



การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ  
กับแป้งมันสำปะหลัง

Preparation and Properties of Low Density Polyethylene  
Blended with Cassava Starch

วรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์  
Wannarat Panwiriyarat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Prince of Songkla University

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

0

เลขที่	TP1180, P65 044 2552 B 2
Bib Key	313468
	11 ต.พ. 2552

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์      การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ  
กับแป้งมันสำปะหลัง  
ผู้เขียน      นางสาววรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์  
สาขาวิชา      วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก      คณะกรรมการสอบ  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)      (ดร.วันจิตา ชินผา) ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล)      กรรมการ

(ดร.ภาสรี เล้ากิจเจริญ)      กรรมการ

(ดร.พัชรภรณ์ ฐิติวงศ์เสวต)      กรรมการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์  
และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....  
.....  
.....  
.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง
ผู้เขียน	นางสาววรรณรัตน์ พันธุ์วิริรัตน์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2551

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม พบว่าการหลอมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในเครื่องผสมแบบปิดก่อน แล้วเติมแป้งมันสำปะหลังเข้าไปผสมที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 นาที สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมได้และให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ดี และขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดความดันที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้แก่ อิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอล (0-50 ส่วนต่อร้อยส่วนของพอลิเมอร์โดยน้ำหนัก) อิทธิพลของปริมาณน้ำ (0-40 ส่วนต่อร้อยส่วนของพอลิเมอร์โดยน้ำหนัก) และอิทธิพลของแป้งที่แปรปริมาณ 0-70 % โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมกลีเซอรอลและน้ำในพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจะให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเค้น ณ จุดขาด ค่าความเครียด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน มีระยะห่างระหว่างเฟสอย่างชัดเจน ในการศึกษาอิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 0-70 % โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาที่ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 2 ชนิดร่วมกัน คือ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เพื่อให้แรงดึงดูดระหว่างเฟสแป้งและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำดีขึ้น เป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้สูงขึ้น คาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันที่ผิวหน้าระหว่างเฟสในระหว่างการผลิต ซึ่งใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.0 ส่วนต่อร้อยส่วนของพอลิเมอร์โดยน้ำหนัก และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.5 ส่วนต่อร้อยส่วนของพอลิเมอร์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งตามลำดับ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่ามอดุลัสและความเค้น ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก มีค่าลดลง ส่วนที่ปริมาณแป้งตั้งแต่ 50 % โดยน้ำหนักขึ้นไป ความเครียด ณ จุดขาด มีค่า

ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อการ  
ศึกษาได้รับการปรับปรุง เมื่อปริมาณแข็งมากกว่า 40 % โดยน้ำหนัก และความสามารถในการ  
ดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด พบว่า มีการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเม็ดแข็ง  
มันสำปะหลัง นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกลศาสตร์ทางความร้อนเชิงพลศาสตร์ ช่วย  
ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแข็งในระหว่างทำการผสม  
ศึกษาการเชื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็งในปริมาณต่างๆ หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา  
24 สัปดาห์ พบว่าเมื่อปริมาณแข็งเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่หายไปหลังฝังดินเพิ่มขึ้น และส่งผลให้  
สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่ม  
ปฏิกิริยามีอัตราการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม  
ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน พบว่าเม็ดแข็งหายไป  
เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น และพบสปอร์ของเชื้อจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์หลังฝังดิน  
นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของแข็งกับ  
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชัดเจนยิ่งขึ้น

**Thesis Title** Preparation and Properties of Low Density Polyethylene Blended with Cassava Starch  
**Author** Miss Wannarat Panwiriyarat  
**Major Program** Polymer Science and Technology  
**Academic Year** 2008

### ABSTRACT

Low density polyethylene (LDPE) blended with cassava starch was prepared by using an internal mixer at 120°C and rotor speed of 100 rpm for 8 min, then were compressed at 120°C. Variables included the effect of glycerol content (0-50 pphr), water content (0-40 pphr) and starch content (0-70 wt%) on the properties of polymer blends. The mechanical properties of the blends decreased when glycerol and water were added. Young's modulus value for the blends increased with the incorporation of starch, while the tensile strength and elongation at break of the blends decreased. The LDPE/cassava starch blends demonstrated the two phase morphology, classical of immiscible blends. The fracture surface micrographs showed the gaps of interfacial between LDPE and cassava starch phases. Investigating effect of benzoyl peroxide (BPO) and potassium persulfate (PPS) as co-initiators for preparation of an *in situ* graft copolymer or reactive blends on mechanical properties of the blends was studied. When initiators were added to the blends, the Young's modulus and the tensile strength were higher than the blends without initiators. The initiators addition did not improve the properties when cassava starch content was 50 wt% or higher, there was no difference among the blends with and without initiators, except 30 and 40 wt% starch addition. The elongation at break values of the blends containing 30 and 40 wt% starch which adding initiators were lower than the blends with initiators. In term of the tear strength of LDPE/cassava starch blends, addition of initiators to the blends increased the tear strength only when starch content form 50 to 70 wt% was added. The phase adhesion and compatibility of LDPE matrix and starch granules were improved in the blends containing initiators. The blends with initiators demonstrated the partly connection between starch granule and LDPE. Also, analysis of DMTA could indirectly prove the reaction of LDPE and starch granule. The biodegradation of the blends

followed the burial in soil for 24 weeks. The weight loss and change in tensile property of the blends containing initiators were lower than the blends without initiators. SEM photographs of the blends showed that holes on the surface of the blends as the starch consumption by microorganism and the spore of microorganism on the blends were detected after the blends buried in soil. In addition, the connection of LDPE and starch phase was also observed.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาแนะนำแนวทางการทำวิจัย และคอยให้คำปรึกษาที่ดีโดยตลอดมา ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัทเอนเนอร์ลีสตาร์ซ ที่เอื้อเฟื้อและให้ความอนุเคราะห์แบ่งมันสำปะหลังในการทำงานวิจัย และขอบพระคุณ ดร.วิชิตา ชินผา ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ภาสรี เล้ากิจเจริญ และ ดร.พัชรภรณ์ ฐิติวงศ์เสวต ที่รับเป็นกรรมการสอบและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมและพัฒนาผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่สนับสนุนทุนในการเล่าเรียนพร้อมทั้งทุนวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนผู้ช่วยวิจัย (Research Assistance, RA) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อุดหนุนทุนในการทำวิจัยเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณเฟอูมิซึย และคุณแม่แสงจันทร์ พันธุ์วิริยรัตน์ ที่ให้ทั้งกำลังใจที่ดีและกำลังทรัพย์สนับสนุนการศึกษา และคอยเป็นที่ปรึกษาปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณญาติๆ ทุกคน และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่ในสาขาวิทยาศาสตร์ พอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา และขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ตั้งแต่เริ่มเรียนจนถึงปัจจุบันนี้

วรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(20)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้	5
2.2 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	10
2.3 พอลิเอทิลีน	14
2.4 พอลิเมอร์ผสม	16
2.5 ปฏิกริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน	17
2.6 การตรวจสอบเอกสาร	21
3. วิธีการวิจัย	31
3.1 สารเคมี	31
3.2 อุปกรณ์	31
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	32
3.4 วิธีการทดลอง	33
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องผสมแบบปิด	33
3.4.2 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด	34
3.4.3 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง	34
3.4.4 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด	35
3.4.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก	36
3.4.6 การทดสอบการบวมตัว	37
3.4.7 การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	37
	(8)



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก	38
3.4.9 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	38
3.4.10 การตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	39
3.4.11 การตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	39
3.4.12 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
3.4.13 การทดสอบความสามารถในการเสื่อมสภาพ	40
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1 อิทธิพลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม	42
4.1.1 ขั้นตอนการผสมและความเร็วรอบของการผสม	42
4.1.2 ระยะเวลาของการผสม	43
4.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการบ่มกลีเซอรอลผสมแบ่งต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง	45
4.3 อิทธิพลปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	47
4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	48
4.3.2 ผลการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	50
4.3.3 ผลการทดสอบสัณฐานวิทยา	52
4.4 อิทธิพลของชนิดแบ่งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	52
4.5 อิทธิพลของปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	57
4.6 อิทธิพลของปริมาณแบ่งต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	60
4.6.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล	60
4.6.2 ผลการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	64
4.6.3 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	65
4.6.4 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	66
4.6.5 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก	68
4.6.6 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	70
4.7 อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	72
4.7.1 การแปรปริมาณ PPS ที่มีปริมาณ BPO คงที่	73
4.7.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล	73
4.7.1.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	75
4.7.2 การแปรปริมาณ BPO ที่ปริมาณ PPS คงที่	75

4.7.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล	77
4.7.2.2 ผลการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	78
4.7.2.3 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	79
4.7.3 การแปรปริมาณแข็ง	81
4.7.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล	81
4.7.3.2 ผลการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ	85
4.7.3.3 ผลการตรวจสอบค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย	87
4.7.3.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	88
4.7.3.5 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	91
4.7.3.6 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตตริก	92
4.7.3.7 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	95
4.7.3.8 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR	100
4.8 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน	101
4.8.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดิน	104
4.8.2 ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึง	109
4.8.3 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตตริก	112
4.8.4 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	114
4.8.5 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	116
4.8.6 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR	125
5. สรุปผลการทดลอง	128
5.1 อิทธิพลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม	128
5.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการปมกลีเซอรอลผสมแข็งต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง	128
5.3 อิทธิพลปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	128
5.4 อิทธิพลของชนิดแข็งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	129
5.5 อิทธิพลของปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	129
5.6 อิทธิพลของปริมาณแข็ง	129
5.7 อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	130
5.8 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน	133
บรรณานุกรม	135
ภาคผนวก	146
ก. DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม	147
ข. เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	155
ประวัติผู้เขียน	170
	(10)

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน	12
3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน ที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา อากาศจังหวัดสงขลา สถานีคอหงส์	41
4.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ที่ความเร็วโรเตอร์ 60 และ 100 rpm ด้วยวิธีการผสมวิธีที่ 1 และ 2	43
4.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ใช้เวลาในการผสม 8 และ 10 min	44
4.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ที่ระยะเวลาการป่มแป้ง ผสมกลีเซอรอล 0 h	47
4.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ที่ระยะเวลาการป่มแป้ง ผสมกลีเซอรอล 24 h	47
4.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง	49
4.6 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งดิบ แปรปริมาณ กลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง	55
4.7 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งพรีเจล แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5 และ 10 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง	56
4.8 ความต้านทานการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งดิบและ แป้งพรีเจล	56
4.9 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งดิบและ แป้งพรีเจล	56
4.10 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณน้ำ 0-40 pphr	59
4.11 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณ น้ำ 0-40 pphr	59
4.12 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งตั้งแต่ 0-70 wt%	62
4.13 ค่า $T_g$ และ $T_m$ ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิค DSC ที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	67
4.14 ค่า $\tan \delta_{max}$ ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt% จากเทคนิค DMTA	72

## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.15 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) ที่แปรปริมาณ PPS 0-2 pphr และใช้ปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr	74
4.16 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) ที่แปรปริมาณ BPO 0-2 pphr และใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr	77
4.17 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) ที่แปรปริมาณ BPO 0-2 pphr และใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr	79
4.18 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%	87
4.19 ค่า $T_c$ และ $T_m$ จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ผสมแปรปริมาณแบ่ง 30, 50 และ 70 wt% ที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	92
4.20 ค่า $\tan \delta_{max}$ จากเทคนิค DMTA ของพอลิเมอร์ผสมแปรปริมาณแบ่งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	96
4.21 ตำแหน่งเลขคลื่นที่ได้จากเทคนิค FT-IR ของ LDPE และแบ่งมันสำปะหลัง	101
4.22 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%	105
4.23 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%	107
4.24 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ LDPE หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	110
4.25 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	110
4.26 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	111
4.27 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (70 %แบ่ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	111
4.28 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	111
4.29 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	112

## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.30 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ	112
4.31 ค่า $T_c$ และ $T_m$ ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจาก เทคนิค DSC	115
4.32 ค่า $T_c$ และ $T_m$ ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากเทคนิค DSC	116

## รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 กลไกการย่อยสลายของจุลินทรีย์บนชิ้นตัวอย่างพลาสติก	6
2.2 สัญลักษณ์แสดงผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	7
2.3 หน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) แบบ $\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6	11
2.4 โครงสร้างของอะมิโลส	11
2.5 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน	11
2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวผลึกแบบ A และ B ในแป้ง	13
2.7 สเปกตรัมจากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B	13
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	17
2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (a) BPO และ เปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (b) PPS	18
2.10 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ BPO	18
2.11 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ PPS	19
2.12 โครงสร้างหน่วยของกลูโคส	19
2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาข้างเคียงของ พอลิเอทิลีน	19
3.1 ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง	35
3.2 ขั้นตอนทดสอบแบบมุมสำหรับการทดสอบการฉีกขาด	36
3.3 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256	36
3.4 พื้นที่หลังรอยบากของชิ้นทดสอบ	37
3.5 ภาพการทดสอบความสามารถในการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมใช้วิธีการฝังดิน	40
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30%แป้ง) ที่ผสมด้วยความเร็วโรเตอร์ 60 และ 100 rpm ด้วยวิธีการผสมวิธีที่ 1 และ 2	43
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ใช้เวลาในการผสม 8 และ 10 min	44
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ที่ระยะเวลาการปมแป้งผสมกลีเซอรอล 0 h	46
4.4 เปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งผสมกับกลีเซอรอล ปมในเวลา 0 h และ 24 h: (a) E (b) $\sigma_b$ และ (c) $\epsilon_b$	48

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 % แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง	49
4.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณ กลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr	50
4.7 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณ กลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr	50
4.8 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr	51
4.9 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% แปรปริมาณกลีเซอรอล: 0 pphr (a, b), 5 pphr (c, d) และ 30 pphr (e, f)	53
4.10 ภาพถ่าย SEM ของแป้งชนิดต่างๆ: แป้งดิบ (a) และ แป้งพรีเจล (b)	54
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) แปรปริมาณกลีเซอรอล 0-30 pphr (a) แป้งดิบ และ (b) แป้งพรีเจล	55
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณน้ำ 0-40 pphr	58
4.13 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง ตั้งแต่ 0-70 wt%	61
4.14 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	64
4.15 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	65
4.16 ภาพถ่าย SEM ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่างกัน: 30 wt% (a, b, c), 50 wt% (d, e, f) และ 70 wt% (g, h, i)	66
4.17 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	69
4.18 อนุพันธ์ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียไปจากการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และแป้งมันสำปะหลัง	69
4.19 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	70
4.20 ค่ามอดุลัสสูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	71
4.21 ค่าแทนเจนต์สูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	72

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.22 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมผสม (50 %แป้ง) แปรปริมาณ PPS 0-2 pphr และใช้ปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr	74
4.23 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% มีปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr แปรปริมาณ PPS: 0 pphr (a, b, c), 0.1 pphr (d, e, f), 0.5 pphr (g, h, i) และ 2.0 pphr (j, k, l)	76
4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณ BPO 0-2 pphr และใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr	78
4.25 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% ใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr และแปรปริมาณ BPO: 0 pphr (a, b, c), 0.1 pphr (d, e, f), 1 pphr (g, h, i) และ 2 pphr (j, k, l)	80
4.26 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	82
4.27 ค่าความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	83
4.28 ค่าความเครียด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	84
4.29 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	85
4.30 ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	88
4.31 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)	89
4.32 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)	90
4.33 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)	91
4.34 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	93



## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.35 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่เดิมและไม่เดิมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	94
4.36 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมที่เดิมและไม่เดิมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%	97
4.37 ค่ามอดุลัสสูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่เดิมและไม่เดิมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%	98
4.38 ค่าแทนเจนต์สูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่เดิมและไม่เดิมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยปริมาณแป้ง (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%	99
4.39 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	102
4.40 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา	103
4.41 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	105
4.42 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%	107
4.43 การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt% (a) ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (b) เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์	108
4.44 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ	113
4.45 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ	113
4.46 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ	114
4.47 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ	114

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.48 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแข็ง 30 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)	117
4.49 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแข็ง 30 wt% ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f), 24 สัปดาห์ (g, h, i)	118
4.50 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f), 24 สัปดาห์ (g, h, i)	119
4.51 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 50 wt% ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f), 24 สัปดาห์ (g, h, i)	120
4.52 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาของ ชิ้นงานหลังจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b), 12 สัปดาห์ (c, d) และ 24 สัปดาห์ (e, f)	121
4.53 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f), 24 สัปดาห์ (g, h, i)	122
4.54 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 70 wt% ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f), 24 สัปดาห์ (g, h, i)	123
4.55 ภาพถ่ายของพอลิเมอร์ผสมที่มีแข็ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาของชิ้นงาน หลังการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่ฝังดินเป็นระยะเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b), 12 สัปดาห์ (c, d) และ 24 สัปดาห์ (e, f)	124
4.56 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (50 %แข็ง) ที่ฝังดิน ในระยะเวลาต่างๆ	126
4.57 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (50 %แข็ง) ที่ฝังดินใน ระยะเวลาต่างๆ	127
ก.1 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแข็ง 0-70 wt%	147
ก.2 DSC thermogram (heating) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแข็ง 0-70 wt%	148
ก.3 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดย แปรปริมาณแข็ง 0-70 wt%	149

## รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
ก.4 DSC thermogram (2-heating) ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดย แปรปริมาณแข็ง 0-70 wt%	150
ก.5 DSC thermogram (cooling) ของ LDPE ที่ฝังดินในเวลาต่างๆ	151
ก.6 DSC thermogram (heating) ของ LDPE ที่ฝังดินในเวลาต่างๆ	152
ก.7 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แข็ง) ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ปฏิกิริยาที่ฝังดินในเวลาต่างๆ	153
ก.8 DSC thermogram (heating) ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แข็ง) ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ปฏิกิริยาที่ฝังดินในเวลาต่างๆ	154

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
AGU	anhydroglucose units	หน่วยกลูโคส
BPO	benzoyl peroxide	เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์
DCP	dicumyl peroxide	ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์
DMTA	dynamic mechanical thermal analysis	การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงแบบพลศาสตร์
DSC	differential scanning calorimeter	เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอรีมิเตอร์
EVA	ethylene-co-vinyl acetate	เอทิลีนโคไวนิลอะซิเตท
EVOH	poly(ethylene-co-vinyl alcohol)	พอลิเอทิลีนโคไวนิลแอลกอฮอล์
FT-IR	fourier transform infrared spectrophotometer	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
HDPE	high density polyethylene	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
LDPE	low density polyethylene	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
LLDPE	linear low density polyethylene	พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ
MAH	maleic anhydride	มาเลอิกแอนไฮไดรด์
PE	polyethylene	พอลิเอทิลีน
PE-g-MAH	polyethylene-grafted-maleic anhydride	พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์
PPS	potassium persulfate	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
SEM	scanning electron microscopy	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TPS	thermoplastic starch	แป้งเทอร์โมพลาสติก
TGA	thermogravimetric analysis	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก
XRD	x-ray diffractometer	เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
UV	ultraviolet	แสงอัลตราไวโอเล็ต

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
$^{\circ}\text{C}/\text{min}$	degree celsius per minute	องศาเซลเซียสต่อนาที
cm	centimeter	เซนติเมตร
E	Young's modulus	มอดุลัสของยัง
E'	storage modulus	ค่ามอดุลัสสะสม
E''	loss modulus	ค่ามอดุลัสสูญเสีย
$\text{g}/\text{cm}^3$	gram per centimeter cubic	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
h	hour	ชั่วโมง
Hz	hertz	เฮิรตซ์
J/g	joule per gram	จูลต่อกรัม
$\text{kg}/\text{cm}^2$	kilogram per centimeter square	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
mm	millimeter	มิลลิเมตร
mm/min	millimeter per minute	มิลลิเมตรต่อนาที
min	minute	นาที
N/mm	Newton per millimeter	นิวตันต่อมิลลิเมตร
pphr	part per hundred	ส่วนในร้อยส่วน
rpm	round per minute	รอบต่อนาที
$\tan \delta$	loss tangent	ค่าแทนเจนต์สูญเสีย
$T_c$	crystallization temperature	อุณหภูมิการเกิดผลึก
$T_g$	glass transition temperature	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน
$T_m$	melting temperature	อุณหภูมิการหลอมเหลว
$X_c$	degree of crystallinity	ปริมาณผลึก
$\sigma_y$	yield stress	ค่าความเค้น ณ จุดคราก
$\epsilon_y$	yield strain	ค่าความเครียด ณ จุดคราก
$\sigma_b$	stress at break	ค่าความเค้น ณ จุดขาด
$\epsilon_b$	strain at break	ค่าความเครียด ณ จุดขาด
$\Delta H_c$	crystallization enthalpy	ค่าพลังงานความร้อนในการเกิดผลึก
$\Delta H_f$	fusion enthalpy	ค่าพลังงานความร้อนในการหลอมเหลว

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันพลาสติกสังเคราะห์มีปริมาณการใช้ที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา ทนความชื้น ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่ายและไม่เป็นสนิม จึงทำให้จำนวนของขยะพลาสติกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าพอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการอุปโภคและบริโภค ไม่ว่าจะเป็นในด้านเกษตรกรรมและบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหาร โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ที่นิยมนำมาทำเป็นพลาสติกฟิล์มและถุงพลาสติก (Zheng *et al.*, 2005) ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้มักไม่เกิดการย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ยาก ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องขยะและของเสีย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาวะแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่พอลิเอทิลีน โดยทั่วไปมักนำพอลิเอทิลีนผสมกับพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติที่นิยมใช้คือแป้ง แป้งเป็นสารประเภทพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังที่ประเทศไทยมีกำลังการผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลก (Sriroth *et al.*, 2002) แต่แป้งมีสมบัติมีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง ส่วนพอลิเอทิลีนมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์ทั้งสองต่ำ ซึ่งความแตกต่างระหว่างความเป็นขั้วของแป้งกับพอลิเอทิลีนนี้ ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนมีน้อย ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งมีสมบัติเชิงกลต่ำ (Shujun *et al.*, 2005)

วิธีการที่จะเอาชนะปัญหาเหล่านี้ก็คือ การดัดแปรโมเลกุลแป้งก่อนการผสม โดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีขั้ว การแทนที่ด้วยออกทาโนเอท (octanoate) (Bikiaris *et al.*, 1998) อะซีเตท (acetate) (Thakore *et al.*, 1999) ไฮดรอกซีล-พรอพิเลท (hydroxypropylate) (Kim, 2003) ออกทีนิลซัคซิเนท (octenyl succinate) (Rivero *et al.*, 2008) อะดิเพท (adipate) และอะเซทิลเลท (acetylate) (Nakamura *et al.*, 2005) เพื่อลดความเป็นขั้วของแป้งลง ส่งผลให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้น หรือมีการเติมสารที่เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibilizer) โดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MAH) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้แก่

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง (Billaris and Panayiotou, 1998; Liu *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2005; Pedrosa and Rosa, 2005(a); Ratankamnuan and Aht-Ong, 2006; Senna *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ตัวอื่นๆ ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง การใช้เอทิลีนโคไวนิลอะซีเตท (ethylene-co-vinyl acetate, EVA) (Prinos *et al.*, 1998; Aht-ong and Charoenkongthum, 2002) พอลิเอทิลีนโคไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (poly(ethylene-co-vinyl alcohol) copolymer, EVOH) (Sailaja and Chanda, 2002)) และใช้ LDPE-grafted-dibutyl maleate (Girija and Sailaja, 2006) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสม (reactive blending) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสม ได้มีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้ง ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเชื่อมโยงและใช้กรดโอเลอิกเป็นตัวเร่ง (Nikazae *et al.*, 2005) เพื่อให้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์โคพอลิเมอร์บนโมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำระหว่างการผสม โดยทั่วไปมักใช้สารในตระกูลของเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของพอลิเอทิลีน (Moad, 1999) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Nikazae *et al.*, 2005; Huang, *et al.*, 2005) ไดคลิวมีวเปอร์ออกไซด์ (Shujun *et al.*, 2005; Shujun *et al.*, 2006; Jinlin *et al.*, 2007) และมีการศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งกับพอลิสไตรีน ใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (ละลายในน้ำ) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้นระหว่างการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เนื่องจากมีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งโดยตรงน้อยมาก มีเพียงงานวิจัยของ Maharana และ Singh (2006) ศึกษาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้ง โดยใช้กลูโคสซีเรียม (glucose-cerium (IV)) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายกรดซัลฟูริก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังระหว่างการผสมในเครื่องผสมแบบปิด โดยคาดว่า การเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้ง ในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมเหลว ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งที่ผิวหน้าระหว่างเฟสทั้งสอง ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างเฟส ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา Moad (1999) กล่าวว่า ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาประกอบไปด้วย ความสามารถในการละลายของตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์หลอมเหลว ครึ่งชีวิต และประสิทธิภาพในการเกิดอนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ โดย Graaf และ

Janssen (2000) ระบุว่าโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมีครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 130°C ในเวลา 1 min และ ละลายน้ำได้จึงคาดว่าสามารถแพร่เข้าสู่โมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในขณะที่ Sanchez และ Myers (1996) รายงานว่าเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์มีครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 131°C ในเวลา 1 min ซึ่งใกล้เคียงกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และนิยมใช้กับโพลิโอฟีน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในการสร้างอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาสภาวะและสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผสม สัดส่วนของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้ง ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาและการเสื่อมสภาพหลังการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพหลังการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง
2. ใช้พอลิเมอร์และสารเคมีที่ผลิตทางการค้า
3. ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง ด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้
  - ความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องผสมแบบปิดเช่น 60-100 rpm
  - วิธีการผสมของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในเครื่องผสมแบบปิด
  - ปริมาณของกลีเซอรอลเช่น 0-50 pphr
  - ระยะเวลาในการเก็บแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลเช่น ใช้ทันที และบ่มที่อุณหภูมิห้องไว้ 24 h
  - เวลาในการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดเช่น 8 และ 10 min
  - ชนิดของแป้งมันสำปะหลังเช่น แป้งดิบ และ แป้งพีจีเอส



- ปริมาณน้ำเช่น 0-40 pphr
- ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเช่น 0-2 pphr
- ปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เช่น 0-2 pphr
- ปริมาณแป้งมันสำปะหลังเช่น 0-70 wt%

4. ทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการผสมในอัตราส่วนต่างๆ

5. ทดสอบความสามารถในการเชื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการฝังดิน

6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเช่น เทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม และวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไป และใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอรี่เมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน จุดหลอมเหลว และปริมาณผลึก

7. ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) และวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis)

8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้
2. เป็นแนวทางในการลดปัญหาขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก
3. เป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดอื่นต่อไป
4. เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้แก่สินค้าทางการเกษตร

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (degradable plastics)

##### 2.1.1 ความหมายและคำจำกัดความ (ธนาวดี, 2549)

พลาสติกย่อยสลายได้ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับพลาสติก และการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ (degradable plastics) ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากการสูญเสียสมบัติแบ่งออกเป็น 4 ประเภท

##### 1. พลาสติกที่สลายได้ด้วยแสง (photodegradable plastics)

การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้แสงยูวี เช่น การมีหมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับแสงยูวี จะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับพันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

##### 2. พลาสติกที่สลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidatively degradable plastics)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

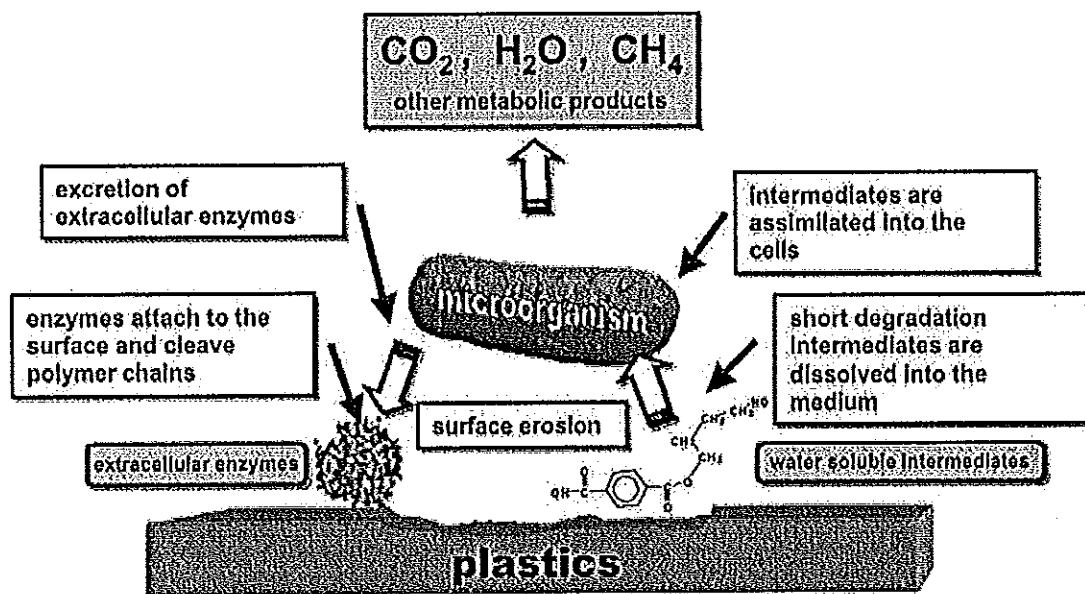
##### 3. พลาสติกที่สลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytically degradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

โดยมีความชื้นจากสภาพแวดล้อมและสารเคมีหรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์

#### 4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ (biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดที่เล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ จะเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็ก เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการย่อยสลายของจุลินทรีย์บนชิ้นตัวอย่างพลาสติก (Muller, 2008)

#### 2.1.2 สัญลักษณที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้ (ปาเจรา, 2549)

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิดจะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60 % โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารชีวมวล สารประกอบอินทรีย์ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน สำหรับพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลาย 90 % และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้

ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานและมีสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น "OK compost" ของประเทศเบลเยียม "Compostable DIN CERTCO" ของประเทศเยอรมันนี "Compostable" ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ "PBS GreenPla" ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น ตัวอย่างสัญลักษณ์แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์แสดงผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ปาเจรา, 2549)

### 2.1.3 มาตรฐานและการตรวจสอบการย่อยสลาย (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

ASTM ได้กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับพลาสติก โดยพัฒนามาตรฐานสำหรับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายในสิ่งแวดล้อมได้มีรายละเอียดดังนี้

วิธีการวิเคราะห์โดยวัดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในพลาสติกที่ต้องการทดสอบไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่มีออกซิเจน และแก๊สมีเทนในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน โดยพลาสติกที่ทดสอบต้องเป็นแหล่งคาร์บอนแหล่งเดียวสำหรับจุลินทรีย์ การวิเคราะห์ลักษณะนี้มี 2 วิธี ได้แก่

1. วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มีกากตะกอนของน้ำทิ้ง (multiple sewer sludge) (D5209-91)

2. วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายของพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในขณะที่มีกากตะกอนของน้ำทิ้ง (multiple sewer sludge) (D5210-91)

มีอีก 3 วิธีในการวิเคราะห์ที่ ASTM ได้กำหนดเพิ่มเป็นมาตรฐาน คือ

1. วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) (D5217-92)

2. วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีการควบคุมสภาวะการหมัก (D5338-93)

3. วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยใช้จุลินทรีย์ที่ได้รับคัดเลือกมา (D5247-92)

สองวิธีแรกเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมของระบบบำบัดของเสีย คือสภาวะการหมักและการบำบัดน้ำเสียจะทำให้ทราบว่าพลาสติกที่ต้องย่อยสลายควรใช้ระบบแบบใด ส่วนวิธีสุดท้ายไม่ได้ทดลองกับระบบจริง แต่เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบค่าความสามารถของพลาสติกในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ทราบชนิดที่แน่นอนที่พบทั่วไปในสิ่งแวดล้อม

#### 2.1.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย (ธนาวัต, 2549)

##### 2.1.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

เป็นวิธีการคำนวณเฉพาะทางสำหรับการทดสอบการย่อยสลายได้ โดยคำนวณปริมาณคาร์บอนในพอลิเมอร์เทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนในสารระหว่างกลาง และคาร์บอนในมวลชีวภาพ โดยการทดสอบจะใช้พอลิเมอร์ที่ติดธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี มี  $^{14}\text{C}$  เป็นวัสดุสำหรับการทดสอบ ทำให้วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง

##### 2.1.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

การวัดหาค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยถูกต้องมากนัก โดยเฉพาะเมื่อพอลิเมอร์ถูกเก็บไว้ในแหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลานาน หรือกรณีที่มีกลุ่มจุลินทรีย์เกิดขึ้น และสะสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ ในช่วงแรกที่ยังไม่เกิดการย่อยสลาย เป็นสาเหตุทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่วัดได้มีค่าสูงเกินจริง ในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (mineralization) ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์นั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งที่มีปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่จะสามารถเกิดการย่อยสลายได้ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง (< 450 g/mol) (Bikiris and Panyiotou, 1998) โดยการย่อยสลายจะเกิดได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน

#### 2.1.4.3 การวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์

การใช้กล้องจุลทรรศน์ เพื่อศึกษาการเกิดขึ้นของกลุ่มของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ในขณะเกิดการย่อยสลาย บางครั้งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ การตรวจสอบ และติดตามการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แต่การสังเกตเห็นกลุ่มของจุลินทรีย์จำนวนมากบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ หรือพบว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ไม่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาอัตราการย่อยสลายได้ โดยทั่วไปใช้สำหรับการประมาณการย่อยสลายได้เท่านั้น

#### 2.1.4.4 การวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางกล

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางกล ของพอลิเมอร์ระหว่างและภายหลังการย่อยสลาย สามารถศึกษาโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (infrared spectroscopy, IR) สำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของพอลิเมอร์ หรือใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแ่งที่หายไประหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ผสม โดยดูจากความเข้ม (intensity) ของพีคที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของแ่งที่ลดลงไป นอกจากนี้ในขณะที่ยุณทรีย์ย่อยสลายแ่งจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่บริเวณรูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดอินฟราเรด เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer, XRD) ใช้สำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึก ส่วนเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) ใช้ในการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการย่อยสลาย ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด (percent elongation) สามารถใช้ในการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ แต่เป็นวิธีการวัดทางอ้อม ในบางกรณีผลการวัดที่ได้อาจไม่สัมพันธ์กับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีอื่น เพราะการย่อยสลายได้ทางกระบวนการทางชีวภาพมักเกิดบริเวณผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งไม่ทำให้ชั้นของพอลิเมอร์ทั้งชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เป็นเหตุให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โดยรวมไม่เปลี่ยนแปลง

#### 2.1.4.5 วัดการใช้ออกซิเจนและการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การวัดปริมาณการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์เป็นการวัดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์โดยตรง แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ต้องรู้ขั้นตอนและกลไกการย่อยสลายเนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบอาจไม่ใช่ผลอันเนื่องมาจากปริมาณแก๊สออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้

ในกระบวนการเมทาบอลิซึม เพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์เพียงอย่างเดียว และนอกจากนี้ยังใช้การวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สที่ได้จากกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ในการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

## 2.2 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูงพบในใบและในส่วนที่พืชใช้เก็บสะสมเป็นแหล่งอาหารเช่น เมล็ดและหัว คำว่า “แป้ง” ในการผลิตนั้นหมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก แป้งที่ผลิตโดยทั่วไปยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มากจะเรียกว่าฟลาวัวร์ (flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนเช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆ ถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่าแป้งสตาร์ช (starch) แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกตัดแปรหรือแปรรูปเรียกว่าแป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งจะตรงกันข้ามกับแป้งที่ถูกตัดแปรแล้วที่เรียกว่าโมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch)

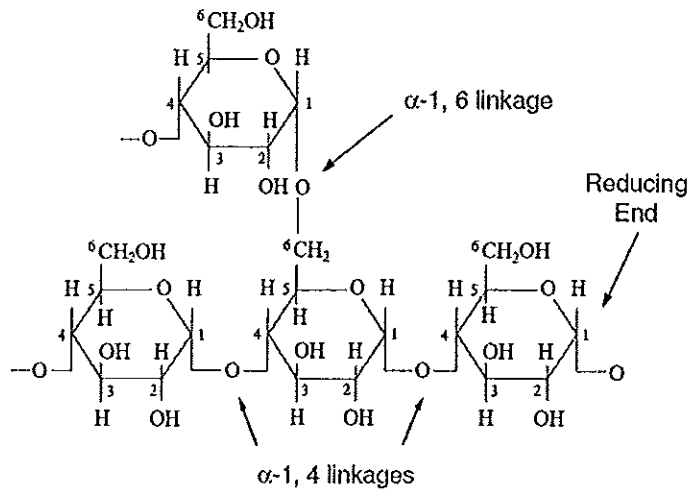
### 2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรโดยทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคส เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดคือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) วางตัวในแนวรัศมีกับเม็ดแป้ง แป้งจากแหล่งผลิตที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินแตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติของอะมิโลส และอะมิโลเพกติน ดังแสดงในรูปที่ 2.4, 2.5 และตารางที่ 2.1

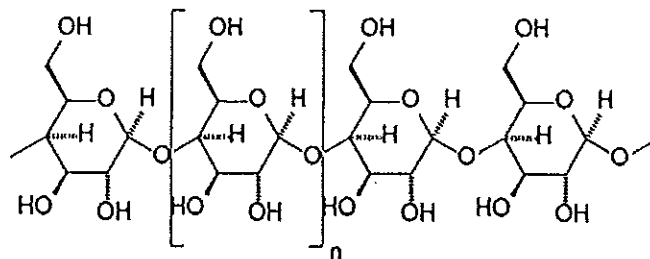
องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

1. อะมิโลส (amylose)
2. อะมิโลเพกติน (amylopectin)
3. สารตัวกลาง (intermediate Material)

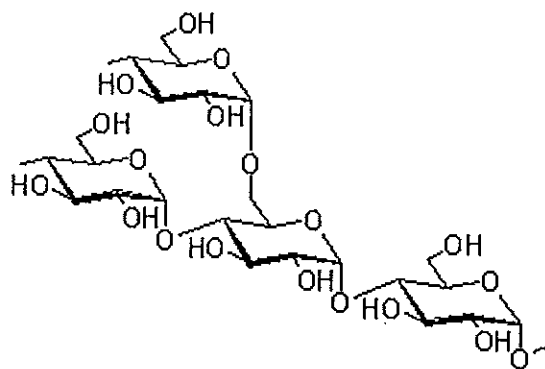
สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้ง โดยจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกตินแต่มากกว่าอะมิโลส ซึ่งสารตัวกลางมีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกตินแต่มีกิ่งที่ยาวกว่า โดยปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช



รูปที่ 2.3 หน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) แบบ  $\alpha$ -1,4 และ  $\alpha$ -1,6 (<http://web-arjarn.muic.mahidol.ac.th>, 2006)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะมิโลส (<http://en.wikipedia.org/wiki/Amylose>, 2008)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน (<http://en.wikipedia.org/wiki/Amylopectin>, 2007)



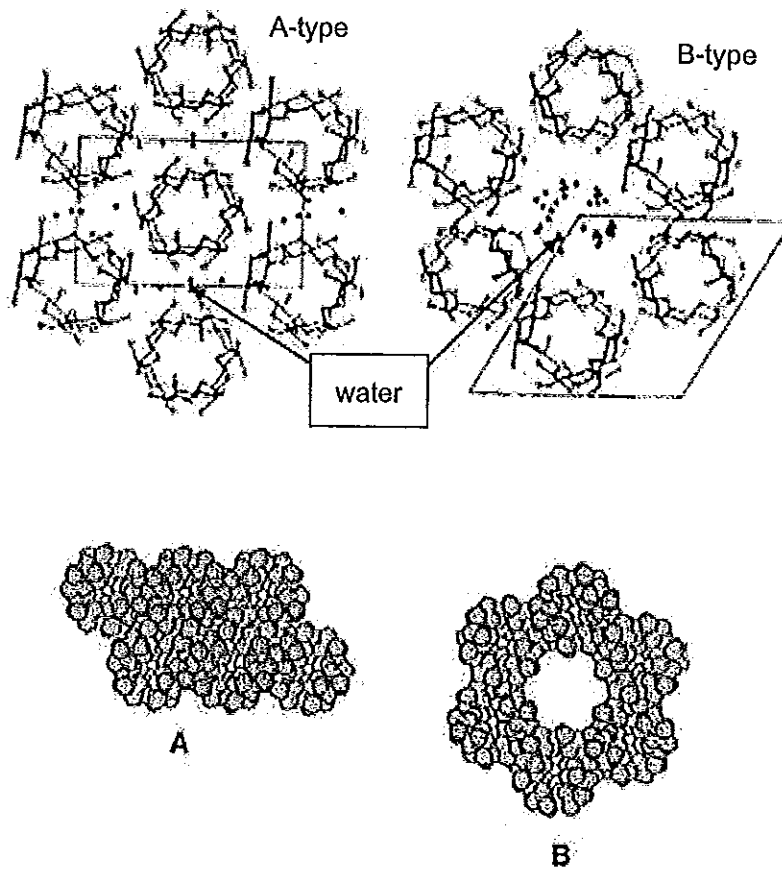
ตารางที่ 2.1 สมบัติของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน (<http://web-arjarn.muic.mahidol.ac.th>, 2006)

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha$ -1,4 glucosidic linkage	$\alpha$ -1,4 glucosidic linkage และ $\alpha$ -1,6 glucosidic linkage
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	เกิดเป็นสีน้ำเงิน	เกิดเป็นสีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่เป็นแผ่นแข็ง

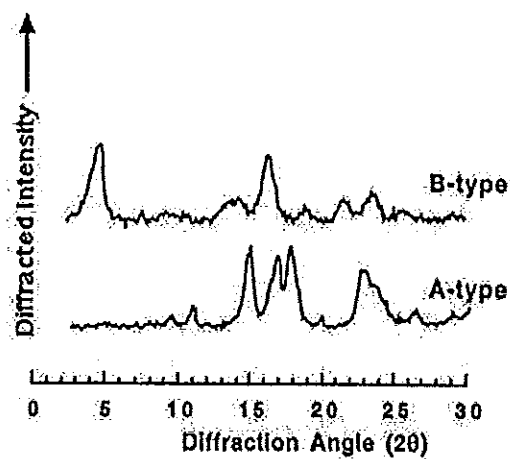
### 2.2.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งแป้งนั้นๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน สายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ ซึ่งบางส่วนจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดผลึกเป็นแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer, XRD) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคที่  $17$  และ  $17.9^{\circ} 2\theta$  แต่ไม่มีพีค  $5.6^{\circ} 2\theta$  แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้พีคที่  $5.6$  และ  $17^{\circ} 2\theta$  แต่ไม่มีพีค  $17.9^{\circ} 2\theta$  ดังแสดงในรูป 2.7 และแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C จะให้พีคที่  $5.6$  และ  $17.9^{\circ} 2\theta$



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวผลึกแบบ A และ B ในแป้ง ([http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2\\_3.html](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html))



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมจากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B (<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2.html>)

### 2.2.3 สมบัติของแป้งในด้านการดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไป แป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้บรรยากาศห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่ เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้นถึง 10-17% แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาคีไนซ์ (gelatinized temperature) เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจะถูกทำลาย โมเลกุลน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวทำให้เกิดการละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือชนิดของแป้ง ความแข็งแรง ลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้งและการจัดแปรแป้ง

