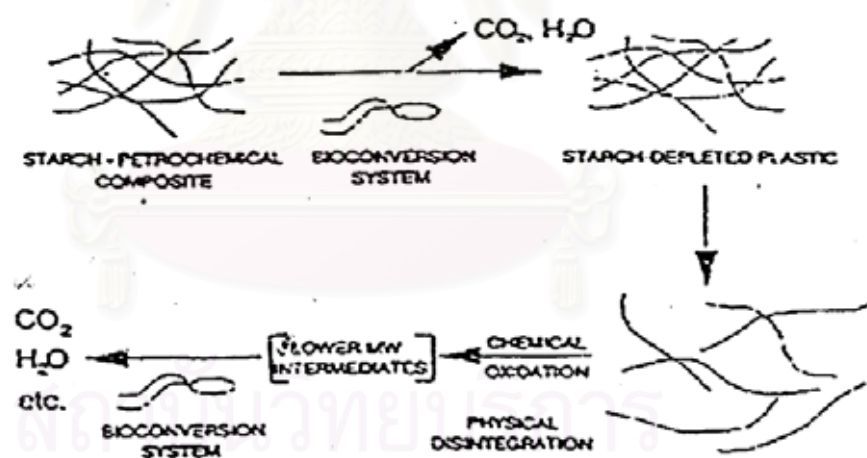


รูปที่ 2.10 โครงสร้างแปรงครอสลิงก์ [15]



แม้ว่าพลาสติกที่ขึ้นรูปจากแป้งดัดแปร จะมีสมบัติทางกายภาพดีกว่าแป้งที่ไม่ได้ดัดแปร เนื่องจากแป้งดัดแปรจะมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้งานในลักษณะที่เป็นพลาสติกได้ แต่เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ยังคงมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ใช้งานได้จำกัด จึงมีแนวคิดที่จะนำแป้งดัดแปรมาผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น แข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

แป้งผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์ [7] ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้ง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูปคือ ในรูปเม็ดแป้งหรือแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไป ด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น แผนภาพการย่อยสลายแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.11 แผนภาพการย่อยสลายของแป้งผสมพอลิเมอร์สังเคราะห์ [7]



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Thiebaud [9] และคณะได้ศึกษาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้ง โดยใช้คลอไรด์ของกรดไขมัน (fatty acid chloride) ซึ่งชนิดที่เลือกใช้คือ ออกทานโนอิลคลอไรด์ (octanoyl chloride) และ โดเดคาโนอิลคลอไรด์ (dodecanoyl chloride) แล้วศึกษาผลของความยาวสายโซ่ของกรดไขมัน (fatty acid chain) ที่ใช้ และระดับการแทนที่ (degree of substitution) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) พบว่ากรดไขมันที่มีสายโซ่ยาวกว่า ทำให้ความเข้มของพีกที่หมู่เมทิลและเมทิลีนสูงกว่า นอกจากนี้ เมื่อปริมาณการแทนที่สูงขึ้น ความเข้มของพีกที่บริเวณหมู่เอสเทอร์และหมู่เมทิลีนก็สูงขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ความเข้มของพีกที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซิลมีค่าลดลง ยังพบว่าแป้งเอสเทอร์ (ester starch) ที่ได้มีสมบัติเหมือนเทอร์โมพลาสติก

N. Ramani และคณะ [10] ได้ใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และแอซิดคลอไรด์หลายประเภทในการดัดแปรแป้งข้าวโพด ใช้ไดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายและใช้ไพริดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถดัดแปรโครงสร้างของแป้งข้าวโพดได้ รวมทั้งได้ทดลองนำแป้งดัดแปรไปขึ้นรูปเป็นพลาสติก แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ กรวัลลี รัตนะรัต และมัลลิกา พงษ์ชนะกุล [1] ได้ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 2 4 และ 6 ชั่วโมง เมื่อนำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งศึกษาลักษณะและสมบัติบางประการของแผ่นพลาสติกดังกล่าวในเบื้องต้น โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายชนิด พบว่า ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้โครงสร้างทางเคมีของแป้ง และลักษณะของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มีความแตกต่างกัน ในขณะที่เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลกระทบต่อ แผ่นพลาสติกดังกล่าวนี้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายต่างๆ ไป เช่น คลอโรฟอร์มหรือสารละลายกรด ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง แต่ละลายได้ในสารละลายด่างที่ร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นพลาสติกซึ่งเตรียมได้จากการดัดแปรแป้งมีสมบัติแตกต่างจากพลาสติกที่เตรียมจากแป้งไม่ได้ดัดแปร กล่าวคือ

มีอุณหภูมิกลาสทรานส์ชันและจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า มีการดูดซึมน้ำที่ดีกว่า และมีความแข็งแรงสูงกว่า

สมพร รุ่งสัมพันธ์กุล และสุพิชญา ชื่นชนม์ [3] ได้ศึกษาแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ได้เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรคือ 50 องศาเซลเซียส ภาวะที่ใช้ในการดัดแปร คือ เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็น 5 15 25 35 50 60 75 และ 85 เปอร์เซ็นต์ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 60 90 และ 120 นาที เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างสมบัติทางเคมีของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากนั้นนำแป้งดัดแปรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการหล่อ พร้อมทั้งจับเวลาการแห้งตัว แล้วนำแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติความทนแรงดึง การดูดความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างมีผลต่อสมบัติของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้ ซึ่งโดยรวมแล้วแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้สมบัติที่ดีที่สุด

J. Aburto และคณะ [11] ได้ดัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กับออกทานอยล์คลอไรด์ (octanoyl chloride) ได้เป็นแป้งออกทานอยล์ (octanoate starch) จากนั้นนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเปลี่ยนปริมาณแป้งที่ร้อยละ 5 10 15 20 25 30 40 50 และ 75 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณแป้งออกทานอยล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature) ความเค้น (stress) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%elongation at break) ลดลง และได้เสนออีกว่าสามารถใช้โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับกรดอะคริลิก (poly(ethylene-co-acrylic acid)) เป็นสารช่วยผสมได้ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพช้า

I.M. Thakore [12] และคณะได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันฝรั่งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร และที่ดัดแปรด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ได้เป็นแป้งฟทาลेट (phthalate starch) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถผสมเข้ากับแป้งฟทาลेटได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร อีกทั้งยังมี

สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าด้วย และปริมาณแบ่งที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

S. Kiatkamjornwong และคณะ [13] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งมันสำปะหลังตัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยตัดแปรแบ่งมันสำปะหลังด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และอีเทอร์ฟิเคชันด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนออกไซด์ ตามลำดับ จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแบ่งมันสำปะหลังตัดแปรที่ร้อยละ 1 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณแบ่งมันสำปะหลังตัดแปรเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงยึดดึง (tensile strength) และค่าความแข็งกด (hardness) สูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%strain) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้พอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งมันสำปะหลังไม่ตัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความทนแรงดึงสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมไม่ดูดซึมความชื้นในอากาศ

B.C. Jang และคณะ [14] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งมันสำปะหลังกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยที่ตัดแปรพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยการผสมไกลซิไดลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ GMA ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และผสมกลีเซอรินในแบ่งที่ร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการอัดแผ่น โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแบ่ง กลีเซอริน และ GMA พบว่าปริมาณแบ่งคงที่ทำให้ความแข็งแรงยึดดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อปริมาณกลีเซอรินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงยึดดึงลดลง และปริมาณ GMA ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

Sagar และ Merrill [16] ได้สังเคราะห์แบ่งเอสเทอร์ โดยอาศัยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีแอซิดคลอไรด์เป็นสารตัดแปร ไดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายและไฟรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาสมบัติของแบ่งเอสเทอร์ที่ได้ในด้านสมบัติการไหล สมบัติความร้อน สมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า การเพิ่มปริมาณของแบ่งเอสเทอร์ทำให้แบ่งเอสเทอร์นี้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น แบ่งเอสเทอร์ที่มีปริมาณการแทนที่สูงๆ มีการย่อยสลายช้าลง

H. Ismail และคณะ [17,18] ได้นำแป้งสาคูมาผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว พบว่า ความทนแรงดึง ณ จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดุลัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำไปย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ยังพบว่าสมบัติเชิงกลต่างๆลดลง

S. Kiatkamjornwong และคณะ [19] ได้ทดลองเติมโซยาออยล์และเฟอริกสเตียเรตลงในพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีแป้งมันสำปะหลังผสมอยู่ ซึ่งพบว่า สารทั้งสองชนิดช่วยทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกดังกล่าวเป็นไปได้ดีขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

##### 3.1.1 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว

##### 3.1.1.1 การเตรียมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

##### วัตถุดิบและสารเคมี

1. แป้งข้าวเหนียว จากบริษัทไทยวา จำกัด
2. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, GR grade จากบริษัท Fluka)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, AR grade จากบริษัท Ajax FineChem)
4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 8 เปอร์เซ็นต์ (Hydrochloric acid, AR grade จากบริษัท J.T. Baker)
5. เมทานอล (Methanol, GR grade จากบริษัท Zen Point)
6. น้ำกลั่น

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. ชุดเครื่องปั่นกวน พร้อมใบพัด
4. แผ่นให้ความร้อน (hot plate)
5. กระดาษวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
6. กระจกนาฬิกา

##### 3.1.1.2 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน

##### วัตถุดิบและสารเคมี

1. แป้งข้าวเหนียวดัดแปร
2. โฟแทสเซียมโบรไมด์

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Nicolet-Impact 400)
2. เครื่องไฮดรอลิกอัดแผ่นตัวอย่าง
3. แม่แบบในการเตรียมตัวอย่าง

### 3.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

#### 3.1.2.1 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม

##### วัตถุดิบ

1. แป้งข้าวเหนียวดัดแปร
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, Injection grade, TPI Co. Ltd.)

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. แม่แบบ
2. แผ่นฟิล์มไมลาร์ (mylar film)
3. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill, LRM 110 )
4. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding, V508-18-CX)

#### 3.1.2.2 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

##### (1) การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

##### วัตถุดิบ

1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม

### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Universal Testing Machine (รุ่น A LLOYD model LR100K)
2. เครื่อง PC computer
3. เวอร์เนีย
4. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ



## (2) การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

## วัสดุดิบ

1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม

## อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Universal Testing Machine (รุ่น A LLOYD model 500)
2. เครื่อง PC computer
3. เวอร์เนียร์
4. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ

## (3) การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

## วัสดุดิบ

1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม

## อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รุ่น Zwick 5102 Pevdulum Impact Tester)
2. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ
3. เครื่องทำรอยบากชิ้นงาน

## (4) การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

## วัสดุดิบ

1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม
2. ดิน

## อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กระบะสำหรับบรรจุดิน
2. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. เดซิเคเตอร์
5. ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven)



## (5) การทดสอบความสามารถในการดูดซึมความชื้น

วัสดุดิบ

1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ตู้กระจกขนาด 25 ซม. × 50 ซม. × 30 ซม. ที่มีฝาปิดสนิทสำหรับใส่น้ำ
2. ตะแกรงสำหรับวางชิ้นงานทดสอบ
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. เดซิเคเตอร์
5. ตู้อบสุญญากาศ