### 2.3 พอลิเอทิลีน (polyethylene) (<http://en.wikipedia.org/wiki/polyethylene>)

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการอุปโภคและบริโภคมากกว่า 60 ล้านตัน/ปี พอลิเอทิลีนเกิดมาจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากเอทิลีนมอนอเมอร์ โดยทั่วไปแล้วพอลิเอทิลีนมีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียวทนความร้อนได้ไม่มากนัก ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น

พอลิเอทิลีนมีมากมายหลายชนิดแบ่งตามความหนาแน่น

1. พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)

เป็นพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงหลักล้านอยู่ในช่วงระหว่าง  $3.10-5.67 \times 10^6$  g/mol เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าสูงมาก ทำให้ประสิทธิภาพของสายโซ่โมเลกุลเข้ามาอยู่ชิดติดกันเป็นโครงสร้างแบบผลึกเกิดขึ้นได้น้อยความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่า HDPE โดยอยู่ในช่วง 0.930-0.935 g/cc การที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้วัสดุมีความเหนียวทนทานต่อการตัด การฉีกขาด และต่อสารเคมี UHMWPE นำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุได้หลากหลายชนิดเช่น ขวดพลาสติก ข้อต่อ เป็นต้น

2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE)

HDPE จะต้องมีค่าความหนาแน่นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.941 g/cc มีกึ่งก้านสาขา น้อยมากทำให้แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลและค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) มีค่าสูง HDPE จะถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์เช่น เขยือก ขวดใส่ดีเทอร์เจนต์ ถุงใส่ขยะ

3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (medium density polyethylene, MDPE)

มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.926-0.940 g/cc MDPE จะมีโครงสร้างที่ทนต่อการกระแทก และเกิดเป็นรอยได้ง่ายกว่า HDPE แต่ทนต่อการเกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้น (stress cracking) ได้ดีกว่า HDPE โดย MDPE มักใช้เป็นท่อแก๊ส กระสอบ ฟิล์มหัดตัว ฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์และถุงหิ้ว

4. พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (linear low density polyethylene, LLDPE)

มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915-0.925 g/cc LLDPE มีค่าความทนต่อแรงดึง การทนต่อการกระแทกและการเจาะได้สูงกว่า LDPE แต่กระบวนการขึ้นรูปที่เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์ แผ่นฟิล์ม และถุงได้ยาก ส่วนมากจะประยุกต์ใช้เป็น ส่วนหุ้มสายเคเบิล ของเล่น ฝาปิดภาชนะ ถังน้ำ ภาชนะและท่อน้ำ

5. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE)

มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910-0.940 g/cc LDPE จะมีปริมาณกิ่งก้านขนาดสั้นและขนาดยาวสูงจึงไม่สามารถเกิดการรวมตัวเป็นผลึกได้ดีทำให้มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงลดลง แต่ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น LDPE จะใช้ทั้งในภาชนะที่ต้องการความแข็งแรงหรือพลาสติกฟิล์มสำหรับถุงพลาสติก

6. พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำมาก (very low density polyethylene, VLDPE)

มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.880-0.913 g/cc VLDPE จะมีปริมาณกิ่งก้านขนาดสั้นอยู่จำนวนมากมักใช้เป็นถุงบรรจุอาหารเย็น ถุงใส่อาหาร

7. พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำพิเศษ (ultra low density polyethylene, ULDPE)

คือพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำมากเป็นพิเศษ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.905-0.915 g/cc มีความใสสูง ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ ทนต่อการแตกเนื่องจากความเค้นได้ดี มักนำมาทำถุงบรรจุอาหาร

## 2.4 พอลิเมอร์ผสม (Folkes and Hope, 1993)

### 2.4.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม (polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมเข้าด้วยกัน ประเภทของพอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งตามฐานวิทยาศาสตร์ได้เป็น 3 ประเภทใหญ่คือ

1. พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล (miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้สามารถมองเห็นเป็นวัฏภาค (phase) เดียวกัน โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมนี้จะมีลักษณะคล้ายกับโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer)

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล (immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะแยกออกจากกันเป็น 2 วัฏภาค ได้อย่างชัดเจนในระดับจุลภาค โดยพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยจะเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง

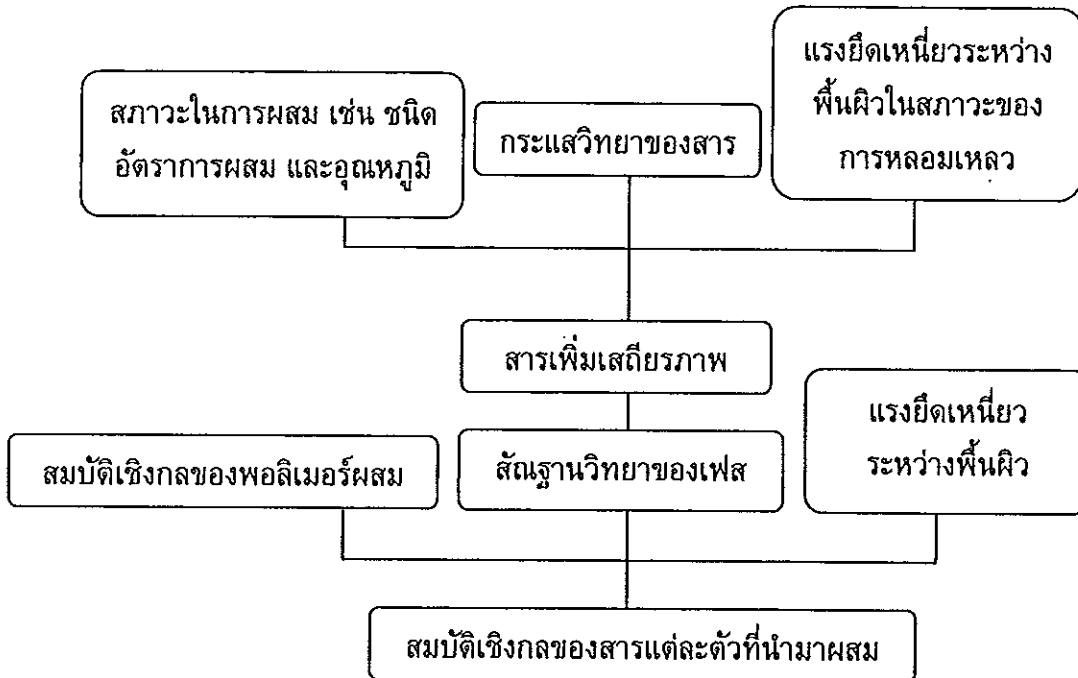
3. พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้บางส่วนในระดับโมเลกุล (partially miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันได้เล็กน้อย พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งอาจแทรกเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะทำให้วัฏภาคมีแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น ดังนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะดีขึ้น

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรืออยู่ในสภาวะหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้นโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ในด้านสมบัติ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้แล้วทำให้สมบัติดีขึ้น (compatible blends) และบางชนิดสามารถผสมเข้ากันได้แล้วอาจทำให้สมบัติที่ได้ไม่ดี (incompatible blends)

### 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ในด้านสมบัติ (compatibility) ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน โดยแต่ละเฟสจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง

กันต่ำ ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์เดิมก่อนนำมาผสม ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม (Folks and Hopes, 1993)

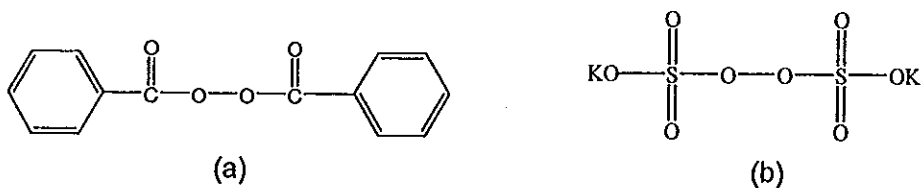
## 2.5 ปฏิกริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน

วิธีการส่วนมากที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับฟรีเรดิคัลพอลิเมอร์ไรเซชัน (free radical polymerization) โดยกราฟท์โคพอลิเมอร์สามารถทำได้ทั้งในระบบเนื้อเดียว (homogenous system) และระบบเนื้อผสม (heterogenous system) อนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้จากการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การแตกตัวด้วยความร้อน ระบบรีดอกซ์และการฉายรังสี ในการเลือกใช้วิธีการใดขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์และสถานะในการทดลอง

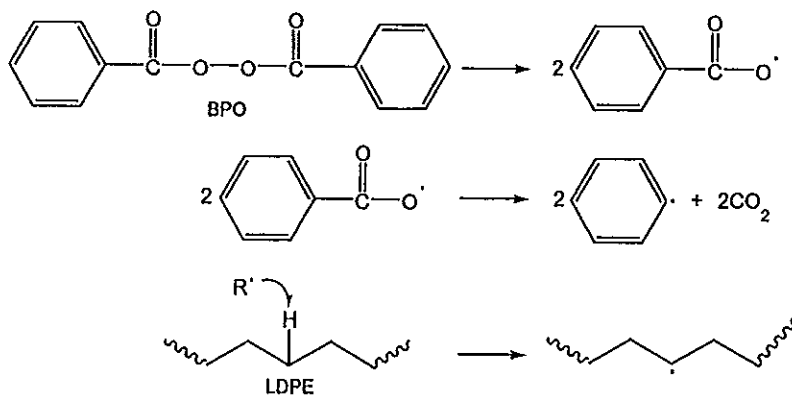
### 2.5.1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวด้วยความร้อน

วิธีนี้เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในเชิงการค้า การแตกตัวด้วยความร้อนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบโฮโมไลติก (homolytic cleavage) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างอนุมูลอิสระ เนื่องจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาเหล่านี้มีพันธะของ O-O, S-S และ N-O ที่สามารถแตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของตัวริเริ่มปฏิกิริยาในระบบนี้ที่เป็นสารจำพวกเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (organic peroxide) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

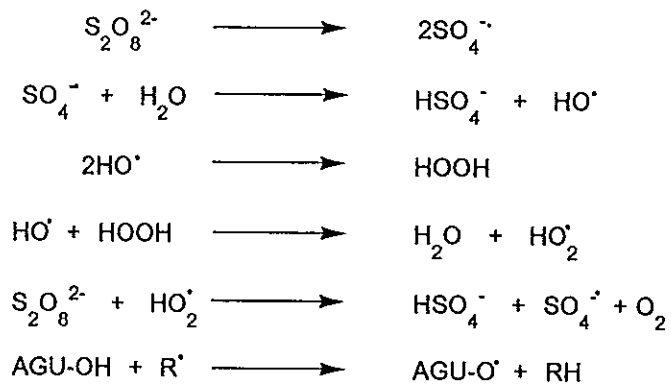
ไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) มีครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 131°C ในเวลา 1 min (Sanchez and Myers, 1996) และไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) เป็นต้น และสารเปอร์ออกไซด์อนินทรีย์ (inorganic peroxide) ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulfate, PPS) ซึ่งมีครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 130°C ในเวลา 1 min (Graaf and Janssen, 2000) โครงสร้างโมเลกุลของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตแสดงในรูปที่ 2.9 กลไกการแตกตัวของ BPO และการเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของ LDPE แสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนกลไกการแตกตัวของ PPS และเกิดอนุมูลอิสระบนหน่วยกลูโคส (anhydroglucose units, AUG) แสดงในรูปที่ 2.11 โครงสร้างของ AUG แสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว ในระหว่างการเตรียมอาจส่งผลให้มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นได้ ยกตัวอย่างเช่น การตัดขาดของสารโซโมเลกุล หรือการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระที่อยู่บนโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ทำให้เกิดการเชื่อมขวางเป็นร่างแห (crosslinked polymer) โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์และปฏิกิริยาข้างเคียงของพอลิเอทิลีนแสดงในรูปที่ 2.13



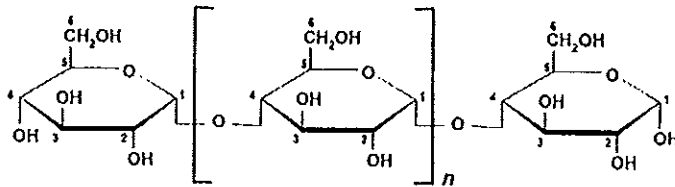
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเปอร์ออกไซด์อนินทรีย์ (a) BPO และชนิดเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (b) PPS



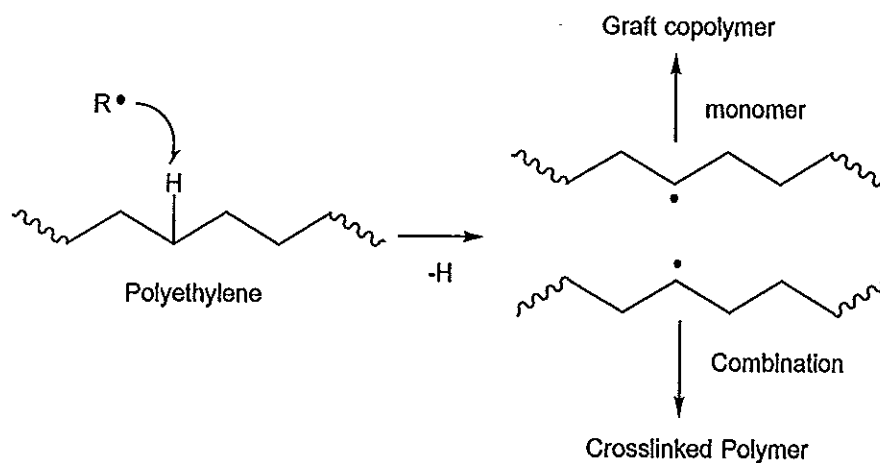
รูปที่ 2.10 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ BPO (Moad, 1999)



รูปที่ 2.11 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของ PPS (Qudsieh *et al.*, 2004)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหน่วยกลูโคส (anhydroglucose units, AUG)



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์และปฏิกิริยาข้างเคียงของพอลิเอทิลีน (Moad, 1999)



### 2.5.2 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาในระบบรีดอกซ์ (Yagci and Yildiz, 2005)

รีดอกซ์พอลิเมอร์ไรเซชัน (redox polymerization) มีข้อดีในเรื่องใช้เวลาในการเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระสั้น ใช้พลังงานกระตุ้นต่ำ (40–85 kJ/mol) พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ง่ายในการควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงลดน้อยลง และสามารถทดสอบสารตัวกลางอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยาได้โดยตรง ในระบบรีดอกซ์สารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในการริเริ่มเกิดขึ้นได้ง่ายจากปฏิกิริยาของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ โดยการแตกตัวของโมเลกุลเพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ใช้ในการริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คู่ของรีดอกซ์จำนวนมากที่ประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยทั่วไปมักใช้ เปอร์ออกไซด์ เปอร์ซัลเฟต หรือเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น เกลือของโลหะทรานซิชันที่รวมตัวกับบิวิตริงเอเจนต์ เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ เอมีน เอไมด์ คีโตนและกรด เป็นต้น จะเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในระบบรีดอกซ์เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในน้ำ สำหรับไวตามินเอเออนของซีเรียม (cerium(IV), Ce(IV)) จะถูกใช้สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในรูปของ ซีเรียม (IV) แอมโมเนียมไนเตรด (cerium (IV) ammonium nitrate) ซีเรียม (IV) แอมโมเนียมซัลเฟต (cerium (IV) ammonium sulfate) ซีเรียม (IV) ซัลเฟต (cerium (IV) sulfate) และซีริกเปอร์คลอเรท (ceric perchlorate) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลกอฮอล์โดยใช้ Ce(IV) ซึ่งเกิดผ่านกระบวนการแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นโคออดิเนชันกัน เนื่องจากกลไกของสารประกอบเชิงซ้อน การแตกตัวของโมเลกุลเป็นอนุมูลอิสระของสารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดเป็น ซีรีส์ไอออน โปรตอน และอนุมูลอิสระบนแอลกอฮอล์

### 2.5.3 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวด้วยแสง

สารริเริ่มปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระด้วยความร้อน สามารถเกิดเป็นอนุมูลอิสระโดยการให้แสงได้ นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจเกิดขึ้นจากมอนอเมอร์ได้ โดยใช้การฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้กับมอนอเมอร์ มอนอเมอร์จะดูดซับพลังงานจากแสงจากสภาวะพื้น (ground state) เลื่อนสูงสภาวะกระตุ้น (exciting state) จากนั้นมอนอเมอร์ที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น จะสลายตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ นอกจากนี้การแตกตัวให้อนุมูลอิสระด้วยแสงสามารถใช้ได้กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทสารประกอบคาร์บอนิล เช่น คีโตน

## 2.6 ตรวจสอบเอกสาร

### 2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของพอลิเอทิลีน

Onodera และคณะ (2001) รายงานการใช้ *Penicillium simplicissimum* YK ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์ในการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีน พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีค่าลดลงหลังจากทดสอบเป็นเวลา 3 เดือน และการใช้รังสียูวีฉายบนพอลิเอทิลีนก่อนการทดสอบกับเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถแทรกเข้าไปด้านในของฟิล์มพอลิเอทิลีนได้

Bonhomme และคณะ (2003) ทำการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนในสองขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการย่อยสลายด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่ไม่ใช้จุลินทรีย์ภายใต้ตู้อบที่จำลองให้เหมือนกับสิ่งแวดล้อม ขั้นที่สองทำการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลาย พบว่าเกิดการย่อยสลายและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้น และทำให้การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนกว้างขึ้นหลังจากทิ้งไว้ภายใต้อากาศร้อน 60°C แต่ลักษณะดังกล่าวไม่เกิดขึ้นหากตั้งตัวอย่างไว้ในที่อุณหภูมิห้อง และพบการเจริญเติบโตของกลุ่มของจุลินทรีย์ในทุกชิ้นงาน การกักต้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานจะเกิดขึ้นกับบริเวณที่มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่ และการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มจากกระบวนการออกซิเดชันศึกษาโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

Chiellini และคณะ (2003) รายงานการย่อยสลายทางความร้อนของ LDPE ที่เติม TDPA<sup>TM</sup> ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการเกิดออกซิเดชัน ทำการศึกษาการย่อยสลายทั้งโดยวิธีการฝังดินและการควบคุมสภาวะการหมัก พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นตัวอย่างทดสอบ และ TDPA<sup>TM</sup> ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่ LDPE

Abd El-Rehim และคณะ (2004) รายงานการศึกษการย่อยสลายของ LDPE กับแป้ง โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้วิธีการฉายรังสียูวีและการฝังดิน พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมหลังการฉายรังสีมีค่าลดลง 20-66 % ในขณะที่การฝังดินทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมลดลงเป็น 10-26 % และการใช้รังสียูวีร่วมกับการฝังดินเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายให้แก่พอลิเมอร์ผสม เนื่องจากรังสียูวีจะเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะเหมาะสมกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ได้

Gilan และคณะ (2004) ทำการศึกษาแยกเชื้อ *Rhodococcus ruber* (C208) ที่เจริญเติบโตอยู่ที่ผิวหน้าชิ้นตัวอย่างพอลิเอทิลีนและสามารถทำให้พอลิเอทิลีนย่อยสลายไปได้ถึง 8% หลังการเพาะเชื้อเป็นเวลา 30 วัน จากการทดสอบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับพอลิเอทิลีนและการทดสอบการรวมตัวของเกลือ (salt aggregation test) แสดงให้เห็นว่าพบ C208 ที่บริเวณของพอลิเอทิลีนที่เกิดการย่อยสลาย การมีน้ำม้วนินทรีย์ช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์บน

ชั้นพอลิเอทิลีน ส่งผลให้พอลิเอทิลีนมีความสามารถในการย่อยสลายถึง 50 % และ C208 สามารถเจริญเติบโตบนพอลิเอทิลีนที่ผ่านการฉายรังสียูวีได้เช่นกัน

Hadad และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของแบคทีเรียต่อพอลิเอทิลีน โดยทำการเพาะเชื้อแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ดีเมื่อได้รับความร้อนที่มีชื่อว่า *Brevibacillus borstelensis* 707 ที่แยกได้มาจากดินบนตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่เป็นแหล่งคาร์บอน โดยทำการเพาะเชื้อ *Brevibacillus borstelensis* บนพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 วันพบว่าสามารถลดน้ำหนักและน้ำหนักโมเลกุลลดลงไป 11 และ 30 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนหลังทำการฉายรังสียูวีพบว่าเวลาในการฉายรังสีนานขึ้นการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนจะเพิ่มขึ้น

Kaczmarek และ Oldak (2006) ศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเซลลูโลส โดยการให้สัมผัสกับแสงยูวีหรือใช้การฝังดินเป็นเวลา 1 ปี และศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของน้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณแฉก ปริมาณผลึก รวมทั้งสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ระดับการย่อยสลายของพอลิเมอร์จะคำนวณจากปริมาณหมู่คาร์บอนิล และการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับเซลลูโลสเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสองเฟส และอัตราในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองเกิดขึ้นต่ำ

Jakubowicz และคณะ (2006) ศึกษาอัตราการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่เติมแมงกานีสเป็นสารช่วยเพิ่มการย่อยสลาย ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C พบว่าการย่อยสลายส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลและค่าความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเอทิลีนมีค่าลดลงหลังจากผ่านอากาศร้อนขึ้น โดยความชื้นจะเป็นตัวเร่งที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสลายตัวทางความร้อนแบบออกซิเดชัน แต่อย่างไรก็ตามการย่อยสลายที่เกิดขึ้นมีอัตราที่ต่ำมาก อธิบายได้ว่าแอมโมเนีย หรือ/และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างของจุลินทรีย์ ส่งผลในการหน่วงการย่อยสลายของพอลิเอทิลีน

Sudhakar และคณะ (2008) ทำการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของ HDPE และ LDPE ที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อน รวมทั้งพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบคทีเรียกับ LDPE โดยทำการศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย โดยใช้จุลินทรีย์ที่แยกได้จากทะเล 2 ชนิด ที่มีชื่อว่า *Bacillus sphericus* GC subgroup IV และ *Bacillus cereus* subgroup A ทำการศึกษาเป็นเวลา 1 ปี ที่อุณหภูมิ 30°C และ pH 7.5 จากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่าดัชนีของหมู่คาร์บอนิลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ที่เกิดกระบวนการสลายตัวแบบนอร์ริช (Norrishtype) การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่ทดสอบกับเชื้อ *B. sphericus* พบว่า LDPE และ HDPE ที่ผ่านการให้ความร้อนมีการสลายตัวทางความร้อนไป 19 % และ 9 % ตามลำดับ

ส่วนพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนมีการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และ HDPE เป็น 10 % และ 3.5 % ตามลำดับ การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งที่ทดสอบกับเชื้อ *B. cereus* เป็น 25 % สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของ LDPE และ HDPE ที่ผ่านการให้ความร้อน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนลดลงไป 27 %, 14.8 % และ 30.5 % ตามลำดับ และความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ดังกล่าวลดลงไป 8 %, 2.2 % และ 8.5 % และการลดลงของมุมสัมผัสของน้ำ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์มีความเป็นขี้และชอบน้ำมากขึ้นหลังจากการทดสอบ

## 2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง

### 2.6.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม

Bikiaris และคณะ (1997) รายงานการศึกษาอิทธิพลของพอลิเอทิลีนอะคริลิก-แอซิดโคพอลิเมอร์ (Ethylene acrylic acid copolymer, EAA) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มีผลต่อการสลายตัวทางความร้อนแบบออกซิเดชัน (thermooxidation) ของ LDPE โดยพอลิเมอร์ผสมที่ทำการศึกษาประกอบด้วย LDPE/starch, LDPE/EAA และ LDPE/starch/EAA พบว่า EAA ช่วยเพิ่มการสลายตัวทางความร้อนแบบออกซิเดชันของ LDPE ส่วนแป้งจะทำหน้าที่ยับยั้งการสลายตัวทางความร้อนแบบออกซิเดชัน

Chandra และ Rustgi (1997) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE ที่ผ่านการกราฟท์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับแป้ง ทดสอบโดยการฝังดินเป็นระยะเวลา 6 เดือน และทดสอบกับเชื้อจุลินทรีย์ (*Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetomium globosum*, *Glioclacium birense* และ *Pullularia pullulans*) เป็นเวลา 28 วันพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมากกว่า 30 % พบว่ามีปริมาณการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อยู่อย่างหนาแน่น และพอลิเมอร์ผสมที่ทำการฝังดินจะมีความสามารถในการย่อยสลายมากกว่าในกรณีที่ใช้จุลินทรีย์ชนิดที่ได้จากการเพาะเชื้อ

Bikiaris และคณะ (1998) ศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งออกทาทาโนเอท (octanoated starch) ที่มีระดับการแทนที่ของหมู่ออกทาทาโนเอท (degree of substitution) เท่ากับ 2.7 % โดยใช้วิธีการฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าพอลิเมอร์ฟิล์มมีรูเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการย่อยสลายแป้งโดยจุลินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำและขึ้นอยู่กับปริมาณของแป้ง และเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น ความเด่นชัด จุดขาด และความเครียด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

Bhattacharya และ Mani (1998) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ HDPE, LDPE และ EVA กับ แป้งข้าวโพดชนิดที่มีปริมาณของอะมิโลเพกตินและอะมิเลสที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ อะมิโลเพกติน 100 % อะมิโลเพกติน 70 % อะมิโลเพกติน 50 % และอะมิโลเพกติน 30 % ความเข้มข้นของแป้งที่ใช้เป็น 70 % โดยน้ำหนัก ซึ่งอิทธิพลของชนิดแป้งมีผลต่อกระบวนการ

ผลิต (ความดัน แรงบิดและพลังงาน) ค่าความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ความต้านทานต่อการหักงอ และค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม พบว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูงจะใช้แรงบิดและพลังงานในกระบวนการผลิตสูง ในขณะที่แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงที่สุดจะใช้พลังงานต่ำสุด ทุกตัวอย่างจะดูดซับน้ำได้ที่สมดุล 20-24 % ภายใน 80 วัน

Arvanitoyannis และคณะ (1998) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งข้าวและแป้งมันฝรั่งที่เตรียมได้จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยแปรปริมาณของแป้ง ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล การซึมผ่านของน้ำและแก๊ส และความสามารถในการย่อยสลาย พบว่าปริมาณแป้งที่สูงกว่า 30 % โดยน้ำหนักจะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง การซึมผ่านของแก๊สและน้ำและอัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งสูงขึ้น

Siddaramaiah และคณะ (2001) ศึกษาผลของปริมาณแป้งที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด นอกจากนี้ยังมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (transmittance) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE/Strach

Danjaji และคณะ (2002) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายและความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LLDPE กับแป้ง ในการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม ณ สภาวะภูมิอากาศทั่วไป พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงความขุ่น สี การแตกหักของชิ้นงาน และในการฝังดินทำให้เกิดรูบนชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลงในช่วงสี่เดือนแรกและลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากนั้น ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น

Rutkowska และคณะ (2002) รายงานการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนบิรสุทธ์ พอลิเอทิลีนผสมกับแป้ง 5 % และ 8 % พอลิเอทิลีนผสมกับสารช่วยในการย่อยสลายภายใต้สภาวะน้ำทะเลที่จำลองมาจากทะเลบอลติก โดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 20 เดือน พบว่าพอลิเอทิลีนบิรสุทธ์ทนต่อสภาวะที่ทดลอง แป้งและสารช่วยย่อยสลายที่เติมเข้าไปช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายให้แก่พอลิเอทิลีน

Favis และคณะ (2003) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอนเดียวในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ และสกรูเดี่ยวระหว่างพอลิเอทิลีน (PE) กับแป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS) โดยใช้การผสมขณะหลอมเหลว มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์แล้วแปรปริมาณเป็น 29-40 % พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วน PE/TPS (55:45) มีปริมาณกลีเซอรอล 36 % ให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาด 94 % และให้ค่ามอดุลัสเป็น 76 %

Shujun และคณะ (2006) รายงานการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากกระบวนการอัดรีดใน

ชั้นตอนเดียว พบว่าน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลดลงไปมากกว่า 3 % ใน 30 วันและ 4 % ใน 60 วัน และจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการหลุดไปของอนุภาคจากฟิล์มพอลิเอทิลีน

### 2.6.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับแป้งตัดแปร

Panayiotou และคณะ (1998) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งออกทาโนเอท (octanoated starch) ที่มีระดับการแทนที่ของหมู่ออกทาโนทิลบนแป้งเป็น 1.8 และ 2.7 % ให้ชื่อย่อเป็น OCST 1.8 และ OCST 2.7 ตามลำดับและกับ แป้งโดเดคาโนเอท (dodecanoated starch) ที่มีระดับการแทนที่เป็น 2.7 % ย่อว่า DODST 2.7 เตรียมได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งกับกรดไขมันคลอไรด์ (fatty acid chloride) ซึ่งพบว่าหมู่เอสเทอร์ทำหน้าที่คล้ายกับเป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) เมื่อเพิ่มจำนวนและขนาดของสายโซ่ของกรดไขมันเอซิล (fatty acyl) ที่กราฟท์บนแป้ง โดยแป้งเอสเทอร์เหล่านี้จะผสมกับ LDPE ในเครื่องผสม พบว่า DODST 2.7/LDPE ให้สมบัติเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่าและให้ค่าระยะการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า OCST/LDPE แต่ให้ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า OCST/LDPE แต่การเติมแป้งเอสเทอร์ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำให้อัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเกิดช้าลง

Panayiotou และคณะ (1999) ศึกษาผลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งเอสเทอร์ชนิดต่างๆ พบว่าจำนวนของเอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดึง และโดยเฉพาะค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงอย่างไม่เป็นเส้นตรง จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมในแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) พบว่าแป้งเอสเทอร์สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ แต่อัตราในการย่อยสลายต่ำกว่าแป้งบริสุทธิ ทำให้อัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมต่ำ เนื่องมาจากอัตราการย่อยสลายที่ต่ำของเอสเทอร์บริสุทธิ

Devi และคณะ (1999) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ starch ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมในสองระบบคือ LDPE/starch และ LDPE/starch/starch acetate พอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 กรณีที่มีปริมาณแป้ง 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี starch acetate หรือมีเพียง 2.5 % โดยน้ำหนักจะไม่มี การเชื่อมต่อกันระหว่างเฟส 2 เฟสของ LDPE และ starch หากมี starch acetate 10 % โดยน้ำหนักจะพบการกระจายตัวของ starch ในเฟส LDPE ได้ดีขึ้นและมีการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสทั้ง 2 ได้มากขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และค่าต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณของ starch เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม starch acetate ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะค่าระยะยืด ณ จุดขาด ความเหนียวและดัชนีการไหลให้ดีขึ้น อัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น

Ha และ คณะ (2001) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ คือ LDPE อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester, APES) ไอโนเมอร์ (ionomer) โดยใช้กระบวนการหลอมเหลวในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง/ionomer ให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง/LDPE และ แป้ง/APES ให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด และมอดุลัสลดลง ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมทุกชนิดมีค่าลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้ง/ionomer ให้ลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง/LDPE และ แป้ง/APES และที่ปริมาณของแป้งมากกว่า 50 % พอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง/ionomer จะปรากฏเป็นเฟสเดียว เมื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง แป้งกับ APES ให้อัตราในการเสื่อมสภาพเร็วที่สุด

Kim (2003) ศึกษาการย่อยสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจาก PE กับแป้งไฮดรอกซีโพรพิลเลท (hydroxypropylated starch, HPS) โดยใช้ความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์พบว่า HPS/PE มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ native starch/PE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์ของระยะยึดของ HPS/PE ลดลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นและจากการศึกษาการย่อยสลายโดยใช้การเพาะเชื้อ *Pseusimonas aeruginosa* ATCC 13388 ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์พบว่า HPS/PE มีปริมาณคาร์บอนิลสูงขึ้นและสมบัติเชิงกลลดลง

### 2.6.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเอทิลีนดัดแปร

Chandra และ Rustgi (1997) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวโพดและ LLDPE ที่มี MAH กราฟท์อยู่บนโมเลกุล ที่จากปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันในไซลีน โดยใช้ DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำการผสมโดยการแปรค่าความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดจาก 10-60% ผสมกับ LLDPE-g-MAH ในเครื่องผสม (torque rheometer) และเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวโพดกับ LLDPE ที่ไม่ดัดแปรไว้เป็นตัวเปรียบเทียบ พบว่าแรงบิดที่ใช้ในการผสมแป้งข้าวโพดกับ LLDPE-g-MAH จะลดลงเมื่อปริมาณแป้งเป็น 10-50 % และจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งเป็น 60 % ค่าต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ของระยะยึดลดลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มสูงขึ้นจากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมใน 2 ระบบ คือ การนำไปฝังดินเป็นเวลา 6 เดือนและการเพาะเชื้อเป็นเวลา 28 วัน พบว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณแป้งสูงกว่า 30 % จะมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สูงและปริมาณความเป็นผลึกลดลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น

Bae และคณะ (2001) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งกับ HDPE ที่ถูกตัดแปรทางเคมี โดยใช้ไกลซิโดเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate) กราฟท์ลงบนโมเลกุลของ HDPE โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์เกิดขึ้นโดยนำ HDPE ที่หลอมเหลวทำปฏิกิริยากับ DCP พบว่าการกระจายตัวของแบ่งใน HDPE-g-glycidyl methacrylate ดีกว่าใน HDPE ที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปร จำนวนของ glycidyl methacrylate ใน HDPE เพิ่มขึ้นจะไปเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งกับ HDPE และพบว่ากลีเซอรินมีส่วนช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

Park และ Yoon (2003) ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง LDPE ที่ทำปฏิกิริยากับ BPO และ 2,2,6,6-เตตระเมทิลปิเปอร์ริไดนิลออกซิ (2,2,6,6-tetramethyl-piperidinyloxy, TEMPO) ในการเตรียมตัวริเริ่มปฏิกิริยาขนาดใหญ่ จากนั้นทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขนาดเล็กได้โดยการนำมาเลือกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MAH) มาทำปฏิกิริยาบัลค์พอลิเมอร์ไรเซชัน (bulk polymerization) ใน PE-TEMPO การเติมสไตรีน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและทำให้ PE-grafted-poly(styrene-co-maleic anhydride) [PE-g-P(ST-co-MAH)] ที่ได้มีผลิตผลที่สูง แล้วนำผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มาทำการผสมกับแบ่งและพอลิเอทิลีน พบว่าปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหน่วยของ MAH และหมู่ไฮดรอกซิล ของแบ่งยังไม่สามารถตรวจพบได้ในระบบการผสมของ PE/PE-g-P(ST-co-MAH)/starch และสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการเติมเตตระบิวทิลไททาเนต (tetrabutyl titanate, TNBT) ในระหว่างกระบวนการผสมสามารถปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึงได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงดึงดูระหว่างผิวหน้าของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบการผสม

Maharana และ Singh (2006) ศึกษาปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของแบ่งบน LDPE โดยใช้ซีเรียมแอมโมเนียมซัลเฟต (cerium ammonium sulfate) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนในขวดกันกลมสามคอที่ต่อกับท่อแก้วที่มีทางเข้าและทางออกของแก๊สไนโตรเจน เติมแบ่งและสารละลายของพอลิเอทิลีน 5 %w/v ลงในขวดกันกลม จากนั้นนำสารละลายกลูโคสและกรดซัลฟูริกเติมลงไปในช่วงปฏิกิริยาแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml โดยการเติมน้ำที่นำไฟฟ้าได้ (conductivity water) กำจัดอากาศออกโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นเวลาครึ่งชั่วโมงก่อนเริ่มปฏิกิริยา หลังจากนั้นคำนวณปริมาตรสารละลาย Ce(IV) แล้วเติมลงในขวดปฏิกิริยา ตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนดและกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 h ทำการหยุดปฏิกิริยาโดยเทของผสมทั้งหมดลงในบีกเกอร์ที่มีเมทานอลอยู่ 200 ml เกิดตะกอนขึ้น กรองและล้างหลายๆครั้งด้วยน้ำร้อนและน้ำเย็นเพื่อกำจัดแบ่งที่ไม่เกิดปฏิกิริยา กลูโคส และสิ่งปนเปื้อนชนิดอื่นๆ หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาอบภายใต้ระบบสุญญากาศจนได้น้ำหนักคงที่ จำนวนของการกราฟท์ (graft yield) คำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของ LDPE หลังจากการกราฟท์เปรียบเทียบ



กับน้ำหนักในตอนเริ่มต้นของ LDPE ที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยค่าเปอร์เซ็นต์การกราฟท์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 85.66 % ทำปฏิกิริยาที่ 50°C ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 h โดย ใช้แป้งจำนวน 1.5 g LDPE 1.0 g ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.25 M ซีริกไอออน 0.025 M กลูโคส 0.25 M จากเทคนิค XRD พบว่าความเป็นผลึกของ LDPE ที่ผ่านการกราฟท์มีค่าลดลง เมื่อตัวอย่างที่ผ่านกราฟท์มาทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าการกราฟท์แป้งลงบน LDPE ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ ยิ่งปริมาณการกราฟท์ของแป้งบน LDPE เพิ่มขึ้นความสามารถในการย่อยสลายก็ยิ่งเพิ่มขึ้นด้วย

#### 2.6.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้แก่พอลิเมอร์ผสม

Panayiotou และคณะ (1998) ศึกษาแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ TPS แปรเปอร์เซ็นต์ของ TPS โดยใช้ PE-g-MAH 10 % เทียบกับน้ำหนักของ TPS ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ มีจำนวนของหมู่ไฮโดรด์จำนวน 0.4 และ 0.8 mol% พบว่าจำนวนของหมู่ไฮโดรด์ของโคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของ TPS ใน LDPE ดีขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ PE-g-MAH ที่มีจำนวนของหมู่ไฮโดรด์ 0.8 mol% จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุด แม้ว่าจะมีปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 %wt ศึกษาการย่อยสลายในน้ำสกปรกที่อุดมไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์ (activated sludge) พบว่าการใช้สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้จะมีอัตราการย่อยสลายต่ำกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้เพียงเล็กน้อย

Jiugao และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ (maleic anhydride, MAH) ที่มีผลต่อความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง TPS กับ LLDPE ทำการผสมกันในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยแปรปริมาณ TPS และ MAH ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งปริมาณของที่ใช้ MAH เทียบกับปริมาณของ LLDPE จะใช้เป็น 0, 1 และ 2 % จากข้อมูล SEM พบว่าเมื่อเติม MAH จะทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีแรงดึงดูระหว่างผิวหน้ามากขึ้นและการกระจายตัวของ TPS ใน LLDPE เกิดขึ้นได้ดี ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติม MAH

Wang และคณะ (2004) ศึกษาผลของกลีเซอรอลและ PE-g-MAH ต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งข้าว (rice starch) โดยศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ LDPE/rice starch, LDPE/rice starch/glycerol และ LDPE/rice starch/glycerol/PE-g-MAH โดยแปรปริมาณแป้งข้าวที่แตกต่างไปแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งการเตรียมพอลิเมอร์ผสมเตรียมในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พบว่าแรงดึงดูระหว่างรอยต่อของ 2 เฟสระหว่างเฟส LDPE กับแป้งข้าวมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้

PE-g-MAH อุณหภูมิของการทำให้เกิดการเกิดผลึกของ LDPE/rice starch/glycerol และ LDPE/rice starch/glycerol/PE-g-MAH มีค่าเท่ากับ LDPE บริสุทธิ์ แต่มีค่าสูงกว่า LDPE/rice starch และให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมให้ผลดังนี้ LDPE/rice starch/glycerol > LDPE/rice starch/glycerol/PE-g-MAH > LDPE/rice starch

Jiugao และคณะ (2005) ศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจาก LLDPE และ TPS ที่เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียวด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว จากข้อมูล FTIR พบว่า MAH จะไปกราฟท์บน LLDPE ซึ่งการผสมระหว่าง LLDPE และ TPS ที่เติม MAH จะทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น จากข้อมูล TGA พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติม MAH จะทนทานความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม MAH แสดงว่า MAH ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความสามารรถในการเข้ากันได้ระหว่าง LLDPE และ TPS

Chanda และ Sailaja (2005) ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน (plasticized starch) โดยเตรียมได้จากกลีเซอรอลและแป้งดิบ และ แป้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน (unplasticized starch) กับ HDPE โดยใช้ HDPE-g-MAH ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความสามารรถในการเข้ากันได้ ให้ผลการทดลองว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งที่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าใช้แป้งที่ไม่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน โดยให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูง ถึงแม้ว่าปริมาณของแป้งที่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชันเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปการผสมของ HDPE กับแป้งที่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน ที่เติมตัวเพิ่มความสามารรถในการเข้ากันได้จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งที่ไม่ผ่านกระบวนการพลาสติกไซเซชัน

Huang และคณะ (2005) ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และแป้ง มีปริมาณแป้งสูงถึง 65 % โดยน้ำหนัก โดยทำการเปรียบเทียบผลของสารเพิ่มความสามารรถในการเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MAH) และ กรดอะคริลิก (acrylic acid, AA) ที่กราฟท์บน LDPE ที่ผ่านการดัดแปรด้วยพลาสติกแล้วให้ชื่อย่อเป็น MAH-g-PLDPE และ AAc-g-PLDPE ตามลำดับ ทำการสังเคราะห์ขึ้นเองจากการทดลอง พบว่าระดับการกราฟท์ (GD) ของ MAH-g-PLDPE มีค่าเป็น  $1.90 \times 10^{-4}$  mol/g และของ AAc-g-PLDPE มีค่าเป็น  $2.50 \times 10^{-4}$  mol/g โดย MAH-g-PLDPE จะทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความสามารรถในการเข้ากันได้ระหว่าง LDPE และแป้งได้ดีกว่า AAc-g-PLDPE เนื่องจากผลของหมู่แอลดีไฮด์ ส่วนผลของโอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากการเติม MAH อีสาระลงไปใน starch/MAH-g-PLDPE/LDPE จะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และทำให้ขนาดอนุภาคของ LDPE ลดลง หากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม MAH อีสาระจะทำให้รูปร่างของ LDPE ผิดปกติหลังจากการผสมและเปอร์เซ็นต์การหายไปของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 2 อาทิตย์ ทุกตัวอย่าง

พบว่าจะมีน้ำหนักหายไปมากกว่า 65% ตัวอย่างที่มีการเติม MAH อีسترจะมีอัตราการหายไปมากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติม MAH อีستر

Rosa และ Pedroso (2005) ได้ศึกษาผลของสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ที่เตรียมได้จากนาไกลโคคิลเมทาคริเลท (glycodyl methacrylate, GMAH) มากราฟที่บนพอลิเอทิลีน (PE-g-GMAH) ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง virgin LDPE/corn starch กับ reprocessed LDPE/corn starch โดยทั้ง LDPE ที่บริสุทธิ์และผ่านการใช้งานแล้ว จะผสมกับแป้งข้าวโพดในสัดส่วน 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนัก โดยใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ ซึ่งเตรียมโดยใช้วิธีการอัดรีด ให้ผลว่าการเติมแป้งข้าวโพดใน LDPE จะให้ค่าดัชนีการไหล (MFI) ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงและเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณแป้งที่เติมลงไปเป็น 40 และ 50 % ในขณะที่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ PE-g-GMAH ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าและให้ค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้

Aht-Ong และ Ratanakamnuan (2006) ได้ทำการศึกษาฟิล์มที่ได้มาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกล้วยที่ปริมาณต่างๆใน LDPE ซึ่งศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ที่ปริมาณของแป้งกล้วยและสารที่ไวต่อแสง (photosensitizer) ที่ปริมาณต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยแปรปริมาณแป้งกล้วยจาก 5-20 % เทียบกับปริมาณของ LDPE ในขณะที่เบนโซฟีโนน (benzophenone) ถูกเติมเข้าไปเพื่อเป็นสารที่ไวต่อแสงที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ดังนี้ 0.25, 0.50 และ 1.00 % โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณของ LDPE ซึ่งใช้ PE-g-GMAH 10 % เทียบกับน้ำหนักของแป้งกล้วยมาใช้เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ พบว่าความเสถียรทางความร้อนของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณแป้งกล้วยและปริมาณของเบนโซฟีโนน และการเติมแป้งกล้วยไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) และระดับความเป็นผลึกของฟิล์ม ส่วน PE-g-GMAH มีผลต่อการลดระดับความเป็นผลึกของฟิล์มในส่วนของเฟส LDPE แต่ไม่มีผลต่อค่า  $T_m$  ส่วนเบนโซฟีโนนทำให้  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่ลดระดับความเป็นผลึกของฟิล์มในส่วนของเฟส LDPE ลง และการเพิ่มจำนวนของแป้งกล้วย จะทำให้ค่าต้านต่อแรงดึงของฟิล์มลดลง การเติม PE-g-GMAH เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ จะทำให้ค่าต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมตัวเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามเบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อค่าต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์ม

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรด LD 1905F/FA ชื่อทางการค้า EI-Lene ผลิตโดยบริษัทไทยพอลิเอทิลีน (1993) จำกัด ความหนาแน่นเท่ากับ  $0.919 \text{ g/cm}^3$  จุดหลอมเหลวเท่ากับ  $110^\circ\text{C}$  และค่าดัชนีการไหลเท่ากับ  $5.0 \text{ g/10 min}$
2. แป้งมันสำปะหลัง ผลิตโดยบริษัทเบนเนรัลสตาร์ช จำกัด เกรดที่ใช้คือ แป้งดิบ และแป้งพรีเจล และก่อนนำมาใช้ทำการอบที่อุณหภูมิ  $105^\circ\text{C}$  จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่
3. โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulfate, PPS) ผลิตโดยบริษัท Merck
4. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) ผลิตโดยบริษัท Ajex finechem
5. พาราไซลีน (p-xylene) ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagenti
6. กลีเซอรอล (glycerol) ความเข้มข้น 99.5 % ความหนาแน่น  $1.25 \text{ g/cm}^3$  ผลิตโดยบริษัท Ajex finechem
7. น้ำกลั่น

#### 3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ไม้พิมพ์สำหรับอัดทำด้วยสแตนเลสรูปทรงสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 12 cm ความยาว 12 cm ความหนา 1 mm และ 3 mm
2. เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C
3. เครื่องตัดชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 แบบ Die C
4. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler
5. ตู้อบความร้อน ผลิตโดยบริษัท Memmert จัดจำหน่ายโดย บริษัท เค เอส พี อินเตอร์เนชัน จำกัด
6. ตู้อบสูญญากาศ ผลิตโดยบริษัท Precision จัดจำหน่ายโดย บริษัท เค เอส พี อินเตอร์เนชัน จำกัด

7. เครื่องผสม ยี่ห้อ Otto
8. โถดูดความชื้น พร้อมเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ
9. ชั้นดักสารพลาสติก
10. ขวดทดลองมีฝาปิด ขนาด 15 ml
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ตะกร้าขนาด 30 x 55 x 23 cm
13. ถุงดำ
14. ภาด
15. ชั้นดักดิน

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 inch ยาว 23 inch ผลิตโดยโรงงานชัยเจริญการช่าง
2. เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) รุ่น Brabender™ Mixer 350E ปริมาตรห้องผสมเท่ากับ 370 cm<sup>3</sup>
3. เครื่องอัดความดัน (compression molding) ผลิตโดยบริษัท Kao Tieh รุ่น KT-7014
4. เครื่องทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงผลิตโดยบริษัท LLOYD instrument รุ่น LR10K
5. เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ผลิตโดยบริษัท Zwick
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-5200LV
7. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer รุ่น DSC7
8. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น EQUINOX 55
9. เครื่องมือทดสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA) ผลิตโดยบริษัท Rheometric Scientific รุ่น Rheometric Scientific™ DMTA V
10. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA) ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA7
11. เครื่องเลื่อยตัดชิ้นงานขนาดใบเลื่อย 16 inch ผลิตโดยบริษัท Chih chuen

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องผสมแบบปิด

เตรียม LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิด แบ่งการเตรียมพอลิเมอร์ผสมออกเป็น 2 วิธี

ลำดับขั้นตอนการผสม

วิธีที่ 1

1. กำหนดปริมาตรของวัสดุทั้งหมดเพื่อให้ปริมาตรการผสมเท่ากับ 70 % ของปริมาตรห้องผสม
2. เติม LDPE ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 120°C ด้วยความเร็วโรเตอร์ที่กำหนด รอจนกระทั่งเทอร์กของการหลอมคงที่ (ใช้เวลาประมาณ 3.50 min) แล้วจึงเติมแป้งลงไปผสมกับ LDPE ที่หลอมเหลว ทำการผสมจนกระทั่งเทอร์กของการผสมคงที่ โดยใช้ระยะเวลารวมตามที่กำหนด
3. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสมแบบปิด แล้วนำไปรีดผ่านเครื่องบดสองลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด
4. กรณีที่มีการเติมกลีเซอรอลหรือน้ำในแป้งมันสำปะหลัง ทำการผสมแป้งกับกลีเซอรอลหรือน้ำในเครื่องผสมเป็นเวลา 3 min ก่อนจะนำมาผสมกับ LDPE ที่หลอมเหลวในเครื่องผสมแบบปิด ทำการผสมจนกระทั่งเทอร์กของการผสมคงที่ โดยใช้เวลารวมตามที่กำหนด
5. กรณีที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำการผสมแป้งกับสารละลาย PPS ในน้ำในเครื่องผสมเป็นเวลา 3 min ก่อนจะนำมาผสมกับ LDPE ที่หลอมเหลวในเครื่องผสมแบบปิด แล้วเติม BPO ทำการผสมจนกระทั่งเทอร์กของการผสมคงที่ โดยใช้เวลารวมตามที่กำหนด
6. อัตราส่วนของ LDPE และแป้ง เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก เช่น 30 wt% ของแป้ง หมายความว่า มีแป้ง 30 ส่วนโดยน้ำหนัก และ LDPE 70 ส่วนโดยน้ำหนัก
7. ปริมาณของกลีเซอรอล น้ำ และ PPS ใช้เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณแป้ง และใช้หน่วยเป็น pphr (parts per hundred) เช่น กลีเซอรอล 30 pphr หมายถึงใช้กลีเซอรอล 30 ส่วนโดยน้ำหนักต่อแป้ง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก
8. ปริมาณของ BPO ใช้เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณ LDPE และใช้หน่วยเป็น pphr เช่น BPO 1 pphr หมายถึง ใช้ BPO 1 ส่วนโดยน้ำหนักต่อ LDPE 100 ส่วนโดยน้ำหนัก

## วิธีที่ 2

1. นำเม็ด LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับกลีเซอรอลแล้วในเครื่องผสมเป็นเวลา 3 min ผสมกันในถุงพลาสติกจนเข้ากันดี
2. เติมส่วนผสมดังกล่าวในเครื่องผสมแบบปิด โดยใช้ปริมาตรเท่ากับ 70 % ของห้องผสม ที่อุณหภูมิ 120°C ด้วยความเร็วโรเตอร์และเวลาตามที่กำหนด
3. นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกจากเครื่องผสมแบบปิด แล้วนำไปรีดผ่านเครื่องบดสองลูกกลิ้ง เพื่อนำไปขึ้นรูปต่อไป

### 3.4.2 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด (compression molding)

นำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการรีดด้วยลูกกลิ้งมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดเป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 1 mm และ 3 mm ขนาด 6 inch x 6 inch ด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 min ที่ความดัน 200 kg/cm<sup>2</sup> และหล่อเย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 min ที่ความดัน 150 kg/cm<sup>2</sup>

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (tensile properties testing)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยทำการตัดชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้ความเร็วในการทดสอบ 50 mm/min ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25.0±0.5°C และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50±5 % รายงานค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress,  $\sigma_y$ ) ค่าความเครียด ณ จุดคราก (yield strain,  $\epsilon_y$ ) ค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break,  $\sigma_b$ ) หรือค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break,  $\epsilon_b$ ) โดยค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{tensile strength (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นทดสอบขาด (N)

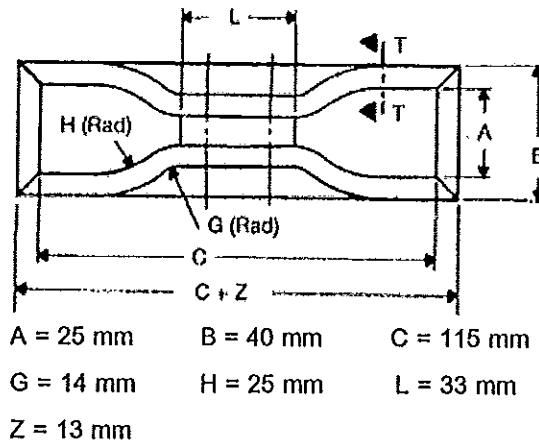
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (m<sup>2</sup>)

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความทนต่อแรงดึง ค่าที่ได้จะวัดโดยการอ่านระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดตัว คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{elongation at break (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $L$  คือ ระยะที่ขึ้นทดสอบยึดจนขาด

$L_0$  คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบรูปตั้มเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง

#### 3.4.4 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance testing)

ทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างโดยทำการตัดชิ้นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทดสอบชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 50 mm/min ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นทดสอบ 8 ชิ้น ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $25.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$  และที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ  $50 \pm 5\%$  ดึงชิ้นตัวอย่างจนฉีกขาด และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างฉีกขาด เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหรือความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) ตามสูตรในการคำนวณดังสมการ 3.3

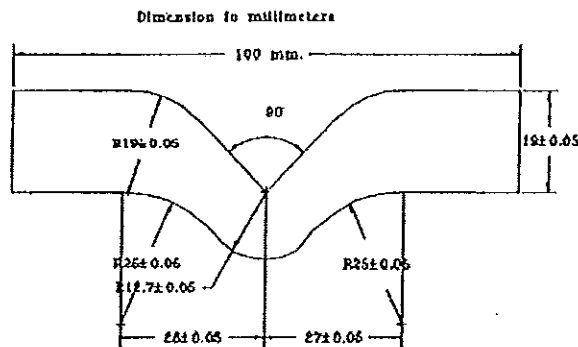
$$T_s \text{ (N/mm)} = \frac{F}{d} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $T_s$  เป็นค่าความทนต่อแรงดึง (tear strength) มีหน่วยเป็น N/mm

$F$  เป็นค่าแรงสูงสุด (maximum force) มีหน่วยเป็น N

$d$  เป็นค่าความหนาของชิ้นตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mm





รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบแบบมุมสำหรับการทดสอบการฉีกขาด

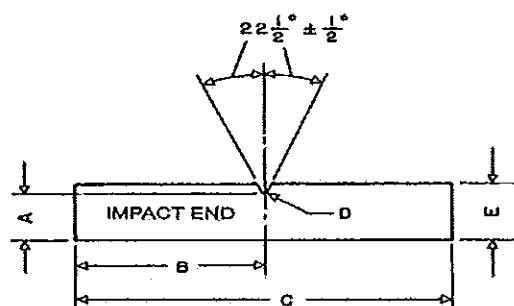
### 3.4.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact property testing)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod ชิ้นทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 12.7 mm และความยาว 63.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3 บากชิ้นทดสอบเป็นรูปตัววี (v shape) โดยให้มีความลึกเท่ากับ 2.54 mm เป็นมุม  $45^\circ$  ใช้ลูกตุ้ม (pendulum) ที่มีขนาด 2 J รายงานค่าการต้านแรงกระแทก (notch Izod impact strength) ดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ( $27 \pm 2^\circ\text{C}$ ) และที่ความชื้นสัมพัทธ์  $65 \pm 5\%$  ทำการทดสอบ 8 ชิ้นตัวอย่าง คำนวณความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้สมการ 3.4

$$\text{impact strength (kJ/m}^2\text{)} = \frac{E}{A} \quad (3.4)$$

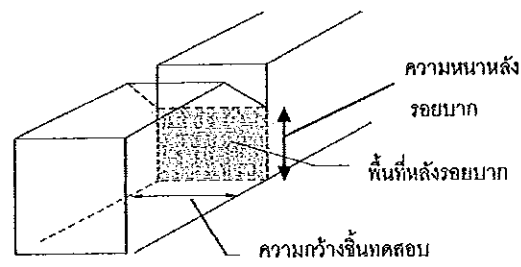
เมื่อ E คือ พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก มีหน่วยเป็น kJ

A คือ พื้นที่บริเวณหลังรอยบาก มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2$



A	$10.16 \pm 0.05$	B	$34.8 \pm 1.0$
C	$63.5 \pm 1.0$	D	$0.25R \pm 2.0$
E	$12.70 \pm 0.20$		

รูปที่ 3.3 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256



รูปที่ 3.4 พื้นที่หลังรอยบากของชิ้นทดสอบ

#### 3.4.6 การทดสอบการบวมตัว (swelling test)

ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2765 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด  $1.0 \times 1.0 \times 0.3$  cm ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบละเอียด  $0.0001$  g แخذชิ้นทดสอบในถ้วยทำละลายพาราไซลีน (p-xylene) ปริมาณ 5 ml อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ชิ้นทดสอบบรรจุอยู่ในขวดทดลองที่มีฝาปิด เมื่อเวลาผ่านไปนำชิ้นทดสอบออกจากขวดทดลองและชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบดังกล่าว คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ดังสมการ 3.5

$$\text{swelling (\%)} = \left[ \frac{W_s - W_o}{W_o} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากแช่ในถ้วยทำละลาย หน่วยเป็น g

$W_o$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในถ้วยทำละลาย หน่วยเป็น g

#### 3.4.7 การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption test)

ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด  $25.0 \times 25.0 \times 3.0$  cm นำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบสูญญากาศ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 h จากนั้นตั้งไว้ให้เย็นภายในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างให้มีความละเอียด  $0.0001$  g ( $m_{dry}$ ) แล้วนำชิ้นตัวอย่างแช่ในน้ำ เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินที่ผิวตัวอย่างออกด้วยกระดาษชำระ ชั่งน้ำหนักทันที ( $m_{wet}$ ) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $26.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  และที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ  $80 \pm 4$  % คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับน้ำ โดยใช้สมการ 3.6

$$\text{water uptake (\%)} = \left[ \frac{m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}}} \right] \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $W_{\text{wet}}$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากแช่ในน้ำ หน่วยเป็น g  
 $W_{\text{dry}}$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในน้ำ หน่วยเป็น g

### 3.4.8 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis, TGA)

เตรียมชิ้นตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม โดยเลือกช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ ตั้งแต่ 30°C ถึง 600°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

### 3.4.9 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอรี่เมตรี (differential scanning calorimetry, DSC)

ทำการศึกษาหาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ โดยตัดตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในอะลูมิเนียมแพน (aluminum pan) วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 20-160°C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min และใช้น้ำแข็งเป็นสารทำความเย็น คำนวณหาปริมาณผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์กับพอลิเมอร์ผสม โดยค่าความร้อนของการหลอมเหลว (fusion heat,  $\Delta H_f^0$ ) ของผลึก LDPE 100 % มีค่าเท่ากับ 277.1 J/g (Predoso and Rosa, 2005) คำนวณหาปริมาณผลึกได้จากสมการ 3.7

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f^*}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $X_c$  คือปริมาณผลึก (crystallinity)  
 $\Delta H_f^*$  คือค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก LDPE ในพอลิเมอร์ผสม  
 $\Delta H_f^0$  คือค่าพลังงานความร้อนของการหลอมเหลวของผลึก LDPE 100%

### 3.4.10 การตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

ทำการศึกษามูฟง์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง ในสัดส่วนแป้งปริมาณต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมหลังจากฝังดินในเวลาต่างๆ โดยนำตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ต้องการวิเคราะห์ขนาดประมาณ 1 cm X 2 cm มาทำการทดสอบในช่วงเลขคลื่น 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  สแกนจำนวน 256 ครั้ง ใช้เทคนิคการทดสอบแบบ ATR

### 3.4.11 การตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

ทำการศึกษาสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ เตรียมชิ้นทดสอบ โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง 10 mm และยาว 25 mm มีความหนาประมาณ 1.5 mm ใช้การทดสอบแบบ dual cantilever bending ด้วยความถี่ 1 Hz เปอร์เซนต์การยืดถูกควบคุมไว้ที่ (strain control) 0.01 % ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ -40 ถึง 100°C และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 3°C/min

### 3.4.12 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

มีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้

(i) การเตรียมตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยการตัดชิ้นงานที่มีความกว้าง 1 cm และความยาว 5 cm แช่ชิ้นตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวประมาณ 2 h และทำการหักทันที แล้วติดตัวอย่างบนแท่งทองเหลือง เคลือบด้วยทอง และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ii) การเตรียมชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่ได้หลังจากการฝังดินในระยะเวลาต่างๆ เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดึง ซึ่งบริเวณที่ทำการตรวจสอบ คือ บริเวณผิวหน้าตัดที่เกิดจากการดึงจนขาด (fractured surface) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างติดบนแท่งทองเหลือง เคลือบด้วยทอง และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.4.13 การทดสอบความสามารถในการเสื่อมสภาพ (Maharana and singh, 2006)

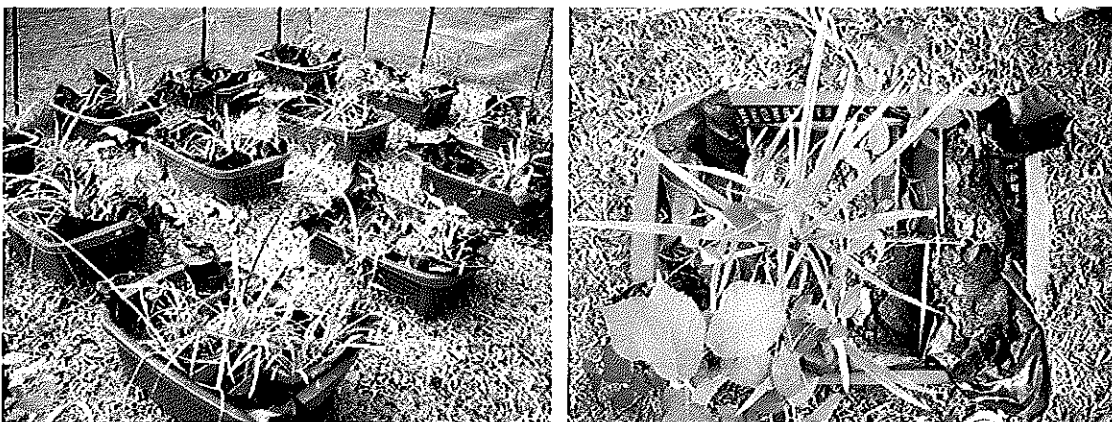
ทำการทดสอบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้วิธีการฝังดิน (soil-burial test) ดินที่ใช้เป็นดินผสมระหว่างดินที่ขायทางการค้ากับดินที่ได้จากสวนยางพารา ผสมกันด้วยอัตรา 1:1 นำขึ้นตัวอย่างที่มีความหนา 1.0 mm และรู้น้ำหนักแน่นอนฝังดินที่บรรจุในตะกร้า ที่ความลึกประมาณ 10 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อครบเวลาที่กำหนดเก็บขึ้นตัวอย่างที่ฝังดินล้างน้ำเพื่อกำจัดเอาเศษดินออก จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 45-50°C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 24 h คำนวนความสามารถในการย่อยสลายจากน้ำหนักที่หายไปจากสมการที่ 3.8

$$\text{Weight loss (\%)} = \left[ \frac{W_b - W_a}{W_a} \right] \times 100 \quad (3.8)$$

เมื่อ  $W_a$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากฝังดิน หน่วยเป็น g

$W_b$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนฝังดิน หน่วยเป็น g

ทำการฝังดินตั้งแต่เดือนกันยายน 2550 – เดือนมีนาคม 2551 ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณฝน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิเฉลี่ย ที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา อากาศจังหวัดสงขลา สถานีคอหงส์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตรวจสอบหาน้ำหนักที่หายไปด้วยการชั่งน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึง ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปด้วยเครื่อง TGA ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR และปริมาณผลึก  $T_m$  และ  $T_c$  ด้วยเครื่อง DSC ของพอลิเมอร์ผสมหลังจากฝังดิน



รูปที่ 3.5 ภาพการทดสอบการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้วิธีการฝังดิน

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน ที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา  
อากาศจังหวัดสงขลา สถานีคอหงส์

เดือน	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณน้ำฝน (mm)
กันยายน 2550	27.8	79	94.4
ตุลาคม 2550	26.7	84	351.6
พฤศจิกายน 2550	26.4	84	251.2
ธันวาคม 2550	27.0	78	263.4
มกราคม 2551	27.0	78	139.7
กุมภาพันธ์ 2551	27.1	74	51.9
มีนาคม 2551	27.7	76	77.1

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

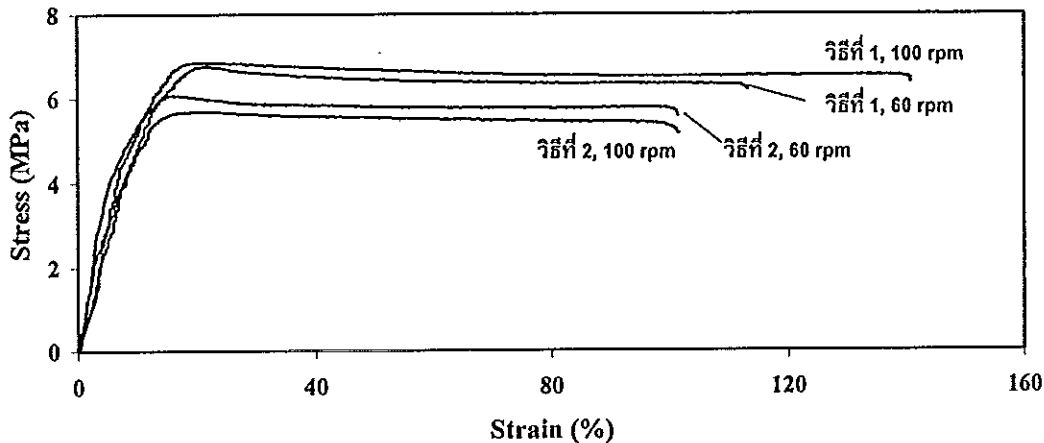
#### 4.1 อิทธิพลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

##### 4.1.1 ขั้นตอนการผสมและความเร็วรอบของการผสม

ศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิดที่มีปริมาณแป้งเท่ากับ 30 wt% ใช้ปริมาณกลีเซอรอลเท่ากับ 10 pphr เทียบกับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ทำการผสมที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 min ใช้วิธีการผสม 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 ทำการหลอม LDPE ในเครื่องผสมแบบปิดก่อน จากนั้นค่อยเติมแป้งมันสำปะหลังเข้าไปผสม ส่วนวิธีที่ 2 นำ LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในถุงพลาสติกจนเข้ากันดี ก่อนนำไปผสมในเครื่องผสมแบบปิด กราฟความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ทั้งสองวิธี มีลักษณะแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมที่ผสมโดยใช้วิธีที่ 1 ให้ค่าความเครียด ณ จุดคราก (yield strain,  $\epsilon_y$ ) และ ค่าความเครียด ณ จุดขาด (strain at break,  $\epsilon_b$ ) สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมโดยใช้วิธีที่ 2 แต่วิธีการเตรียมทั้งสองวิธีให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus, E) ค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress,  $\sigma_y$ ) และค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break,  $\sigma_b$ ) ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการหลอม LDPE ก่อนแล้วค่อยเติมแป้งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิด ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดแป้งในเฟสของ LDPE เกิดได้ดีกว่าการนำ LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในถุงพลาสติก ก่อนนำไปผสมในเครื่องผสมแบบปิด ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยใช้วิธีที่ 1 มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยวิธีที่ 2

ศึกษาอิทธิพลของความเร็วโรเตอร์ของเครื่องผสมแบบปิด ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม โดยศึกษาความเร็วของโรเตอร์ที่ 60 rpm และ 100 rpm พบว่าในวิธีการผสมวิธีที่ 1 พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์ในการผสมเป็น 100 rpm ให้ค่า  $\epsilon_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm เนื่องจากที่ความเร็วโรเตอร์ในการผสมสูงส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคแป้งในเฟสของ LDPE เกิดได้ดีกว่าที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำ (Joseph *et al.*, 1999) อันเป็นผลมาจากที่ความเร็วโรเตอร์สูงมีแรงเฉือนสูงกว่าที่ความเร็วโรเตอร์ต่ำ (Xu *et al.*, 1999) การผสมที่ใช้วิธีที่ 2 ให้สมบัติความทนต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ทั้งกรณีที่ใช้ความเร็วโรเตอร์ 60

และ 100 rpm จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงมากกว่าอิทธิพลของความเร็วโรเตอร์ ส่งผลให้การทดลองในส่วนต่อไปใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 และใช้ความเร็วโรเตอร์ในการผสมเท่ากับ 100 rpm เนื่องจากวิธีการผสมและความเร็วโรเตอร์ดังกล่าวให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ผสมด้วยความเร็วโรเตอร์ 60 และ 100 rpm โดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4.1 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ความเร็วโรเตอร์ 60 และ 100 rpm ด้วยวิธีการผสมวิธีที่ 1 และ 2

ความเร็วโรเตอร์ (rpm)	วิธีการผสม	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
60	วิธีที่ 1	64.8±10.7	6.4±0.4	21.0±0.8	5.9±0.4	103.9±32.3
	วิธีที่ 2	79.4±12.1	6.1±0.4	17.8±1.3	5.6±0.3	82.2±21.3
100	วิธีที่ 1	62.1±7.0	6.3±0.5	21.8±0.9	6.1±0.3	139.4±15.0
	วิธีที่ 2	69.3±10.5	5.6±0.2	19.7±0.7	5.1±0.1	103.9±19.2

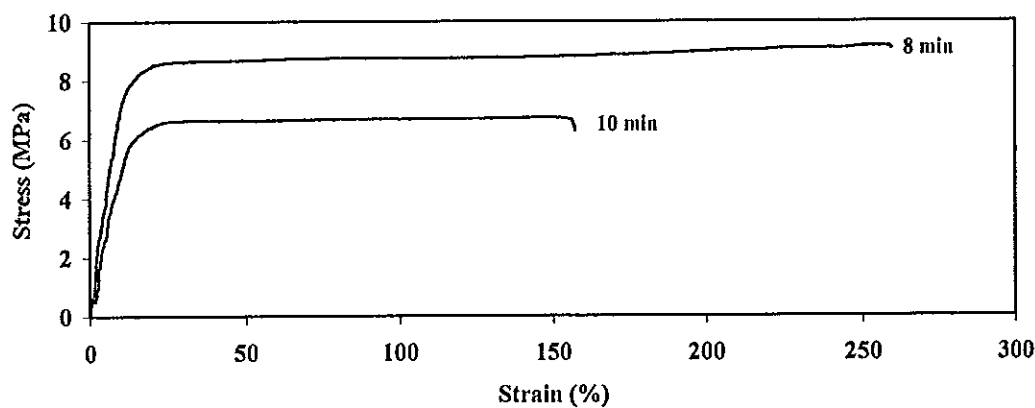
#### 4.1.2 ระยะเวลาของการผสม

ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาของการผสมต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแบ่งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิด ที่มีปริมาณแบ่งเท่ากับ 30 % โดยน้ำหนัก ในการศึกษาไม่มีการเติมกลีเซอรอลเพื่อใช้ในการทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แก่แบ่ง ทำการผสมโดยใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 120°C ใช้ความเร็ว



โรเตอร์ในการผสมเท่ากับ 100 rpm แปรระยะเวลาที่ใช้ในการผสมเป็น 8 และ 10 min เพื่อดูว่าความผสมพอลิเมอร์ทั้งสองนานเท่าไร กราฟความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมที่เวลาผสมต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.2 กราฟที่ได้มีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว ทั้งกรณีที่ใช้เวลาในการผสม 8 และ 10 min

จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 8 min ให้ค่า  $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\sigma_b$  และ  $\epsilon_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 10 min ดังแสดงในตารางที่ 4.2 สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 8 min มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 10 min เนื่องจากภายใต้การผสมที่อุณหภูมิและแรงเฉือนที่สูง การใช้เวลาในการผสมนานขึ้น ทำให้เกิดการขาดของโมเลกุลของพอลิเมอร์ขึ้น ส่งผลให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ที่ใช้เวลาในการผสม 8 และ 10 min

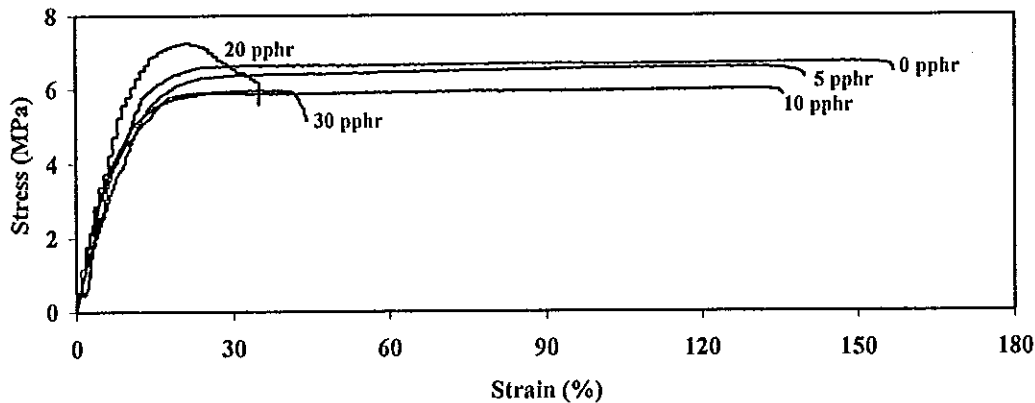
ตารางที่ 4.2 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป้ง) ใช้เวลาในการผสม 8 และ 10 min

เวลาในการผสม (min)	$E$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
8	79.6±7.2	8.9±0.3	32.6±2.8	9.2±0.3	265.1±19.6
10	53.5±1.6	6.5±0.2	25.4±1.6	6.3±0.1	151.2±14.8

#### 4.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มกลีเซอรอลปริมาณต่าง ๆ ในแป้งที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

การทดลองนี้มีการแปรระยะเวลาการบ่มกลีเซอรอลที่ผสมกับแป้ง 2 เวลา คือ การนำแป้งมาใช้ทันทีหลังจากที่ผสมกับกลีเซอรอลแล้ว เรียกระยะการบ่มว่า 0 h และระยะเวลาการบ่มที่ 24 h ภายใต้บรรยากาศห้อง มีการแปรปริมาณกลีเซอรอลดังนี้ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 pphr ทำการผสมที่ 120°C ความเร็วโรเตอร์ในการผสม 100 rpm ใช้เวลาการผสมรวม 10 min พอลิเมอร์ผสมมีปริมาณแป้งเท่ากับ 30 % โดยน้ำหนัก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ 4.3 และสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีระยะเวลาการบ่มแป้งผสมกลีเซอรอล 0 h แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อค่า  $E$  และ  $E_b$  อย่างเห็นได้ชัด พอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนจากลักษณะการแตกหักแบบเหนียวไปเป็นการแตกหักแบบเปราะแต่ยังคงมีจุดคราก (ductile-brittle fracture) เมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 10 pphr ในขณะที่ค่า  $\sigma_y$ ,  $E_y$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน การเติมกลีเซอรอลมีแนวโน้มทำให้ค่า  $E$  สูงขึ้น ที่กลีเซอรอลปริมาณ 20 pphr ทำให้ค่า  $E$  สูงมากขึ้นถึง 71.0 MPa และค่า  $E_b$  ลดลงตามปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น อาจมีผลจาก 2 สาเหตุด้วยกันคือ กลีเซอรอลที่เติมในแป้งบางส่วนไม่ได้เข้าไปลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของแป้ง เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลแป้งเคลื่อนที่ได้มากขึ้น แต่จะเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งแทน เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งกลายเป็นร่างแห ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมแข็งและเปราะขึ้น (อรอุษา, 2546; Lourdin *et al.*, 1996) ทำให้ค่า  $E$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และทำให้ค่า  $E_b$  ของพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งเป็นผลมาจากในกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) จะไม่ทำให้เกิดกระบวนการพลาสติกไซเซชันระหว่างแป้งกับกลีเซอรอล เพราะเกิดการแยกเฟสระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลขึ้น เนื่องมาจากในกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวเม็ดแป้งไม่เกิดการหลอมระหว่างการผสม ทำให้กลีเซอรอลไม่สามารถแพร่เข้าไปในอนุภาคแป้งได้ (Roz *et al.*, 2006; Follain *et al.*, 2006) นอกจากนี้เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความหนืดลดลงอย่างมาก ส่งผลให้กระบวนการพลาสติกไซเซชันของกลีเซอรอลกับแป้งเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากแรงเฉือนที่ลดลงในระหว่างกระบวนการผสม (Roz *et al.*, 2006) จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เติมกลีเซอรอลมีสมบัติเชิงกลลดลง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (30 %แ่ง) ที่ใช้ระยะเวลาการปมแ่งผสมกลีเซอรอล 0 h

สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีระยะเวลาการปมแ่งผสมกลีเซอรอล 24 h แสดงในตารางที่ 4.4 การปมแ่งกับกลีเซอรอลนานขึ้น แสดงผลเช่นเดียวกับกับการปมที่ 0 h (หรือการนำมาใช้ทันที) พบว่าค่า  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า E จะสูงขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ค่า  $\epsilon_b$  มีค่าสูงขึ้นหลังจากการเติมกลีเซอรอล และที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 pphr ให้ค่า  $\epsilon_b$  สูงที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปมแ่งผสมกลีเซอรอลไว้ 24 h ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของกลีเซอรอลในเฟสของแ่ง เนื่องจากกลีเซอรอลมีเวลาในการซึมผ่านเข้าไปในอนุภาคของเม็ดแ่งได้ดียิ่ง ทำให้กลีเซอรอลที่เติมไปบางส่วนสามารถเกิดกระบวนการพลาสติไซเซชันกับแ่งได้ จึงส่งผลให้ค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณกลีเซอรอล 5 pphr มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการปมแ่งผสมกลีเซอรอลทิ้งไว้ 24 h ส่งผลให้กลีเซอรอลอิสระ (free glycerol) ดูดซับโมเลกุลน้ำในอากาศได้มากกว่ากรณีของแ่งผสมกลีเซอรอลที่ใช้โดยทันที (การปมที่ 0 h) ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แ่งผสมกลีเซอรอลที่ผ่านการปมเป็นระยะเวลา 24 h ไม่สามารถใช้ปริมาณของกลีเซอรอลมากกว่า 10 pphr ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แ่งผสมกลีเซอรอลที่ผ่านการปม 0 h สามารถใช้ปริมาณกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมได้สูงถึง 30 pphr แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มเป็น 40 และ 50 pphr ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมได้เช่นเดียวกัน เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลสูงขึ้นไปอีก ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำในอากาศยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเป็นขั้วของแ่งผสมกลีเซอรอลยิ่งเพิ่มขึ้น และจากความแตกต่างระหว่างความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง จึงทำให้เกิดการแยกเฟสขึ้นระหว่าง LDPE กับแ่งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิด ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตา

เปรียบเทียบผลของระยะเวลาการปมแบ่งผสมกลีเซอรอลดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการปมเป็นเวลานานขึ้นจะให้ค่า E และ  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น แต่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แบ่งผสมกลีเซอรอลในทันที จึงจัดได้ว่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แบ่งผสมกลีเซอรอลที่มีระยะเวลาการปม 0 h และ 24 h มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาตามหลักเศรษฐศาสตร์และการแยกเฟสแล้ว การปมเป็นเวลานานจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และไม่สามารถเติมกลีเซอรอลได้มากขึ้น ดังนั้นการทดลองต่อไปจะเลือกใช้ตัวอย่างที่ไม่มีการปมหรือการนำแบ่งผสมกลีเซอรอลมาใช้ทันทีหลังการผสม

ตารางที่ 4.3 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ใช้ระยะเวลาการปมแบ่งผสมกลีเซอรอล 0 h

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	53.5±1.6	6.5±0.2	25.4±1.6	6.3±0.1	151.2±14.8
5	50.2±3.0	6.0±0.7	25.6±2.8	6.0±0.7	146.4±27.5
10	62.1±7.0	6.3±0.5	21.8±0.9	6.1±0.3	139.3±14.9
20	71.0±4.1	7.3±0.2	20.7±1.5	6.3±0.3	33.6±7.5
30	66.3±8.4	5.7±0.2	8.7±1.1	5.6±0.2	44.1±6.4

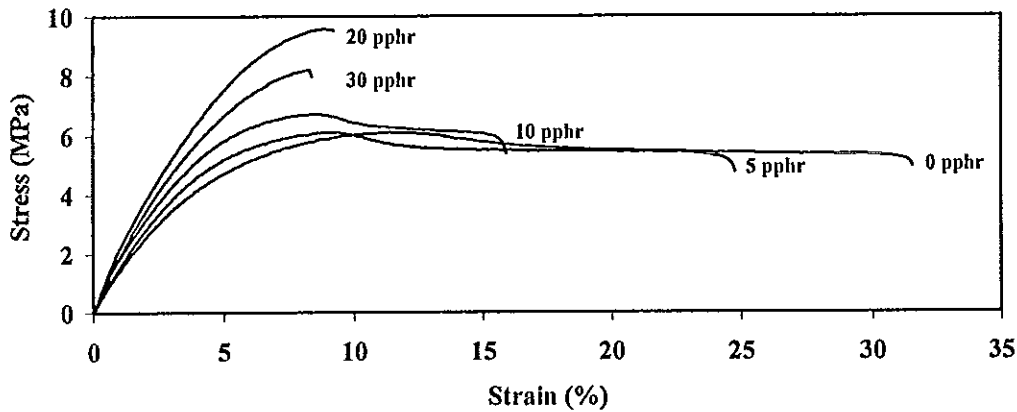
ตารางที่ 4.4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ใช้ระยะเวลาการปมแบ่งผสมกลีเซอรอล 24 h

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	50.5±3.2	5.8±0.2	28.6±0.8	5.7±0.1	129.1±23.8
5	70.3±13.5	5.6±0.2	25.0±2.3	5.1±0.4	182.4±24.6
10	71.3±14.5	5.5±0.2	24.8±1.2	5.0±0.4	130.4±13.8

#### 4.3 อิทธิพลปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

เตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่ง 50 wt% ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 120°C ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm ใช้เวลารวมในการผสมเป็น 8 min ผสมกลีเซอรอลในแบ่งตามปริมาณต่อไปนี้ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 pphr และนำมาใช้ทันทีหลังการผสม (เวลาการปมแบ่งผสมกลีเซอรอลเท่ากับ 0 h)

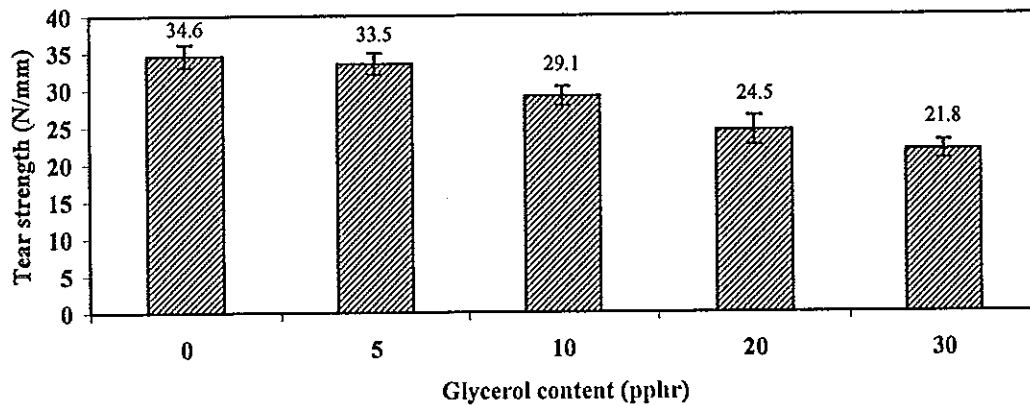
พิจารณาสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่าให้ผลเป็นแนวโน้มเดียวกันกับค่า  $\epsilon_b$  โดยค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงจาก 34.6 N/mm ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลเป็น 33.5, 29.1, 24.5 และ 21.8 N/mm ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงกระทำลดลงจาก 9.2 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 3.8, 3.3, 1.6 และ 1.8 kJ/m<sup>2</sup> ที่ปริมาณกลีเซอรอลเป็น 5, 10, 20 และ 30 pphr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะแข็งเปราะเพิ่มขึ้น สาเหตุการแข็งและเปราะขึ้นของพอลิเมอร์ผสม เนื่องมาจากการเติมกลีเซอรอลได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2



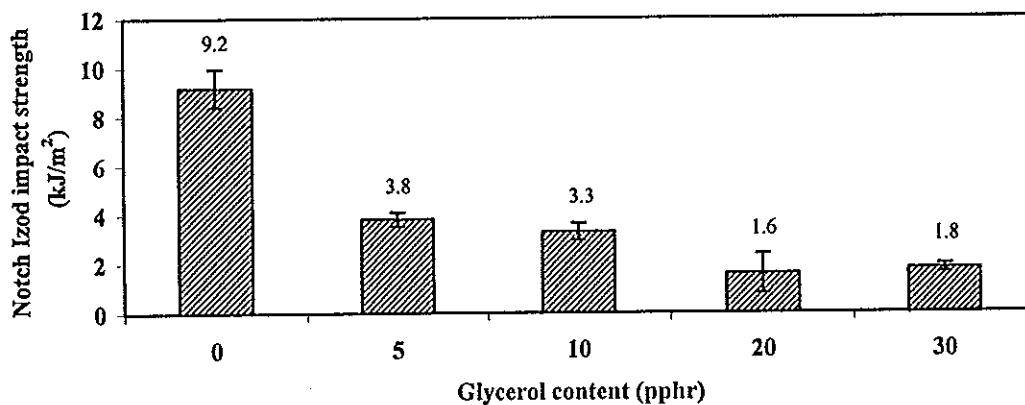
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง

ตารางที่ 4.5 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	154.2±13.1	6.1±0.2	10.3±1.0	5.2±0.2	31.6±3.4
5	164.8±14.2	6.2±0.2	8.9±1.1	5.3±0.1	25.5±4.6
10	190.6±8.5	6.8±0.2	7.9±0.5	5.6±0.2	15.5±1.4
20	193.1±18.8	-	-	8.8±1.1	9.1±0.8
30	186.4±10.9	-	-	8.1±0.3	8.1±0.4