## (6) การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

วัสดุดิบ

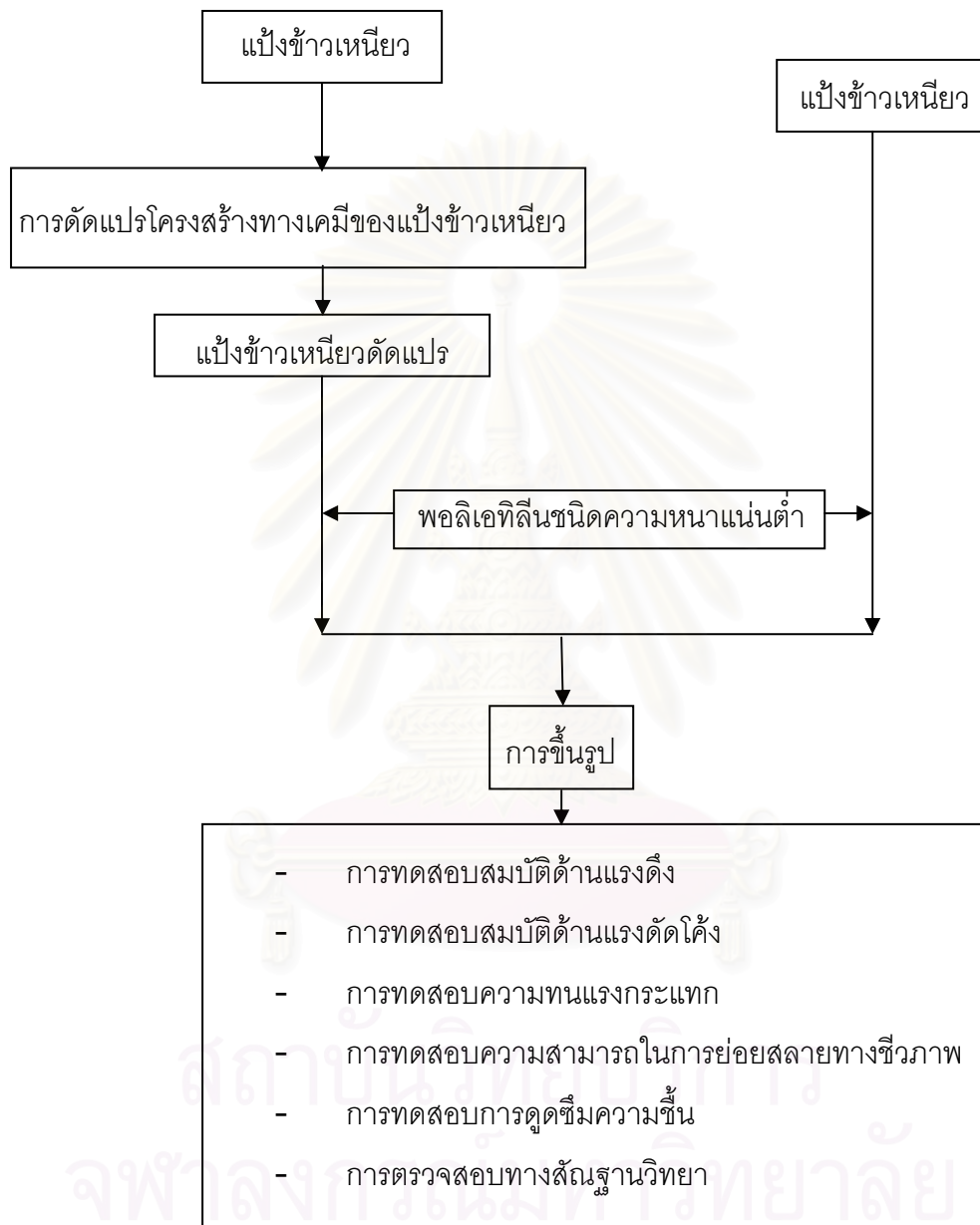
1. แผ่นพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM, JSM-6400)
2. แท่นทองเหลืองสำหรับวางชิ้นงานทดสอบ
3. ยาทาเล็บ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.2 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

### 3.2.1 การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการดัดแปรแป้ง

ขั้นตอนในการดัดแปรแป้ง เป็นดังนี้

1. อบแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแป้งที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แล้วนำไปใช้คำนวณหาปริมาณสารอื่นๆ ที่ใช้ในปฏิกิริยา
2. เตรียมชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เติมน้ำกลั่นและละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่นจนหมด (ปริมาณ NaOH : MA = 2.2 : 1 โมล)
3. ละลายแป้งข้าวเหนียวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยค่อยๆ ใส่แป้งที่ละน้อยพร้อมกับการกวนและให้ความร้อนไปด้วย โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการละลายแป้งหลังจากใส่จนหมดครึ่งชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2
4. เติมน้ำเกลือแกงไฮโดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์\* (เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดจากการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว) ลงไปอย่างช้าๆ โดยค่อยๆ ใส่ที่ละน้อย พร้อมกับปั่นกวนตลอดเวลา ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 60-65 องศาเซลเซียส
5. เมื่อครบกำหนดปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้งดัดแปรผสมให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก นำไปตกตะกอนในเมทานอล กรอง แล้วนำไปอบที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งดัดแปรที่อบจนแห้งแล้วไปบดให้ละเอียด ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดเปกโทรสโกปี

6. นำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดเปกโทรสโกปี

7. นำแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อเตรียมชิ้นรูป แล้วนำไปทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป

\*ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ คิดเป็นโมลเปอร์เซ็นต์ของหมู่กรดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในแป้ง

### 3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว

เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งดัดแปร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดเปกโทรสโกปี โดยตรวจหาการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล ด้วยหมู่เอสเทอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ณ เลขคลื่น (wave number) ประมาณ  $3,200-3,600\text{ cm}^{-1}$  และพีคของหมู่เอสเทอร์ (CO-O group) ที่เลขคลื่นประมาณ  $1,500-1,700\text{ cm}^{-1}$  เป็นหลัก

ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยละเอียดเป็นดังนี้

1. นำแป้งดัดแปรที่ตกตะกอนด้วยเมทานอล และอบแห้งแล้วมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน KBr 2 ส่วน ต่อ แป้ง 1 ส่วน จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไฮดรอลิกอัดแผ่นตัวอย่าง

2. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดเปกโทรสโกปี (Nicolet – Impact 400) ดังรูปที่ 3.3 จะได้สเปกตรัมของแป้งดัดแปร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์  
(Nicolet –Impact 400)

### 3.2.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม

การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ผสมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้เข้ากันด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill, LRM 110) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.4
2. นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากเครื่องบดสองลูกกลิ้งมาวางบนแม่แบบเพื่อเตรียมกดอัดเป็นแผ่น (compression molding, V508-18-CX) ดังรูปที่ 3.5 โดยให้อุณหภูมิในช่วงแรก (preheat) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ต่อมาให้ความดัน 10 ตัน เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลง (cool down) เหลือ 40 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่เตรียมเสร็จแล้วไปตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมทดสอบสมบัติต่างๆ ในขั้น ตอนต่อไป จากนั้นนำแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปรมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการเดียวกันกับแป้งข้าวเหนียวที่ดัดแปร

โดยอัตราส่วนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร

สูตร	ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณแป้งข้าวเหนียว (เปอร์เซ็นต์)
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20
6	75	25
7	70	30
8	75	40
9	60	50
10	50	60
11	40	70
12	30	80
13	20	90
14	0	100

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.4 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-rolls mill, LRM 110)



รูปที่ 3.5 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding, V508-18-CX)

### 3.2.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.2.4.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D638-82a (type IV) (Standard Test Method For Tensile Properties of Plastic) โดยใช้เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine (model LR 100K) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model LR 100K

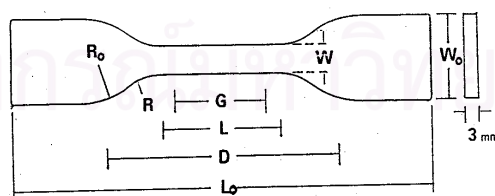
โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์

น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ 1 กิโลนิวตัน

ความเร็วในการทดสอบ 50 มม./นาที



W: 6 มม.

L: 33 มม.

G: 25 มม.

R: 14 มม.

W<sub>o</sub>: 19 มม.

L<sub>o</sub>: 115 มม.

D: 65 มม.

R<sub>o</sub>: 25 มม.

รูปที่ 3.7 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638-82a (type IV)

### 3.2.4.2 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง

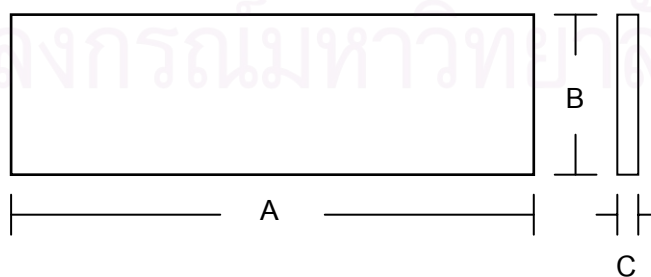
เตรียมชิ้นงานและทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D790-81 โดยใช้เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine (model 500) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง LLOYD Universal Testing Machine model 500

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50 เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	2500 กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50 มม./นาที
ระยะที่ใช้ทดสอบ	50 มม.



A : 80 มม.

B : 25 มม.

C : 3.2 มม.

รูปที่ 3.9 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790-81

### 3.2.4.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก

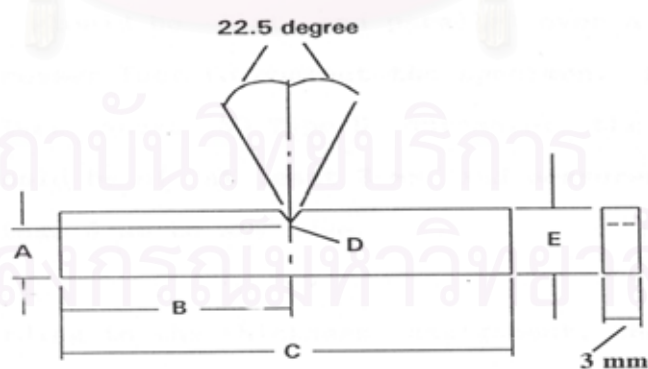
จะทำการเตรียมชิ้นงาน และทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D256-04 (type Izod) โดยใช้เครื่อง Zwick 5102 Pendulum Impact tester ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่อง Zwick 5102 Pendulum Impact Tester

โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50 เปอร์เซ็นต์



A: $10.16 \pm 0.05$ มม.	B: ค่าสูงสุด 32.00, ค่าต่ำสุด 31.50
C: ค่าสูงสุด 63.50 , ค่าต่ำสุด 53.50	D: $0.25 \pm 0.05$ มม.      E: $12.70 \pm 0.15$ มม.

รูปที่ 3.11 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256-04 (type Izod)

### 3.2.4.4 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 2.6 ซม.× 2.6 ซม. แล้วนำไปใส่ในเดซิเคเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นทดสอบ
3. นำชิ้นทดสอบฝังลงในดินให้ลึกจากผิวดิน 5 ซม. ในกระบะที่บรรจุดินอยู่เต็ม (กระบะใส่ดินต้องมีรูสำหรับระบายน้ำส่วนเกินออก)
4. รดน้ำบนดินให้ชุ่ม จากนั้นนำกระบะดินเก็บไว้ในอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด\*
5. นำชิ้นทดสอบออกจากดินอย่างระมัดระวัง และล้างเบาๆ ด้วยน้ำกลั่นเพื่อเอาดินที่ติดที่ผิวออก จากนั้นทำชิ้นทดสอบให้แห้งโดยใส่ในตู้อบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักชิ้นทดสอบคงที่

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ การหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบเริ่มต้น

$W_2$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามที่กำหนด

\* ระยะเวลาที่ทำการทดสอบรวม 14 วัน โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชุดดังนี้

ชุดที่ 1 สำหรับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย เป็นระยะเวลา 7 วัน

ชุดที่ 2 สำหรับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย เป็นระยะเวลา 14 วัน

หมายเหตุ : ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพียงชุดเดียว เพื่อใช้ทดสอบตลอดระยะเวลา 14 วัน อาจทำให้ได้ผลการทดลองผิดพลาด เนื่องจากในขั้นตอนที่ 5 จะต้องทำความสะอาดและอบชิ้นทดสอบ จึงต้องใช้ชิ้นทดสอบทั้งหมด 2 ชุด

### 3.2.4.5 การทดสอบการดูดซึ่มความชื้น

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 2.6 ซม.× 2.6 ซม. นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในเดซิเคเตอร์ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
  2. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นทดสอบ
  3. นำชิ้นทดสอบไปวางบนตะแกรงในตู้กระจก ซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
  4. นำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก
- ความสามารถในการดูดซึ่มความชื้น คือ การหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

เมื่อ  $M_1$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบเริ่มต้น

$M_2$  = น้ำหนักชิ้นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามที่กำหนด



#### 3.2.4.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบลักษณะที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6400 ดังรูปที่ 3.11 โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ซึ่งก่อนการทดสอบจะเคลือบผิวด้วยทอง โดยศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ทั้งนี้เพื่อดูการกระจายตัวของแป้งข้าวเหนียว และการยึดเกาะระหว่างแป้งข้าวเหนียวและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6400

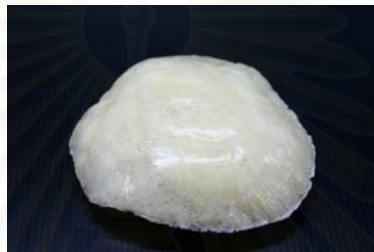
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรและไม่ตัดแปร

แป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่ผ่านการอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่ผ่านการอบ

เมื่อนำแป้งข้าวเหนียวตัดแปรไปบดเป็นผง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการตัดแปร พบว่า มีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายกันดังรูปที่ 4.2



(ก)



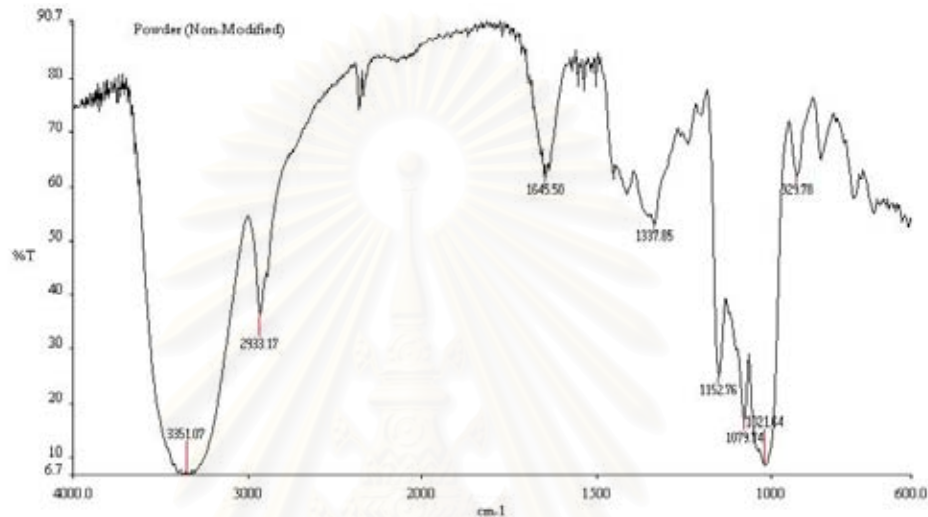
(ข)

รูปที่ 4.2 ลักษณะของผงแป้งข้าวเหนียวไม่ตัดแปร (ก) และผงแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ข)

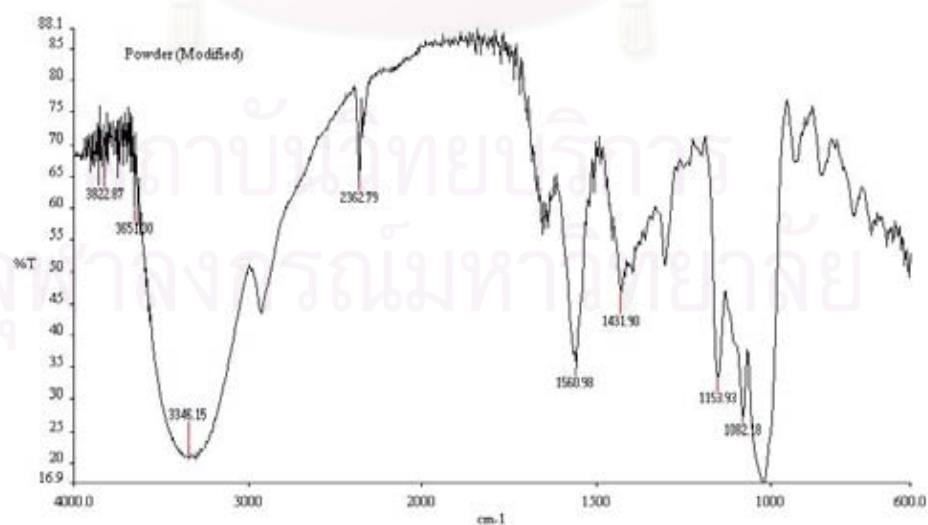
#### 4.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรและไม่ตัดแปร

แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่ามีลักษณะของสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงว่าเกิดการตัดแปรทางเคมีของแป้ง โดยเปรียบเทียบสเปกตรัม

ของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร พบว่าสเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีพีกที่สำคัญ คือ พีกของหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ซึ่งอยู่ในช่วง  $3,200-3,600\text{ cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 4.3 แต่เมื่อดัดแปรแล้วด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นเวลา 30 นาที จะเห็นการปรากฏของพีกที่แสดงถึงหมู่เอสเทอร์ (CO-O) ที่เลขคลื่น  $1,561\text{ cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปร

### 4.3 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แปะข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (GST) และแปะข้าวเหนียวดัดแปร (MGST) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก)



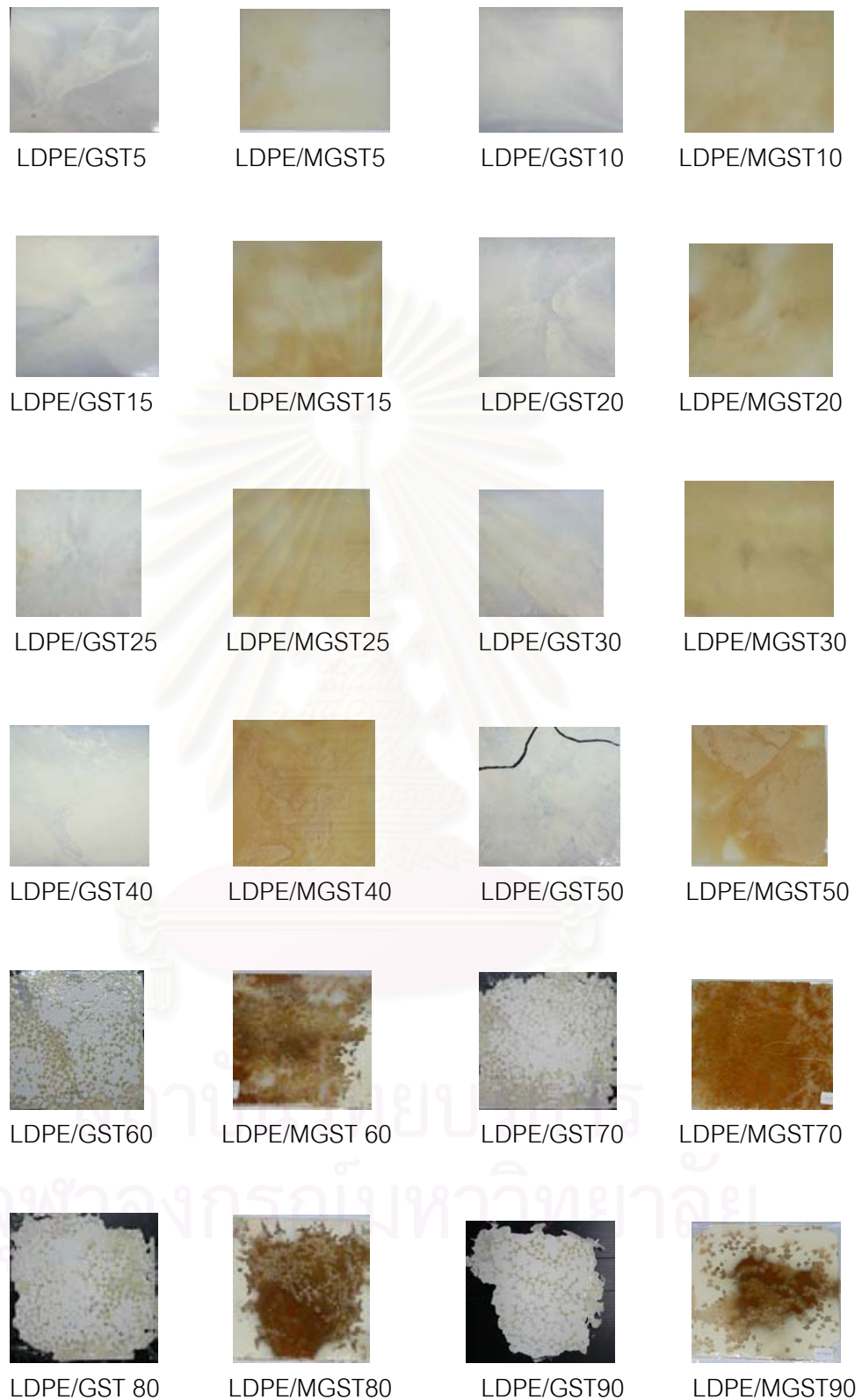
(ข)



(ค)

**รูปที่ 4.5** ชิ้นงานพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ก) แปะข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (ข) และแปะข้าวเหนียวดัดแปร (ค)

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีลักษณะเรียบ และโปร่งแสง ส่วนแปะข้าวเหนียวที่ไม่ดัดแปรไม่หลอม จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ ในขณะที่แปะข้าวเหนียวดัดแปรสามารถหลอมได้บางส่วน โดยเกิดการไหม้บางส่วน เมื่อนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาผสมแปะข้าวเหนียวดัดแปรและแปะข้าวเหนียวที่ไม่ดัดแปร ณ อัตราส่วนต่างๆ ได้พอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.6



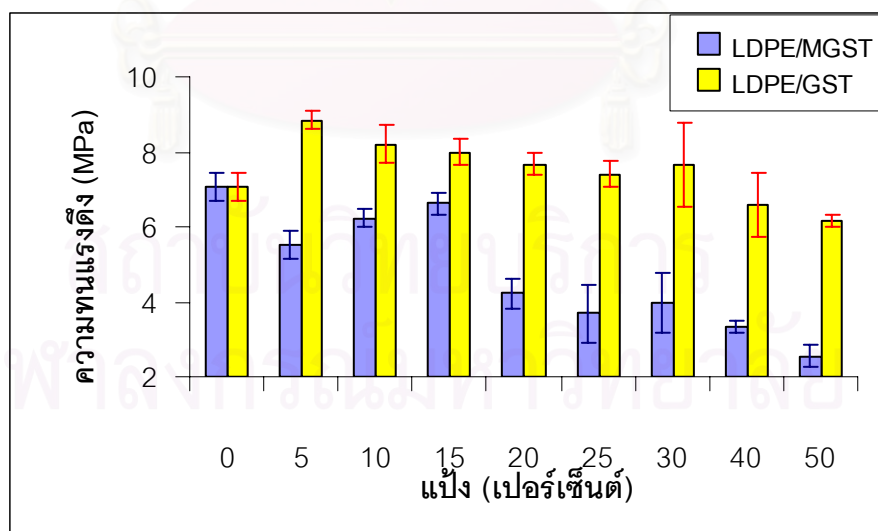
**รูปที่ 4.6** ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับ  
 แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (LDPE/MGST) และแป้งข้าวเหนียวไม่ตัดแปร  
 (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีสีขาว ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่มีสีน้ำตาล อันเนื่องมาจากการไหม้ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่มีส่วนของกรดอยู่ จึงทำให้ทนต่อความร้อนได้ต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมทั้งสองแบบ มีลักษณะคล้ายโฟมมากขึ้น รวมทั้งเปราะและแตกง่าย ดังนั้น ที่ปริมาณแป้ง 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จึงไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบและนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้