รูปที่ 4.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr

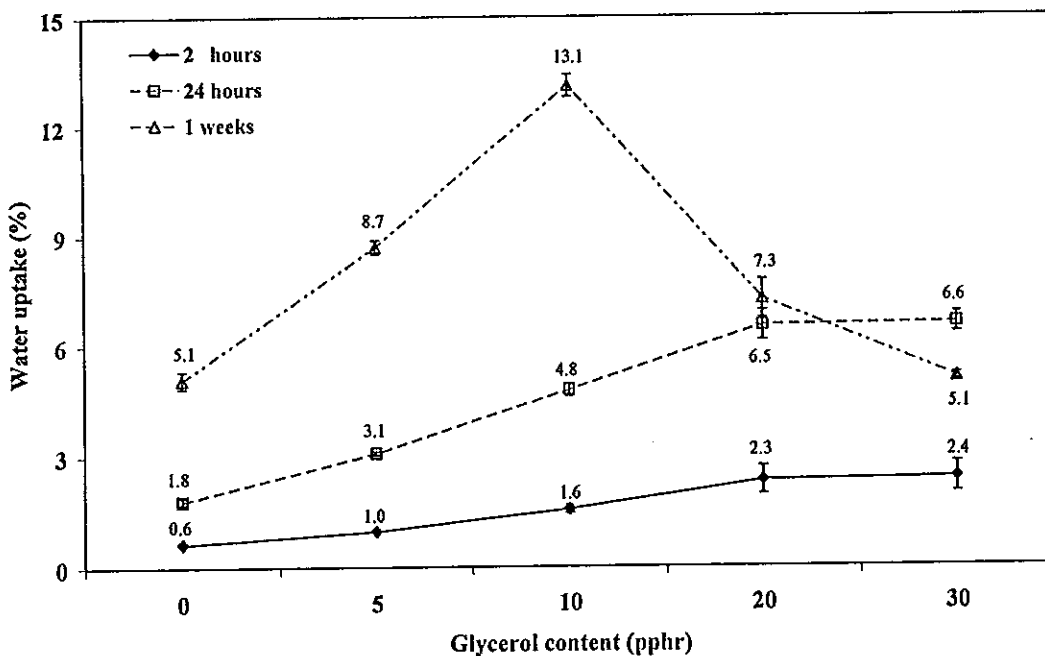


รูปที่ 4.7 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr

#### 4.3.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

พิจารณาความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น 5.1, 8.7, 13.1, 7.3 และ 5.1 % เมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 24 h ที่ปริมาณกลีเซอรอลเท่ากับ 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม อธิบายได้ว่าเนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปนั้นไม่สามารถเกิดกระบวนการพลาติไซเซชันกับโมเลกุลแป้ง เกิดการแยก

เฟสกันขึ้นระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลที่เตรียมโดยใช้กระบวนการหลอมเหลวตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น กลีเซอรอลที่เติมไปจึงอยู่ในรูปของกลีเซอรอลอิสระ ดังนั้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น จึงไปเพิ่มความเป็นขั้วให้แก่พอลิเมอร์ผสม อันเนื่องมาจากโมเลกุลของกลีเซอรอลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวน 3 หมู่ ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น (Godbillot *et al.*, 2006) เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ดี ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นนี้ ช่วยยืนยันกระบวนการแยกเฟสระหว่างแป้งกับกลีเซอรอลได้ดียิ่งขึ้น ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น นอกจากนี้เวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เป็นผลมาจากการเพิ่มเวลาในการดูดซับน้ำให้แก่พอลิเมอร์ผสมนั่นเอง โดยที่ระยะเวลาในการทดสอบเป็น 1 สัปดาห์ พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 0-10 pphr แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 20 และ 30 pphr ค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลง โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีบางส่วนที่ละลายน้ำออกมา ทำให้น้ำมีตะกอนสีขาวขุ่น จึงทำให้น้ำหนักที่ชั่งได้มีค่าลดลง แสดงว่าที่ระยะเวลาการทดสอบ 1 สัปดาห์ พอลิเมอร์ผสมมีการดูดซับน้ำเหนือจุดอิ่มตัว ทำให้มีบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมละลายน้ำออกมา



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr

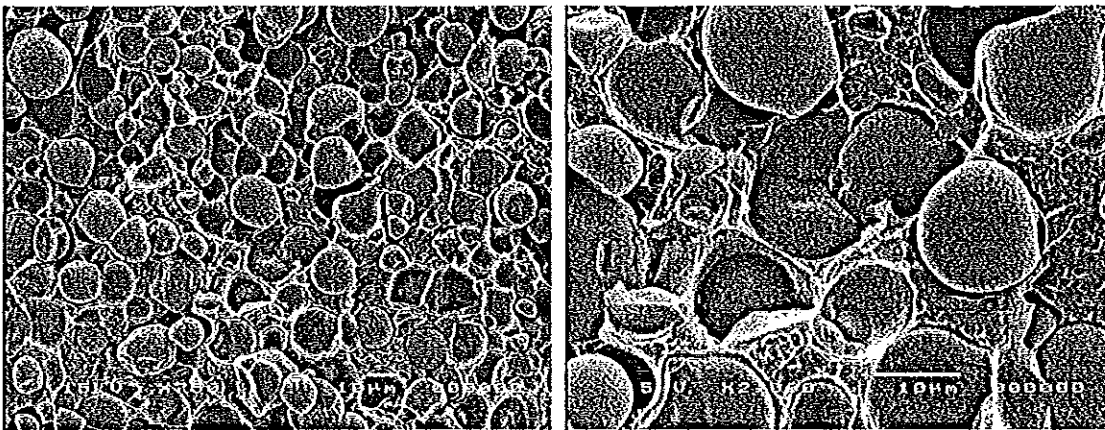
### 4.3.3 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้น ในรูปที่ 4.9(a, b) เป็นรูปที่แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล จะเห็นว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสของ LDPE และไม่พบการรวมกลุ่มของเม็ดแป้งเป็นกลุ่มก้อน แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นเป็น 5 pphr และ 30 pphr ดังแสดงในรูปที่ 4.9(c, d) และ 4.9(e, f) ตามลำดับ จะพบการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งกระจายอยู่ทั่วไป และเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น ขนาดของกลุ่มเม็ดแป้งจะรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดง ซึ่งจุดที่เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคเม็ดแป้ง จะเป็นจุดอ่อนแอและเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการแตก (crack) ในพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ยิ่งขนาดกลุ่มของเม็ดแป้งใหญ่ขึ้น จะทำสมบัติเชิงกลลดต่ำลงมากขึ้น จากลักษณะสัณฐานดังกล่าว จึงช่วยอธิบายสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมได้ เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น

### 4.4 อิทธิพลของชนิดแป้งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

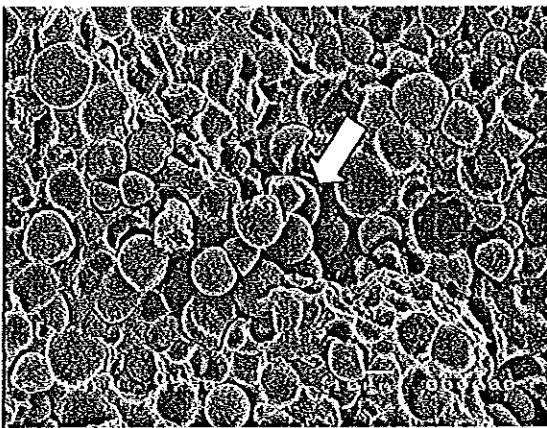
เตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 50 wt% ทำการผสมที่อุณหภูมิ 120°C ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm ใช้เวลารวมในการผสมเป็น 8 min ผสมกลีเซอรอลในแป้งตามปริมาณต่อไปนี้ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 pphr เทียบกับปริมาณของแป้ง และนำมาใช้ทันที หลังการผสม ใช้วิธีการผสมวิธีที่ 1 เช่นเดียวกับที่กล่าวมา ในการทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของชนิดแป้งต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยจะทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างใช้แป้งดิบ (native starch) คือแป้งที่ยังไม่ได้ถูกทำการดัดแปรหรือแปรรูป กับแป้งพรีเจล (pregelatinized starch) ซึ่งแป้งพรีเจลเป็นแป้งที่เกิดการนำเอาแป้งดิบที่มีน้ำอยู่มากพอ มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดพองตัวเต็มที่และแตกออก (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) ลักษณะสัณฐานของแป้งดิบและแป้งพรีเจลแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าแป้งดิบมีลักษณะค่อนข้างกลม มีขนาดของเม็ดแป้งแตกต่างกันอยู่ในช่วง 5-35  $\mu\text{m}$  และไม่สามารถละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลอยู่ในรูปของร่างแห ส่งผลให้ละลายน้ำได้ยากที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแป้งพรีเจลไม่มีสภาพการเป็นเม็ดแป้งเหลืออยู่มีรูปร่างและขนาดไม่แน่นอน แป้งพรีเจลจะสามารถละลายและกระจายตัวได้ในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



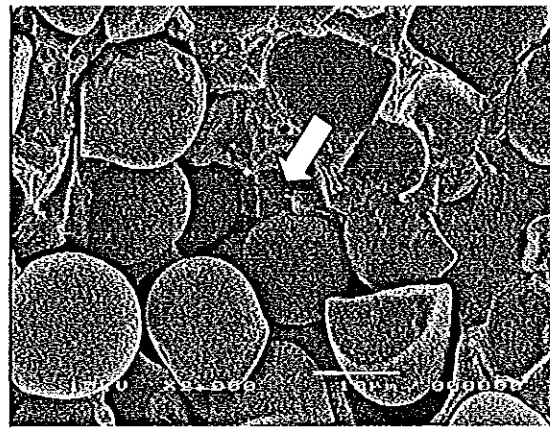


a

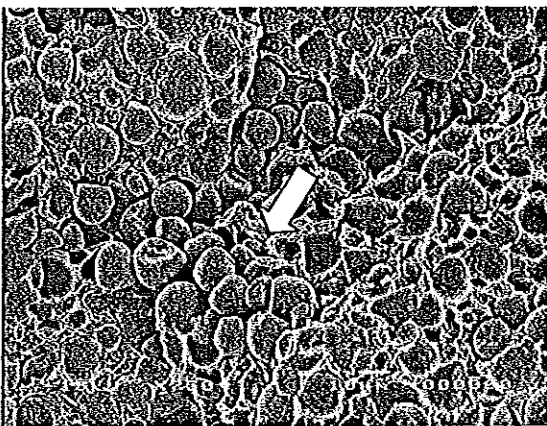
b



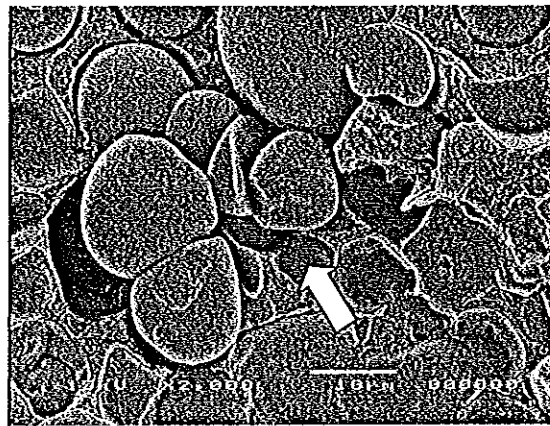
c



d

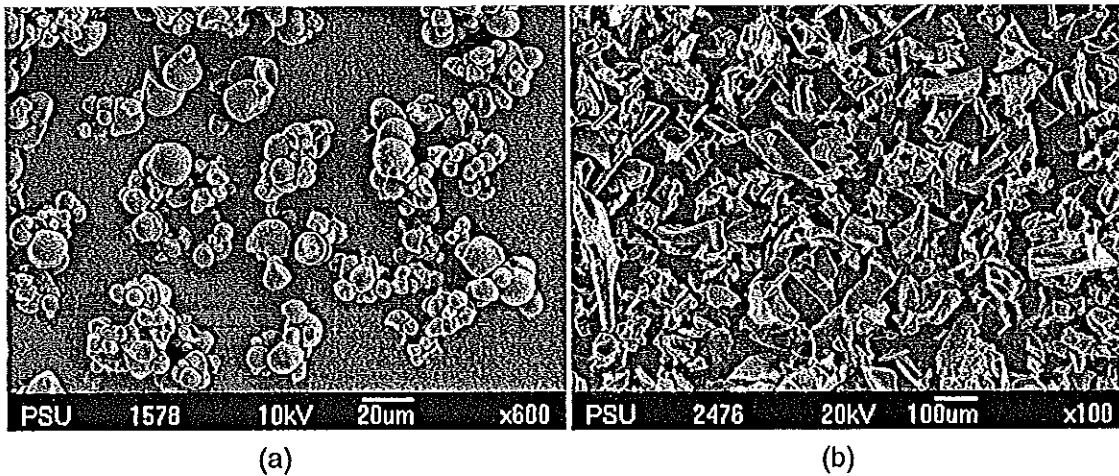


e



f

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% แปรรูปปริมาณเจลาติน: 0 pphr (a, b), 5 pphr (c, d) และ 30 pphr (e, f)

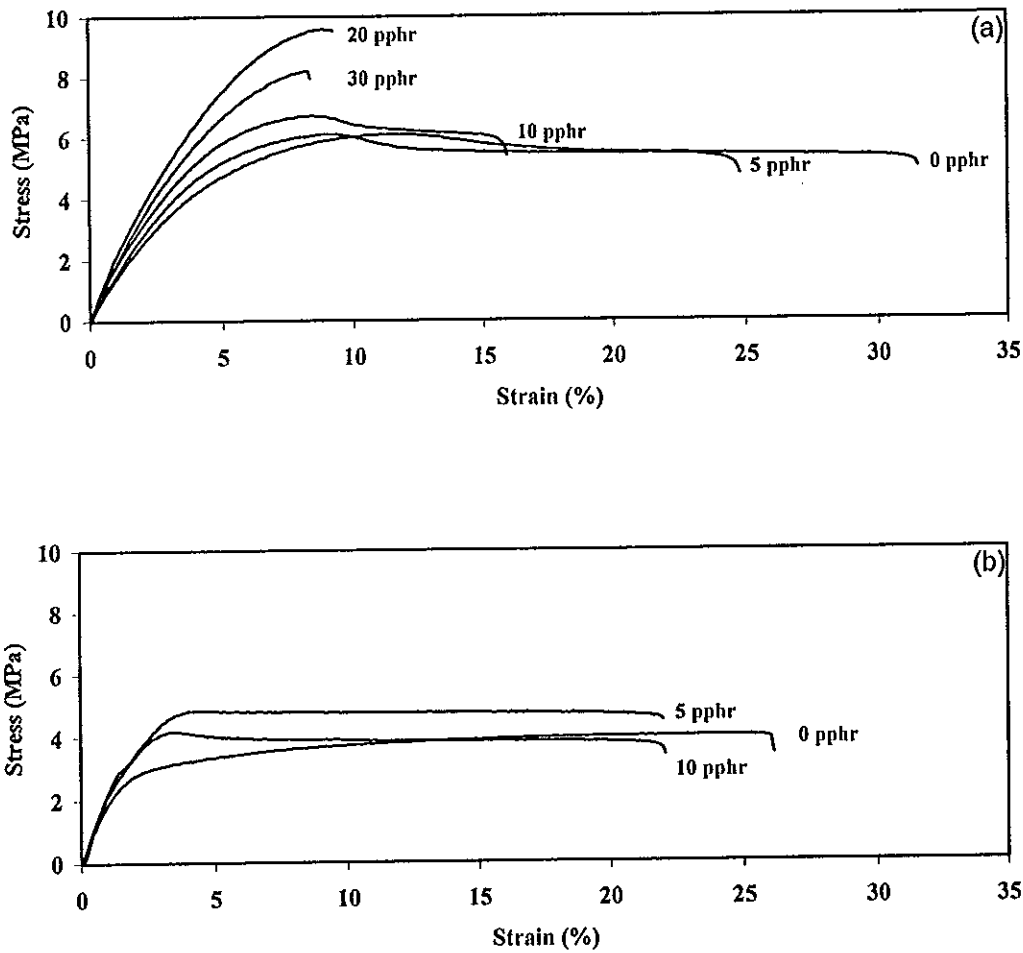


รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของแป้งชนิดต่างๆ: แป้งดิบ (a) และ แป้งพรีเจล (b)

กราฟความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบและแป้งพรีเจล แสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนจาก ลักษณะการแตกหักแบบเหนียวไปเป็นการแตกหักแบบเปราะ และสมบัติความทนต่อแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบที่แปรปริมาณกลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า  $E$ ,  $\sigma_y$  และ  $\sigma_b$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $\epsilon_y$  และ  $\epsilon_b$  ลดลง โดยเฉพาะค่า  $\epsilon_b$  ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น และไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสม ได้เมื่อใส่กลีเซอรอลตั้งแต่ 40 pphr ขึ้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.3.1

สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล โดยแปรปริมาณ กลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลลงในพอลิเมอร์ผสม ค่า  $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และค่า  $\sigma_b$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่า  $\epsilon_b$  ลดลง

เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทก ของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบมีค่าลดลง ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจลให้สมบัติความ ต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่า ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าจะ เปลี่ยนชนิดของแป้งมันสำปะหลังจากแป้งดิบไปเป็นแป้งพรีเจล ก็ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน คือพอลิเมอร์ผสมจะมีลักษณะแข็งและเปราะขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า กระบวนการผสมเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดการเกิดกระบวนการพลาสติกไซเซชันของแป้งกับ กลีเซอรอล ตามที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลงเมื่อมีการ เติมกลีเซอรอล ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะไม่ใช้กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แฉ่ง) ที่แปรปริมาณกลีเซอรอล 0-30 pphr: (a) แฉ่งดิบ และ (b) แฉ่งพริเจล

ตารางที่ 4.6 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แฉ่ง) ที่ใช้แฉ่งดิบ แปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5, 10, 20 และ 30 pphr เทียบกับปริมาณแฉ่ง

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	154.2±13.1	6.1±0.2	10.3±1.0	5.2±0.2	31.6±3.4
5	164.8±14.2	6.2±0.2	8.9±1.1	5.3±0.1	25.5±4.6
10	190.6±8.5	6.8±0.2	7.9±0.5	5.6±0.2	15.5±1.4
20	193.1±18.8	-	-	8.8±1.1	9.1±0.8
30	186.4±10.9	-	-	8.1±0.3	8.1±0.4

ตารางที่ 4.7 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งพรีเจลโดยแปรปริมาณกลีเซอรอล 0, 5 และ 10 pphr เทียบกับปริมาณแป้ง

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	203.4±29.3	3.4±0.1	1.7±0.2	3.7±0.3	26.0±2.2
5	239.9±21.4	4.7±0.2	1.9±0.2	4.2±0.3	20.7±2.4
10	215.7±29.3	4.3±0.1	3.8±0.4	3.5±0.3	22.2±1.4

\*\*\* กลีเซอรอล 20, 30, 40 และ 50 pphr ไม่สามารถเตรียมได้

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) โดยใช้แป้งดิบและแป้งพรีเจล

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	Tear strength (N/mm)	
	แป้งดิบ	แป้งพรีเจล
0	34.58 ± 1.58	23.58 ± 1.68
5	33.49 ± 1.46	28.34 ± 1.27
10	29.09 ± 1.30	28.28 ± 2.52
20	24.46 ± 1.98	-
30	21.81 ± 1.21	-

ตารางที่ 4.9 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ใช้แป้งดิบและแป้งพรีเจล

ปริมาณกลีเซอรอล (pphr)	Izod impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	
	แป้งดิบ	แป้งพรีเจล
0	9.18 ± 0.78	4.70 ± 0.41
5	3.81 ± 0.28	3.82 ± 0.47
10	3.29 ± 0.34	3.42 ± 0.24
20	1.59 ± 0.08	-
30	1.79 ± 0.17	-

เปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ที่ใช้แป้งดิบกับ แป้งพรีเจล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบให้ ค่า  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\sigma_b$  และ  $\epsilon_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล แต่ให้ค่า  $E$  ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจลเล็กน้อย สาเหตุเนื่องจากแป้งพรีเจลดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้มากกว่าแป้งดิบ ทำให้ความชื้นที่แป้งพรีเจลดูดเข้าไปบางส่วนจะเข้าไปเป็นน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (bound water) ไปเกิดพันธะกับโมเลกุลของแป้ง ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล แข็งและเปราะกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบ นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล จากสมบัติความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจลมีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบ อธิบายได้ว่าในกรณีของแป้งพรีเจลอนุภาคของเม็ดแป้ง (granule) ได้ถูกทำลายไปในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชัน ส่งผลทำให้แป้งจากที่มีความเป็นผลึกสูงกลายเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำ จึงมีความต้านทานต่อแรงกระทำได้น้อยกว่าแป้งดิบที่ยังคงความเป็นเม็ดแป้งและมีความเป็นผลึกอยู่ (Rosa et al., 2004) ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจลมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ทั้งแป้งดิบและแป้งพรีเจลจะให้สมบัติเชิงกลลดลง เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวได้อธิบายไปแล้วในส่วนของการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้การที่ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 30 pphr ในกรณีที่ใช้แป้งดิบ และมากกว่า 10 pphr ในกรณีที่ใช้แป้งพรีเจล โดยในกรณีของแป้งพรีเจลที่ใช้กลีเซอรอลได้ปริมาณน้อยกว่ากรณีของแป้งดิบสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า เนื่องจากแป้งพรีเจลเกิดจากเม็ดแป้งที่แตกออกทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่อยู่ภายในเม็ดแป้งออกมาอยู่ด้านนอก จึงส่งผลให้ความแตกต่างของความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจลมีมากกว่ากรณีที่ใช้แป้งดิบ ทำให้ไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 10 pphr ในกรณีของแป้งพรีเจล

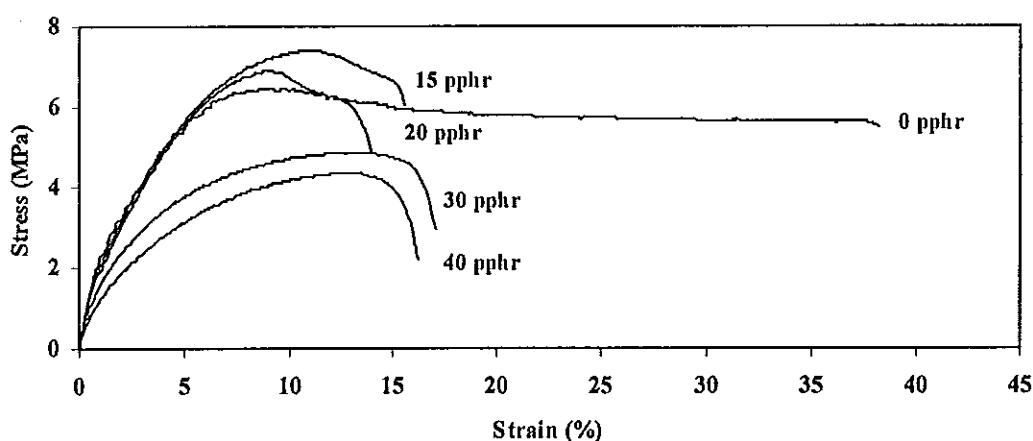
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบ ให้สมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล จึงเลือกใช้แป้งดิบในการทดลองต่อไป

#### 4.5 อิทธิพลของปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

การทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของน้ำ (ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ตัวหนึ่งของแป้ง) ที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง และสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด เตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 50 wt% ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm ใช้เวลารวมในการผสมเป็น 8 min ผสมน้ำในแป้งตามปริมาณต่อไปนี้ 0, 15, 20, 30 และ 40

pphr เทียบกับปริมาณของแป้ง และนำมาใช้ทันทีหลังการผสม โดยในการทดลองนี้ไม่มีการเติม กลีเซอรอล เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จากผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และในตารางที่ 4.10 พบว่า E เพิ่มขึ้น เมื่อใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้น้ำ 15-20 pphr และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำ เพิ่มขึ้น  $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$  และ  $\epsilon_b$  ลดลงจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมน้ำ แต่ให้ค่าใกล้เคียงกันที่ ปริมาณน้ำต่างๆ การเพิ่มขึ้นของค่า E อธิบายได้ว่า เมื่อเติมมีการเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ ที่อุณหภูมิห้อง โดยน้ำสามารถแพร่เข้าสู่เม็ดแป้งได้อย่างอิสระ เนื่องจากที่ผิวของเม็ดแป้ง ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำ ที่ถูกดูดซึมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซึมน้ำได้ ปริมาณ 42.9 g ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 g น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำใน ผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (bound water) และน้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับกับ โมเลกุลแป้งได้แน่นตามลำดับ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสในแต่ละหน่วยของโมเลกุลแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต (starch monohydrate,  $n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)$ ) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) โดยน้ำในรูปที่ไม่อิสระจะสามารถจับกับแป้ง ได้เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง (50-155°C) (Zhiqiang *et al.*, 2000) การจับตัวของน้ำกับสายโซ่ โมเลกุลของแป้งเกิดเป็นร่างแหเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเฉพาะตัวของแป้งแข็งและ เปราะขึ้น ค่า E มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่า  $\epsilon_b$  ลดลง



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณน้ำ 0-40 pphr

ตารางที่ 4.10 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) โดยแปรปริมาณน้ำ 0-40 pphr

ปริมาณน้ำ (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	154.2±13.1	6.1±0.2	10.3±1.0	5.2±0.2	31.6±3.4
15	252.4±21.8	7.4±0.1	10.9±0.5	5.2±0.6	15.3±1.0
20	252.7±30.2	7.0±0.1	10.2±1.2	5.6±0.4	13.9±1.3
30	219.0±17.8	4.7±0.2	13.0±1.0	3.6±0.3	16.8±1.0
40	174.0±17.9	4.1±0.2	11.6±1.0	2.6±0.3	16.2±1.1

นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณน้ำในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง แต่มีค่าใกล้เคียงกันในทุกปริมาณน้ำที่เติมลงไป ดังแสดงในตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลที่ลดลงเมื่อเติมน้ำลงไปปริมาณสูง นอกจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้แล้ว อาจเกิดมาจากอีกสาเหตุหนึ่ง คือ เป็นผลมาจากภายใต้อุณหภูมิและแรงเฉือนสูง น้ำที่เติมเข้าไปในปริมาณสูงมากกว่า 30 pphr อาจจะทำให้ LDPE เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเกิดการขาดออก นอกจากนี้ น้ำที่เติมเข้าไปและเข้าไปอยู่ในรูปอิสระ (free water) ไม่สามารถจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ เนื่องจากในระหว่างการผสมใช้อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำที่อยู่ในรูปอิสระระเหยออกไป ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง จากสมบัติเชิงกลที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม เมื่อมีการเติมน้ำ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงไม่มีการเติมน้ำลงในพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.11 สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่แปรปริมาณน้ำ 0-40 pphr

ปริมาณน้ำ (pphr)	Tear strength (N/mm)
0	34.58 ±1.58
15	28.76±2.32
20	29.49±1.56
30	33.35±1.55
40	26.21±1.60

## 4.6 อิทธิพลของปริมาณแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

### 4.6.1 สมบัติเชิงกล

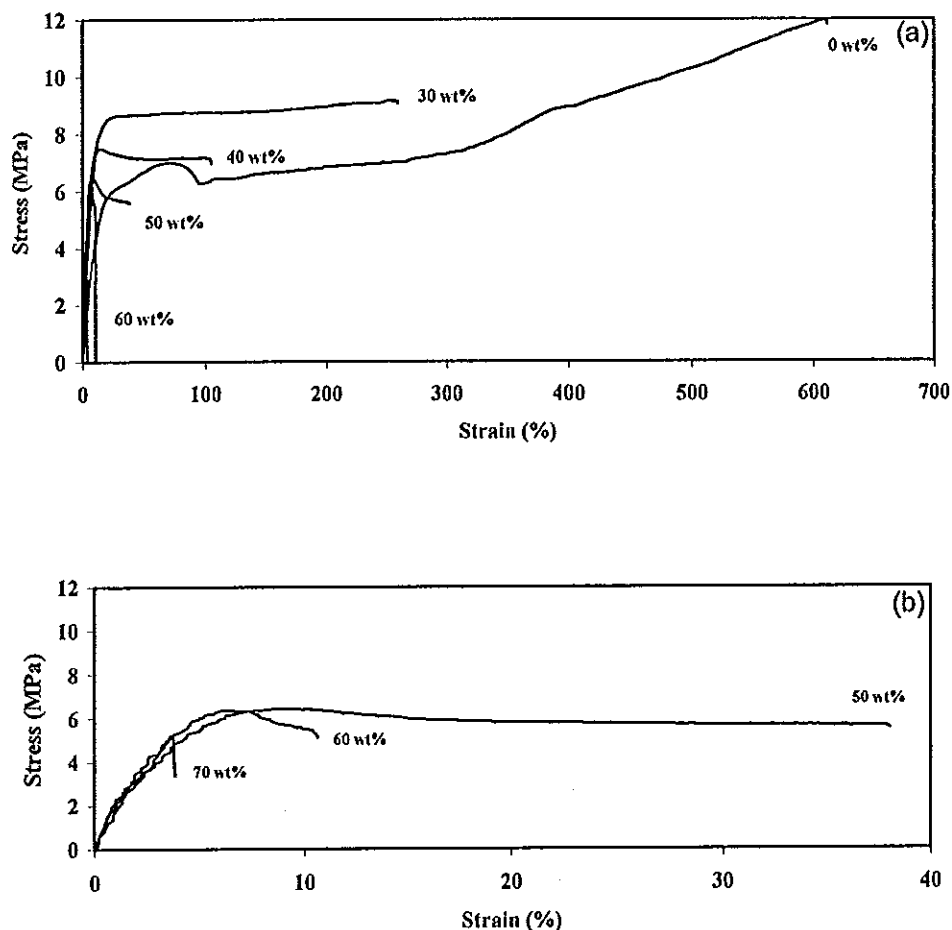
ปัจจุบันปัญหาการใช้พลาสติกเริ่มมีผู้ให้ความสนใจมากขึ้น ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย ใช้เวลานับร้อยปีกว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วน แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) แต่ละโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสหลายหน่วยมาต่อเชื่อมกันเป็นสายยาว ในธรรมชาติจะพบแป้งในลักษณะที่เป็นเม็ดแป้งขนาดเล็กมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยมีส่วนที่เป็นผลึกค่อนข้างสูงกว่าส่วนที่เป็นอสัณฐานอยู่มาก โมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ค่อนข้างสูง จึงมีสมบัติในการดูดน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวขึ้นเป็นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะการเปลี่ยนรูป นำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก ความบริสุทธิ์สูง จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัสดุใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งาน โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกรายใหญ่ของโลก ในปัจจุบันได้มีการนำแป้งมาทำการผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ที่อยู่ในรูปของสารตัวเติม (filler) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch) หรือ กราฟท์โคพอลิเมอร์ (graft copolymer) อยู่บ้างแล้ว (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546: ธนาวดี, 2549) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แป้งแทนที่พลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์ทำได้ไม่ดีนัก เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งที่ดูดซับน้ำได้ดี และหากไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปเพื่อลดความแข็งเปราะของแป้ง ก็จะนำมาขึ้นรูปได้ยาก (Yu *et al.*, 2006) และฟิล์มแป้งหรือผลิตภัณฑ์แป้งที่ผ่านการขึ้นรูปได้แล้ว หากเก็บหรือใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดปรากฏการณ์รีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของแป้งขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวและเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งใหม่ ทำให้สมบัติของพลาสติกที่ได้จากแป้งไม่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงไป (Chandra and Rustgi, 1998) โดยจะทำให้แป้งเปราะมากยิ่งขึ้น จึงนิยมใช้แป้งในรูปของสารตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายแทน โดยควรศึกษาอัตราส่วนของแป้งที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม แป้งปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ทำการผสมกับ LDPE ในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 120°C ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm ใช้เวลา



ในการผสม 8 min โดยไม่มีการเติมกลีเซอรอลและน้ำ เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าการเติมกลีเซอรอลและน้ำทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง

กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงในรูปที่ 4.13 และสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแอมันสำปะหลัง แสดงในตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณแอมันเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนจากลักษณะการแตกหักแบบเหนียว ไปเป็นการแตกหักแบบเปราะแต่ยังคงมีจุดคราก ที่ปริมาณแอมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเป็น 60 wt% ส่วนที่ปริมาณแอมันสำปะหลัง 70 wt% กราฟที่ได้มีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแอมันสูงขึ้น สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงลักษณะเฉพาะตัวของแอมันมากขึ้น นั่นคือแข็งและเปราะ ทำให้กราฟความเค้นและความเครียดที่ได้เปลี่ยนแปลงไป เมื่อปริมาณแอมันเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแอมันตั้งแต่ 0-70 wt%

อิทธิพลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่า E แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 0-60 wt% จะให้ค่า E มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากโดยทั่วไปค่า E จะมีความสัมพันธ์กับส่วนแข็ง (hard domain) ที่อยู่ภายในพอลิเมอร์ผสม (Danjaji *et al.*, 2001; Predoso and Rosa, 2005) นั่นก็คือค่า E ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ LDPE จะขึ้นกับอยู่กับปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง เพราะแป้งมันสำปะหลังจะมีความแข็งเปราะมากกว่า LDPE เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่โมเลกุลแป้ง ดังนั้นเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า E ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากขึ้นเป็น 70 wt% ค่า E ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าความแข็งที่ลดลงอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ของเม็ดแป้ง (Predoso and Rosa, 2005) การเพิ่มขึ้นของค่า E เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Bikiaris *et al.* (1998); Raj *et al.* (2001); Liu *et al.* (2003); Wang *et al.* (2004); Raj *et al.* (2004); Huang *et al.* (2005) และ Predoso and Rosa (2005)

ตารางที่ 4.12 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งตั้งแต่ 0-70 wt%

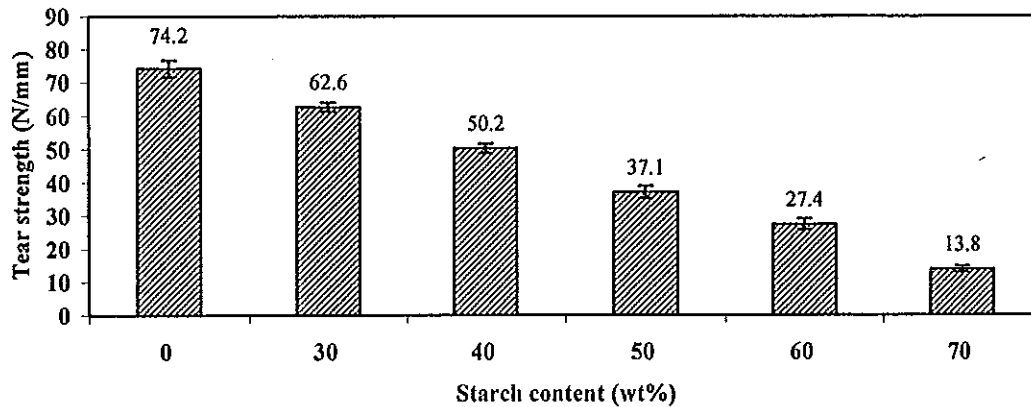
ปริมาณแป้ง (wt%)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	52.8±7.0	7.8±0.4	72.7±5.1	11.4±0.7	606.8±38.4
30	79.6±7.2	8.9±0.3	32.6±2.8	9.2±0.3	265.1±19.6
40	151.2±28.3	7.4±0.2	15.2±0.7	6.8±0.2	110.7±16.7
50	214.4±15.8	6.6±0.3	10.0±0.3	5.5±0.3	36.4±4.1
60	260.6±73.0	6.1±0.5	6.5±0.6	5.0±0.6	11.5±2.1
70	166.6±21.0	-	-	5.5±1.6	3.8±0.5

ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งที่มีต่อค่า  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้น ค่า  $\sigma_b$  มีแนวโน้มลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมให้ค่า  $\sigma_b$  ลดลงจาก 11.4 MPa ใน LDPE บริสุทธิ์เป็น 9.2, 6.8, 5.5, 5.0 และ 5.5 MPa เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังทำให้พอลิเมอร์ผสมเปราะและแตกหักง่ายขึ้น ค่า  $\sigma_b$  ที่ลดลงในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันระหว่างแป้งกับ LDPE ต่ำ ทำให้แรงดึงดูระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมต่ำ (Bikiaris and Panayiotou, 1998; Liu *et al.*, 2003; Raj *et*

*et al.*, 2004; Nakamura *et al.*, 2005; Nikazar *et al.*, 2005; Ratanakamnuan and Aht-Ong, 2006) เป็นผลมาจากความแตกต่างกันของความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ทั้งสอง (Shujun *et al.*, 2005.) และยังเป็นผลมาจากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งที่ให้ค่า  $\sigma_b$  ต่ำกว่า LDPE (Aburto *et al.*, 1997; Bikiaris and Panayiotou, 1998) ทำให้เมื่อเติมแป้งใน LDPE มากขึ้น ค่า  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลง

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งต่อค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับ แป้งมันสำปะหลัง โดยแปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังตั้งแต่ 0-70 wt% พบว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก อธิบายได้ว่าในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการเติมพอลิเมอร์ตัวที่สองที่ไม่สามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล (immiscible phase) ในพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว (ductile polymer) จะมีความว่องไวต่ออันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก (Predoso and Rosa, 2005) การลดลงของค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมเทียบกับ LDPE จาก 606.8 % มีค่าเป็น 265.1, 110.7, 36.4, 11.5 และ 3.8 % เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ ค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลงเมื่อเติมแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจาก 2 สาเหตุ คือ แรงดึงดูด (london forces) ระหว่างเฟสของ LDPE และแป้งในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำ และความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และแป้งมันสำปะหลังมีน้อย (Raj *et al.*, 2004; Ratanakamnuan and Aht-Ong, 2006; Rivero *et al.*, 2008) ก่อให้เกิดการสะสมความเค้น (stress concentration) ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (craze) ในพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีแรงมากระทำ (Wang *et al.*, 2004) นอกจากนี้เป็นผลมาจากสมบัติของแป้งที่ให้ค่า  $\epsilon_b$  ต่ำกว่า LDPE บริสุทธิ์ (Raj *et al.*, 2004) จึงทำให้ระยะยืดของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น

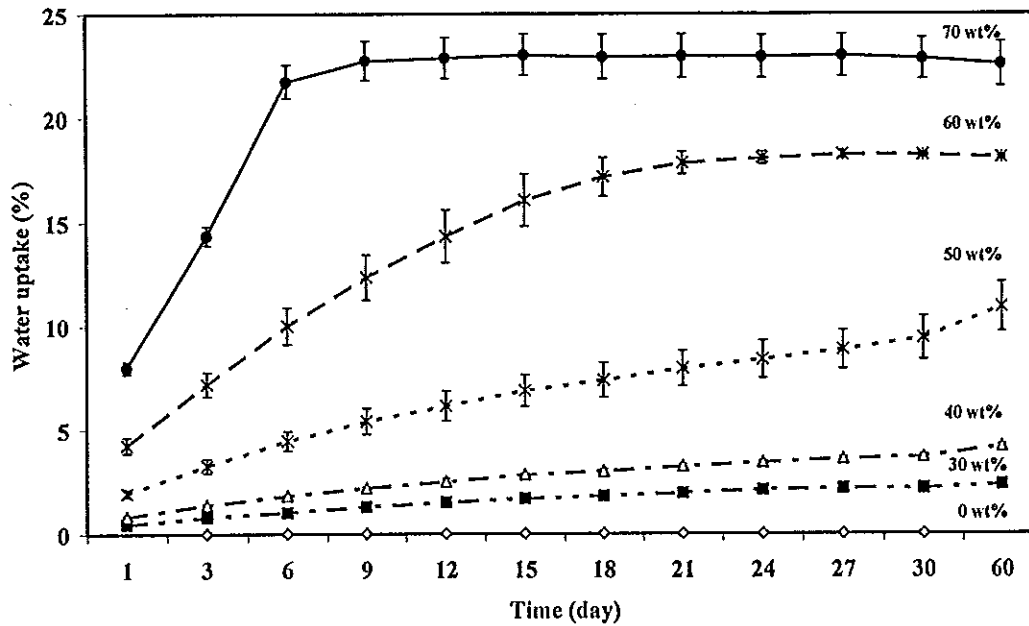
เมื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าให้แนวโน้มเหมือนกับค่า  $\sigma_b$  และค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ นั่นคือเมื่อปริมาณแป้งสูงขึ้นค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง มีค่าลดลงจาก 74.2 N/mm ใน LDPE เป็น 62.6, 50.2, 37.1, 27.4 และ 13.8 N/mm เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ สาเหตุการลดลงของค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม เมื่อมีการเติมแป้งใน LDPE เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้แรงดึงดูดระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าน้อย (Raj *et al.*, 2004) สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