#### 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

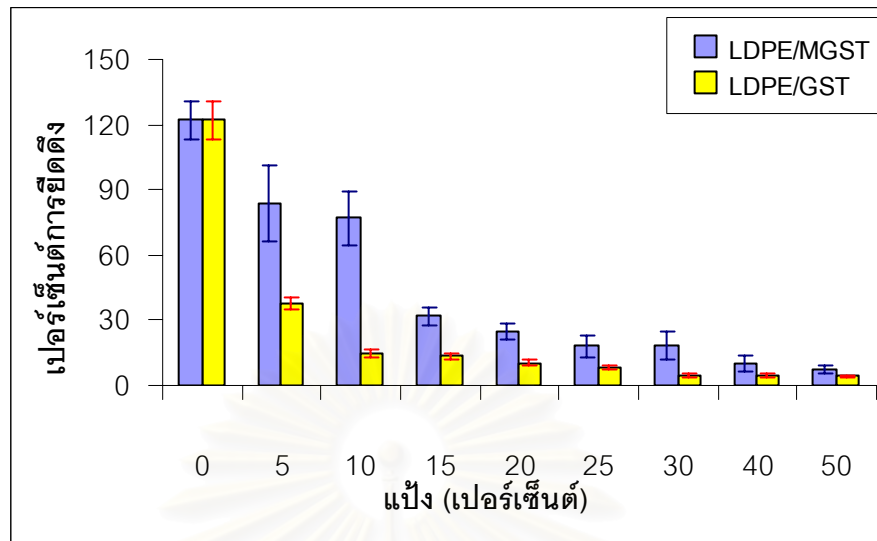
##### 4.4.1 สมบัติด้านแรงดึง

จากผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) สามารถแสดงค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดดึง (%elongation) และค่ายังก์มอดุลัส (Young's modulus) ในกราฟรูปที่ 4.6-4.8 ตามลำดับ

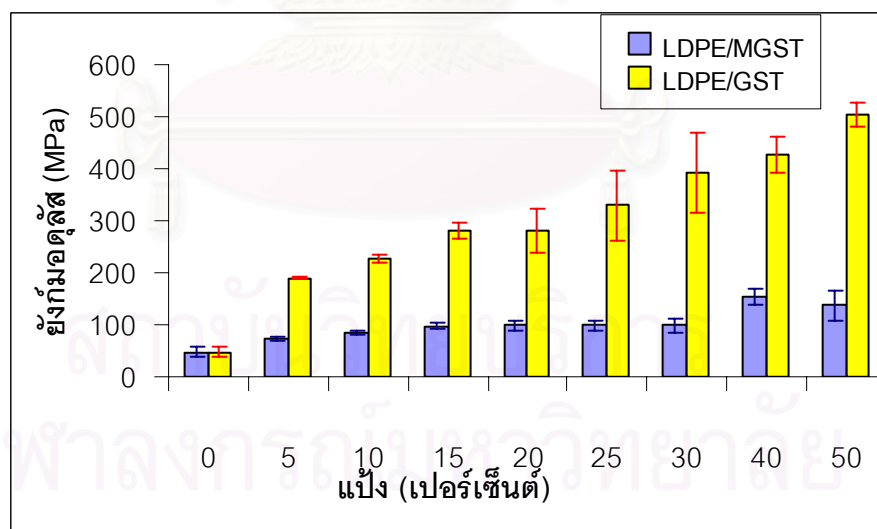


รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ





รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การยืดดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเบี่ยงข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเบี่ยงข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.9 ยังก์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเบี่ยงข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเบี่ยงข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

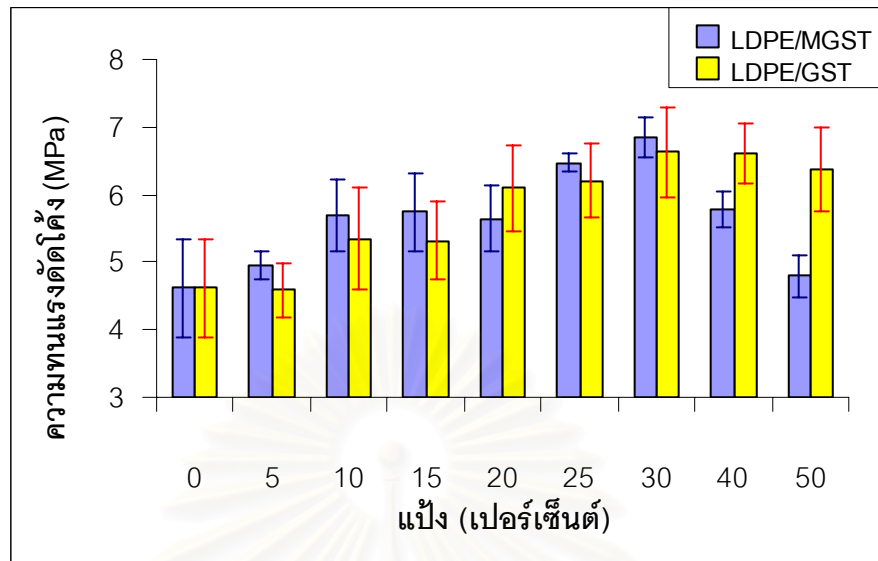
รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร ในช่วงแรก จะส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แล้วค่อยๆ ลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังเห็นได้ว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว มีค่าสูงกว่าของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สันนิษฐานได้ว่า แป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร อาจทำหน้าที่เป็นเหมือนสารก่อผลึก (nucleating agent) ให้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำให้ปริมาณผลึกในพอลิเมอร์ผสมมีมากกว่าในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มส่วนที่ไม่หลอมให้กับพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของขึ้นทดสอบ ขึ้นทดสอบจึงมีความทนแรงดึงที่ต่ำลง

ในกรณีของแป้งข้าวเหนียวที่ดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์นั้น สายโซ่โมเลกุลของแป้งมีหมู่เอสเทอร์ที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังนั้น เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวดัดแปรเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนเดียวกัน จึงทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีความทนแรงดึงสูงกว่า

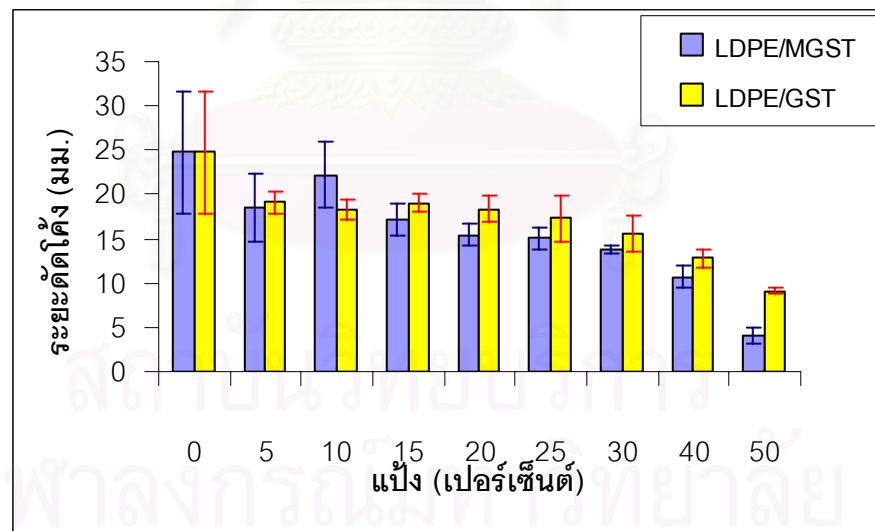
จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวทั้งที่ดัดแปรและไม่ดัดแปร ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความสามารถในการยืดตัวสูงอยู่แล้ว การเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรลงไป เมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวที่มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลสูงกว่า การยืดตัวจึงลดลง แต่ยังมีค่ามากกว่าการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร เนื่องจากการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเอทิลีนผสมลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าYoung's modulus ของพอลิเมอร์ผสมลดลงด้วย ดังรูปที่ 4.9

#### 4.4.2 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง

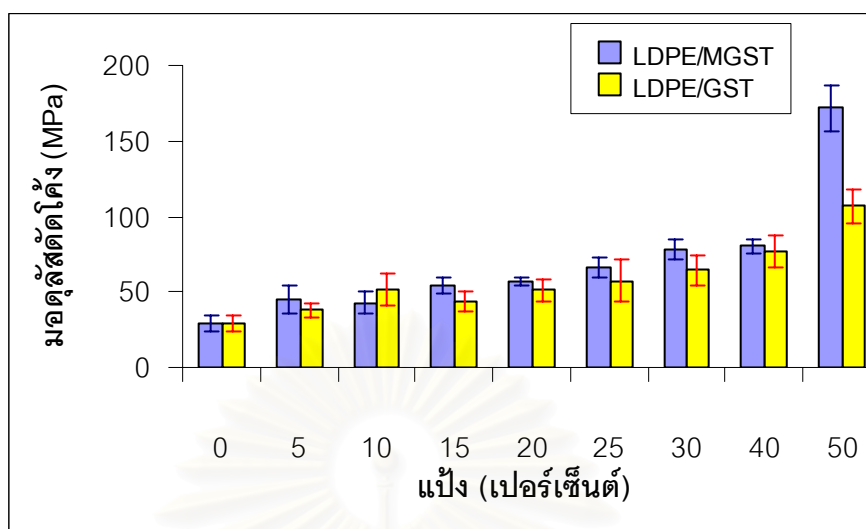
จากผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม สามารถแสดงค่าความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ค่าระยะดัดโค้ง (deformation at maximum load) และค่ามอดุลัสดัดโค้ง (flexural modulus) ดังกราฟรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.11 รัศมียดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ



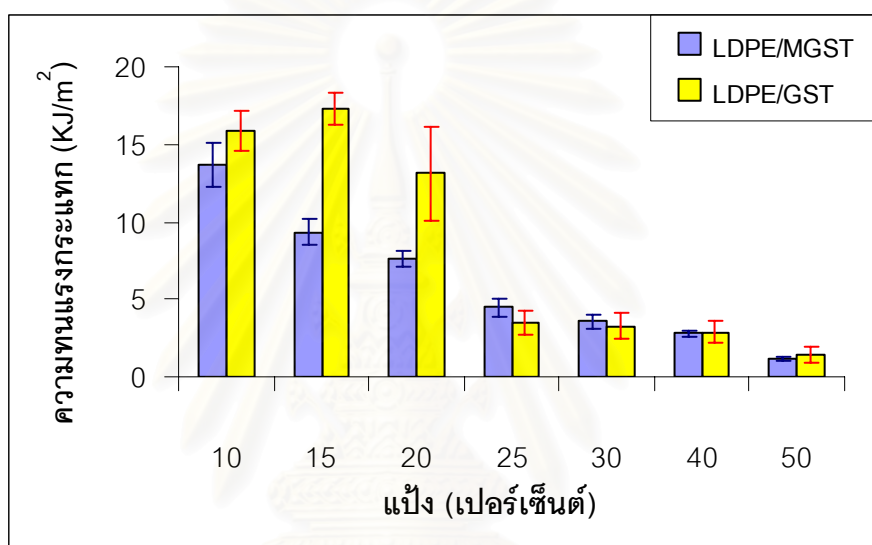
**รูปที่ 4.12** มอดุลัสตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแ่งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแ่งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแ่งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากแ่งมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลที่สูงกว่า เมื่อเติมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งมีความอ่อนตัวและดัดโค้งได้ดี จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น ใช้แรงในการดัดโค้งเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการเติมแ่งข้าวเหนียวที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปริมาณแ่งข้าวเหนียวมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองลดลง เนื่องจากปริมาณแ่งข้าวเหนียวดัดแปรที่มากเกินไป จนกลายเป็นตำหนิในชิ้นทดสอบ แต่พอลิเมอร์ผสมที่เติมแ่งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรยังคงมีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า อันเนื่องมาจากปริมาณผลึกที่มากกว่านั่นเอง

รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแ่งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ระยะเวลาตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการเติมแ่งข้าวเหนียวที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ระยะเวลาตัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความอ่อนตัวและดัดโค้งได้ดี เมื่อเติมแ่งข้าวเหนียวที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงกว่า จึงส่งผลให้ระยะเวลาตัดโค้งลดลง และยังส่งผลให้ค่ามอดุลัสตัดโค้งเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่

#### 4.4.3 ความทนแรงกระแทก

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวที่เติมลงไป ทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความเปราะมากขึ้น ความอ่อนตัวลดลง จึงรับแรงกระแทกได้น้อยลง

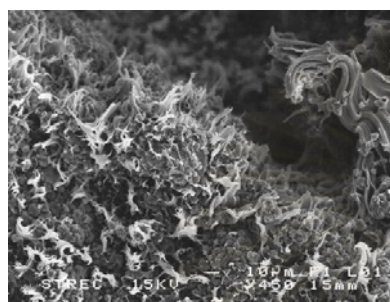


**รูปที่ 4.13** ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

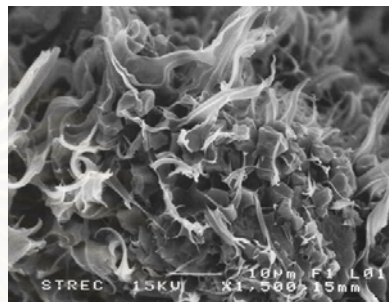
หมายเหตุ : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ไม่ผสมแป้งข้าวเหนียว และที่ผสมแป้งข้าวเหนียวที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถตีขึ้นทดสอบให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากขึ้นทดสอบมีความเหนียวกว่า รับแรงกระแทกได้ดีกว่า จึงไม่สามารถรายงานค่าความทนแรงกระแทกได้

#### 4.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

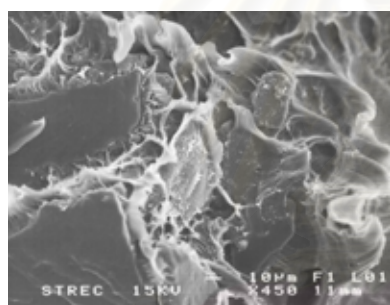
การศึกษาสัณฐานวิทยา เป็นการศึกษากาจากชั้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบความทนแรงกระแทก ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



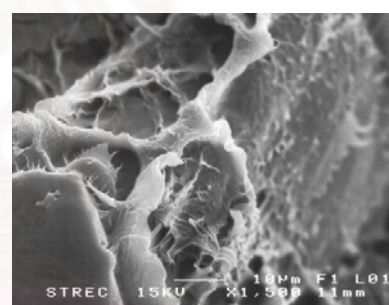
LDPE/GST20 (กำลังขยาย 450 เท่า)



LDPE/GST20 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



LDPE/MGST20 (กำลังขยาย 450 เท่า)



LDPE/MGST20 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

**รูปที่ 4.14** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกที่ปริมาณแป้ง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

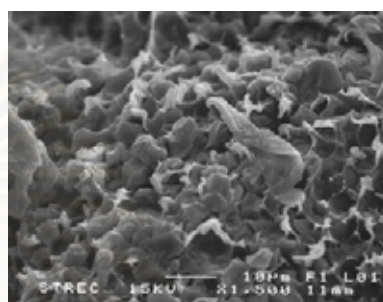
เมื่อเปรียบเทียบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรที่ 20 เปอร์เซ็นต์ จะสังเกตเห็นว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร มีรอยฉีกขาดจากการเสียดสีที่ชัดเจนกว่าและมีความขรุขระมากกว่า เนื่องจากมีการหลอมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้น้อยกว่าแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ก็ จะเห็นความขรุขระและ



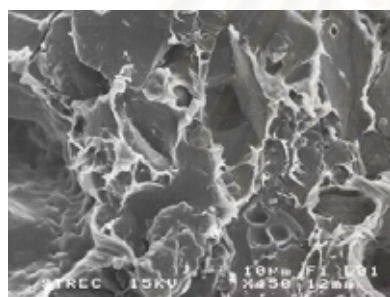
การเสียดสภาพเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น แต่ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรยังคงเป็นแบบเดียวกับเมื่อใช้ปริมาณแป้ง 20 เปอร์เซ็นต์



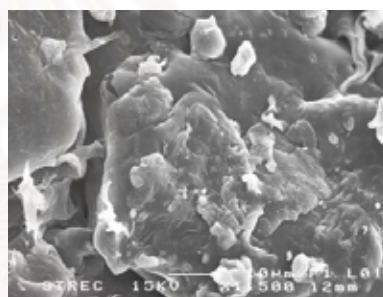
LDPE/GST50 (กำลังขยาย 450 เท่า)



LDPE/GST50 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



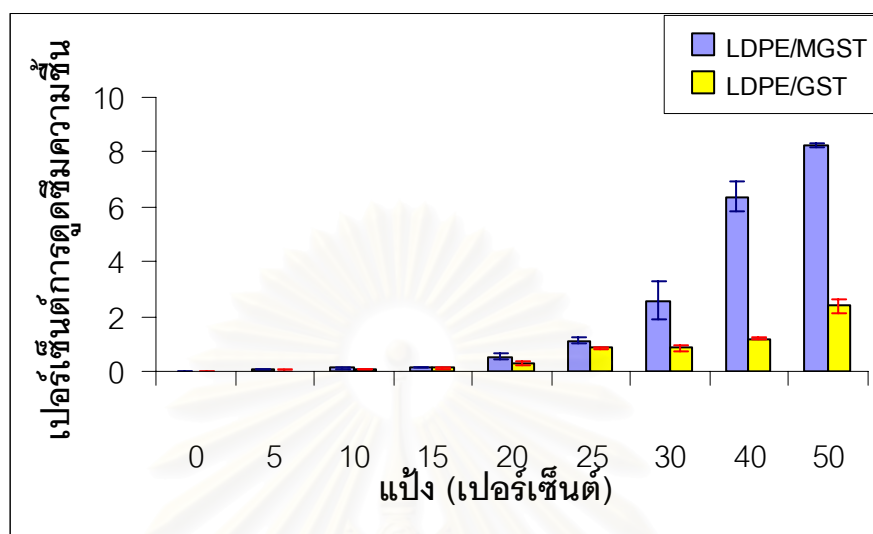
LDPE/MGST50 (กำลังขยาย 450 เท่า)



LDPE/MGST50 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

**รูปที่ 4.15** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกที่ปริมาณแป้ง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

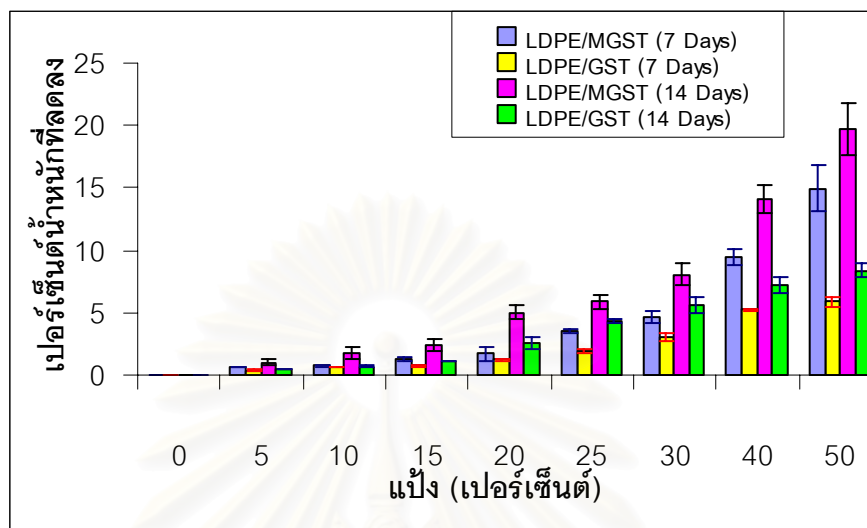
#### 4.6 การดูดซึมความชื้น



**รูปที่ 4.16** เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นของพอลิเอทิลีนที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสูงกว่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในสายโซ่โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรมีหมู่ที่ชอบน้ำ ซึ่งได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอสเทอร์ และหมู่คาร์บอกซิลิก มากกว่าในแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรที่มีแต่หมู่ไฮดรอกซิล จึงทำให้สามารถดูดซึมความชื้นได้มากกว่า

#### 4.7 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ



**รูปที่ 4.17** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (LDPE/MGST) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งข้าวเหนียวไม่ตัดแปร (LDPE/GST) ที่อัตราส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อฝังชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเป็นเวลา 7 วัน และ 14 วัน เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่า มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 14 วัน พบว่า เมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวทั้งที่ตัดแปรและไม่ตัดแปรลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะว่าปริมาณแป้งข้าวเหนียวที่น้อยเกินไปนั้น ยังแทรกอยู่ในเนื้อของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้มาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวตัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวไม่ตัดแปร และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวที่ตัดแปร

โครงสร้างทางเคมีด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีสายโซ่โมเลกุลของแป้งข้าวเหนียวห่างกันมากขึ้น ทำให้น้ำแทรกตัวได้มากขึ้น ซึ่งน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน ดังนั้น การเติมแป้งข้าวเหนียวจึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปร ที่สายโซ่โมเลกุลอยู่ชิดกันเนื่องจากแรงของพันธะไฮโดรเจน ทำให้น้ำแทรกตัวได้น้อย การดูดซึ่มความชื้นน้อย ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพน้อยตามไปด้วย และการฝังดินเป็นเวลา 14 วันมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพสูงกว่าการฝังดินเป็นเวลา 7 วัน เนื่องจากการฝังดินเป็นเวลายาวนาน ระยะเวลาการดูดซึ่มความชื้นของแป้งสูงขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึ่มความชื้น และการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความทนแรงดึงลดลง ในขณะที่การเติมแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร ส่งผลให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าความทนแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีขนาดเล็ก ซึ่งเปรียบเหมือนสารก่อผลึกให้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในขณะที่โครงสร้างทางเคมีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรจะมีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากหมู่ที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล คือหมู่เอสเทอร์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

5.1.2 การเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร ส่งผลให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำลง และยังมีมอดุลัสเพิ่มขึ้น

5.1.3 การเติมแป้งข้าวเหนียว ส่งผลให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปรจะมีความทนแรงดึงต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร ในปริมาณที่เท่ากัน

5.1.4 การเติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรส่งผลให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความทนแรงกระแทกต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

5.1.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวดัดแปร สามารถดูดซับความชื้น และเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เติมแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่า หากต้องการใช้งานที่เน้นการย่อยสลายทางชีวภาพสูง ควรเลือกใช้แป้งข้าวเหนียวดัดแปร หากเป็นงานที่ต้องการการย่อยสลายทางชีวภาพไม่สูงนัก แต่ต้องการความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ด้วย ควรใช้แป้งข้าวเหนียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวเหนียวเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น เช่น อาจเพิ่มจำนวนครั้งในการผสมขึ้นต้นด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง หรืออาจใส่สารช่วยผสม

5.2.2 ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม ในรูปแบบอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน

5.2.3 ควรศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเก็บชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม เช่น ระยะเวลา หรือ อุณหภูมิในการเก็บชิ้นงาน

5.2.4 ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแป้งข้าวเหนียว ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย และหากสามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ ก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพสู่อุตสาหกรรมด้วย



## รายการอ้างอิง

1. 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.
2. มานิตา จิตต์หรรษา และ ลินดา ชัยชำนะภัย. ภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544.
3. สมพร รุ่งสัมพันธ์กุล และ สุพิชญา ชื่นชนม์. ภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งข้าวเหนียวเพื่อใช้ในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545.
4. จักรกฤษณ์ โสวิวัชน์ และ ศรายุทธ์ คุสกุล. การเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งธรรมชาติดัดแปรชนิดต่างๆ. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544.
5. ชลดา ฤตวิรุฬห์. เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.
6. สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์. เอกสารประกอบการสอนวิชาเส้นใยสิ่งทอ. กรุงเทพฯ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545.
7. ณัฐพงษ์ กริชยานนท์ และ ทศน์พล ธัญพิชชา. การเตรียมโฟมจากกราฟต์โคพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังและสไตรีน. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545.

8. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาการดัดแปรพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546.
9. Thiebaud, S.; Aburto, J.; Alric, I.; Borredon, E.; Bikiaris, D.; Prinos, J.; and Panayiotou, C. Properties of fatty-acid ester of starch and their blends with LDPE. Journal of Applied Polymer Science 65(1997): 705.
10. Ramani, N.; Ramsay, J. A. ; and Vergooht, H. Method of preparing biodegradable modified-starch moldable product and films. United States Patent 5(1999): 889, 847.
11. Aburto, J.; Thiebaud, S.; Alric, I.; Borredon, E.; Bikiaris, D.; Prinos, J.; and Panayiotou, C. Properties of octanoate starch and it blends with polyethylene. Carbohydrate Polymer 34(1996): 101-112.
12. Thakore. I. M.; Desai, S.; Sarawade, B. D.; and Davi, S. Studies on biodegradability, morphology and thermomechanical properties of LDPE/modified starch blend. European Polymer Journal 37(2001): 151-160.
13. Kaitkamjornwong, S.; Thakeow, P.; Sonsak, M. Chemical modification of cassava starch for degradable polyethylene sheets. Polymer Degradable and Stability 73(2001): 363-375.
14. Jang, B. C.; Huh, S. Y.; Jang, J. G.; and Bae, Y. C. Mechanical properties and morphology of modified HDPE/starch reactive blends. Journal of Applied Polymer Science 82(2001): 3313-3320.
15. สุวิทย์ เอื้อโสภณ. ผลของพลาสติกไฮเซออร์ตอสสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังดัดแปร. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546.