#### 4.6.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

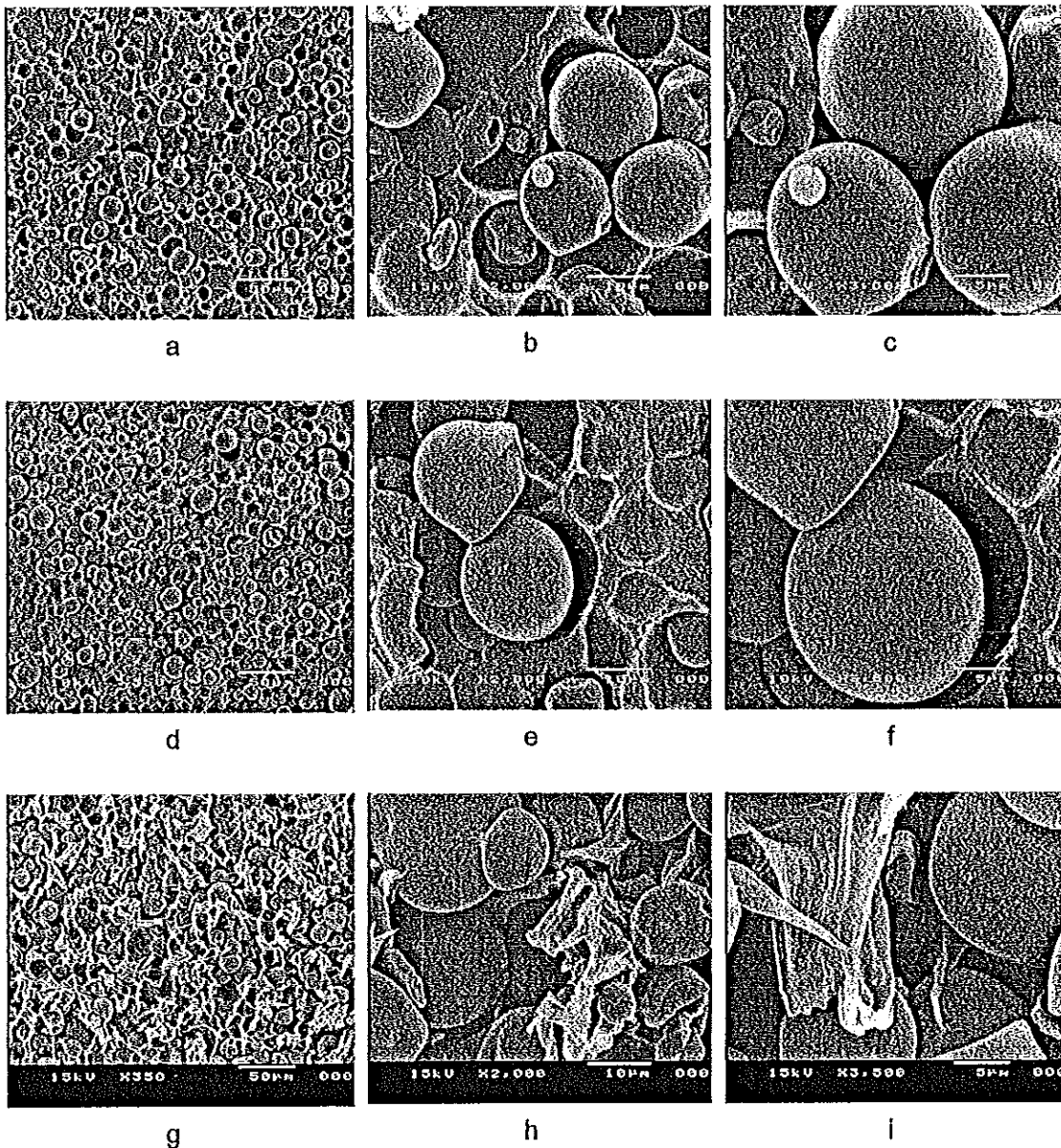
ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งตั้งแต่ 0-70 wt% ใช้เวลาในการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำเป็นระยะเวลา 60 วัน และวัดความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากแช่ในน้ำภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมที่เวลาการทดลองต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสมจาก LDPE จาก 0 % เป็น 2.4, 4.2, 10.9, 18.1 และ 22.6 % ตามลำดับ เมื่อมีปริมาณแป้งเท่ากับ 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเนื่องจากโมเลกุลของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลถึง 4 หมู่ภายในหน่วยกลูโคส 1 หน่วย (anhydroglucose units, AUG) ที่มาต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลมีความเป็นขั้วและสามารถดูดซับน้ำได้ดี จึงทำให้เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น (Danjaji *et al.*, 2001) และเมื่อเวลาในการศึกษาเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน โดยอัตราการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นช้าลงเนื่องจากการดูดซับน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibration time) สังเกตได้จากเส้นกราฟที่ลักษณะคงที่หลังจากการทดลองมากกว่า 18 วัน สาเหตุเป็นผลมาจากเมื่อเวลาในการทดลองนานขึ้นโอกาสการแพร่ผ่านของน้ำจากด้านนอกชั้นตัวอย่างเข้าไปทั่วทั้งชั้นตัวอย่างได้มากยิ่งขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

#### 4.6.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณแบ่งมันสำปะหลัง 30, 50 และ 70 wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ที่มีกำลังขยาย 200 เท่า (a, d, g) 2,000 เท่า (b, e, h) และ 3,500 เท่า (c, f, i) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเม็ดแบ่งที่ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ใน LDPE ที่ทำหน้าที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase หรือ matrix phase) พบว่าการกระจายตัวของเม็ดแบ่งมันสำปะหลังใน LDPE เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นวิธีการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดโดยให้ LDPE หลอมเหลวก่อน แล้วค่อยเติมแบ่งมันสำปะหลัง ส่งผลให้เม็ดแบ่งกระจายตัวได้ดีใน LDPE และพบว่าแบ่งมันสำปะหลังคงสภาพความเป็นเม็ดแบ่งอยู่ เนื่องจากแบ่งไม่เกิดการหลอมในขณะที่ทำการผสม นอกจากนี้พบช่องว่าง (gap) ระหว่างรอยต่อระหว่างเฟสของ LDPE และเม็ดแบ่ง ที่มีระยะห่างกว้างอย่างชัดเจน และไม่พบการเชื่อมต่อระหว่างเฟสทั้งสอง จากลักษณะสัณฐานวิทยาดังกล่าวช่วยยืนยันความสามารถในการเข้ากันระหว่างแบ่งกับ LDPE ที่มีน้อย เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสม ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อเติมแบ่งใน LDPE ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ที่ปริมาณแบ่งมันสำปะหลังต่างกัน: 30 wt% (a, b, c), 50 wt% (d, e, f) และ 70 wt% (g, h, i)

#### 4.6.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ LDPE บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ) หาได้จากจุดสูงสุดของกราฟอันเนื่องมาจากการลดอุณหภูมิ (cooling) ในการ

ทดสอบลง เนื่องมาจากการคายพลังงานความร้อน (exothermic) ของพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) หาได้จากจุดสูงสุดของกราฟที่ได้จากการให้อุณหภูมิ (heating) ในระหว่างการทดสอบ เนื่องมาจากการดูดพลังงานความร้อน (endothermic) ของพอลิเมอร์ผสม ค่าพลังงานความร้อนในการหลอมเหลว (fusion enthalpy,  $\Delta H_f$ ) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ณ อุณหภูมิที่ผลึกเกิดการหลอมเหลว ส่วนค่าพลังงานความร้อนในการเกิดผลึก (crystallization enthalpy,  $\Delta H_c$ ) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ณ อุณหภูมิที่เกิดผลึก และปริมาณผลึก (degree of crystallinity,  $X_c$ ) จากผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า  $T_c$  และ  $T_m$  ของ LDPE มีค่าเท่ากับ 94.0 และ 109.9°C ตามลำดับ และคำนวณหาปริมาณผลึก โดยใช้ค่าความร้อนของการหลอมเหลว (fusion heat) ของผลึก LDPE 100% มีค่าเท่ากับ 277.1 J/g (Predoso and Rosa, 2005) โดยใช้สมการที่ 3.7 พบว่าปริมาณผลึกของ LDPE มีค่าเท่ากับ 20.8 % กรณีของพอลิเมอร์ผสมค่า  $T_c$  และ  $T_m$  เป็นสมบัติของ LDPE เพราะแบ่งมันสำปะหลังไม่เกิดการหลอมและไม่เกิดกระบวนการพลาสติกไซเซชัน เนื่องจากไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ ในขณะที่ทำการผสม นอกจากนี้ค่า  $T_m$  ของแบ่งอยู่ใกล้กับอุณหภูมิการสลายตัวของโมเลกุลแบ่ง ทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ (Aburto *et al.*, 1997) ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงเป็นของ LDPE

ตารางที่ 4.13 ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิค DSC โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

ปริมาณแบ่ง (wt%)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	$X_c$ (%)
0	94.0	64.5	109.9	57.7	20.8
30	95.0	46.0	109.5	37.1	19.1
50	95.3	39.6	109.4	21.0	15.2
70	95.6	17.6	109.5	14.3	17.0

เมื่อปริมาณแบ่งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่า  $T_m$  มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่สามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล (immiscible blend) ทำให้  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับ  $T_m$  ของ LDPE (Raj *et al.*, 2004; Predoso and Rosa, 2005) แต่  $T_c$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณแบ่งสูงขึ้น ค่า  $\Delta H_c$  และ  $\Delta H_f$  ที่ลดลงเมื่อปริมาณแบ่งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากสัดส่วนของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่ลดลงนั่นเอง (Raj *et al.*, 2004) ทำให้พื้นที่ใต้กราฟในระหว่างการลดความร้อน (cooling) และระหว่างการให้ความร้อน (heating) ที่ได้มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองพบการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟใน LDPE และพอลิเมอร์

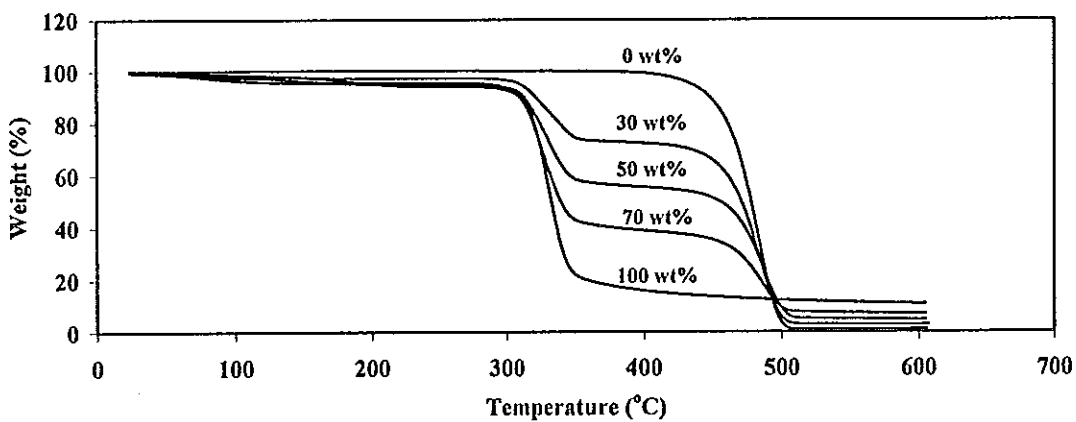
ผสม เห็นเฉพาะการให้ความร้อนและลดความร้อนในครั้งที่ 1 เท่านั้น โดยในการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ ดังนั้นในที่นี้จะไม่สรุปว่าเป็น  $T_g$  หรือไม่ และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สาเหตุเป็นผลมาจากการเติมแป้งจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของ LDPE (Thakore *et al.*, 1999; Girija and Sallaja, 2006)

#### 4.6.5 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

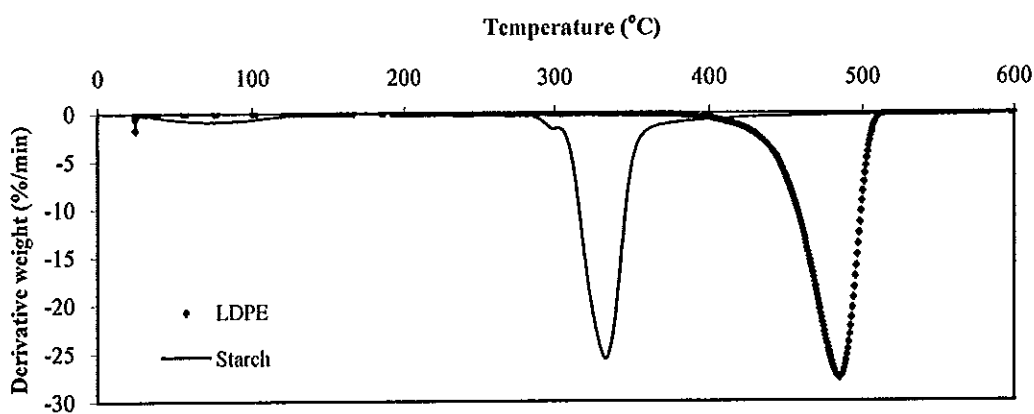
ศึกษาความสามารถในการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง ที่ทำการวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง  $600^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อศึกษาหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนัก (percent weight loss) และอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมแสดงในรูปที่ 4.17 โดยพอลิเมอร์ผสมมีการสลายตัว 3 ขั้นตอน ช่วงแรก  $30-100^{\circ}\text{C}$  โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักประมาณ 4.26 % ซึ่งเป็นผลจากแป้งสูญเสียน้ำหนัก อันเนื่องมาจากความเป็นขี้และมีความชอบน้ำ (hydrophilic) ของแป้งทำให้แป้งดูดความชื้นในบรรยากาศได้ดี ช่วงอุณหภูมิ  $316^{\circ}\text{C}$  โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักประมาณ 82.31 % ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่แป้งเกิดการสลายตัว และที่อุณหภูมิ  $458^{\circ}\text{C}$  เป็นการสลายของ LDPE ซึ่งช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมให้ผลสัมพันธ์กับการสลายตัวของแป้ง และ LDPE ดังแสดงในรูปที่ 4.18 นอกจากนี้พบว่าการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม แป้ง และ LDPE ที่ได้จากการทดลองให้ผลไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Chandra and Rustgi (1997) ที่รายงานการสลายตัวทางความร้อนของแป้งข้าวโพด พบการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้นตอน คือ ที่อุณหภูมิระหว่าง  $120-250^{\circ}\text{C}$  เป็นการสลายตัวของพันธะ 1,6 กลูโคซิดิก (1,6-glucosidic bond) ที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลหน่วยของกลูโคส 2 หน่วย หรือเป็นพันธะระหว่างเลโวกลูโคแซน (levoglucosan) และที่ช่วงอุณหภูมิ  $250-350^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิที่แป้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์ งานวิจัย Ratanakamnuan and Aht-Ong (2006) รายงานการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งกล้วย พบการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน คือที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นผลมาจากการระเหยของน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ภายในเม็ดแป้งกล้วย ที่อุณหภูมิ  $290-300^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้ง และที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และ Girija and Sallaja (2006) รายงานการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลทำหน้าที่



เป็นพลาสติกไฮเซอรั พบการสลายตัวทางความร้อน 4 ขั้นตอน ที่อุณหภูมิ  $77^{\circ}\text{C}$  เป็นการระเหยของน้ำ ที่อุณหภูมิ  $209^{\circ}\text{C}$  เป็นการหายไปของกลีเซอรอล อุณหภูมิ  $318^{\circ}\text{C}$  เป็นช่วงอุณหภูมิที่แบ่งเกิดการสลายตัว เนื่องจากเกิดการควบแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลกลายเป็นพันธะอีเทอร์จึงทำให้เกิดการขาดของวงแหวนของหน่วยย่อยกลูโคซิดิกขึ้น และที่อุณหภูมิ  $467^{\circ}\text{C}$  เนื่องจาก การขาดของพันธะ C-C ในส่วนสายโซ่หลักของ LDPE



รูปที่ 4.17 เปรอเซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญหายไปจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

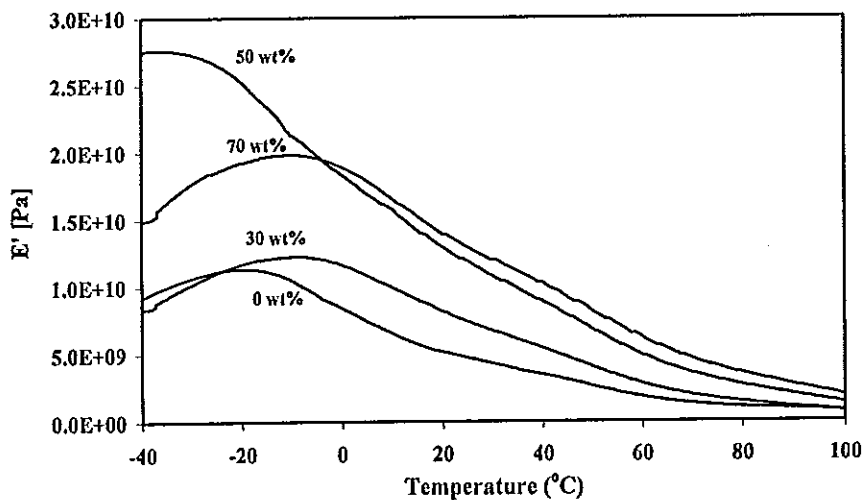


รูปที่ 4.18 อนุพันธ์ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายไปจากการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และแป้งมันสำปะหลัง

#### 4.6.6 การตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

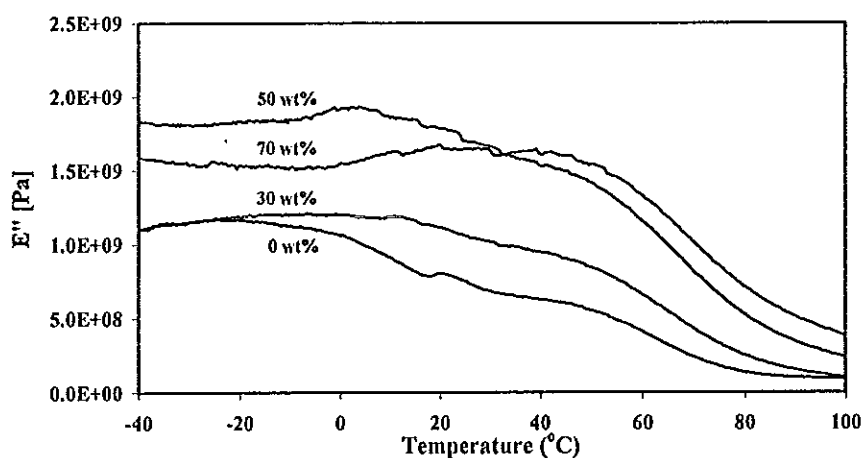
การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ สามารถอธิบายพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์ได้ Nouri และ Hay (2004) กล่าวว่า โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (transition) ของพอลิเมอร์ 3 ตำแหน่งด้วยกันคือ  $\gamma$ ,  $\beta$  และ  $\alpha$  การผ่อนคลายโมเลกุลแบบ  $\gamma$  ( $\gamma$  relaxation) ของพอลิเอทิลีนแบบเส้นตรงและมีกิ่งจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ  $-120$  ถึง  $-90^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลสายสั้นๆ ที่อยู่ในส่วนอสัณฐานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวแบบ crankshaft motion การผ่อนคลายโมเลกุลของพอลิเอทิลีนในช่วงนี้จะเทียบเท่ากับค่า  $T_g$  ส่วนการผ่อนคลายโมเลกุลแบบ  $\beta$  ( $\beta$  relaxation) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ  $-30$  ถึง  $20^{\circ}\text{C}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเอทิลีน จะเป็นการเคลื่อนไหวโมเลกุลในส่วนอสัณฐาน โดยที่ความเข้ม (intensity) ของพีคจะเพิ่มขึ้น เมื่อส่วนของอสัณฐานมากขึ้น และการผ่อนคลายโมเลกุลแบบ  $\alpha$  ( $\alpha$  relaxation) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ  $20$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเอทิลีน จะเป็นการเคลื่อนไหวโมเลกุลที่อยู่ในส่วนของผลึก

พิจารณาอิทธิพลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อค่า  $E'$  ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $0^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป พบว่าเมื่อปริมาณแบริ่งเพิ่มขึ้นค่า  $E'$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.19 เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติเฉพาะตัวของแบริ่งที่แสดงลักษณะที่แข็งแรง ส่งผลให้เมื่อปริมาณแบริ่งเพิ่มขึ้น  $E'$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Biklaris and Panayiotou, 1998) การเพิ่มขึ้นของค่า  $E'$  นอกจากสมบัติเฉพาะตัวของแบริ่งเองที่ทำให้ค่า  $E'$  ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ยังขึ้นอยู่กับแบริ่งที่เติมลงใน LDPE จะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์จึงทำให้ค่า  $E'$  เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแบริ่งเพิ่มสูงขึ้น (Predoso and Rosa, 2005(a))



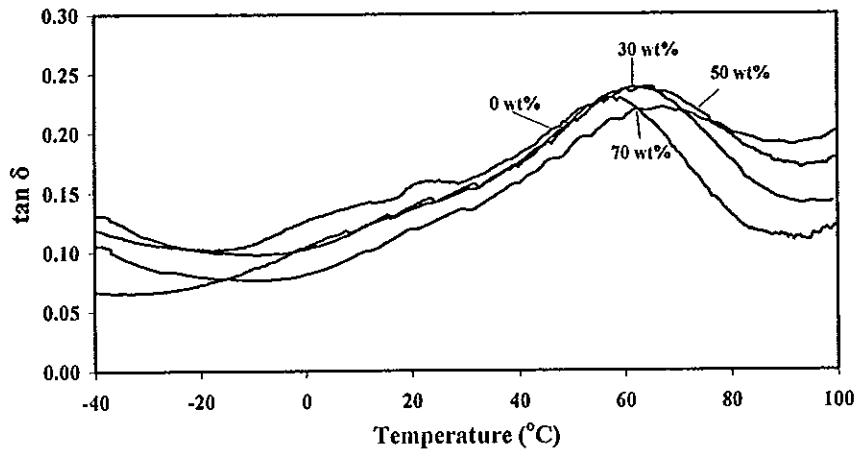
รูปที่ 4.19 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแบริ่ง 0-70 wt%

ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อค่า  $E''$  ของพอลิเมอร์ผสม แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่ากราฟค่า  $E''$  ของพอลิเมอร์ผสมทุกสัดส่วนจะมีค่าลดลงจนถึงประมาณ  $-20$ - $10^{\circ}\text{C}$  ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะแสดงลักษณะการผ่อนคลายของโมเลกุลแบบ  $\beta$  ของ LDPE ที่เป็นการเคลื่อนไหวของกิ่งในส่วนอสัณฐานของ LDPE นอกจากนี้เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่า  $E''$  ของพอลิเมอร์จะเคลื่อนตำแหน่งไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแบริ่งเพิ่มขึ้นจะไปเพิ่มอุณหภูมิการผ่อนคลายของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น (Predoso and Rosa, 2005) อันเนื่องมาจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้น้อยลง



รูปที่ 4.20 ค่ามอดุลัสสูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแบริ่ง 0-70 wt%

ศึกษาค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิที่ให้ค่า  $\tan \delta$  ของ LDPE สูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ  $57^{\circ}\text{C}$  ค่า  $\tan \delta_{\max}$  (maximum  $\tan \delta$ ) ที่ได้จากเทคนิค DMTA ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยของ Jagannath *et al.* (2006) โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้อาจแสดงถึงการผ่อนคลายแบบ  $\alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นค่า  $\tan \delta$  จะเลื่อนตำแหน่งไปอุณหภูมิสูงขึ้นและพีคที่ได้มีลักษณะกว้างขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมแบริ่งลงไป ใน LDPE จะส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงและในช่วงอุณหภูมิได้กว้างกว่า LDPE โดยค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังมากขึ้น แสดงในตารางที่ 4.14 เนื่องมาจากแบริ่งมันสำปะหลังที่เติมลงไปจะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวโมเลกุลของ LDPE จากลักษณะดังกล่าวทำให้การเคลื่อนไหวของโมเลกุล LDPE ได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.21 ค่าแทนเจนต์สูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

ตารางที่ 4.14 ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt% จากเทคนิค DMTA

ปริมาณแบ่ง (wt%)	$\tan \delta_{\max}$ (°C)
0	57.09
30	62.03
50	64.35
70	67.17

#### 4.7 อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (PPS และ BPO) ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

จากทฤษฎีพอลิเมอร์ผสมระหว่างแบ่งและ LDPE จะมีความสามารถเข้ากันได้ (compatibility) ต่ำ เพราะมีขั้วต่างกันดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในเบื้องต้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมคู่นี้ต่ำ การเพิ่มความเข้ากันได้ทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้าของเฟสทั้งสองที่เรียกว่า reactive blending เพื่อให้มีความเข้ากันได้ดีขึ้น ในที่นี้เลือกตัวริเริ่มปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ PPS และ BPO ซึ่งตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้จะทำให้แบ่งและ LDPE เกิดอนุมูลอิสระขึ้นบนโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสอง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลระหว่างแบ่งและ LDPE ได้ คาดว่าจะเกิดเป็นกราฟฟโคพอลิเมอร์ที่ผิวหน้าระหว่างเฟส จากการตรวจสอบเอกสารพบว่า PPS เหมาะกับการเกิดปฏิกิริยากับแบ่งเนื่องจากละลายน้ำได้ ในการทดลองจะละลาย PPS ในน้ำก่อนนำไปผสมกับแบ่ง และใช้ในสัดส่วนที่เทียบกับน้ำหนักแบ่งในแต่ละสูตร BPO เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่นิยมใช้กับพอลิเอทิลีน จึงนำมาใช้ในสัดส่วนที่เทียบกับน้ำหนักของ LDPE ในการทดลองนี้จะใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้งคู่พร้อมกัน

และจะแปรปริมาณของสารแต่ละตัวเพื่อตรวจสอบว่าในที่สุดสัดส่วนใดที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาจากสมบัติความทนต่อแรงดึงโดยเฉพาะค่า  $E$ ,  $\sigma_b$  และ  $\epsilon_b$  เป็นหลัก เนื่องจากการเติมแบ็ง จะทำให้ค่าทั้งสามมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.6 การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนแรกเป็นการทดลองการแปรปริมาณ PPS โดยมีปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr เทียบกับน้ำหนักของ LDPE ตอนที่สองทำการแปรปริมาณ BPO โดยเลือกใช้ปริมาณ PPS ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองจากตอนที่ 1 ส่วนตอนที่สามเป็นการแปรปริมาณแบ็งในพอลิเมอร์ผสมที่มีการใช้ปริมาณ PPS และ BPO ที่เหมาะสม ที่ได้จากการแปรปริมาณของ PPS และ BPO ในตอนที่ 1 และ 2

#### 4.7.1 การแปรปริมาณ PPS ที่มีปริมาณ BPO คงที่

เลือกใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ็ง 50 wt% ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm เวลาในการผสม 8 min ในเครื่องผสมแบบปิด แปรปริมาณ PPS ที่ใช้เป็น 0, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 pphr และใช้น้ำในการละลาย PPS เป็น 5, 5, 8, 8, 10 และ 15 pphr ตามลำดับ เทียบกับน้ำหนักของปริมาณแบ็งมันสำปะหลัง เนื่องจากในการทดลองในหัวข้อ 4.5 พบว่าการเติมน้ำลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงใช้ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่สามารถละลาย PPS ได้หมด และใช้ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr เทียบกับน้ำหนัก LDPE

##### 4.7.1.1 สมบัติเชิงกล

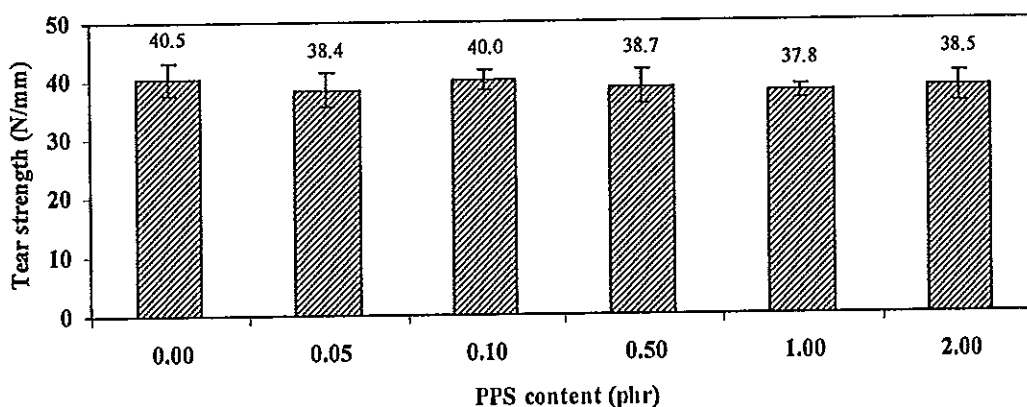
ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ PPS ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแบ็งมันสำปะหลัง แปรปริมาณ PPS ตั้งแต่ 0-2 pphr เทียบกับน้ำหนักของแบ็ง โดยให้ปริมาณ BPO คงที่ และใช้น้ำในปริมาณน้อยที่สุดที่สามารถละลาย PPS ได้หมด น้ำที่ใช้ในส่วนนี้เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการกระจาย PPS เข้าไปในเฟสของแบ็งเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคอิสระในเฟสของแบ็ง และช่วยทำให้ PPS เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคอิสระเมื่อได้รับความร้อน

การศึกษาค่าอิทธิพลของปริมาณ PPS ต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณ PPS ตั้งแต่ 0 pphr ถึง 1.0 pphr ให้ค่า  $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  ใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 pphr ค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $\epsilon_b$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้นจาก 0 pphr ถึง 0.5 pphr โดยค่า  $\epsilon_b$  มีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณ PPS เป็น 0.5 pphr และเมื่อเพิ่มปริมาณ PPS ต่อไปอีก ค่า  $\epsilon_b$  มีแนวโน้มลดลงสาเหตุที่ทำให้ช่วงแรกที่ค่า  $\epsilon_b$  เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเชื่อมโยง

ระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวริเริ่มปฏิกิริยามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PPS ต่อไปอีก ค่า  $\epsilon_b$  มีค่าลดลง เนื่องมาจากปริมาณ PPS ที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการละลาย PPS เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งปริมาณน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ลดลง ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 4.5 นอกจากนี้การเติม PPS เพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันเองระหว่างเม็ดแป้งด้วยกัน ซึ่งจะอธิบายและแสดงในหัวข้อ 4.7.1.2 จึงทำให้สมบัติดังกล่าวมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ปริมาณของ PPS ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด เนื่องจากเมื่อปริมาณของ PPS เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.15 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) โดยแปรปริมาณ PPS 0-2 pphr และใช้ปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr

ปริมาณ PPS (pphr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0.00	186.3±48.2	8.0±0.4	12.8±1.2	7.3±0.6	21.5±1.7
0.05	211.8±24.2	8.1±0.1	11.5±0.3	6.6±0.4	17.0±2.2
0.10	157.0±27.4	8.0±0.4	13.4±0.8	6.9±0.5	30.8±2.1
0.50	205.8±24.7	8.5±0.1	14.5±0.7	8.0±0.3	40.3±5.8
1.00	260.0±47.5	8.4±0.3	12.7±0.5	7.2±0.3	20.6±1.5
2.00	323.3±34.9	9.4±0.3	11.8±0.8	9.1±0.4	17.0±3.0



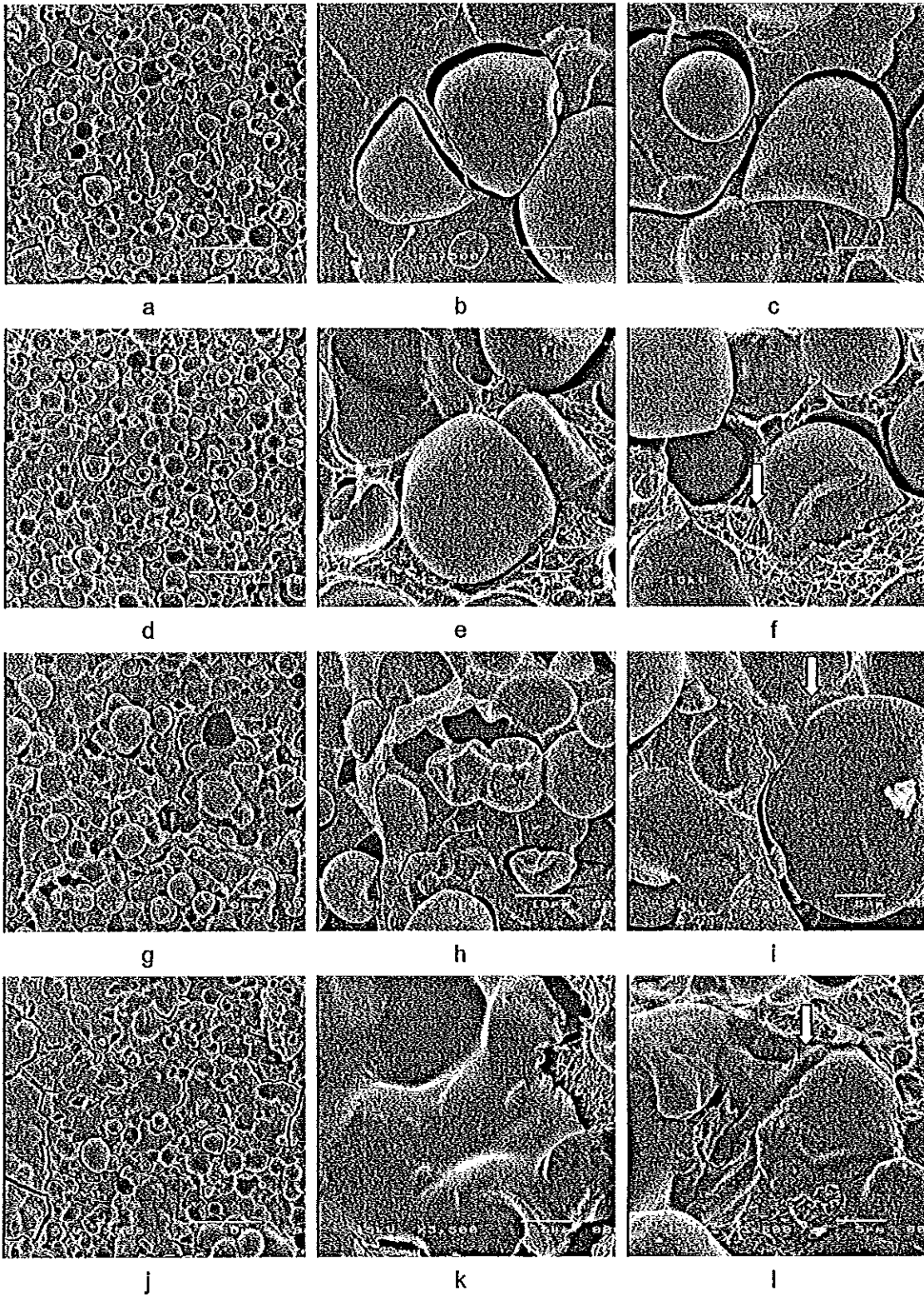
รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมผสม (50 %แป้ง) แปรปริมาณ PPS 0-2 pphr และใช้ปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr

#### 4.7.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่ง 50 % แปรปริมาณ PPS และใช้ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr รูปที่ 4.25(a-c) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเติมเฉพาะ BPO เพียงอย่างเดียว ไม่มีการเติม PPS ไม่พบการเชื่อมกันระหว่างเฟสของ LDPE กับแบ่งมันสำปะหลัง แสดงให้เห็นว่าการใช้ BPO เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพียงลำพังไม่ได้ช่วยปรับปรุงการเชื่อมต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมทั้งสอง จากลักษณะดังกล่าวช่วยยืนยันสมมติฐานที่ PPS สามารถเข้าไปเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของแบ่งได้ดีกว่า LDPE และ BPO เข้าไปเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของ LDPE ได้ดีกว่า PPS เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติในการละลายของตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวแต่ละชนิดนั่นเอง และเมื่อมีการเติม PPS และ BPO ในพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4.23(d-l) จะพบการเชื่อมต่อทั้งระหว่างเม็ดแบ่งมันสำปะหลังกับ LDPE และระหว่างเม็ดแบ่งด้วยกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ PPS เป็น 2 pphr พบว่าเม็ดแบ่งบางส่วนเกิดการแตกออก และรวมตัวกันเป็นแผ่นขนาดใหญ่ จากลักษณะดังกล่าวจึงส่งผลให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อันเป็นผลมาจาก เมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่ใช้ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้บางส่วนของแบ่งเกิดการระเหิดในเซชัน เม็ดแบ่งจึงเกิดการแตกออก ความหนืดสูงขึ้น ทำให้โอกาสของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นบนเม็ดแบ่งไปสัมผัสกับอนุมูลอิสระที่เกิดบนโครงสร้าง LDPE เกิดขึ้นได้น้อย ทำให้เกิดการรวมตัวกันเองระหว่างอนุมูลอิสระจากเม็ดแบ่งด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.23(e, h, k) สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงต่ำลง สรุปได้ว่าปริมาณ PPS และน้ำ ที่ให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุดคือที่ 0.5 pphr และ 8 pphr เทียบกับน้ำหนักของแบ่งมันสำปะหลัง ซึ่งจะใช้สัดส่วนนี้ในการศึกษาในการทดลองถัดไป

#### 4.7.2 การแปรปริมาณ BPO ที่มีปริมาณ PPS คงที่

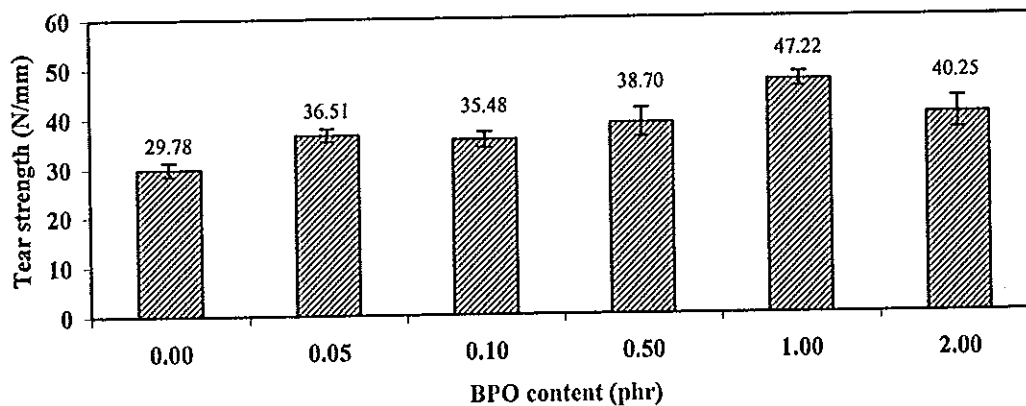
ทำการศึกษาผลของปริมาณ BPO ต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยแปรปริมาณของ BPO เป็น 0, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 pphr เทียบกับน้ำหนักของ LDPE ใช้ปริมาณ PPS เท่ากับ 0.5 pphr น้ำ 8 pphr คงที่เทียบกับน้ำหนักของแบ่งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ใช้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่งมันสำปะหลังเท่ากับ 50 wt% ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 120°C ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm เวลาในการผสม 8 min ในเครื่องผสมแบบปิด



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% มีปริมาณ BPO คงที่ที่ 0.5 pphr  
แปรปริมาณ PPS: 0 pphr (a, b, c), 0.1 pphr (d, e, f), 0.5 pphr (g, h, i) และ  
2.0 pphr (j, k, l)



2 pphr ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม เนื่องมาจากสาเหตุการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นดังที่อธิบายไว้แล้วก่อนหน้า



รูปที่ 4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม (50 %แบ่ง) โดยแปรปริมาณ BPO 0-2 pphr และใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr

#### 4.7.2.2 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ BPO ต่อการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่งเท่ากับ 50 wt% แสดงในตาราง 4.17 จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของ BPO เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง โดยให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำออกเป็น 2 ช่วงอย่างชัดเจน ที่ปริมาณ BPO เป็น 0, 0.05 และ 0.1 pphr จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่เวลา 60 วัน เป็น 10.1, 10.5 และ 10.4 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ BPO เป็น 0.5, 1.0 และ 2.0 pphr ค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ระยะเวลา 60 วัน มีค่าเป็น 5.2, 3.8 และ 3.7 % ตามลำดับ จากลักษณะการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ที่ลดลงดังกล่าวเมื่อปริมาณ BPO เพิ่มขึ้น ช่วยยืนยันการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของ LDPE กับแบ่งมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสม หลังจากการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแบ่งถูกใช้ในการเชื่อมโยงกับ LDPE ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับน้ำได้ดีมีค่าลดลง นอกจากนี้การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นภายในของพอลิเมอร์ผสมมีมากขึ้น ทำให้โอกาสที่น้ำซึมเข้าภายในพอลิเมอร์ผสมได้ยาก ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) โดยแปรปริมาณ BPO 0-2 pphr และใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr

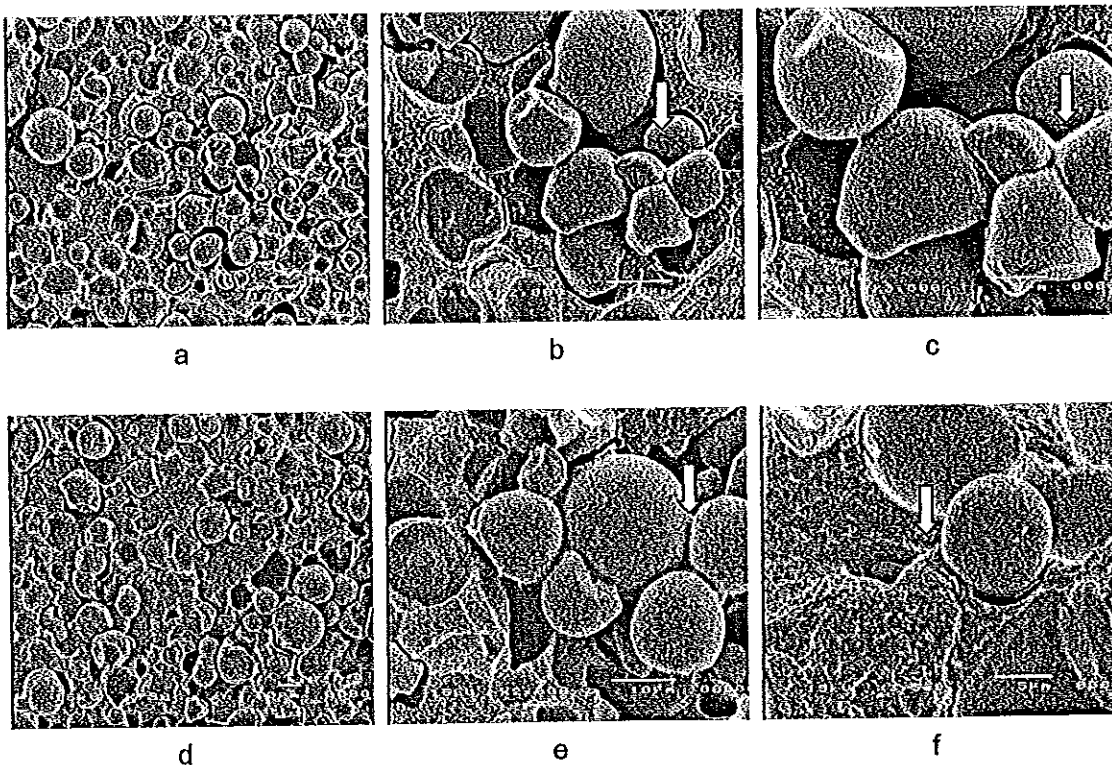
เวลา (day)	Water uptake (%)					
	ปริมาณ BPO (pphr)					
	0.00	0.05	0.10	0.50	1.00	2.00
1	1.9±0.3	1.9±0.3	1.7±0.1	1.0±0.0	0.7±0.0	0.7±0.0
6	4.3±0.5	4.1±0.5	3.9±0.3	2.2±0.2	1.6±0.0	1.7±0.1
12	5.8±0.8	5.7±0.8	5.5±0.4	2.9±0.1	2.2±0.0	2.2±0.1
18	6.9±0.9	6.9±0.9	6.7±0.5	3.5±0.2	2.6±0.1	2.6±0.0
24	7.8±1.0	7.9±0.9	7.7±0.5	3.9±0.2	2.9±0.0	2.9±0.1
30	8.8±1.2	8.9±1.1	9.0±0.8	4.4±0.3	3.3±0.0	3.3±0.0
60	10.1±1.4	10.5±1.3	10.4±0.8	5.2±0.3	3.8±0.0	3.7±0.1