16. Sagar, A. D. and Merrill, E. W. Properties of fatty-acid ester of starch. Journal of Applied Polymer Science 58(1995) :1647.
17. Ismail, H.; Nawang, R.; Danjaji, D. I.; Ishiaku, U. S.; and Ishak, Z. A. Mechanical properties of Sago starch-filled linear-low density polyethylene composites. Polymer Testing 20 (2001) : 167.
18. Ismail, H.; Nawang, R.; Danjaji, D. I.; Ishiaku, U. S.; and Ishak, Z. A. Degradation study and moisture uptake of sago starch filled linear-low density polyethylene composites. Polymer Testing 20 (2001) : 75.
19. Kaitkamjornwong, S.; Pabunrung T.; Wongvisetsirikul, N.; and Prasassarakich, P. Degradation of cassava starch-polyethylene blends. J. Sci. Soc. Thailand 13 (1997) : 135.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ก.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (MGST) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปร (GST) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งข้าวเหนียวที่ 0-50 เปอร์เซ็นต์

### ก.1.1 สมบัติด้านแรงดึง

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
0	7.04	113.59	54.90
	6.87	122.67	50.31
	7.55	133.58	34.39
	6.59	114.08	47.05
	7.25	126.54	52.32
Average	7.06 ± 0.36	122.09 ± 8.49	47.79 ± 8.02

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
5	5.44	98.46	75.14
	5.48	58.31	71.63
	5.14	85.47	76.86
	6.18	74.55	71.87
	5.39	101.34	66.25
Average	5.53 ± 0.39	83.63 ± 17.75	72.35 ± 4.06

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
10	6.57	63.89	85.16
	6.05	69.93	89.58
	6.30	93.69	85.55
	5.99	84.57	80.26
	6.29	72.23	78.86
Average	6.24 ± 0.23	76.86 ± 12.04	83.88 ± 4.34

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
15	5.99	34.57	97.68
	5.55	31.23	93.83
	6.30	27.55	94.59
	5.99	37.26	93.54
	6.29	28.45	108.26
Average	6.02 ± 0.31	31.81 ± 4.09	97.58 ± 6.19

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
20	3.69	30.65	85.55
	4.33	24.32	92.18
	4.01	25.71	99.93
	4.77	22.58	103.59
	4.26	21.55	109.95
Average	4.21 ± 0.40	24.96 ± 3.56	98.24 ± 9.57



% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
25	4.69	13.13	110.55
	3.56	26.35	92.84
	2.64	20.23	84.77
	3.63	13.91	100.46
	3.95	16.63	104.45
Average	$3.70 \pm 0.74$	$18.05 \pm 5.41$	$98.61 \pm 10.06$

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
30	3.59	17.94	105.46
	3.96	26.56	86.29
	3.47	13.91	91.21
	5.39	22.55	118.77
	3.54	11.37	89.33
Average	$3.99 \pm 0.80$	$18.4642 \pm 6.20$	$98.21 \pm 13.65$

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
40	3.26	9.95	161.96
	3.46	10.58	164.24
	3.22	15.95	172.21
	3.57	6.474	141.47
	3.22	8.45	135.53
Average	$3.35 \pm 0.16$	$10.28 \pm 3.54$	$155.08 \pm 15.75$

% MGST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
50	2.96	9.85	130.92
	2.41	5.95	166.37
	2.39	7.88	112.43
	2.76	5.84	171.12
	2.29	8.36	109.55
Average	2.56 ± 0.28	7.58 ± 1.69	138.08 ± 29.22

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young,s Modulus (MPa)
5	8.80	34.55	192.46
	8.61	39.70	187.44
	9.21	39.54	187.18
	8.87	39.93	189.03
	8.70	35.45	191.24
Average	8.84 ± 0.23	37.84 ± 2.61	189.47 ± 2.33

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
10	8.79	12.06	238.45
	7.49	13.45	215.15
	8.54	14.14	226.80
	8.36	16.55	230.15
	7.89	16.58	220.99
Average	8.21 ± 0.52	14.56 ± 1.98	226.31 ± 8.88

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
15	7.62	13.80	303.78
	7.75	11.71	259.25
	7.99	12.77	281.52
	8.01	14.01	288.22
	8.53	14.85	274.41
Average	$7.98 \pm 0.35$	$13.43 \pm 1.21$	$281.43 \pm 16.48$

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
20	7.92	12.70	222.20
	7.46	9.05	244.33
	7.69	10.87	309.24
	7.96	9.45	312.36
	7.33	10.12	311.37
Average	$7.67 \pm 2.77$	$10.44 \pm 1.44$	$279.90 \pm 43.30$

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
25	7.19	8.84	368.53
	7.32	7.11	237.08
	7.88	9.52	395.22
	7.65	8.90	284.42
	7.015	7.01	361.29
Average	$7.41 \pm 0.35$	$8.28 \pm 1.41$	$329.31 \pm 66.00$

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
30%	8.48	5.70	265.13
	9.01	4.55	461.19
	7.76	3.66	389.24
	6.49	5.64	442.40
	6.54	5.11	398.55
Average	$7.66 \pm 1.31$	$4.95 \pm 0.85$	$391.30 \pm 76.60$

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young,s Modulus (MPa)
40	5.99	4.20	388.99
	6.91	5.54	462.55
	5.84	5.23	458.23
	7.86	4.23	425.99
	6.24	3.88	398.74
Average	$6.57 \pm 0.83$	$4.62 \pm 0.72$	$426.90 \pm 33.48$

% GST	Stress at Maximum Load (MPa)	%Strain at Maximum Load	Young's Modulus (MPa)
50	6.06	4.66	492.96
	6.04	4.95	493.98
	6.24	4.01	489.21
	6.02	3.75	545.22
	6.42	4.02	499.25
Average	$6.16 \pm 0.17$	$4.28 \pm 0.50$	$504.13 \pm 23.25$

## ก.1.2 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
0	24.88	4.15	25.43
	23.36	4.59	30.40
	24.91	5.87	37.35
	24.95	4.35	26.99
	25.57	4.15	24.90
Average	24.73 ± 0.82	4.62 ± 0.72	29.02 ± 5.13

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
5	24.95	4.76	30.11
	15.45	5.01	53.36
	19.07	5.08	48.30
	16.75	5.08	50.71
	16.25	4.59	45.13
Average	18.49 ± 3.85	4.90 ± 0.22	45.52 ± 9.13

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
10	24.91	5.28	36.46
	19.87	6.29	51.48
	24.91	5.25	35.56
	24.72	6.54*	41.09
	16.69	5.09	50.18
Average	22.22 ± 3.77	5.69 ± 0.67	42.96 ± 7.50

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
15	17.09	5.09	49.09
	16.37	5.28	52.68
	16.82	5.81	57.38
	15.49	6.49	62.99
	20.25	6.04	49.30
Average	17.20 ± 1.81	5.74 ± 0.57	54.29 ± 5.91

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
20	15.02	5.49	55.95
	13.55	4.88	54.99
	15.37	6.14	60.54
	16.66	5.75	54.02
	16.48	5.97	58.24
Average	15.42 ± 1.26	5.64 ± 0.49	56.75 ± 2.63

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
25	15.03	6.30	62.18
	15.87	6.48	63.29
	14.84	6.37	65.53
	16.4	6.64	62.73
	13.24	6.55	77.77
Average	15.08 ± 1.21	6.47 ± 0.13	66.30 ± 6.54



%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
30	14.00	6.97	79.49
	13.31	6.77	81.54
	13.47	6.38	69.97
	13.31	7.16	87.55
	14.32	6.92	74.04
Average	13.68 ± 0.46	6.84 ± 0.29	78.51 ± 6.80

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
40	11.18	6.08	77.90
	9.31	5.56	86.69
	12.13	6.93*	83.17
	9.58	4.95*	79.72
	11.23	5.70	73.99
Average	10.68 ± 1.20	5.84 ± 0.73	80.29 ± 4.87

%MGST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
50	4.19	4.68	164.72
	5.35	5.30	193.66
	3.36	4.90	212.49*
	3.05	4.62	166.02
	3.99	4.48	160.89
Average	3.99 ± 0.89	4.79 ± 0.32	179.56 ± 15.05

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
5	19.84	4.83	37.45
	20.18	4.89	39.21
	17.18	4.86	44.73
	19.87	3.96	30.50
	18.43	4.42	37.89
Average	19.10 ± 1.27	4.59 ± 0.40	37.95 ± 5.08

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
10	18.65	4.78	44.19
	19.26	4.34	38.93
	16.86	4.93	52.55
	19.08	6.12	55.66
	17.42	6.54	66.58
Average	18.25 ± 1.06	5.34 ± 0.94	51.58 ± 10.69

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
15	20.37	4.74	37.29
	19.65	5.70	45.25
	19.44	4.82	38.68
	17.75	5.25	46.47
	18.12	6.08	53.73
Average	19.07 ± 1.10	5.32 ± 0.57	44.28 ± 6.62

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
20	19.54	6.28	49.59
	20.12	6.51	48.99
	18.46	5.41	45.63
	16.58	6.81	63.35
	17.23	5.45	47.58
Average	18.38 ± 1.50	6.09 ± 0.63	51.03 ± 7.06

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
25	20.44	5.37	41.06
	17.75	6.34	56.20
	16.45	6.17	56.81
	13.35	6.87	79.40
	18.45	6.27	52.22
Average	17.29 ± 2.63	6.21 ± 0.54	57.134 ± 13.96

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
30	12.88	5.93	69.56
	17.74	6.17	53.09
	17.23	6.39	53.44
	15.54	7.48	72.91
	14.32	7.18	73.27
Average	15.54 ± 2.02	6.63 ± 0.67	64.45 ± 10.32

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
40	13.62	6.813	74.97
	13.43	6.48	71.26
	12.02	5.15	64.86
	13.32	7.53	84.43
	11.44	7.04	91.30
Average	12.77 ± 0.97	6.60 ± 0.90	77.36 ± 10.53

%GST	Deformation at Maximum Load (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (MPa)
50	9.42	6.26	102.19
	9.04	6.45	105.80
	8.47	6.33	113.58
	9.22	5.56	90.957
	9.24	7.29	121.37
Average	9.08 ± 0.67	6.38 ± 0.62	106.78 ± 11.53

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ก.1.3 ความแรงกระแทก

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
10	14.51
	17.09
	17.22
	14.86
	15.68
Average	15.87 ± 1.25

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
10	0.012.25
	0.015.38
	0.012.51
	0.014.87
	0.013.42
Average	13.69 ± 1.40

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
15	15.63
	17.34
	17.38
	17.53
	18.44
Average	17.26 ± 1.02

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
15	9.37
	8.62
	10.04
	8.51
	10.21
Average	9.35 ± 0.79

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
20	9.82
	16.35*
	10.52
	12.92
	16.04*
Average	13.13 ± 1.63

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
20	7.54
	6.26
	7.35
	7.12
	7.35
Average	7.13 ± 0.50

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
25	3.81
	3.29
	4.13
	2.19
	4.04
Average	3.49 ± 0.80

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
25	4.47
	5.14
	3.77
	5.00
	4.09
Average	4.49 ± 0.58

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
30	2.67
	4.07
	2.64
	3.49
	3.51
Average	3.28 ± 0.62

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
30	3.20
	4.02
	3.17
	4.01
	3.37
Average	3.55 ± 0.43

%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
40	1.70
	3.35
	3.62
	2.80
	2.89
Average	2.87 ± 0.74

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
40	3.00
	2.92
	2.61
	2.56
	2.99
Average	2.82 ± 0.21



%MGST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
50	2.12
	0.70
	1.63
	1.28
	1.63
Average	1.47 ± 0.52

%GST	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )
50	1.31
	1.17
	1.01
	1.08
	1.27
Average	1.17 ± 0.13

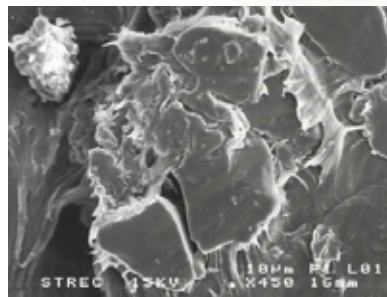
หมายเหตุ : \* คือค่าที่ไม่ใช้ในการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

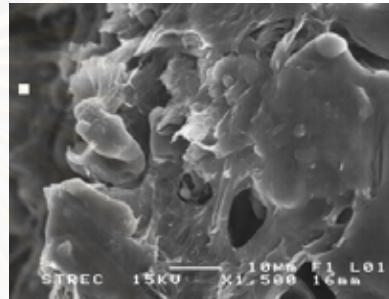
## ภาคผนวก ข

ข.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

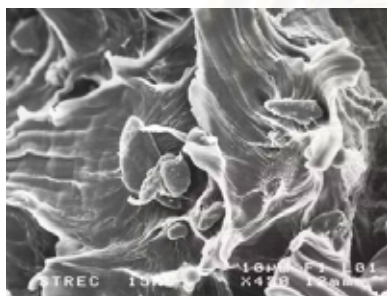
ข.1.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ



LDPE/MGST10 (450x)



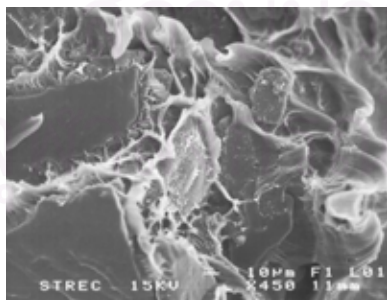
LDPE/MGST10 (1,500x)



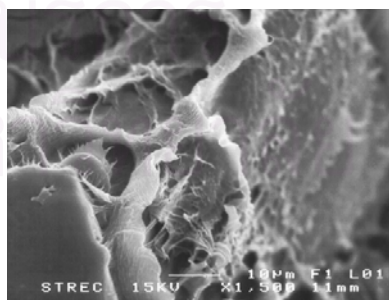
LDPE/MGST15 (450x)



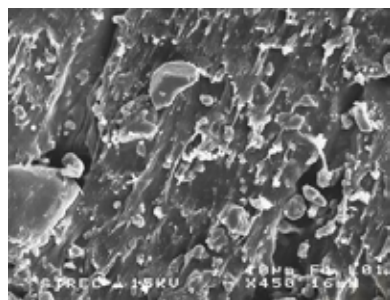
LDPE/MGST15 (1,500x)



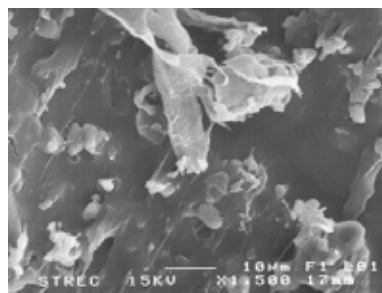
LDPE/MGST20 (450x)



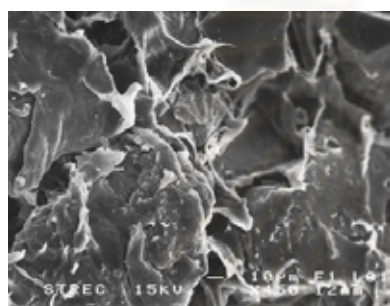
LDPE/MGST20 (1,500x)



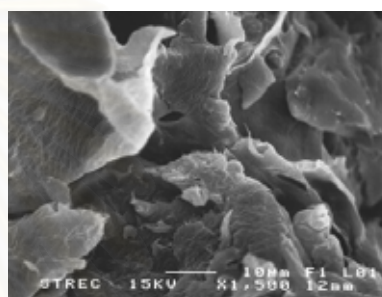
LDPE/MGST25 (450x)



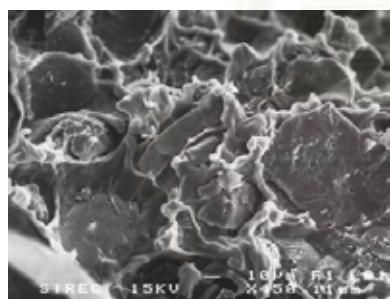
LDPE/MGST25 (1,500x)



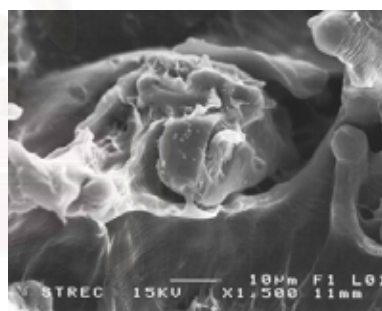
LDPE/MGST30 (450x)



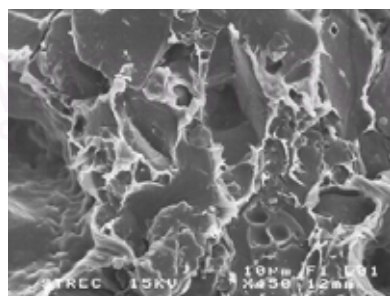
LDPE/MGST30 (1,500x)



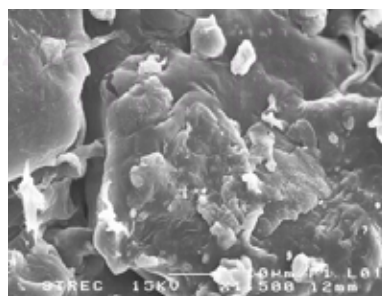
LDPE/MGST40 (450x)



LDPE/MGST40 (1,500x)

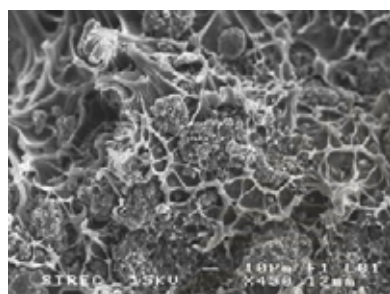


LDPE/MGST50 (450x)

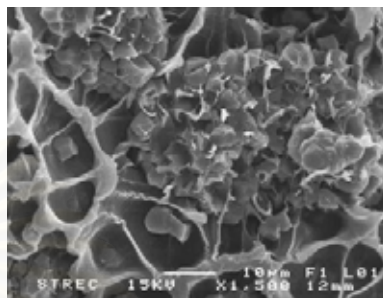


LDPE/MGST50 (1,500x)

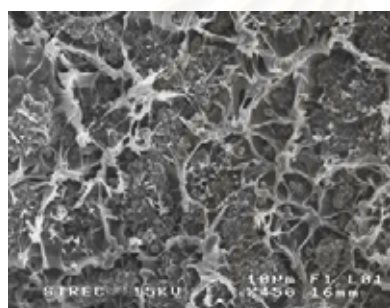
ข.1.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ



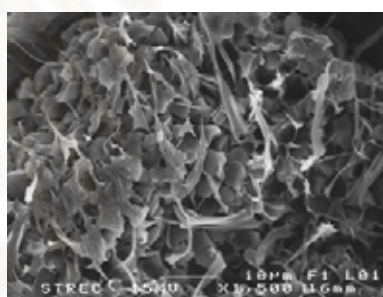
LDPE/GST10 (450x)



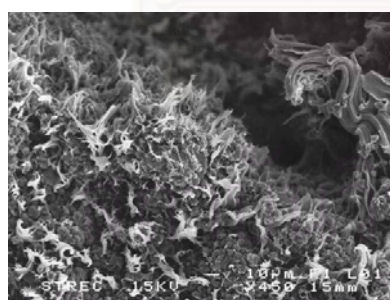
LDPE/GST10 (1,500x)



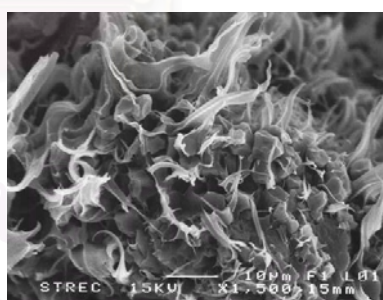
LDPE/GST15 (450x)



LDPE/GST15 (1,500x)

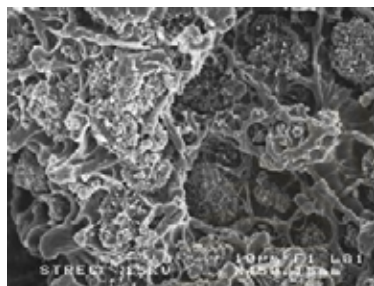


LDPE/GST20 (450x)

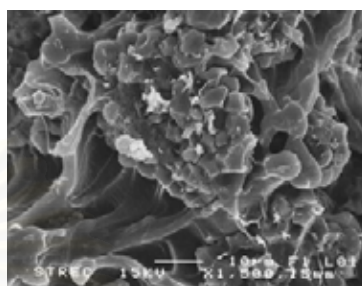


LDPE/GST20 (1,500x)

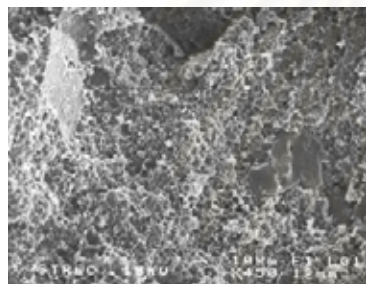




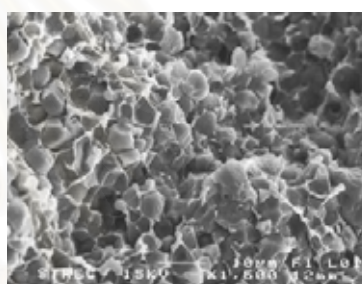
LDPE/GST25 (450x)



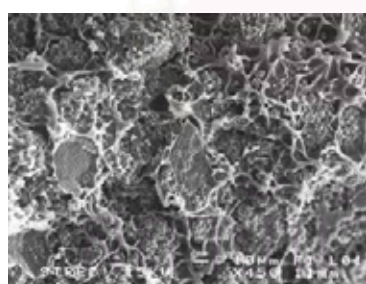
LDPE/GST (1,500x)



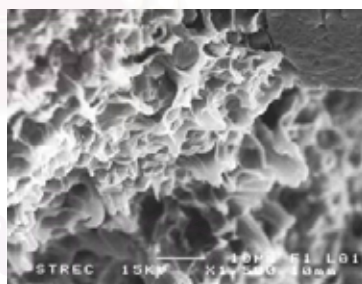
LDPE/GST30 (450x)



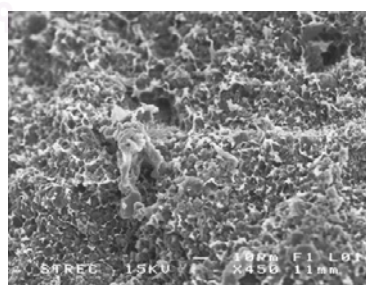
LDPE/GST30 (1,500x)



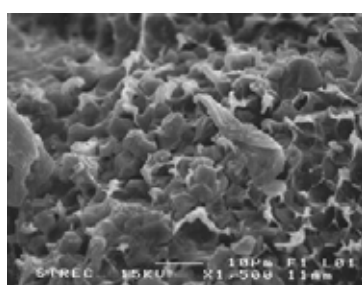
LDPE/GST40 (450x)



LDPE/GST40 (1,500x)



LDPE/GST50 (450x)



LDPE/GST50 (1,500x)

## ภาคผนวก ค

ค.1 ผลการทดสอบการดูดซึ่มความชื้นของพอลิเมอร์ผสม

%MGST	%Moisture Absorption
5	0.06496
	0.05892
	0.06894
Average	$0.06427 \pm 0.00505$

%GST	%Moisture Absorption
5	0.04060
	0.03251
	0.03286
Average	$0.03533 \pm 0.0046$