#### 4.7.2.3 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

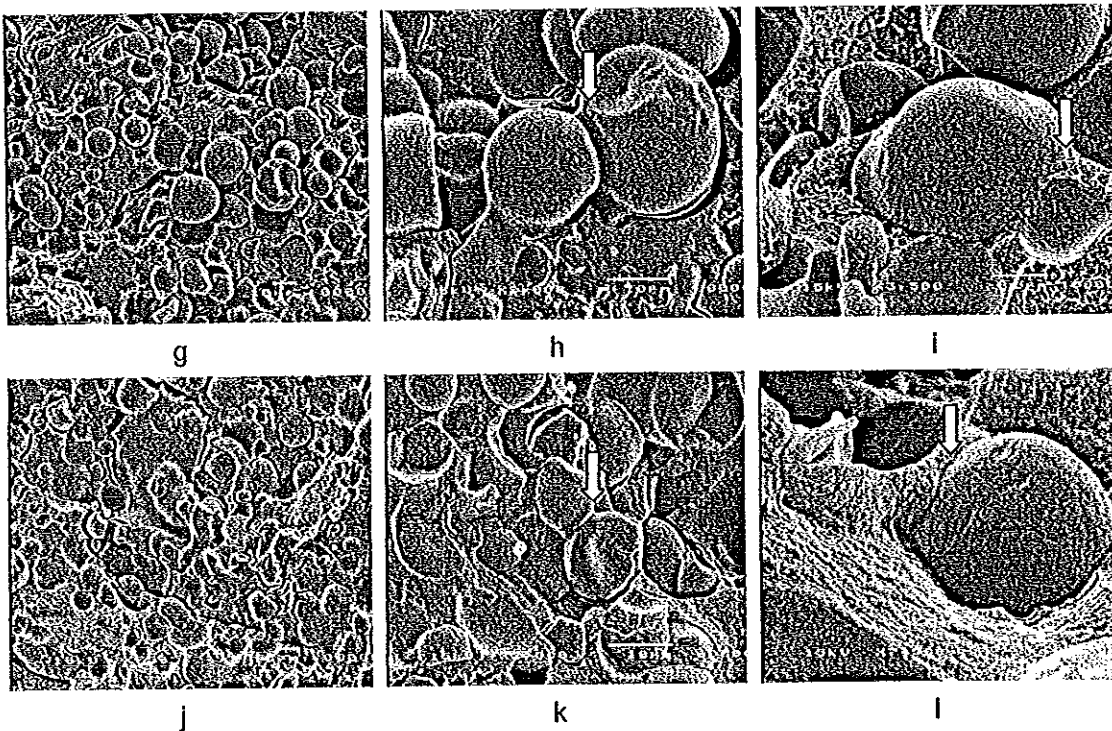
รูปที่ 4.25 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณ BPO ตั้งแต่ 0 pphr จนถึง 2 pphr โดยให้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ช่วยอธิบายผลการทดลองในส่วนของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้ดียิ่งขึ้น รูปที่ 4.25(a-c) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่มีการเติม PPS 0.5 pphr เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว โดยไม่มีการเติม BPO เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาร่วม เมื่อมีการเติม PPS เพียงอย่างเดียว พบว่าเกิดการเชื่อมติดกันที่ผิวของเม็ดแป้งทำให้แบ่งเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน แต่ไม่พบการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของแป้งและ LDPE เนื่องจาก PPS มีความสามารถในการละลายน้ำได้ จึงชอบที่จะไปทำปฏิกิริยาในเฟสของแป้งมากกว่าเฟสของ LDPE ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ก่อให้เกิดอนุภาคนูนสายโซ่โมเลกุลของเม็ดแป้งได้เป็นอย่างดี จึงทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างของเม็ดแป้งขึ้น และเมื่อมีการเติม BPO เพิ่มเข้าไปเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาร่วมกับ PPS ดังแสดงในรูปที่ 4.25(d-i) จะพบทั้งการเชื่อมโยงกันระหว่างเม็ดแป้งด้วยกันเอง ซึ่งช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง และพบการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของ LDPE กับเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ตามที่ลูกศรชี้ และเมื่อปริมาณ BPO เพิ่มมากขึ้นการเชื่อมโยงระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ LDPE เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อรอยต่อระหว่างเฟสทั้งสองได้รับการปรับปรุงส่งผลให้สมบัติเชิงกล

ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเชื่อมโยงจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสภายนอกของเม็ดแป้งนั้นเอง ซึ่งการพบการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของ LDPE กับเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ช่วยสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของ LDPE และแป้งเกิดการรวมตัวกันระหว่างทำการผสม (reactive blending) ในเครื่องผสมแบบปิด โดยการเชื่อมโยงดังกล่าวเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสทั้งสอง แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมยังคงมีการแยกเฟสกันอยู่ระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง

จากการศึกษาการแปรปรมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา PPS และ BPO พบว่าปริมาณที่ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด เมื่อใช้ BPO เท่ากับ 1.0 pphr เทียบกับน้ำหนักของ LDPE และใช้ PPS เท่ากับ 0.5 pphr โดยละลายในน้ำปริมาณ 8 pphr ปริมาณของ PPS และน้ำที่ใช้เทียบกับน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง จะใช้ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยานี้ในการศึกษาในการทดลองต่อไป ที่ทำการแปรปรมาณแป้งมันสำปะหลังในสัดส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 70 wt% ในหัวข้อที่ 4.7.3



รูปที่ 4.25 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% ใช้ปริมาณ PPS คงที่ที่ 0.5 pphr และแปรปรมาณ BPO: 0 pphr (a, b, c), 0.1 pphr (d, e, f), 1 pphr (g, h, i) และ 2 pphr (j, k, l)



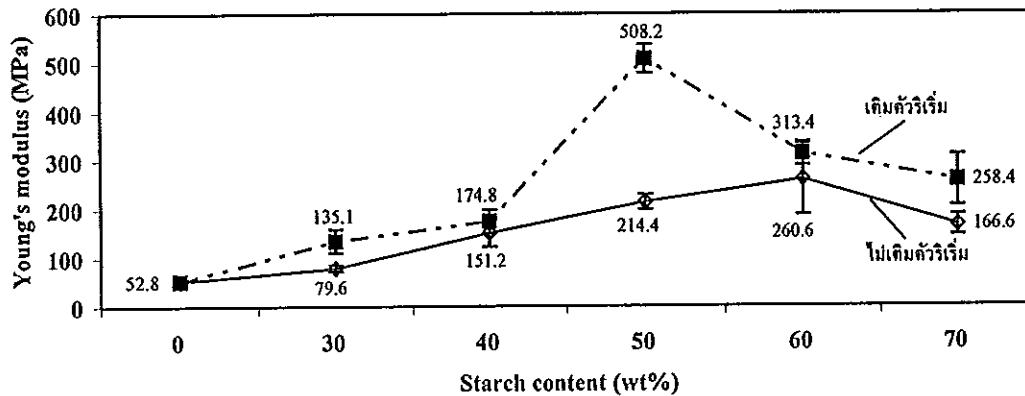
รูปที่ 4.25 (ต่อ)

### 4.7.3 การแปรปริมาณปริมาณแข็ง

เนื่องจากได้อธิบายผลของปริมาณแข็งที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา PPS และ BPO ในหัวข้อที่ 4.6 มาแล้ว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของปริมาณแข็งที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แปรปริมาณแข็งเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ใช้ BPO เท่ากับ 1.0 pphr เทียบกับน้ำหนักของ LDPE และใช้ PPS เท่ากับ 0.5 pphr ละลายในน้ำปริมาณ 8 pphr เทียบกับน้ำหนักของแข็งมันสำปะหลัง ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm เวลาในการผสม 8 min ในเครื่องผสมแบบปิด

#### 4.7.3.1 สมบัติเชิงกล

อิทธิพลของปริมาณแข็งที่มีต่อค่า E ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อปริมาณแข็งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้นจาก 0 wt% ถึง 50 wt% ค่า E มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณแข็งต่อไปอีก ค่า E มีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนแปลงค่า E ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการเติมแข็งลงใน LDPE ซึ่งทั้งกรณีที่ได้เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน สาเหตุการเปลี่ยนแปลงของค่า E เมื่อมีการเติมแข็งใน LDPE ดังกล่าวได้อธิบายไว้ก่อนหน้าแล้วในหัวข้อที่ 4.6.1

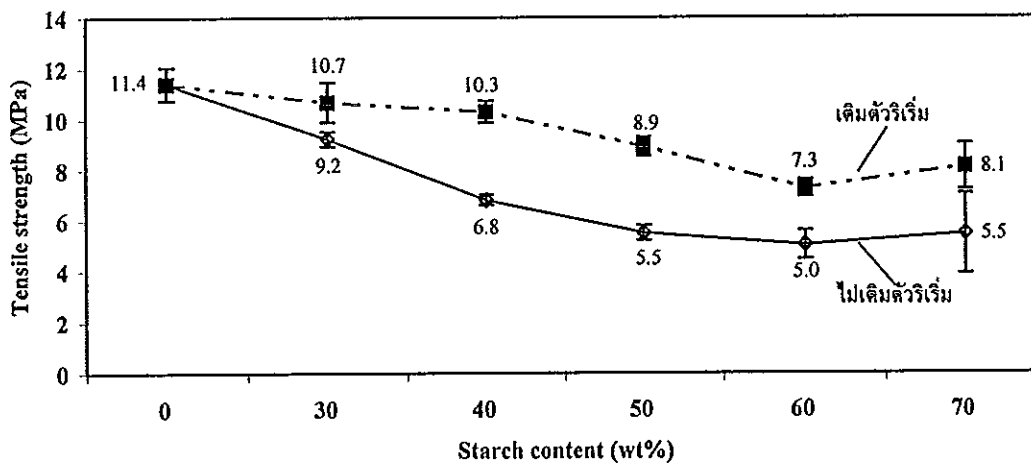


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

พิจารณาผลการเติมตัวริเริ่มและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มให้ค่า E สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ค่า E ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้ผลในทิศทางเดียวกับการใช้ PE-g-MAH เป็นสารที่ใช้เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibilizer) ให้แก่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้ง ในงานวิจัยของ Pedrosa and Rosa (2005(a)) คือพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PE-g-MAH จะให้ค่า E สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PE-g-MAH การเพิ่มขึ้นของค่า E ของพอลิเมอร์ผสมหลังจากเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมส่งผลทั้งให้เกิดการเชื่อมโยงกันขึ้นทั้งในระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง การเชื่อมโยงกันเองทั้งระหว่าง LDPE และระหว่างเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยกันเอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่า E ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

เมื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อค่า  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้น ค่า  $\sigma_b$  มีแนวโน้มลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่า  $\sigma_b$  ลดลงจาก 11.4 MPa ของ LDPE เป็น 9.2, 6.8, 5.5, 5.0 และ 5.5 MPa และในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ค่า  $\sigma_b$  ลดลงเป็น 10.7, 10.3, 8.9, 7.3 และ 8.1 MPa เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ การลดลงของค่า  $\sigma_b$  หลังจากเติมแป้งลงใน LDPE ได้ อธิบายในหัวข้อที่ 4.6.1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่า  $\sigma_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นของค่า  $\sigma_b$  หลังจากเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสม ให้ค่าสอดคล้องกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับ

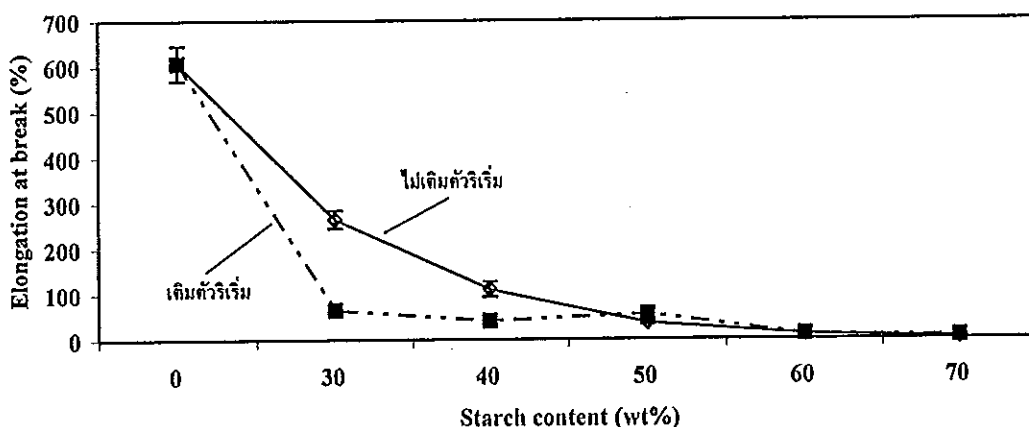
พอลิเอทิลีนที่เติม compatibilizer ต่างๆ ที่ให้ค่า  $\sigma_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม compatibilizer เช่น การเติม PE-g-MAH (Bikiaris and Panayiotou, 1998; Bikiaris *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2003; Pedrosa and Rosa, 2005 (a); Ratankamnuan and Aht-Ong, 2006; Jinlin *et al.*, 2007) การใช้ LDPE-g-dibutyl maleate (Girija and Sailaja, 2006) การใช้เอทิลีน ไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) (Prinos *et al.*, 1998) และการใช้พอลิเอทิลีนโคไวนิล-แอลกอฮอล์ ในงานวิจัยของ Sailaja and Chanda (2002) สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นภายในพอลิเมอร์ผสม รอยต่อระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งได้รับการปรับปรุง เนื่องมาจากการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ในระหว่างการผสม (reactive blending) ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.7.3.4 ส่งผลให้ค่า  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา



รูปที่ 4.27 ค่าความต้าน ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

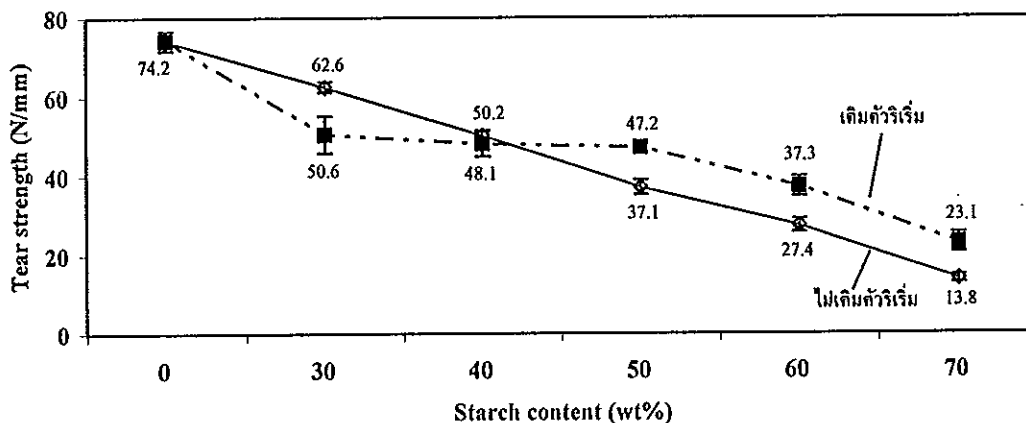
ในรูปที่ 4.28 แสดงค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณของแป้งมันสำปะหลังตั้งแต่ 0-70 wt% การลดลงของค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับ LDPE จาก 606.8 % มีค่าเป็น 265.1, 110.7, 36.4, 11.5 และ 3.8 % ส่วนในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ค่า  $\epsilon_b$  ลดลงเป็น 65.0, 40.8, 55.6, 11.4 และ 6.6 % เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ พบว่าค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของแป้งมันสำปะหลังมากกว่า 50 wt% พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะให้ค่า  $\epsilon_b$  ใกล้เคียงกันกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยมีค่าสูงกว่าเพียง

เล็กน้อย ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยมีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 30 และ 40 wt% จะให้ค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา สามารถอธิบายได้ว่าที่ปริมาณแป้งดังกล่าวจะมีสัดส่วนของ LDPE อยู่ในสัดส่วนที่มากกว่า จึงทำให้ใน ขณะที่ทำการผสมความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนแป้งน้อยๆ คือที่ปริมาณ 30 และ 40 wt% มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนแป้งมากเนื่องจากแป้งไม่เกิดการหลอม ทำให้ปริมาณ แป้งมากขึ้นความหนืดในระหว่างการผสมลดลง (Aburto *et al.*, 1997) เมื่อความหนืดในการ ผสมสูงส่งผลให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ผสมสูงตามไปด้วย ทำให้ภายใต้การผสมที่ อุณหภูมิสูงและมีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ให้อนุมูลอิสระแก่พอลิเมอร์ อาจผลให้เกิดการตัด ขาดของสายโซ่ LDPE เกิดขึ้นได้ง่ายกว่า แต่เนื่องจากค่า  $E$  และ  $\sigma_b$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมตัว ริเริ่มปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการขาดของสายโซ่ LDPE ระหว่างกระบวนการผสม ดังนั้น อาจเป็นผลมาจากเมื่อความหนืดในการผสมสูง ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุมูลอิสระบนสาย โยโมเลกุลของ LDPE ไปรวมกับอนุมูลอิสระบนเม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิดได้ยาก ทำให้ส่วนใหญ่จึง เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น คืออาจเกิดการรวมตัวของอนุมูลอิสระบนสายโซ่ LDPE กันเอง หรือ ในระหว่างเม็ดแป้งด้วยกันเอง (Moad, 1999) ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวนี้จึงทำให้ค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30 และ 40 wt% มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา นอกจากนี้ค่า  $\epsilon_b$  ที่ปริมาณแป้งอื่นๆ ให้ค่าไม่ แตกต่างกัน เหตุผลหลักเป็นผลมาจากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งเองเป็นหลักที่มีความแข็งแรงประ เสง



รูปที่ 4.28 ค่าความเครียด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดย แป้งปริมาณแป้ง 0-70 wt%

เมื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมแสดงในรูปที่ 4.29 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่เดิมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้แนวโน้มเช่นเดียวกับค่า  $\epsilon_b$  ซึ่งค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะได้รับการปรับปรุง เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมมีมากกว่า 40 wt% สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ได้อธิบายเหตุผลไว้ก่อนหน้าแล้ว นั่นก็คือที่ปริมาณ LDPE สูง ความหนืดระหว่างการผลิตผสมย่อมสูงตามไปด้วย ส่งผลให้โอกาสเกิดการเจอกันระหว่างอนุภาคลิเธอร์ของ LDPE กับอนุภาคลิเธอร์ของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นได้น้อย จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันเองเกิดขึ้นได้สูง ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณแป้งน้อยกว่า 50 wt%



รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เดิมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

#### 4.7.3.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม

ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังระหว่างเดิมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังตั้งแต่ 0-70 wt% ใช้เวลาในการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำเป็นเวลา 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจาก LDPE จาก 0 % เป็น 2.4, 10.9 และ 22.6 %



ตามลำดับ เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 30, 50 และ 70 wt% ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 2.1, 3.8 และ 12.8 % ตามลำดับ ในระยะเวลา 60 วัน การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.6.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งจากความสามารถในการดูดซับน้ำที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะเป็นข้อด้อยอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งเป็นองค์ประกอบเนื่องจากแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดี ซึ่งจะเป็นข้อด้อยหากนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ด้านบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสหรือใช้บรรจุอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการดูดซับน้ำที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสมทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันขึ้นระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังบางส่วนถูกใช้ไปในการเกิดพันธะกับ LDPE หรืออาจเกิดการเชื่อมโยงกันเองระหว่างเม็ดแป้งด้วยกัน ทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดน้ำของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าลดลงไปด้วย นอกจากนี้การเชื่อมโยงกันในพอลิเมอร์ผสม จะขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้ยากยิ่งขึ้น จึงให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำที่ได้มีค่าลดลง

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ BPO และ PPS เพื่อปรับปรุงรอยต่อระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการทดลองดังกล่าวให้ผลในทางตรงกันข้ามกับการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้เป็นตัวเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งในงานวิจัยของ Bikiaris and Panayiotou (1998) ซึ่งได้รายงานการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งข้าวโพด โดยใช้ PE-g-MA เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ใช้และใช้ PE-g-MA ที่ปริมาณ 0.4 และ 0.8 mol% พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ PE-g-MA มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PE-g-MA ลงไป และเมื่อปริมาณของ PE-g-MA ที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องมาจากหมู่แอนไฮไดรด์ที่มาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีเช่นเดียวกัน จึงยังเป็นการเพิ่มความความสามารถในการดูดซับน้ำให้แก่พอลิเมอร์ผสม

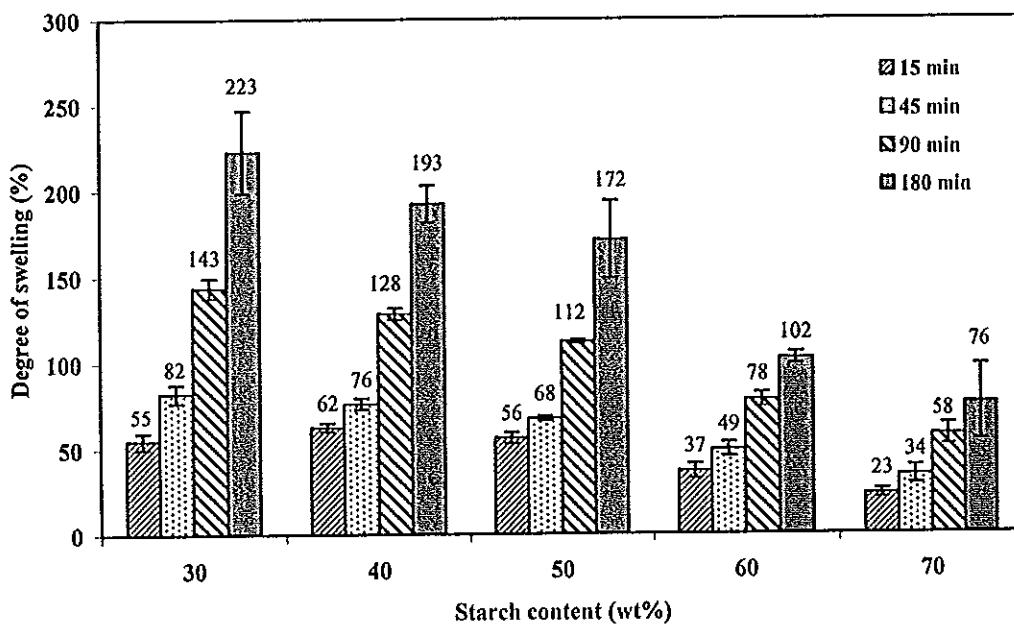
ตารางที่ 4.18 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

เวลา (day)	Water uptake (%)					
	ปริมาณแบ่ง (wt%)					
	ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา			เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา		
	30	50	70	30	50	70
1	0.5±0.0	2.0±0.2	8.0±0.3	0.4±0.0	0.7±0.0	2.4±0.2
3	0.8±0.0	3.3±0.3	14.3±0.5	0.6±0.0	1.2±0.0	3.9±0.2
6	1.0±0.0	4.5±0.5	21.7±0.8	0.9±0.0	1.6±0.0	5.4±0.4
9	1.3±0.1	5.4±0.6	22.7±0.9	1.1±0.1	1.9±0.0	6.4±0.4
12	1.5±0.0	6.1±0.7	22.9±1.0	1.1±0.1	2.2±0.0	7.2±0.5
15	1.7±0.1	6.9±0.8	23.0±1.0	1.4±0.1	2.4±0.0	8.0±0.5
18	1.8±0.1	7.4±0.8	22.9±1.1	1.4±0.1	2.6±0.1	8.6±0.5
21	2.0±0.1	7.9±0.9	23.0±1.1	1.5±0.1	2.6±0.0	9.0±0.5
24	2.1±0.1	8.4±0.9	22.9±1.0	1.6±0.1	2.9±0.0	9.7±0.5
27	2.2±0.0	8.8±0.9	23.0±1.0	1.7±0.0	3.0±0.0	10.2±0.5
30	2.2±0.1	9.4±1.1	22.9±1.0	1.8±0.0	3.3±0.0	11.0±0.6
60	2.4±0.0	10.9±1.2	22.6±1.1	2.1±0.1	3.8±0.0	12.8±0.7

#### 4.7.3.3 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย

ทำการศึกษาความสามารถในการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาในตัวทำละลายพาราไซลีน (p-xylene) ที่อุณหภูมิ 80°C แสดงรูปที่ 4.30 จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาและ LDPE จะละลายในตัวทำละลายพาราไซลีนก่อน 15 min ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะให้ค่าบวมตัวในตัวทำละลายภายในเวลา 180 min หลังจากนั้นเริ่มมีบางส่วนละลายออกมาจากพอลิเมอร์ผสมทำให้สารละลายที่ได้มีลักษณะขุ่นและเป็นวุ้นเกิดขึ้น ดังนั้นที่เวลาดังกล่าวเป็นจุดอิ่มตัวของพอลิเมอร์ผสมที่จะสามารถบวมตัวในตัวทำละลาย และเมื่อทำการทดลองต่อไปเป็นระยะเวลา 24 h พบว่าชิ้นตัวอย่างที่ทำการศึกษาจะละลายกลายเป็นของเหลวขุ่น และมีตะกอนเกิดขึ้นที่ก้นขวด และเมื่อตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดเป็นวุ้นขึ้น แสดงให้เห็นว่าแทบไม่เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง LDPE ด้วยกัน หรือเกิดในปริมาณที่น้อยมาก จึงทำให้เกิดการละลายของพอลิเมอร์ผสมหลังจากทดลองเป็นเวลา 24 h การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา LDPE เกิดการเชื่อมโยงกันกับแป้งมันสำปะหลัง จากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้สามารถทนต่อตัวทำละลายได้ดีกว่า LDPE และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณแป้งต่อค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ดีกรีการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแป้งที่แสดงความเป็นขั้วสูง จากกฎของการละลายสารที่ไม่มีขั้วจะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ส่วนสารที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแป้งที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การละลายของพอลิเมอร์ผสมในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเกิดขึ้นได้น้อยลง ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งสูงจึงให้ค่าการบวมตัวในพาราไซลีนต่ำ

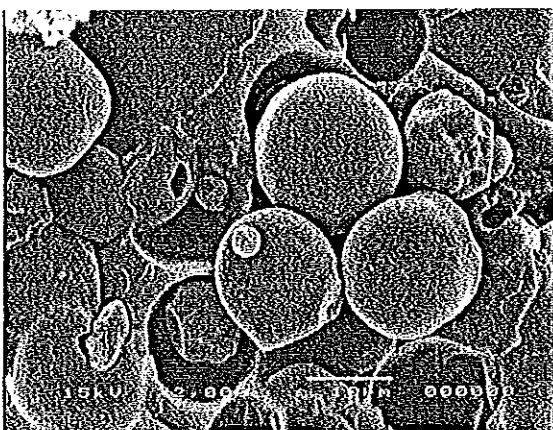


รูปที่ 4.30 ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

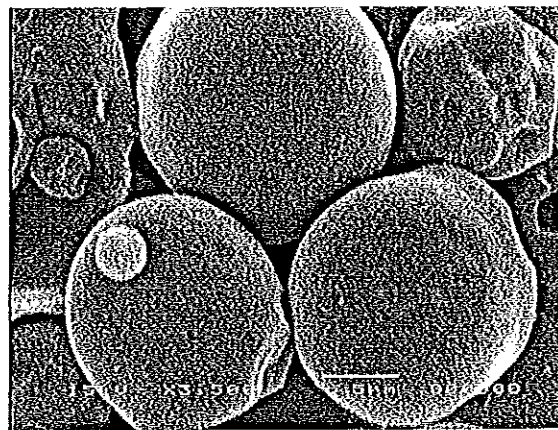
#### 4.7.3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30, 50 และ 70 wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.31, 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ พิจารณาการกระจายตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการกระจายตัวของเม็ดแป้ง

ใน LDPE เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมมีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยเมื่อพิจารณารอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสอง พบว่าไม่มีการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของแข็งมันสำปะหลังกับ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.31(a, b), 4.32(a, b) และ 4.33(a, b) สามารถสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเฟสทั้งสองอย่างชัดเจน อันเป็นผลมาจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างแข็งมันสำปะหลังกับ LDPE แต่เมื่อเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงไปในพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.31(d), 4.32(d) และ 4.33(d) พบว่ารอยต่อระหว่างเฟสของ LDPE กับแข็งมันสำปะหลังได้รับการปรับปรุง นั่นก็คือจะพบการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของ LDPE กับแข็งมันสำปะหลังที่มีลักษณะขรุขระ โดยการเชื่อมโยงดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองหรือเกิดเฉพาะที่ผิวนอกของแข็งมันสำปะหลังเท่านั้น เป็นผลเนื่องมาจากแข็งมันสำปะหลังไม่เกิดการแตกออกในระหว่างการผสมทำให้ยังคงสภาพความเป็นเม็ดแข็งอยู่ และที่ผิวของแข็งมันสำปะหลังมีส่วนของปลายสายอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่ยื่นออกมาจากผิวของแข็งมันสำปะหลัง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2545) ซึ่งส่วนที่ยื่นออกมาดังกล่าวนี้จะเชื่อมกับสายโซ่โมเลกุลของ LDPE เนื่องมาจากเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุมูลอิสระบนสายโซ่ LDPE กับแข็งมันสำปะหลังในระหว่างกระบวนการผสมเมื่อมีการเติม BPO และ PPS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาลงไป นอกจากจะพบรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองได้รับการปรับปรุงแล้ว ยังพบการเชื่อมโยงกันเองระหว่างเม็ดแข็งมันสำปะหลังด้วยกันเองเมื่อมีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.31(c), 4.32(c) และ 4.33(c) จากลักษณะดังกล่าวช่วยยืนยันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงระหว่างพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น การเชื่อมต่อกันระหว่าง LDPE กับแข็งมันสำปะหลัง ช่วยสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการผสมหรือที่เรียกว่า reactive blending ได้เป็นอย่างดี เมื่อมีการเติม BPO และ PPS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาร่วม (co-initiators)

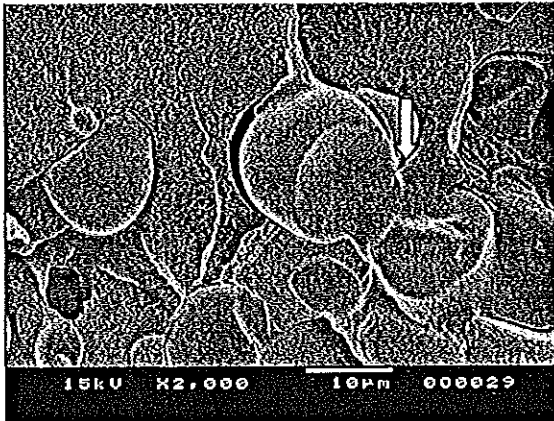


a

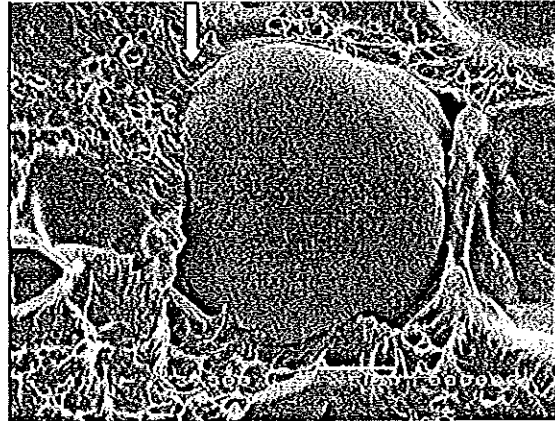


b

รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแข็งมันสำปะหลัง 30 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)

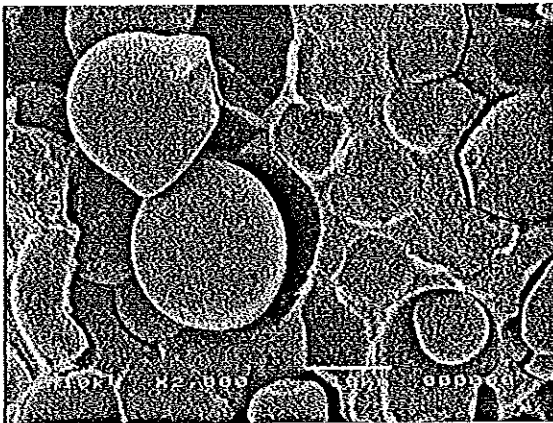


c

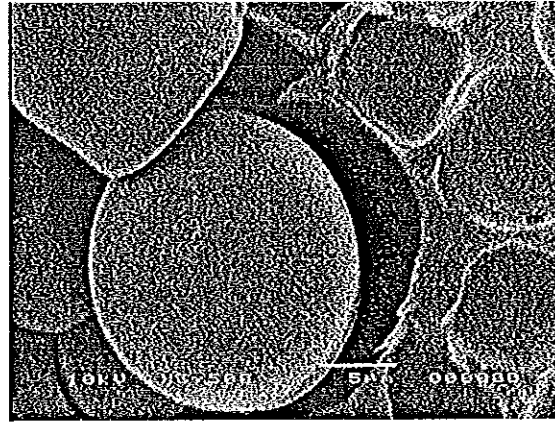


d

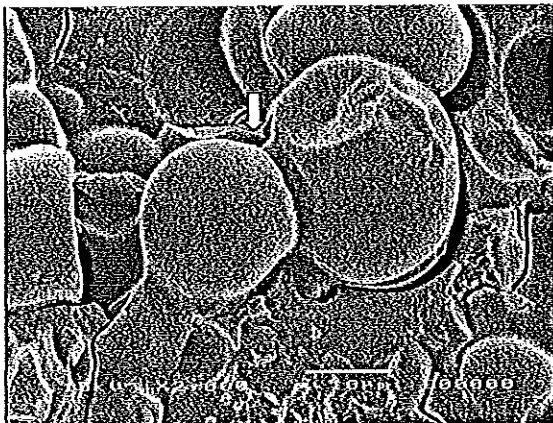
รูปที่ 4.31 (ต่อ)



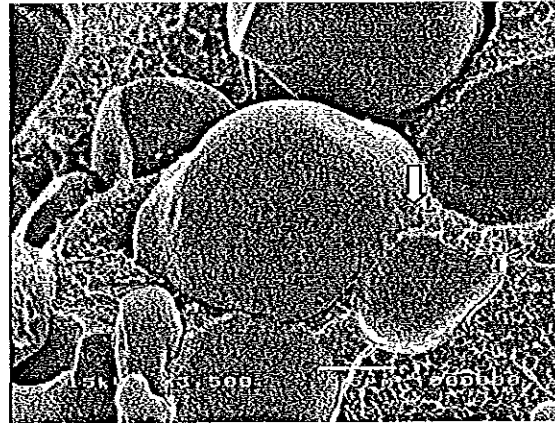
a



b

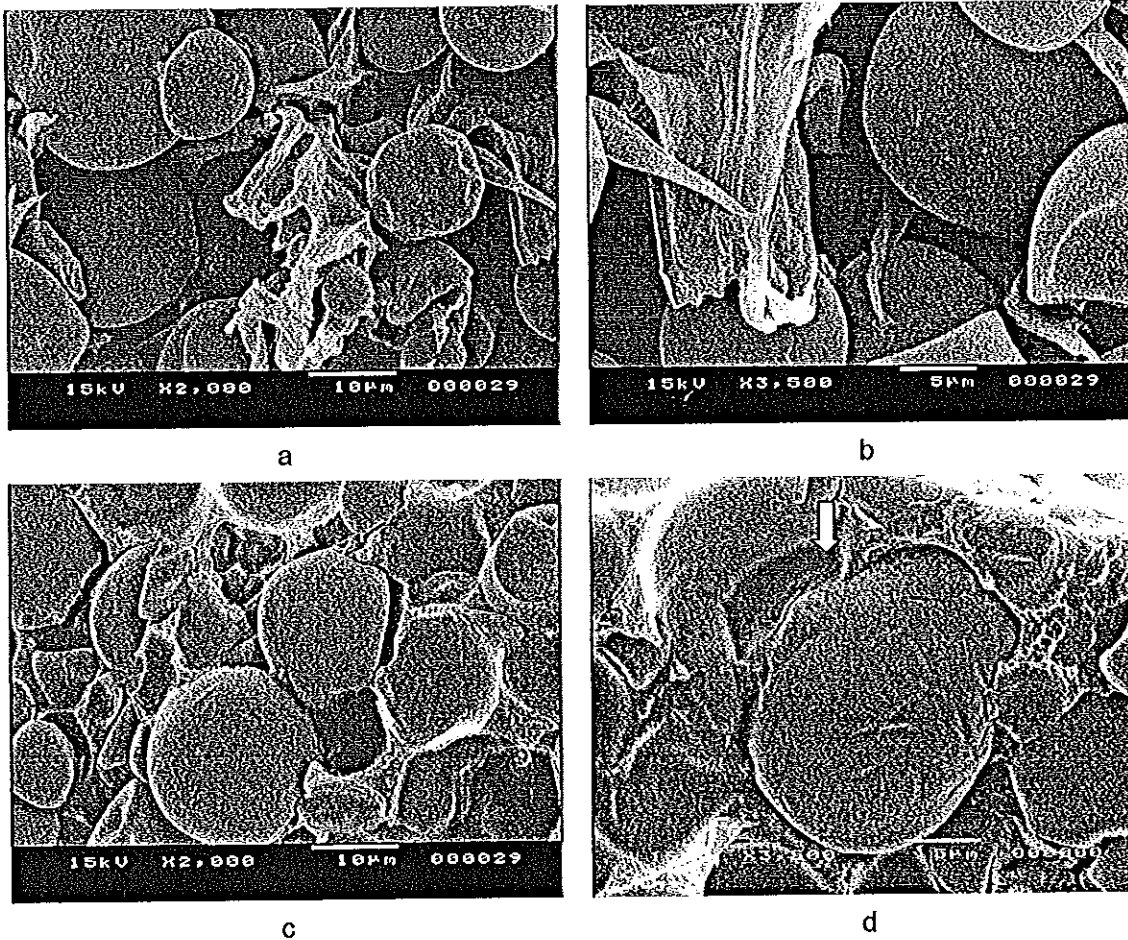


c



d

รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)



รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (a, b) และที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (c, d)

#### 4.7.3.5 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ LDPE และพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่า  $T_g$ ,  $T_m$  และ  $X_c$  ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการเติมแบ่งมันสำปะหลังใน LDPE ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 4.6.4 ดังนั้นในหัวข้อนี้ทำการเปรียบเทียบค่า  $T_g$  และ  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเมื่อปริมาณแบ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้ค่า  $T_g$  และ  $T_m$  ที่ได้จากเทคนิค DSC มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ไม่สามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล (immiscible blend) (Raj *et al.*, 2004; Predoso and Rosa, 2005) แต่เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะให้ปริมาณผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัว

ริเริ่มปฏิกิริยาเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่าการที่ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมตัวริเริ่มลงไป เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของแป้งมันสำปะหลังและ LDPE ในระหว่างการผสมจะไปลดแรงตึงผิว (interfacial tension) ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสอง ทำให้ใจกลางในการเกิดผลึกของ LDPE ย้ายไปอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ผลึกของ LDPE เกิดและเจริญขึ้นระหว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสที่ได้รับการปรับปรุง (Liu *et al.*, 2003) ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา มีปริมาณผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.19 ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ผสมแปรปริมาณแป้ง 30, 50 และ 70 wt% ที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

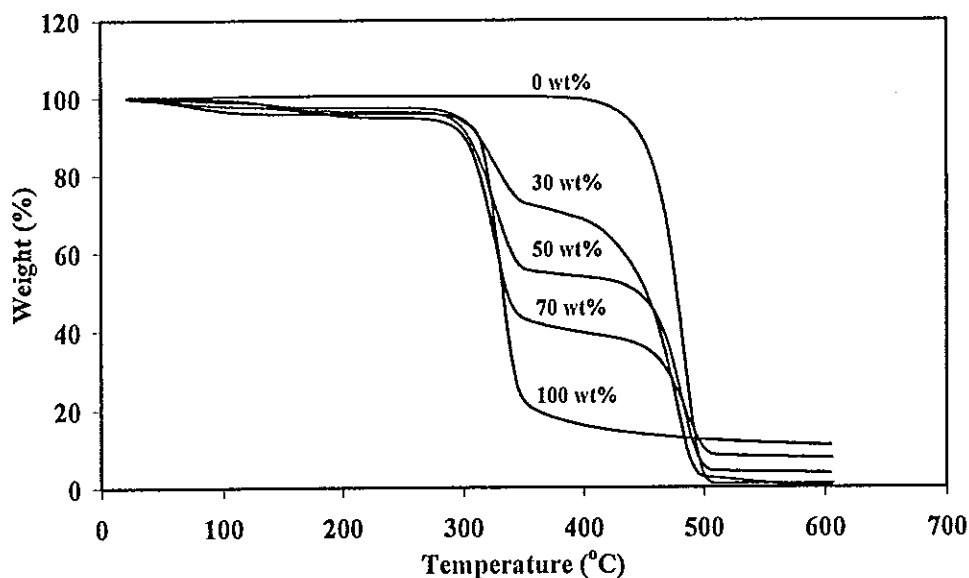
ปริมาณแป้ง (wt%)	ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา			เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา		
	$T_c$ (°C)	$T_m$ (°C)	Xc (%)	$T_c$ (°C)	$T_m$ (°C)	Xc (%)
0	94.0	109.9	20.8	-	-	-
30	95.0	109.5	19.1	95.8	109.2	20.1
50	95.3	109.4	15.2	95.6	109.5	20.1
70	95.6	109.5	17.0	95.1	108.7	16.0

#### 4.7.3.6 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิ

##### เมตตริก

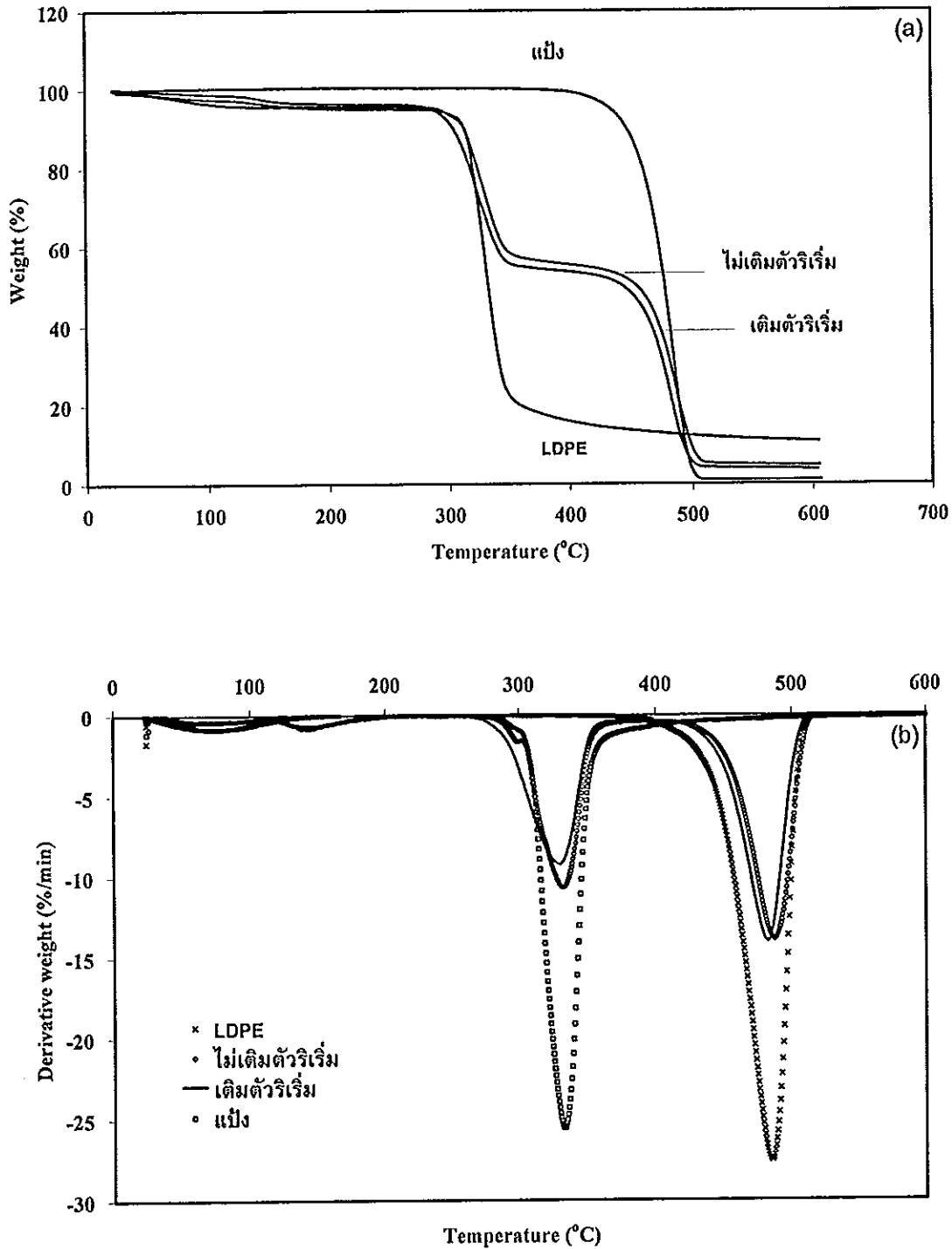
ศึกษาความสามารถในการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง รูปที่ 4.34 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีแป้งในสัดส่วนต่างๆ รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่มีปริมาณแป้ง 50 wt% ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาพบการสลายตัว 3 ขั้นตอน ช่วงแรก 30-100°C ซึ่งเป็นผลจากแป้งสูญเสียความชื้น ช่วงอุณหภูมิ 316°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่แป้งเกิดการสลายตัว และที่อุณหภูมิ 458°C เป็นการสลายของ LDPE ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.6.5 สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ตำแหน่งเช่นเดียวกัน แต่พบว่าตำแหน่งการสลายตัวของแป้งที่อุณหภูมิประมาณ 310°C และของ LDPE ที่อุณหภูมิประมาณ 450°C ซึ่งมีแนวโน้มเลื่อนมายังอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม โดยเฉพาะในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 wt% ที่ให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งในสัดส่วนอื่นๆ

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เลื่อนตำแหน่งมายังอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา เช่นพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบริ่ง 30 % ลดลงจาก 460°C เป็น 446°C พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบริ่ง 50 % อุณหภูมิการสลายตัวของ LDPE ลดลงจาก 464°C เป็น 460°C และที่มีปริมาณแบริ่ง 70 % ลดลงจาก 463°C เป็น 460°C ซึ่งให้ผลการทดลองไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Girija and Sallaja (2006) ได้รายงานอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และแบริ่งมันสำปะหลังเทอร์โมพลาสติกที่ลดลงที่ใช้ LDPE-g-dibutyl maleate เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม LDPE-g-dibutyl maleate โดยอุณหภูมิการสลายตัวของแบริ่งและ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้มีค่าเท่ากับ 318°C และ 478°C ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ อุณหภูมิการสลายตัวของแบริ่ง และ LDPE ลดลงเป็น 303°C และ 468°C ตามลำดับ ซึ่ง Girija and Sallaja (2006) ได้อธิบายการลดลงของอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ผสมทั้งสอง เนื่องจากการเติมสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.34 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบริ่ง 0-70 wt%





รูปที่ 4.35 การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่ม ปฏิกริยา

#### 4.7.3.7 การตรวจสอบด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.6.7 ซึ่งในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์เปรียบเทียบทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยทำการแปรปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30, 50 และ 70 wt% ตารางที่ 4.20 แสดงค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสม ส่วนรูปที่ 4.36, 4.37 และ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $E'$ ,  $E''$  และ  $\tan \delta$  กับอุณหภูมิที่มีปริมาณแป้งในสัดส่วนต่างๆ ตามลำดับ

พิจารณาค่า  $E'$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าค่า  $E'$  ที่ได้จาก DMTA ให้ผลในแนวโน้มเดียวกันกับค่า  $E$  ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 4.7.3.1 การเพิ่มขึ้นของค่า  $E'$  ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา เป็นผลมาจากพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Predoso and Rosa, 2005(a)) โดยการเพิ่มขึ้นของค่า  $E'$  ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bikiaris and Panayiotou (1998) และ Predoso and Rosa (2005(a)) พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และแป้งที่มีการเติม PE-g-MAH เป็นสารเพิ่มความสามารภในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมให้ค่า  $E'$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PE-g-MAH

ค่า  $E''$  แสดงถึงพลังงานที่หายไปเพื่อเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานชนิดอื่น เช่นพลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งเป็นการตอบสนองของส่วนแสดงพฤติกรรมส่วนของเหลว (viscous behavior) กราฟแสดงค่า  $E''$  ของพอลิเมอร์ผสมแสดงในรูปที่ 4.37 เมื่อเปรียบเทียบค่า  $E''$  ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่า  $E''$  น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา การที่พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่า  $E''$  น้อยกว่านั้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีความเป็นอีลาสติกสูง (high elastic recover) อันเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงกันระหว่างเม็ดแป้งกับ LDPE และระหว่าง LDPE ด้วยกันเอง ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีความแข็งเพิ่มขึ้น (Predoso and Rosa, 2005(a))

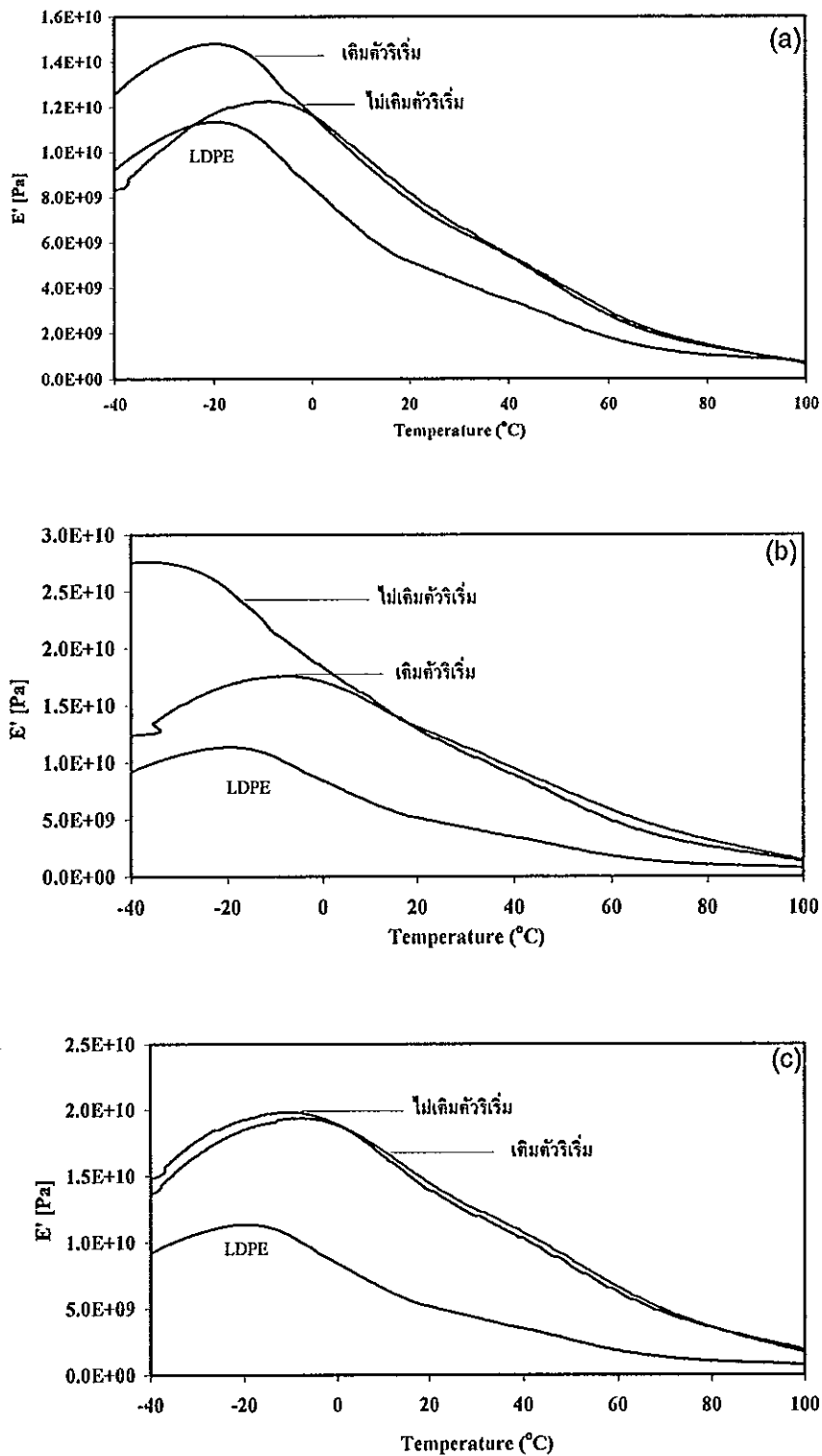
พิจารณาค่าแห่งสูงสุดของกราฟ  $E''$  ของ LDPE พบว่าอยู่ในช่วง  $-25-0^{\circ}\text{C}$  ซึ่งแสดงถึงการผ่อนคลาย  $\beta$  อันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของกิ่งในส่วนอสัณฐาน (Predoso and Rosa, 2005(a)) เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นมีการเลื่อนตำแหน่ง

ไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับกับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาดำเน่งดังกล่าวจะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากการเลื่อนตำแหน่งของจุดสูงสุดของกราฟ  $E''$  ไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยยืนยันการเชื่อมโยงกันขึ้นระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้การเคลื่อนไหวของโมเลกุลเกิดขึ้นได้น้อยลง

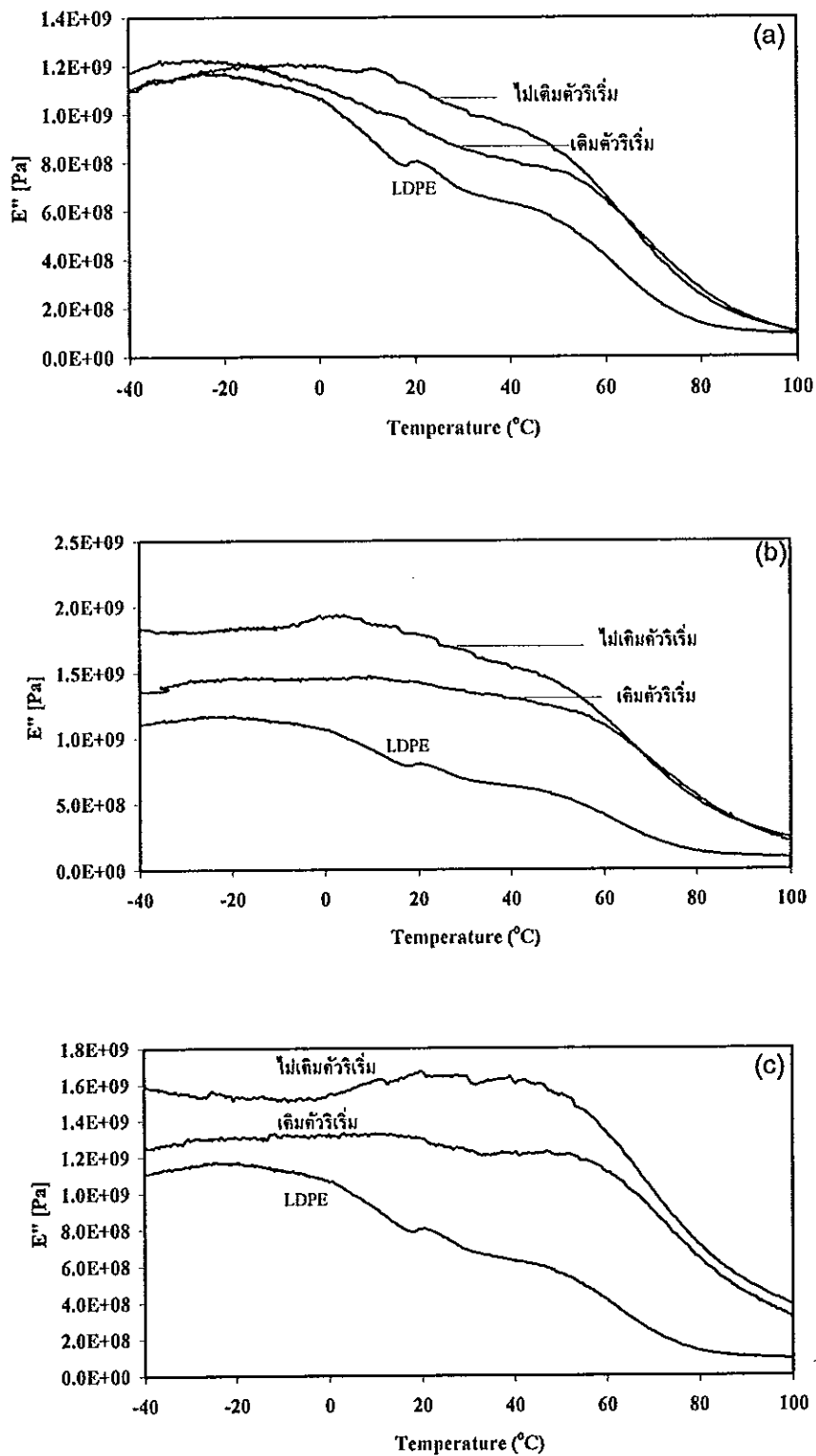
ศึกษาค่า  $\tan \delta$  ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิที่ให้ค่า  $\tan \delta$  ของ LDPE สูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ  $57^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมินี้แสดงถึงการผ่อนคลายแบบ  $\alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาค่า  $\tan \delta_{\max}$  จะเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมริเริ่มปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะไปส่งผลให้การเคลื่อนไหวของโมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้น้อยลง และเมื่อพิจารณาค่า  $\tan \delta_{\max}$  ที่หาได้จากตำแหน่งสูงสุดของกราฟ  $\tan \delta$  ดังแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไปจะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวโมเลกุล และเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้  $\tan \delta_{\max}$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังและการเชื่อมโยงกันเองระหว่าง LDPE จากลักษณะดังกล่าวทำให้การเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.20 ค่า  $\tan \delta_{\max}$  ของพอลิเมอร์ผสมแปรปริมาณแป้งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

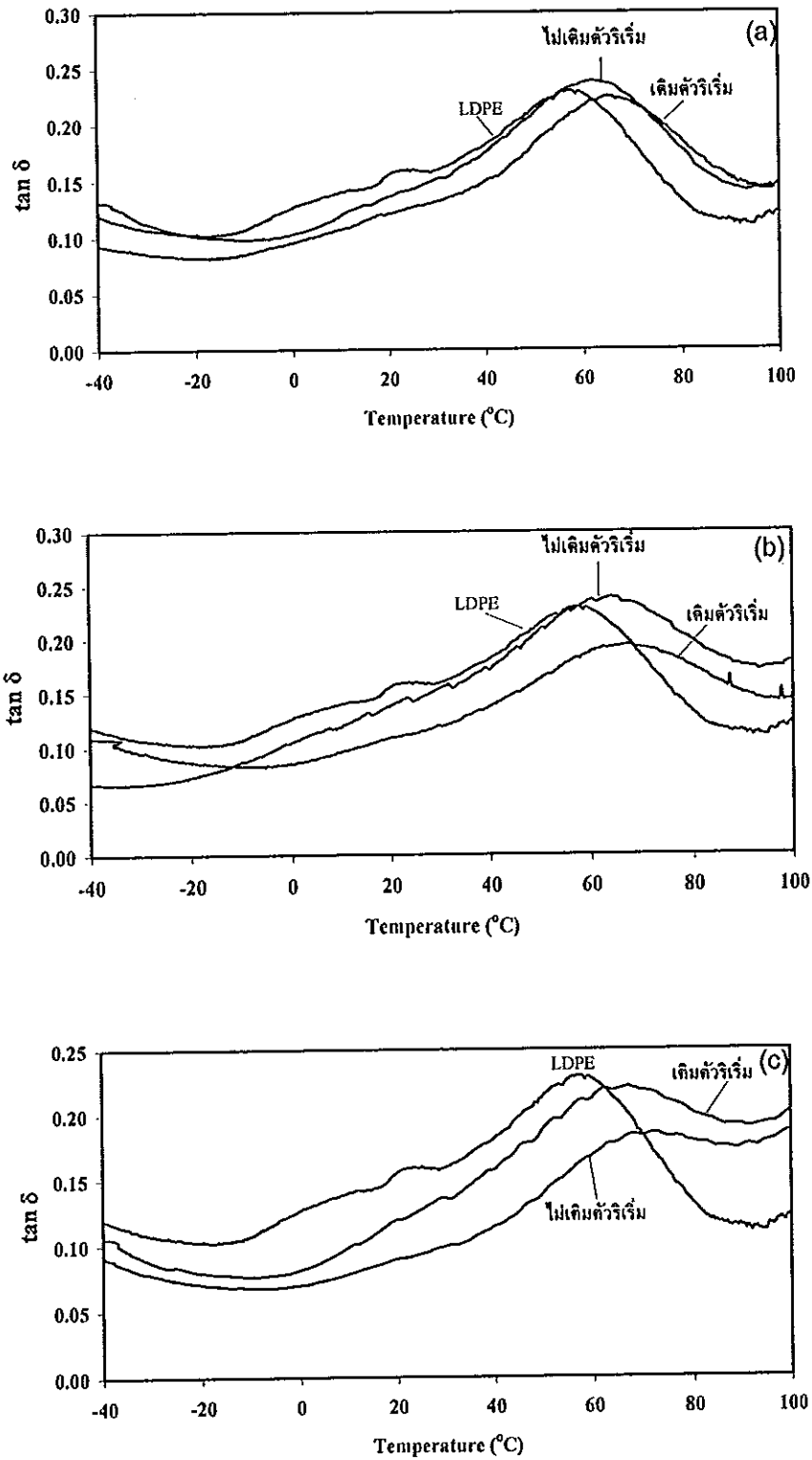
ปริมาณแป้ง (wt%)	$\tan \delta_{\max}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	ไม่เติมตัวริเริ่ม	เติมตัวริเริ่ม
0	57.09	-
30	62.03	65.09
50	64.35	67.09
70	67.17	72.52



รูปที่ 4.36 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่ปริมาณแบ่ง (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%



รูปที่ 4.37 ค่ามอดุลัสสูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่ปริมาณ  
 แป้ง (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%



รูปที่ 4.38 ค่าแทนเจนต์สูญเสียของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่ปริมาณ  
แบ่ง: (a) 30 wt% (b) 50 wt% และ (c) 70 wt%

#### 4.7.3.8 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

ตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.39 แสดงเลขคลื่นและสเปกตรัมของ LDPE แฉ่ง และ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแฉ่งมันสำปะหลังเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่ศึกษาในช่วงเลขคลื่น  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  โดยแฉ่งมันสำปะหลังปรากฏแถบการสั่นของหมู่  $\text{CH}_2$  บนแกนหลักของโมเลกุล แฉ่งที่เลขคลื่น  $858\text{ cm}^{-1}$  ช่วง  $1750-1550\text{ cm}^{-1}$  และที่ช่วง  $900-750\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ (Raj *et al.*, 2004) นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่เลขคลื่น  $1648\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวยังคงมีความขัดแย้งกันอยู่ โดยบางรายงานการศึกษา กล่าวว่า ณ ตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าว เป็นพีคที่แสดงการยืดของหมู่  $\text{C-C(O)}$  (Raj *et al.*, 2004; Ratanakamnuan and Aht-Ong, 2006) หรือ บางงานวิจัยกล่าวว่า เป็นแถบการดูดซับน้ำของหมู่  $\text{O-H}$  ของแฉ่ง (Senna *et al.*, 2008; Mano *et al.*, 2003, Chandra and Rustgi, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานในงานวิจัยของ Kaewtatip and Tanrattanakul (2008) ที่กล่าวว่า ช่วงเลขคลื่นดังกล่าวมีความขัดแย้งกันอยู่ แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวไม่มีผลต่อการพิจารณาการเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างแฉ่งกับสไตรีน ดังนั้นจากงานวิจัยเหล่านี้จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นแถบการดูดกลืนดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันใด ในขณะที่ LDPE ปรากฏแถบดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2915, 2847, 1465 และ  $723\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของ  $\text{C-H}$  แถบการยืดของ  $\text{CH}_2$  แถบการงอของ  $\text{CH}_3$  และแถบการสั่นหมู่  $\text{CH}_2$  บนแกนหลักของโมเลกุล LDPE ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาพีคของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมจะปรากฏพีคทั้งของ LDPE และแฉ่งมันสำปะหลังโดยสัดส่วนความสูงของพีคที่ตำแหน่งต่างๆ แปรผันโดยตรงกับปริมาณของแฉ่งมันสำปะหลังที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม และตำแหน่งพีคที่ปรากฏอยู่ในพอลิเมอร์ผสมจะมีตำแหน่งเดียวกันกับแฉ่งมันสำปะหลังและ LDPE จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแฉ่งไม่สามารถเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล (Raj *et al.*, 2004)

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 4.40 พบว่าตำแหน่งพีคส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง LDPE กับแฉ่งมันสำปะหลัง เกิดบริเวณผิวสัมผัสที่ผิวหน้าด้านนอกของเม็ดแฉ่ง และการเชื่อมโยงระหว่างเม็ดแฉ่งมันสำปะหลังกับ LDPE ที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจเกิดในสัดส่วนน้อย ส่งผลให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้

ตารางที่ 4.21 ตำแหน่งเลขคลื่นที่ได้จากเทคนิค FT-IR ของ LDPE และแป้งมันสำปะหลัง

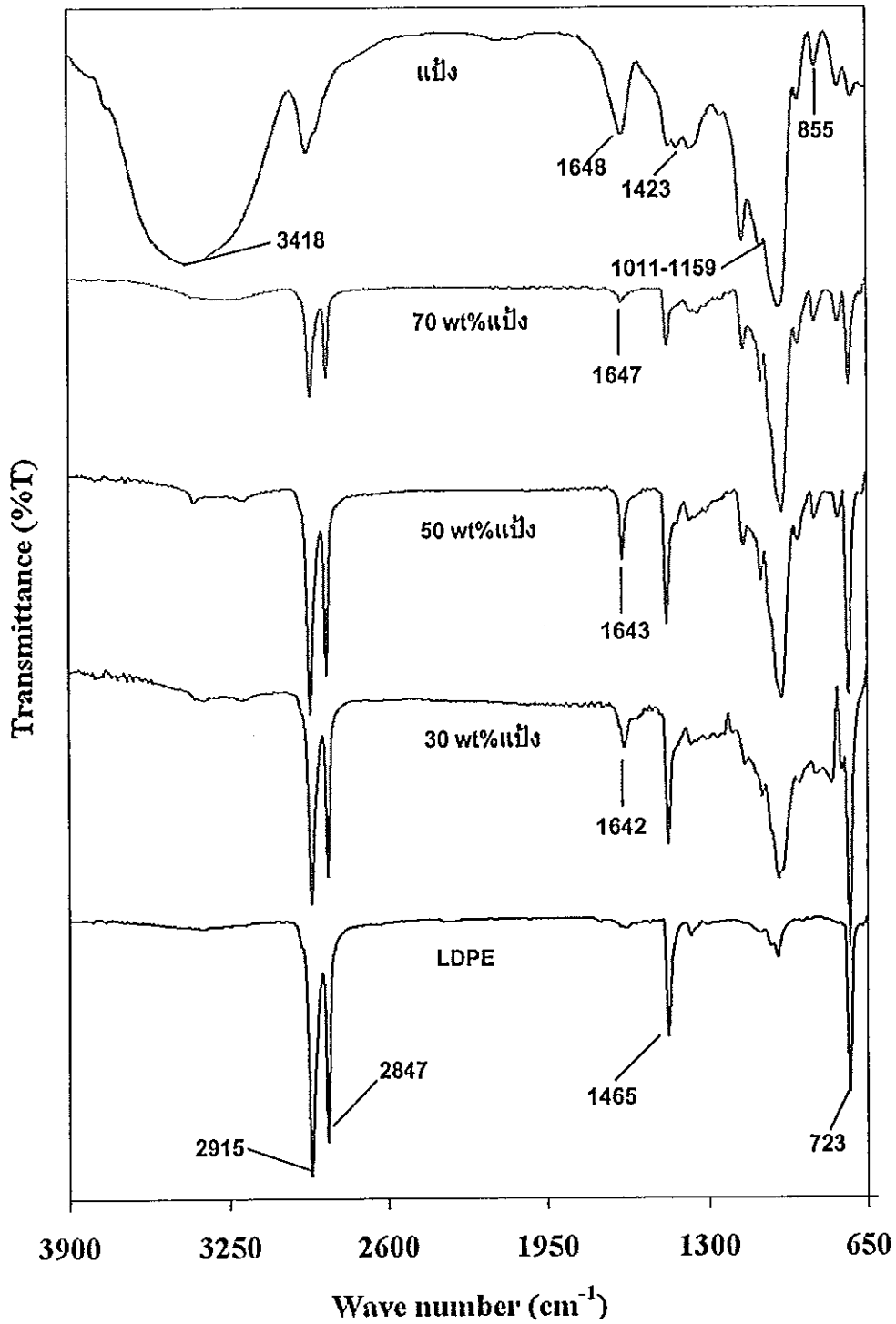
ตำแหน่งเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )		หมู่ฟังก์ชัน
LDPE	แป้ง	
-	3418 <sup>b</sup>	O-H Stretching
2915	-	C-H Stretching
2847	-	CH <sub>2</sub> Stretching
-	1648	C-C-(O) Stretching/(O-H) band of absorbed water
1465	-	CH <sub>3</sub> Bending
-	1423	OH Bending
-	1159	C-O stretching of starch
-	1085	
-	1011	
-	858	C-C-(O) Bending
723	-	Skeletal vibration -CH <sub>2</sub> -

หมายเหตุ<sup>b</sup> พีคกว้าง (broad peak)

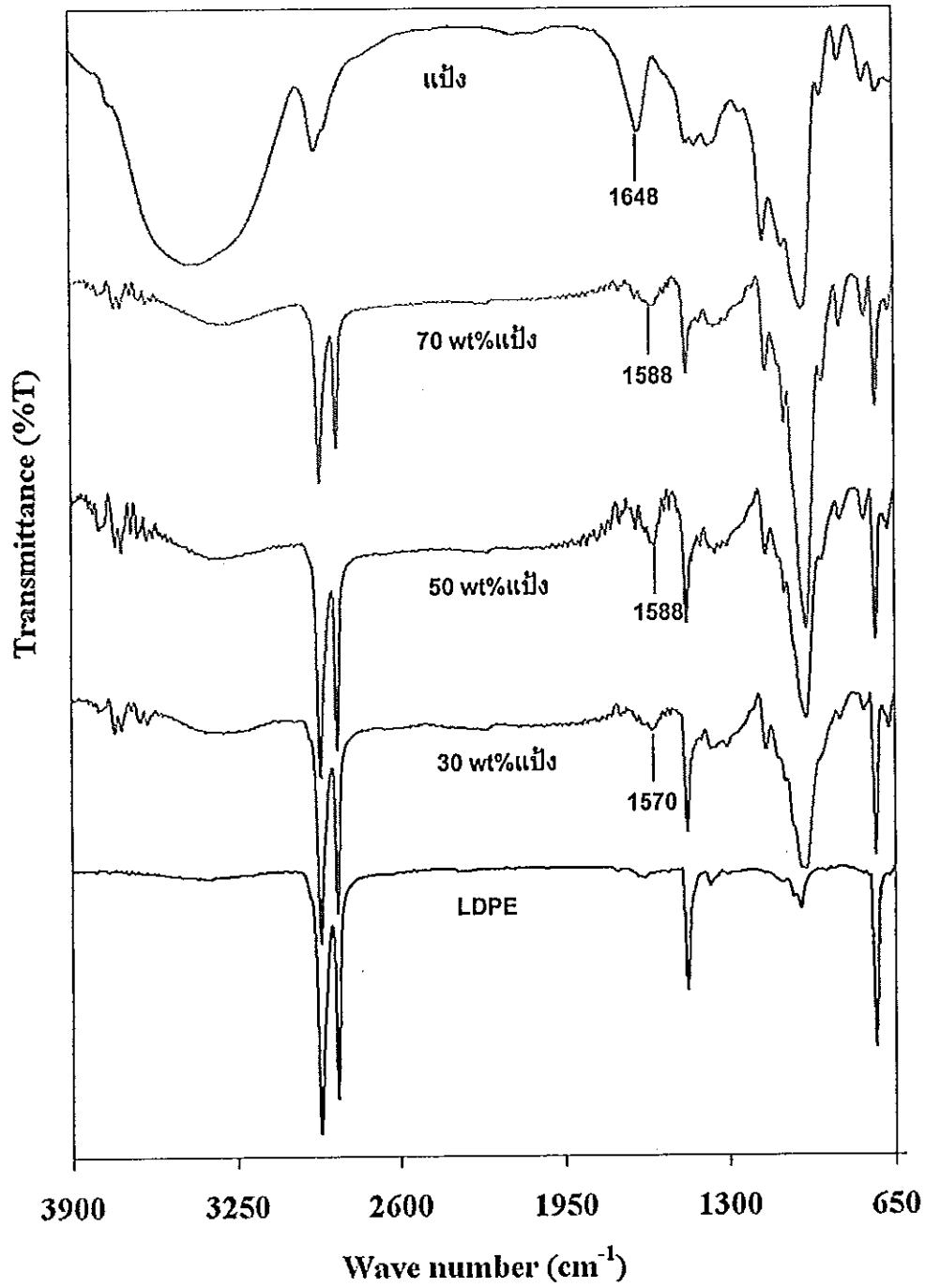
#### 4.8 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน

ทดสอบการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้วิธีการฝังดิน โดยนำ LDPE พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ BPO เท่ากับ 1.0 pphr เทียบกับ น้ำหนัก LDPE และ PPS 0.5 pphr เทียบกับน้ำหนักของแป้ง แปรรูปปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสม เป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งและตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 6, 12, 18 และ 24 สัปดาห์ โดยศึกษาจากน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปด้วยเครื่อง TGA รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน





รูปที่ 4.39 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่  
ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา



รูปที่ 4.40 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่แปรปริมาณแป้งเป็น 30, 50 และ 70 wt% ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

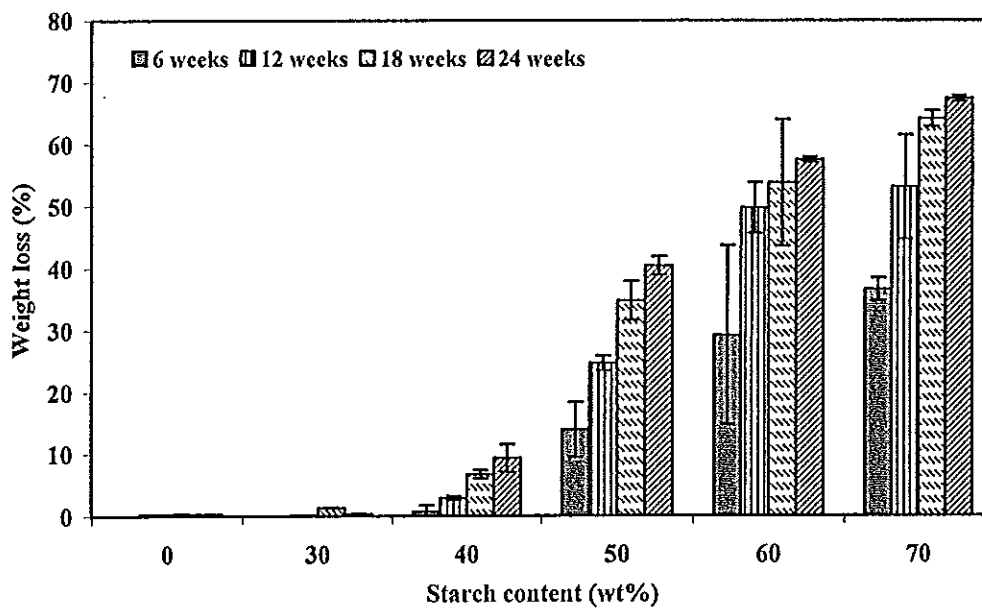
#### 4.8.1 น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดิน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ ดังนั้นในการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.41 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่หายไปหลังจากการฝังดินเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่หายไปหลังจากฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ เป็น 0.32, 9.34, 40.40, 57.49 และ 67.37 % เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ โดยที่ LDPE แทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ สาเหตุที่เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น อัตราในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากแบริ่งเป็นอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ในธรรมชาตินั่นเอง และโครงสร้างโมเลกุลของแบริ่ง เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมในการย่อยสลายโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ เนื่องจากมีสมบัติชอบน้ำ และหากมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน จะช่วยทำให้การย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น ในธรรมชาติมีความหลากหลายของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะและเหมาะสมต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทใดประเภทหนึ่งโดยเฉพาะ การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ ไม่จำเป็นต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดเดียวกัน สำหรับพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น พอลิแซคคาไรด์ และโปรตีน เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากมีจุลินทรีย์จำนวนมากในธรรมชาติที่สังเคราะห์เอนไซม์ในการย่อยสลายพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ (ชนาวดี, 2549) ดังนั้นเมื่อปริมาณแบริ่งในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้อาหารของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การหายไปของน้ำหนักจึงเกิดมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบริ่งอยู่ในสัดส่วนน้อย และเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น อัตราการหายไปของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นผลเนื่องมาจากเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการย่อยสลายให้แก่จุลินทรีย์นั่นเอง

พิจารณาน้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยใช้ BPO 1.0 pphr เทียบกับน้ำหนัก LDPE และ PPS 0.5 pphr เทียบกับน้ำหนักของแบริ่ง แสดงในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.42 พบว่าน้ำหนักที่หายไปหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลดลงเป็น 0.21, 0.18, 1.33, 14.18 และ 24.95 % เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลไปในแนวทางเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือเมื่อเวลาในการฝังดินและปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มเพิ่มขึ้น สาเหตุดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.22 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

ปริมาณแป้ง (wt%)	Weight loss (%)			
	เวลา (week)			
	6	12	18	24
0	-0.06±0.04	0.30±0.00	0.33±0.03	0.33±0.00
30	-0.79±0.13	0.04±0.04	1.32±0.09	0.32±0.12
40	0.71±1.00	2.88±0.32	6.71±0.71	9.34±2.25
50	13.98±4.45	24.73±1.19	34.81±3.15	40.40±1.47
60	29.23±14.43	49.73±4.10	53.78±10.21	57.49±0.43
70	36.65±1.82	53.08±8.36	64.11±1.29	67.37±0.49



รูปที่ 4.41 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น คาดว่าจุลินทรีย์น่าจะมีปริมาณมากในตัวอย่างที่มีแป้งมากดังแสดงในรูปที่ 4.43 เนื่องจากแป้งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ โดย LDPE แทบไม่พบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นงานเลย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปหลังจากการฝังดินที่ LDPE แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังจากฝังดิน

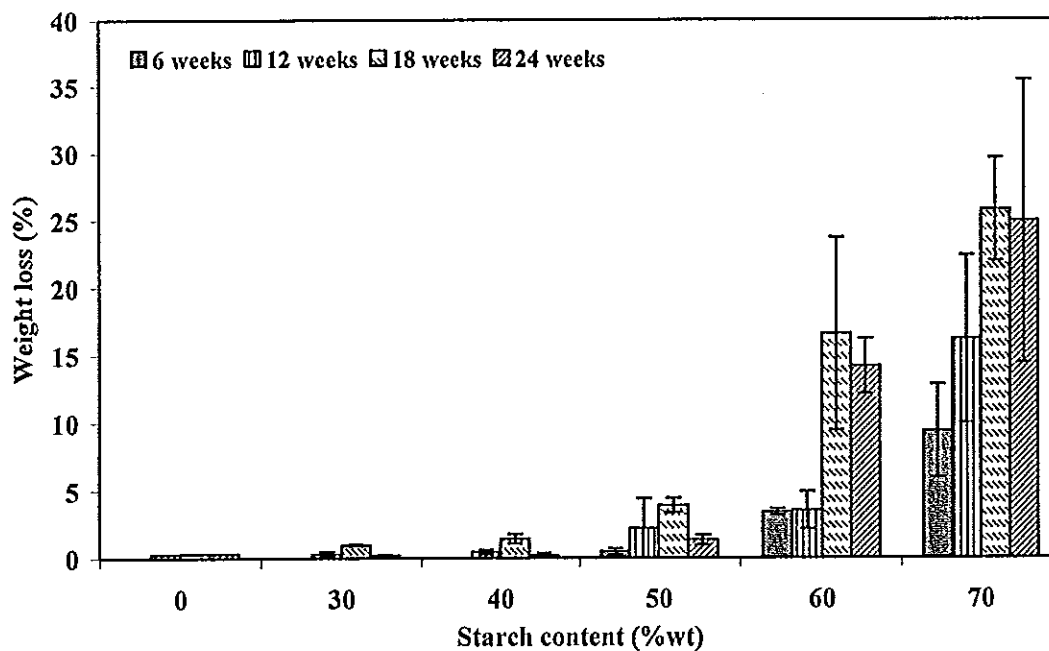
เปรียบเทียบการหายไปของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีการหายไปของน้ำหนักหลังจากการฝังดินสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวอย่างที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพมากกว่าตัวอย่างที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากลักษณะดังกล่าวอธิบายได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเกิดการเชื่อมโยงกันขึ้นทำให้โครงสร้างโมเลกุลบางส่วนของแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้การย่อยสลายเม็ดแป้งของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ยากขึ้นกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่โครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งยังคงเหมือนเดิม นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจาก พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามากกว่า 2 เท่า ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.7.3.2 เนื่องมาจากการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง และการเชื่อมโยงกันเองระหว่าง LDPE และแป้งมันสำปะหลังด้วยกันเอง ส่งผลให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมริเริ่มปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังได้แสดงในรูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในหัวข้อ 4.7.3.4 จากลักษณะดังกล่าวทำให้การแพร่ของน้ำเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมได้ยาก Bikiaris and Panayiotou (1998) กล่าวไว้ว่าน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เม็ดแป้งพองตัว และทำหน้าที่เป็นตัวนำและทำให้สภาวะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าสภาวะที่แห้ง และธนาวัต (2549) รายงานว่า น้ำและความชื้นเป็นปัจจัยที่ช่วยในการเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเป็นปัจจัยสำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากน้ำและความชื้นมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ โดยช่วยละลายสารประกอบแร่ธาตุ เป็นที่อยู่อาศัย และช่วยในการเคลื่อนที่ของจุลินทรีย์ หากมีปริมาณน้ำน้อยจะทำให้การย่อยสลายไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีอัตราการหายไปของน้ำหนักหลังจากการฝังดินที่เวลาเดียวกันน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับ LDPE ที่ใช้ PE-g-MAH เป็น compatibilizer มีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PE-g-MAH ดังที่ได้รายงานในงานวิจัยของ Bikiaris and Panayiotou (1998)

ในสัปดาห์ที่ 6 ของการฝังดินพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 30 และ 40 wt% มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักในตอนเริ่มต้นเล็กน้อย อันเป็นผลมาจากในช่วงแรกปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมยังคงมีอยู่ในปริมาณมากอยู่ ซึ่งแป้งมีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี ดังนั้นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในช่วงสัปดาห์แรกๆ เป็นผลมาจากการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งในพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง (Bikiaris and Panayiotou, 1998) และเป็นผลมาจากในช่วงแรกที่

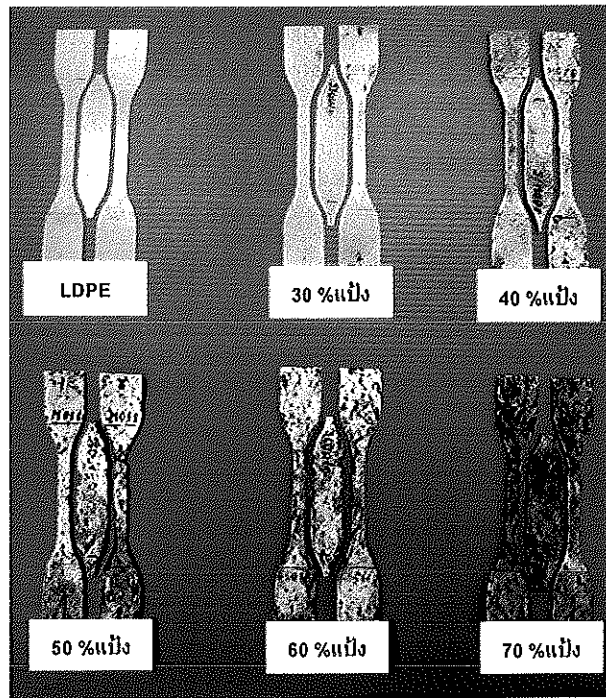
มีกลุ่มจุลินทรีย์เกิดขึ้น และสะสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำหนักที่วัดได้มีค่าสูงเกินจริง (ธนาวัต, 2549)

ตารางที่ 4.23 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%

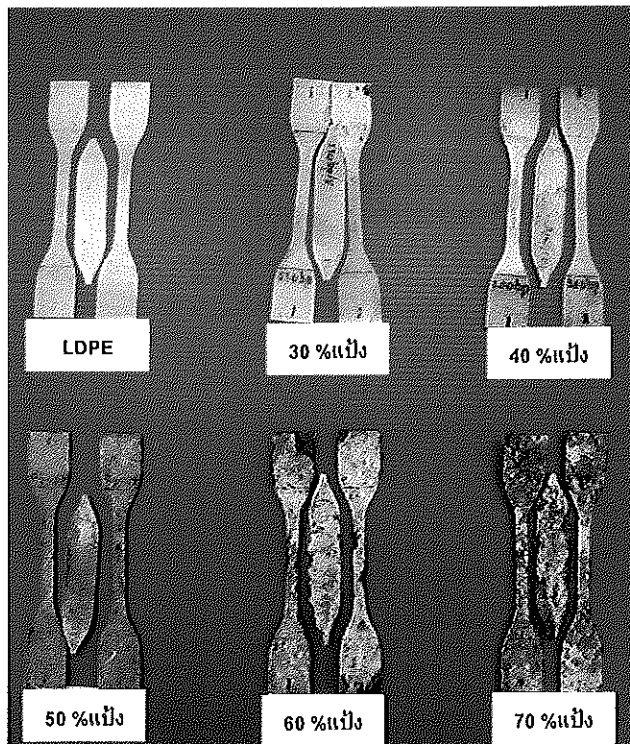
ปริมาณแป้ง (wt%)	Weight loss (%)			
	เวลา (week)			
	6	12	18	24
0	-0.06±0.04	0.30±0.00	0.33±0.03	0.33±0.00
30	-0.33±0.08	0.31±0.18	0.96±0.06	0.21±0.05
40	-0.58±0.21	0.45±0.18	1.43±0.35	0.18±0.20
50	0.49±0.24	2.22±2.21	3.89±0.54	1.33±0.37
60	3.41±0.25	3.53±1.36	16.58±7.12	14.18±2.03
70	9.39±3.45	16.20±6.20	25.79±3.84	24.95±10.52



รูปที่ 4.42 น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยแปรปริมาณแป้ง 0-70 wt%



(a)



(b)

รูปที่ 4.43 การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการแปรปริมาณแบริ่ง 0-70 wt%  
 (a) ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (b) เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์

#### 4.8.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของ LDPE และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ BPO 1.0 pphr เทียบกับน้ำหนัก LDPE และ PPS 0.5 pphr เทียบกับน้ำหนักของแป้ง แปรปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมเป็น 30, 40, 50, 60 และ 70 wt% หลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 6, 12, 18 และ 24 สัปดาห์ ในตารางที่ 4.24 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปของ LDPE พบว่าเมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ค่า  $\sigma_y$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่  $E$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $\epsilon_b$  มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้เวลาในการฝังดิน 24 สัปดาห์ จากลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า LDPE มีการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยหลังจากการฝังดิน เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณแป้ง 30, 50 และ 70 wt% แสดงในตารางที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ค่า  $E$ ,  $\sigma_b$  และ  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง โดย  $E$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่าลดลงโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 18.5, 73.9 และ 92.0 % เทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนฝังดิน หลังจากฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30, 50 และ 70 wt% ตามลำดับ การลดลงของค่า  $E$  ของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากแป้งในพอลิเมอร์ผสมถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ทำให้ส่วนที่แสดงความแข็งในพอลิเมอร์ผสมลดลง

ส่วนค่า  $\sigma_b$  พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาลดลงโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 34.8, 29.0 และ 69 % เทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนทำการฝังดิน ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30, 50 และ 70 wt% ตามลำดับ ค่า  $\sigma_b$  ที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งในสัดส่วนต่างๆ หลังการฝังดิน เป็นผลเนื่องมาจากหลังการฝังดิน ส่วนของแป้งเกิดการย่อยสลายไป ทำให้เกิดรู โพรง หรือช่องว่างภายในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่า  $\sigma_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ลดลง

ค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 wt% ค่า  $\epsilon_b$  มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 46.2 % แต่ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 50 และ 70 wt% ให้ค่า  $\epsilon_b$  เพิ่มขึ้นหลังฝังดินนาน 24 สัปดาห์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 61 และ 826.3% ตามลำดับ เทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนฝังดิน จากลักษณะดังกล่าวอธิบายได้ว่าการย่อยสลายหรือการเสื่อมสภาพของเม็ดแป้งเกิดขึ้นได้เร็วกว่า LDPE มาก ซึ่งส่วนของเม็ดแป้งแสดงความแข็งเปราะให้แก่พอลิเมอร์ผสม ดังนั้นเมื่อเม็ดแป้งเกิดการย่อยสลายไปอย่างรวดเร็ว แต่ในขณะที่ LDPE มีการเสื่อมสภาพน้อยมาก ทำให้เมื่อให้แรงไปกระทำต่อพอลิเมอร์ผสมที่มี



ปริมาณ LDPE อยู่ในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดการยืดหรือให้ค่า  $\epsilon_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ยังคงเหลือปริมาณแบ่งอยู่ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าค่า  $\epsilon_b$  ของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังจากการฝังดิน แต่ค่า E และค่า  $\sigma_b$  มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งการลดลงของ E และค่า  $\sigma_b$  เป็นผลมาจากการย่อยสลายของแบ่งในพอลิเมอร์ผสมจึงก่อให้เกิดรูบนผิวหน้าและภายในชิ้นตัวอย่างจึงทำให้สมบัติความทนของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดินมีค่าลดลง (Bikiaris and Panayiotou, 1998; Prinós *et al.*, 1998)

ตารางที่ 4.24 สมบัติความทนต่อแรงดึงของ LDPE หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	52.8±7.0	7.8±0.4	72.7±5.1	11.5±0.7	606.6±38.2
6	82.9±8.1	8.0±0.4	72.4±1.7	9.2±0.4	438.4±22.6
12	62.0±10.3	9.4±0.1	76.7±0.8	11.2±0.4	434.5±17.6
18	73.9±3.3	9.0±0.0	73.8±0.6	10.5±0.1	450.0±11.5
24	74.3±2.7	9.2±0.2	75.0±1.2	10.0±1.4	428.8±54.5

ตารางที่ 4.25 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แบ่ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	79.6±7.2	8.9±0.3	32.6±2.8	9.2±0.3	265.1±19.6
6	66.0±5.8	6.7±0.1	24.2±1.9	6.2±0.1	89.8±17.4
12	53.0±8.6	7.0±0.0	29.1±1.9	6.0±0.4	113.7±38.8
18	69.4±21.1	7.1±0.4	25.4±5.6	6.0±0.5	110.7±43.8
24	64.9±5.6	6.8±0.2	28.0±0.4	6.0±0.4	142.6±22.3

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณแบ่ง 30, 50 และ 70 wt% แสดงในตารางที่ 4.28, 4.29 และ 4.30 พบว่าค่า E พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 25.5, 77.56 และ 67 % ส่วนค่า  $\sigma_b$  เปลี่ยนไป 25.2, 9.0 และ 50% และค่า  $\epsilon_b$  เปลี่ยนไป 16.7, 67.7 และ 3.9 % เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนฝังดิน หลังฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่ง 30, 50 และ 70 wt% ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทน

ต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือค่า E และค่า  $\sigma_b$  จะลดลงเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น ส่วนค่า  $\epsilon_b$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อแป็งในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณสูง สาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.26 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป็ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	214.5±15.8	6.6±0.3	10.0±0.3	6.2±0.3	36.4±4.1
6	126.6±16.4	4.1±0.3	3.3±0.6	3.8±0.9	22.6±7.3
12	49.8±15.6	3.9±0.6	8.2±1.8	4.3±0.3	48.2±13.7
18	66.1±25.5	3.6±0.6	5.9±1.3	4.3±0.1	80.8±15.8
24	55.9±8.2	3.7±0.4	6.8±1.0	4.4±0.2	58.6±14.2

ตารางที่ 4.27 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป็ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	166.6±21.0	-	-	5.5±1.6	3.8±0.5
6	79.6±22.7	1.5±0.4	2.0±0.4	1.9±0.4	13.7±4.5
12	24.6±5.2	1.6±0.2	6.6±1.3	2.2±0.3	30.8±8.7
18	16.1±3.4	1.4±0.2	9.1±1.2	1.9±0.2	46.6±15.6
24	13.3±1.1	1.6±0.2	11.6±0.6	1.7±0.2	35.2±5.6

ตารางที่ 4.28 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (30 %แป็ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	135.1±23.9	12.6±0.9	29.4±2.2	10.7±0.8	65.0±3.8
6	100.4±11.2	8.6±0.4	32.2±1.0	7.7±0.3	57.5±4.2
12	86.4±4.9	9.3±0.2	34.0±6.5	8.1±0.4	61.7±12.7
18	89.8±9.4	9.1±0.6	25.0±4.9	8.2±0.6	58.3±12.4
24	100.6±4.8	9.0±0.6	25.6±2.8	8.0±0.5	54.2±11.3

ตารางที่ 4.29 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	508.2±29.1	9.3±0.4	12.3±0.7	8.9±0.4	55.6.0±10.3
6	185.7±64.4	7.0±0.2	13.4±1.2	5.5±2.3	24.9±9.6
12	372.5±1031.	7.5±0.4	15.9±2.3	7.0±1.6	23.7±3.4
18	233.6±57.3	7.7±0.4	12.6±1.3	7.5±0.6	14.7±3.1
24	114.0±20.0	8.5±0.3	13.8±1.0	8.1±0.4	17.7±1.0

ตารางที่ 4.30 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่ม หลังฝังดินที่เวลาต่างๆ

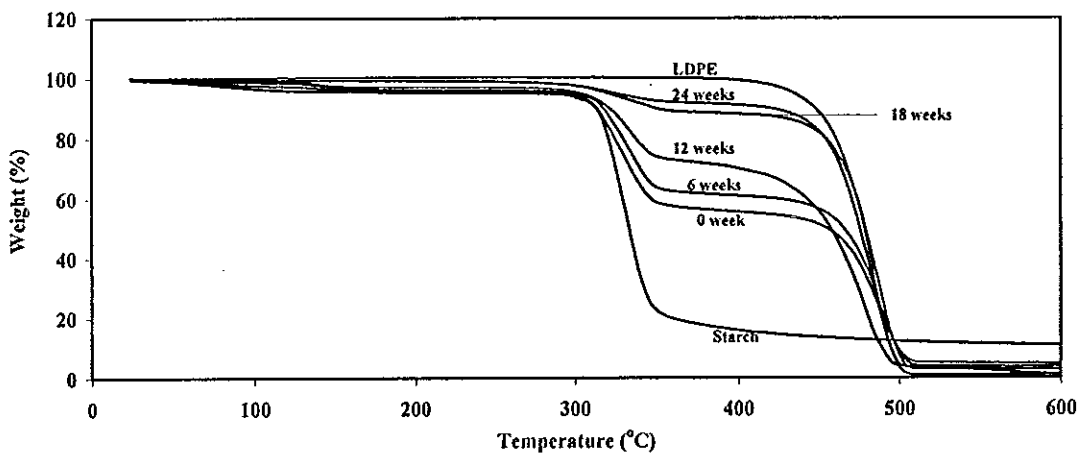
เวลา (week)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
0	258.4±52.1	-	-	8.6±1.0	7.9±0.6
6	163.3±47.4	-	-	4.3±0.6	5.9±1.0
12	93.1±34.7	-	-	4.4±1.0	10.4±2.1
18	113.6±19.3	-	-	4.5±3.1	5.3±0.5
24	85.1±2.0	-	-	4.3±0.9	4.8±0.6

#### 4.8.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

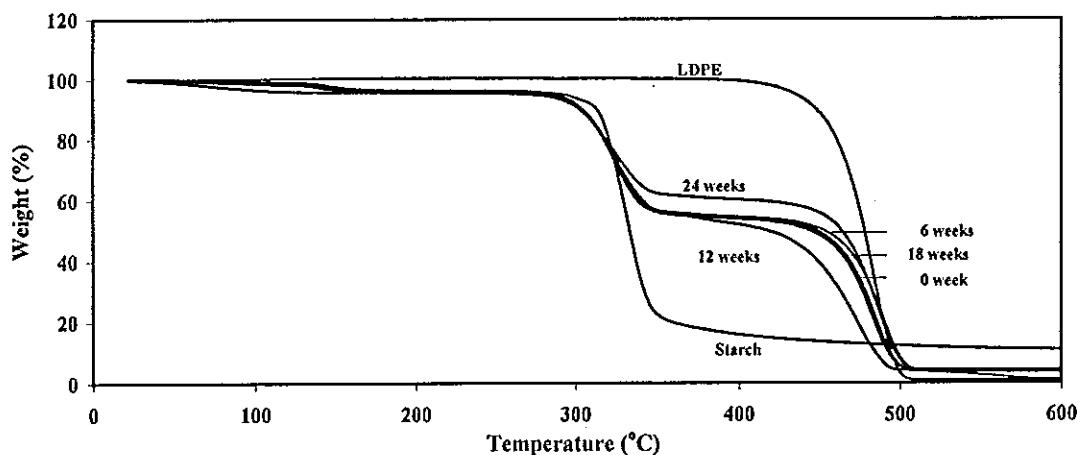
ศึกษาความสามารถในการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังจากการฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งเป็น 50 และ 70 wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.44-4.47 โดยในหัวข้อที่ 4.6.5 ได้อธิบายการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีอยู่ 3 ช่วงคือ อุณหภูมิ 30-100°C ที่อุณหภูมิ 316°C และ 458°C ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำหนักของความชื้น แป้ง และ LDPE ตามลำดับ

หลังจากทดสอบการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นน้ำหนักที่หายไปของอุณหภูมิช่วงการสลายตัวของแป้งที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA มีค่าลดลงดังแสดง นอกจากนี้ส่วนที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ 600°C มีค่าน้อยลงเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น เนื่องมาจากการย่อยสลายแป้งของจุลินทรีย์ ทำให้สัดส่วนของแป้งใน LDPE มีน้อยลง โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา การหายไปของน้ำหนักในส่วน

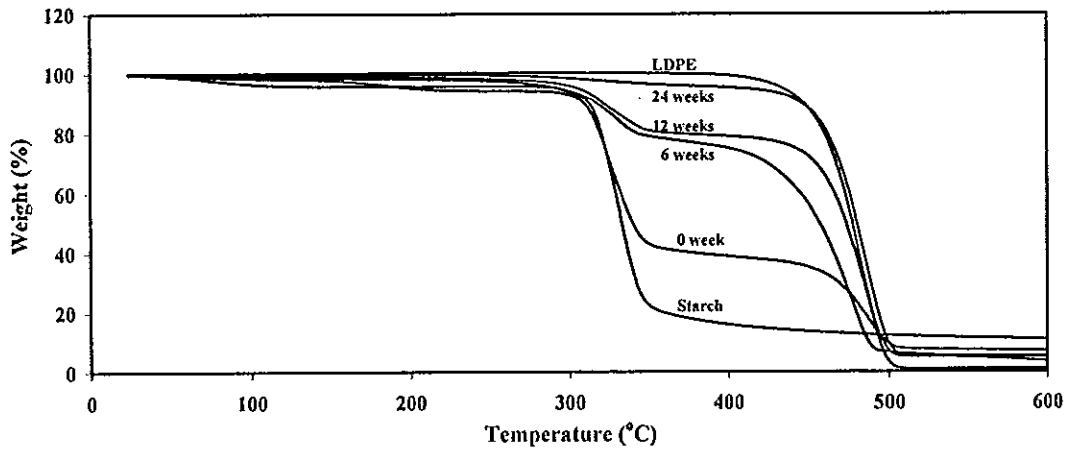
แป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบในส่วนการชั่งน้ำหนักที่สูญหายไปหลังจากการฝังดิน แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมทั้งที่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของ LDPE แสดงให้เห็นว่าหลังการฝังดินแทบไม่พบการเสื่อมสภาพหรือมีการเสื่อมสภาพที่น้อยมากของ LDPE จึงช่วยยืนยันผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะค่า  $\epsilon_b$  ที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น



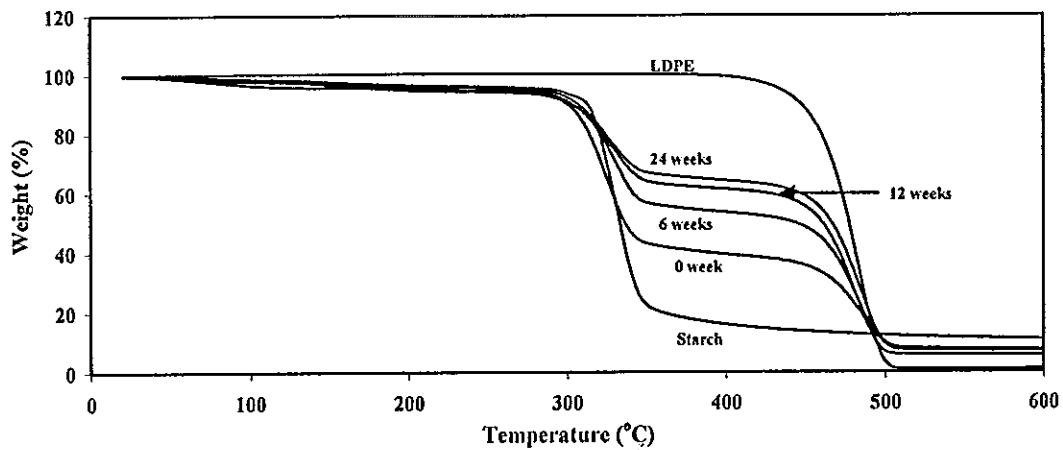
รูปที่ 4.44 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.45 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.46 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.47 การสลายตัวทางความร้อนและน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม (70 %แป้ง) ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา หลังฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ

#### 4.8.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรีของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ ตามโดยศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 50 wt% พบว่าเมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการฝังดินทั้งในพอลิเมอร์

ผสมที่มีและไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมทั้งเดิมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น อธิบายเพิ่มเติมได้ว่าอาจเป็นผลมาจากสัดส่วนของ LDPE ต่อแป้งเพิ่มขึ้นหลังการฝังดิน เนื่องจากส่วนของแป้งเกิดการย่อยสลายไป ทำให้ในพอลิเมอร์ผสมหลังการฝังดินส่วนใหญ่มีสัดส่วนของ LDPE สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมก่อนการฝังดิน ทำให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นหลังจากการฝังดิน นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากในระหว่างกระบวนการย่อยสลายส่วนที่ถูกย่อยสลายส่วนใหญ่เป็นส่วนของอสัณฐาน ทำให้สัดส่วนที่เป็นผลึกมีค่ามากกว่า ส่งผลให้หลังจากการย่อยสลายจึงทำให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (Chandra and Rustgi, 1997) ดังในงานวิจัยของ Albertsson (1986) และ Kestelman *et al.* (1982) ที่อ้างอิงในงานวิจัยของ Chandra and Rustgi (1997) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนบิสูทรี พบว่าหลังจากการทดสอบความเป็นผลึก พอลิเอทิลีนบิสูทรีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดิน จึงช่วยสนับสนุนการสลายตัวหรือการเสื่อมสภาพของส่วนอสัณฐานของ LDPE แต่อย่างไรก็ตามการสลายตัวของ LDPE ในงานวิจัยนี้ยังเกิดในปริมาณที่น้อย ทำให้การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่ศึกษาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งให้ผลสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก สมบัติความทนต่อแรงดึง และการสลายตัวทางความร้อนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.8.1, 4.8.2 และ 4.8.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.31 ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากเทคนิค DSC

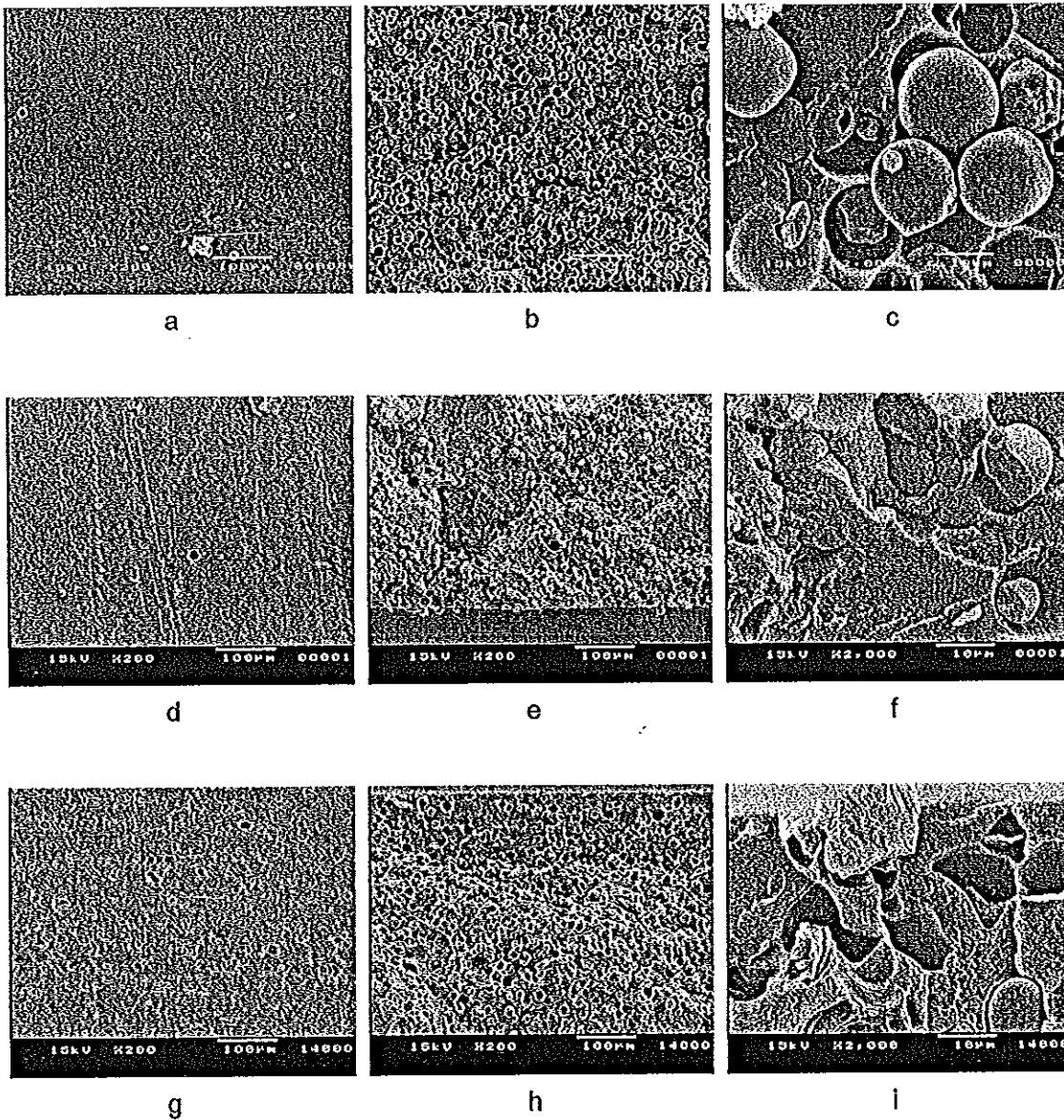
เวลา (weeks)	$T_c$ (°C)	$T_m$ (°C)	$X_c$ (%)
0	95.3	109.4	7.6
6	94.6	109.0	14.5
12	94.5	109.7	20.1
18	94.3	109.7	18.0
24	94.5	109.7	19.6

ตารางที่ 4.32 ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากเทคนิค DSC

เวลา (weeks)	$T_c$ (°C)	$T_m$ (°C)	$X_c$ (%)
0	95.6	109.5	11.1
6	95.3	108.9	12.7
12	95.3	108.7	12.9
18	95.5	108.4	10.6
24	95.3	108.7	12.5

#### 4.8.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังเป็น 30, 50 และ 70 ดังแสดงในรูปที่ 4.48-4.55 โดยศึกษาทั้งพื้นผิวด้านนอกและผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นงาน พบว่าพอลิเมอร์ผสมก่อนการฝังดินพื้นผิวด้านนอกมีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบไม่สามารถแยกส่วนที่เป็นแป้งและ LDPE ได้ ส่วนผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นงานมีส่วนของเม็ดแป้งกระจายอยู่ในเฟสของ LDPE อย่างสม่ำเสมอ โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาผิวหน้าจะมีลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างเฟสของแป้งมันสำปะหลังกับ LDPE หลังจากการฝังดินจะเกิดรูและช่องว่างทั้งผิวด้านนอกและผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นงาน ทั้งในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบการย่อยสลายและการเสื่อมสภาพของเม็ดแป้งในพอลิเมอร์ผสม เมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น พอลิเมอร์ผสมจะเกิดรูและช่องว่างในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จากลักษณะดังกล่าวนี้เองทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น และปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นพบว่าเกิดรูและการย่อยสลายของแป้งในพอลิเมอร์ผสมมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งในสัดส่วนที่น้อยกว่า เนื่องจากแป้งเป็นอาหารที่ดีของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อมีปริมาณแป้งในพอลิเมอร์ผสมมากย่อมทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น และในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งน้อยจะเกิดการห่อหุ้มของ LDPE บนแป้งได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมากกว่า ทำให้การเข้าไปย่อยแป้งในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งน้อยกว่าเกิดการย่อยสลายในอัตราส่วนที่ต่ำ

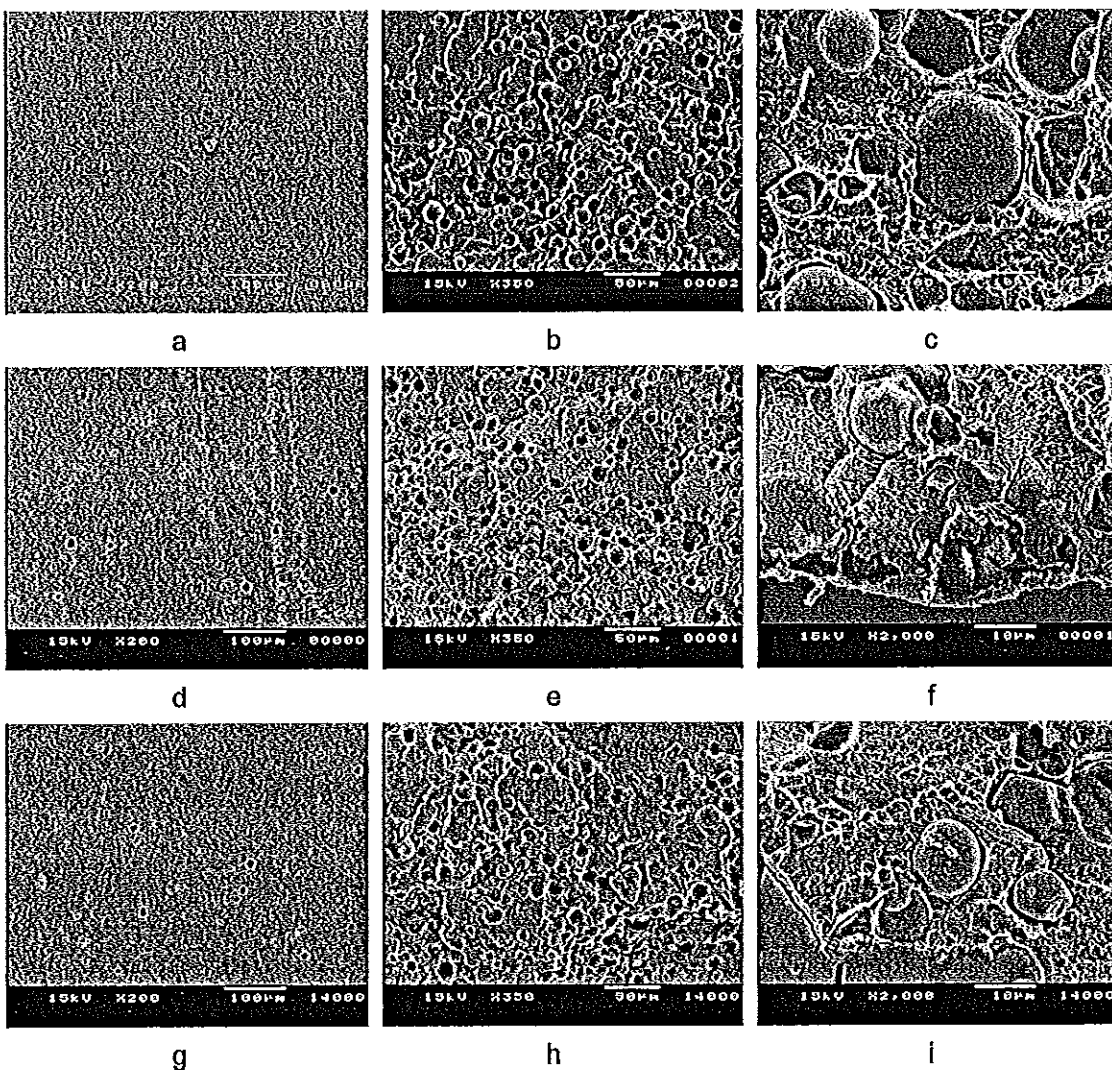


รูปที่ 4.48 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)

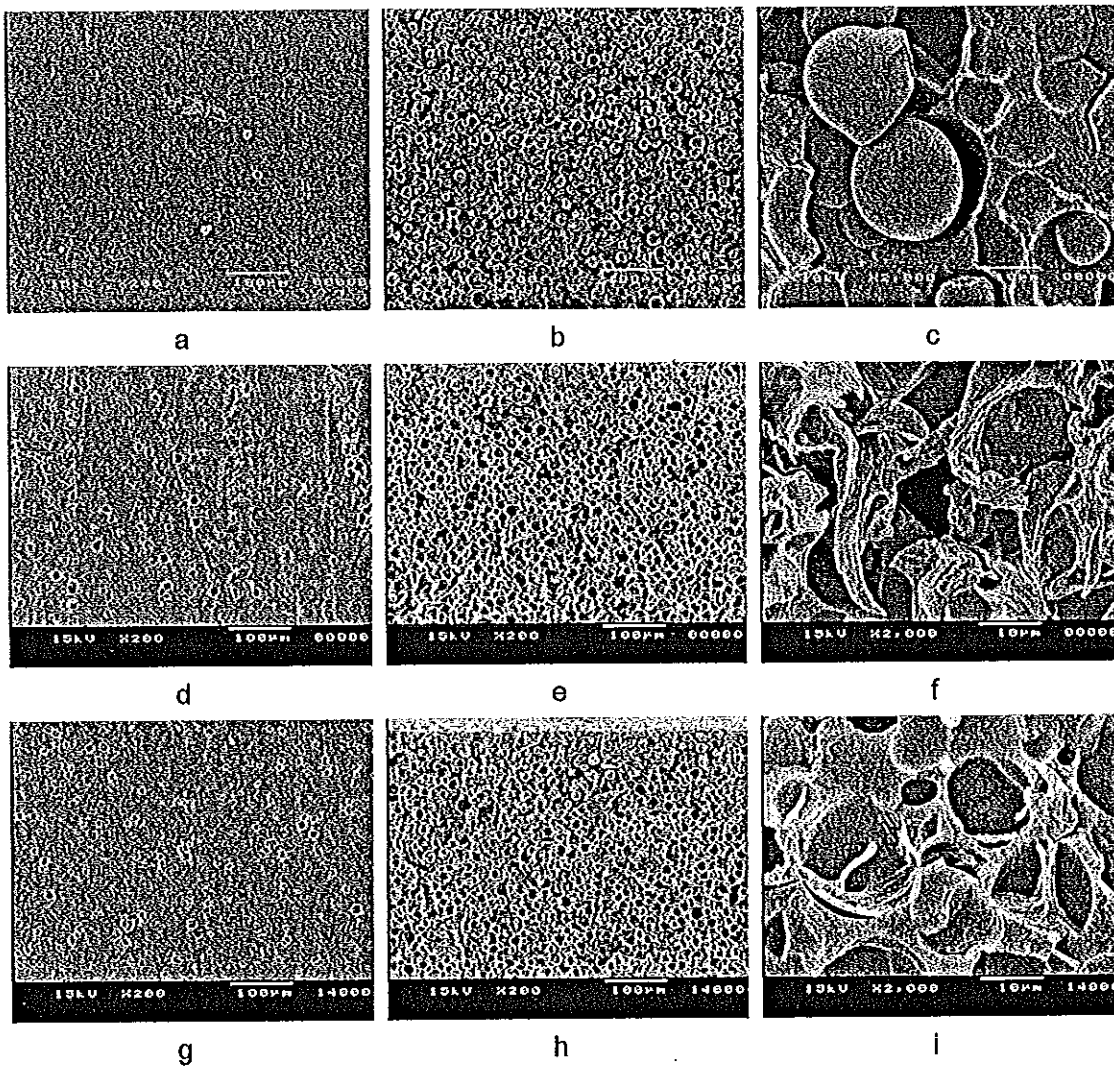
การย่อยสลายจะเกิดจากบริเวณขอบด้านนอกที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ภายในชิ้นงาน เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้นจะเกิดช่องว่างจากขอบนอกเข้าสู่ด้านในชิ้นงานมากขึ้น เมื่อแป้งถูกย่อยสลายไปยังคงเหลือเฟสของ LDPE ที่มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องจากรูป SEM พบว่า LDPE แฉกไม่เกิดการย่อยสลาย แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายหรือการเสื่อมสภาพของ LDPE เกิดขึ้นน้อยมากเทียบกับแป้งมันสำปะหลังโดยเฉพาะในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากกว่า 50 wt% จึงทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น



เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่ามีอัตราการหายไปของเม็ดแป้งในพอลิเมอร์ผสมได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาหลังจากการย่อยสลายเม็ดแป้ง จะพบการเชื่อมติดกันระหว่างเม็ดแป้งมันปะหลังและ LDPE จากการเชื่อมติดของพอลิเมอร์ทั้งสองหลังจากการฝังดิน ช่วยยืนยันการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสมที่มีเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทั้ง BPO และ PPS ระหว่าง LDPE กับแป้งมันปะหลัง ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงระหว่างเฟสทั้งสองขึ้น

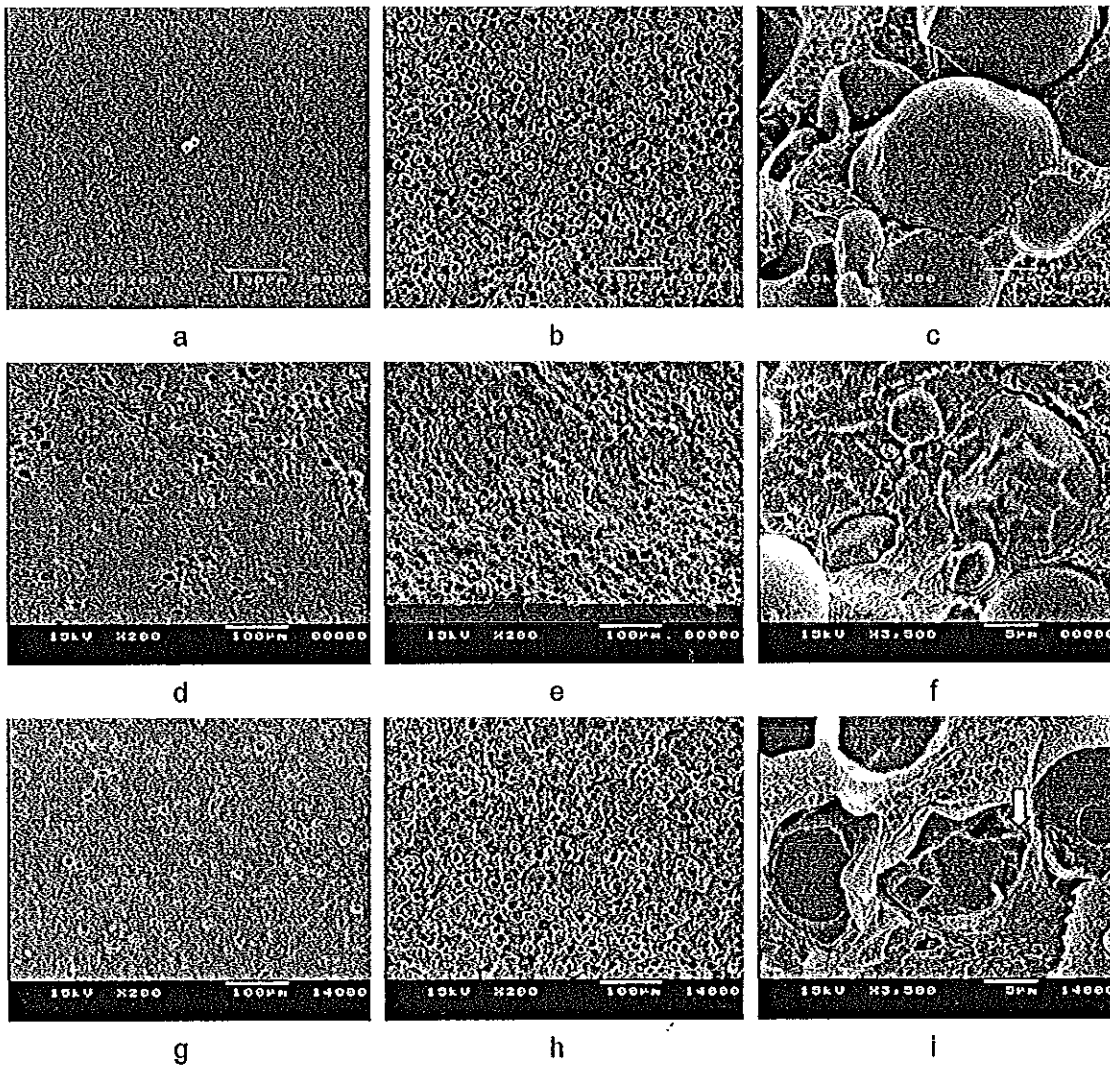


รูปที่ 4.49 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแป้ง 30 wt% ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)



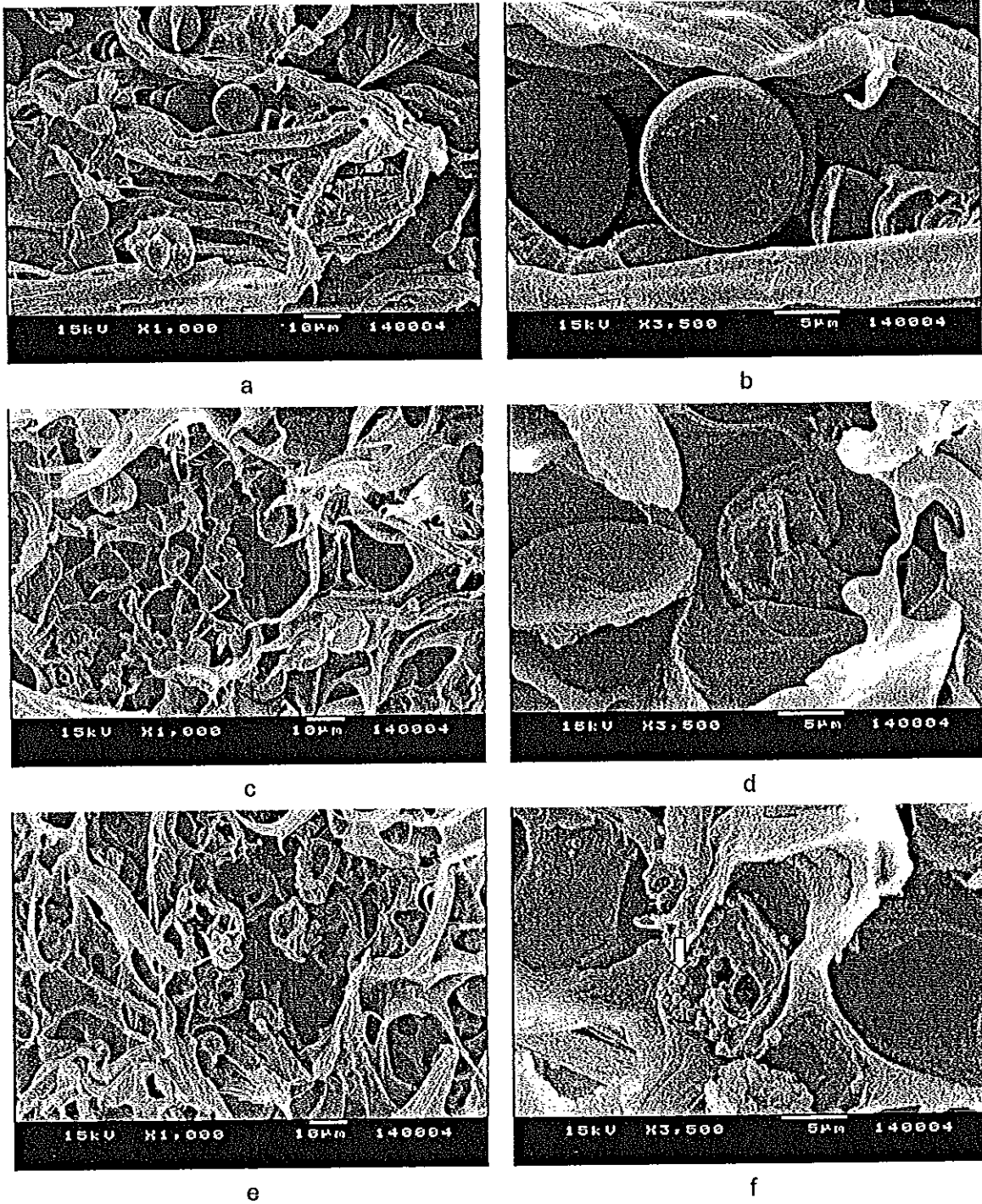
รูปที่ 4.50 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ผังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)

จากการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จึงส่งผลให้อัตราการย่อยสลายมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา เนื่องมาจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างเม็ดแป้งกับ LDPE โครงสร้างทางเคมีบางส่วนของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายเม็ดแป้งได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการเชื่อมโยงของ LDPE และแป้งมันสำปะหลังด้วยกันเองหลังจากเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากลักษณะดังกล่าวทำให้การแพร่ของน้ำจากภายนอกเข้าสู่ภายในพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เม็ดแป้งพองตัว และปัจจัยที่ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี จึงส่งผลให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ยากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

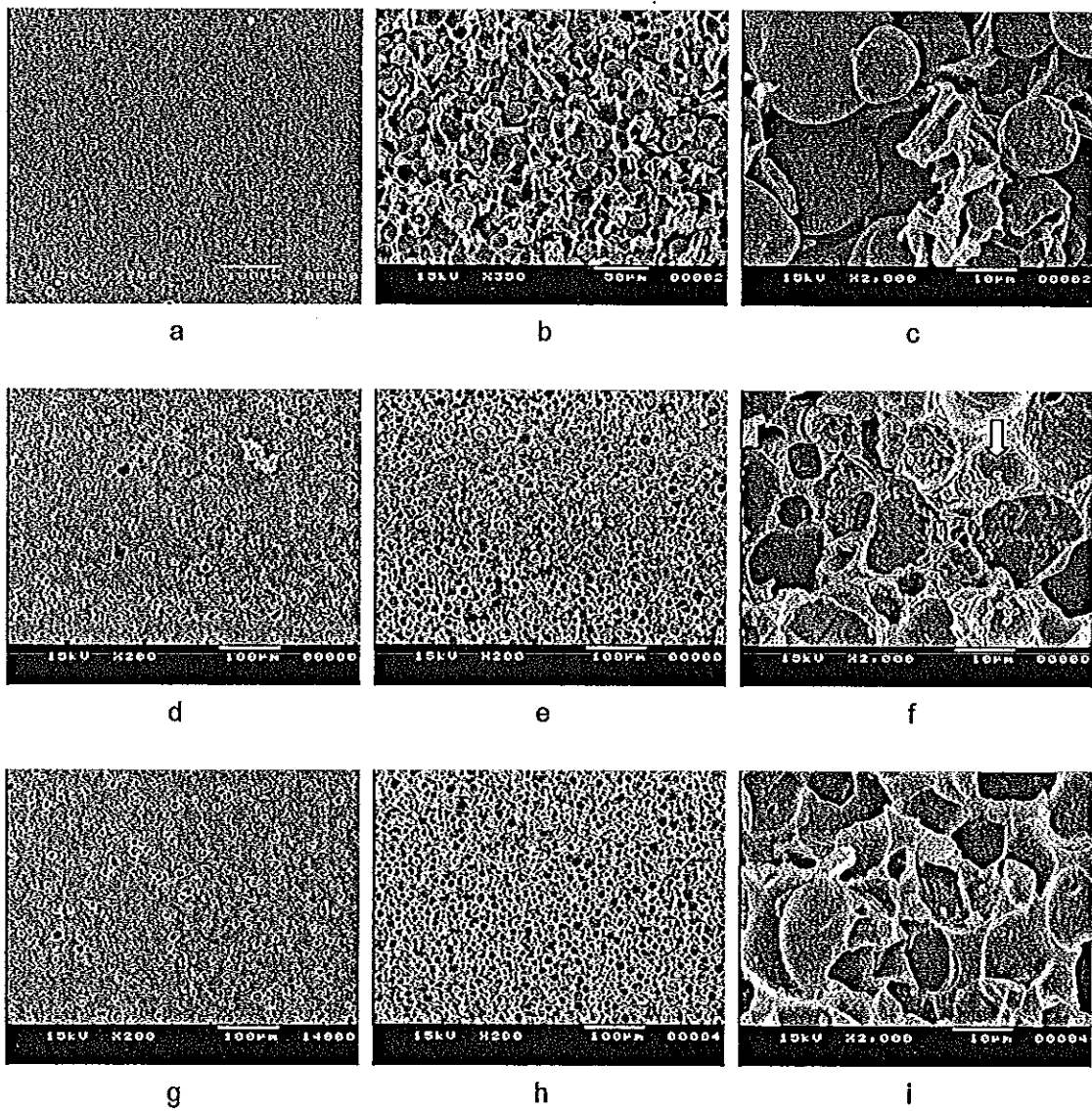


รูปที่ 4.51 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% ที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ผังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)