%MGST	%Moisture Absorption
10	0.1204
	0.10938
	0.10722
Average	$0.11233 \pm 0.0071$

%GST	%Moisture Absorption
10	0.09397
	0.0908
	0.07583
Average	$0.08687 \pm 0.0097$

%MGST	%Moisture Absorption
15	0.13723
	0.11746
	0.12887
Average	$0.12786 \pm 0.0099$

%GST	%Moisture Absorption
15	0.11183
	0.11902
	0.10353
Average	$0.11146 \pm 0.0078$

%MGST	%Moisture Absorption
20	0.44509
	0.54955
	0.63754
Average	0.54406 ± 0.0963

%GST	%Moisture Absorption
20	0.24648
	0.32203
	0.34059
Average	0.30304 ± 0.0499

%MGST	%Moisture Absorption
25	1.03218
	1.11877
	1.21303
Average	1.12133 ± 0.0905

%GST	%Moisture Absorption
25	0.90207
	0.8001
	0.84391
Average	0.84869 ± 0.0512

%MGST	%Moisture Absorption
30	2.49204
	2.61353
	2.60801
Average	2.57119 ± 0.0686

%GST	%Moisture Absorption
30	0.7552
	0.94084
	0.86276
Average	0.85293 ± 0.0932

%MGST	%Moisture Absorption
40	7.02242
	5.89701
	6.22643
Average	6.38195 ± 0.5786

%GST	%Moisture Absorption
40	1.2377
	1.13672
	1.21349
Average	1.19597 ± 0.0527



%MGST	%Moisture Absorption
50	7.45065
	7.33458
	9.93719
Average	8.24081 ± 0.0821

%GST	%Moisture Absorption
50	2.61246
	2.12251
	2.39222
Average	2.37573 ± 0.2454



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม

ค.2.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม เมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 7 วัน

%MGST	%Weight Loss	%GST	%Weight Loss
5	0.643660	5	0.287283
	0.667662		0.344432
	0.642148		0.422100
Average	0.651157 ± 0.014	Average	0.351272 ± 0.068

%MGST	%Weight Loss	%GST	%Weight Loss
10	0.81463	10	0.62476
	0.71702		0.57354
	0.70987		0.59133
Average	0.74717 ± 0.059	Average	0.59655 ± 0.026

%MGST	%Weight Loss	%GST	%Weight Loss
15	1.3845	15	0.71257
	1.23536		0.69211
	1.12288		0.76957
Average	1.24758 ± 0.131	Average	0.72475 ± 0.040

%MGST	%Weight Loss	%GST	%Weight Loss
20	1.02124	20	1.19247
	1.90977		1.26687
	2.16531		1.29012
Average	1.69877 ± 0.601	Average	1.24982 ± 0.051

%MGST	%Weight Loss
25	3.39358
	3.7694
	3.56116
Average	3.57471 ± 0.188

%GST	%Weight Loss
25	1.7863
	1.88614
	2.08509
Average	1.91918 ± 0.152

%MGST	%Weight Loss
30	5.17634
	4.37925
	4.35158
Average	4.63572 ± 0.468

%GST	%Weight Loss
30	2.78321
	3.35066
	2.92741
Average	3.02043 ± 0.295

%MGST	%Weight Loss
40	9.71223
	10.0012
	8.77815
Average	9.49718 ± 0.640

%GST	%Weight Loss
40	5.24956
	5.32908
	5.07917
Average	5.21927 ± 0.128

%MGST	%Weight Loss
50	12.9558
	15.1816
	16.6854
Average	14.9409 ± 1.876

%GST	%Weight Loss
50	6.29673
	5.53753
	5.72381
Average	5.8526 ± 0.396

ค.2.2 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม เมื่อฝังดินเป็นระยะเวลา 14 วัน

%MGST	%Weight Loss
5	0.7772
	1.00771
	1.26911
Average	1.01801 ± 0.246

%GST	%Weight Loss
5	0.46631
	0.50998
	0.48855
Average	0.48828 ± 0.022

%MGST	%Weight Loss
10	2.25359
	1.32594
	1.55841
Average	1.71264 ± 0.483

%GST	%Weight Loss
10	0.59276
	0.66651
	0.72221
Average	0.66049 ± 0.065

%MGST	%Weight Loss
15	2.29492
	2.83935
	1.9303
Average	2.35485 ± 0.457

%GST	%Weight Loss
15	1.13012
	1.07729
	1.16148
Average	1.12296 ± 0.042

%MGST	%Weight Loss
20	4.39329
	5.53897
	5.13163
Average	5.02129 ± 0.581

%GST	%Weight Loss
20	2.03719
	2.5793
	3.03124
Average	2.54925 ± 0.498

%MGST	%Weight Loss
25	5.85997
	6.36453
	5.35319
Average	5.85923 ± 0.506

%GST	%Weight Loss
25	4.43858
	4.09079
	4.48795
Average	4.3391 ± 0.216

%MGST	%Weight Loss
30	7.8308
	7.27405
	9.01747
Average	8.04077 ± 0.890

%GST	%Weight Loss
30	5.41806
	6.32027
	5.02833
Average	5.58889 ± 0.663

%MGST	%Weight Loss
40	13.7442
	13.1792
	15.4439
Average	14.1224 ± 1.179

%GST	%Weight Loss
40	7.30104
	6.58263
	7.88535
Average	7.25634 ± 0.653

%MGST	%Weight Loss
50	21.569
	20.019
	17.4885
Average	19.6922 ± 2.059

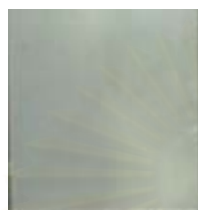
%GST	%Weight Loss
50	8.90992
	7.86895
	8.44159
Average	8.40682 ± 0.521

ค.2.3 รูปแสดงลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

ค.2.3.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมก่อนการทดสอบ



LDPE/MGST5



LDPE/GST5



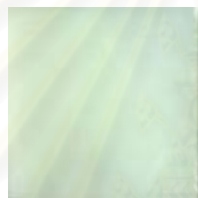
LDPE/MGST10



LDPE/GST10



LDPE/MGST15



LDPE/GST15



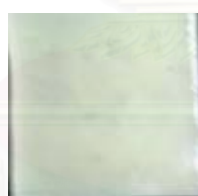
LDPE/MGST20



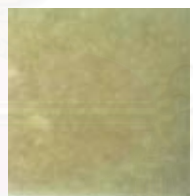
LDPE/GST20



LDPE/MGST25



LDPE/GST25



LDPE/MGST30



LDPE/GST30



LDPE/MGST40



LDPE/GST40



LDPE/MGST50

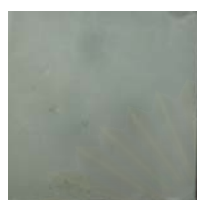


LDPE/GST50

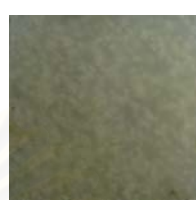
## ค.2.3.2 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมหลังการทดสอบเป็นระยะเวลา 7 วัน



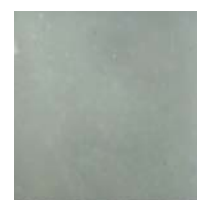
LDPE/MGST5



LDPE/GST5



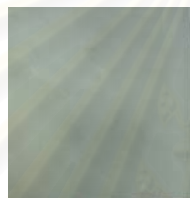
LDPE/MGST10



LDPE/GST10



LDPE/MGST15



LDPE/GST15



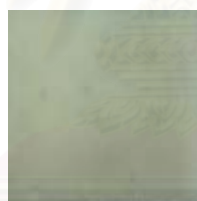
LDPE/MGST20



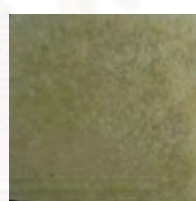
LDPE/GST20



LDPE/MGST25



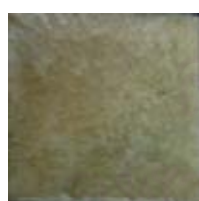
LDPE/GST25



LDPE/MGST30



LDPE/GST30



LDPE/MGST40



LDPE/GST40



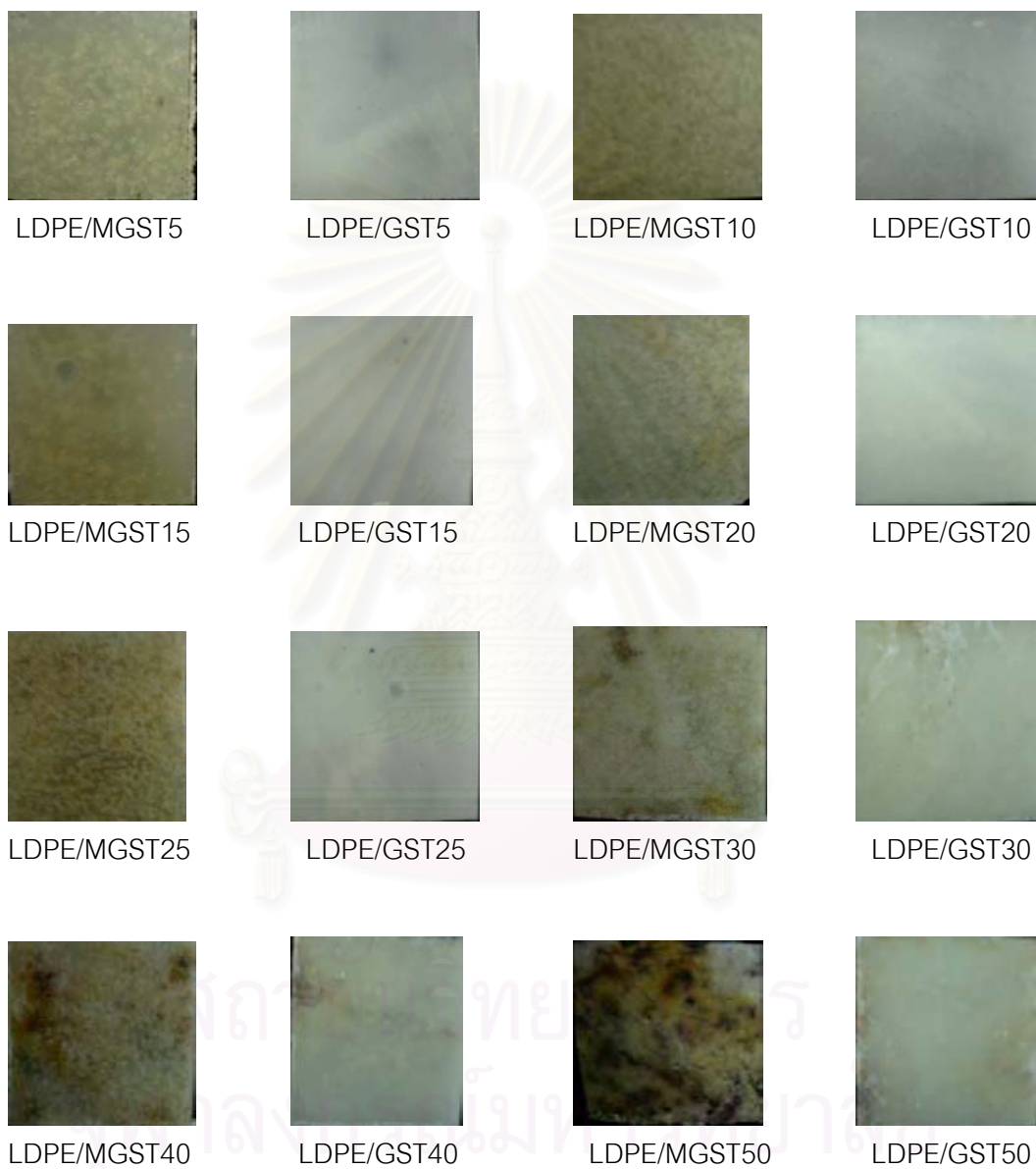
LDPE/MGST50



LDPE/GST50



## ค.2.3.3 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมหลังการทดสอบเป็นระยะเวลา 14 วัน



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนรศิษฐ์ จันทรวงศ์ เกิดวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2524 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2545 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย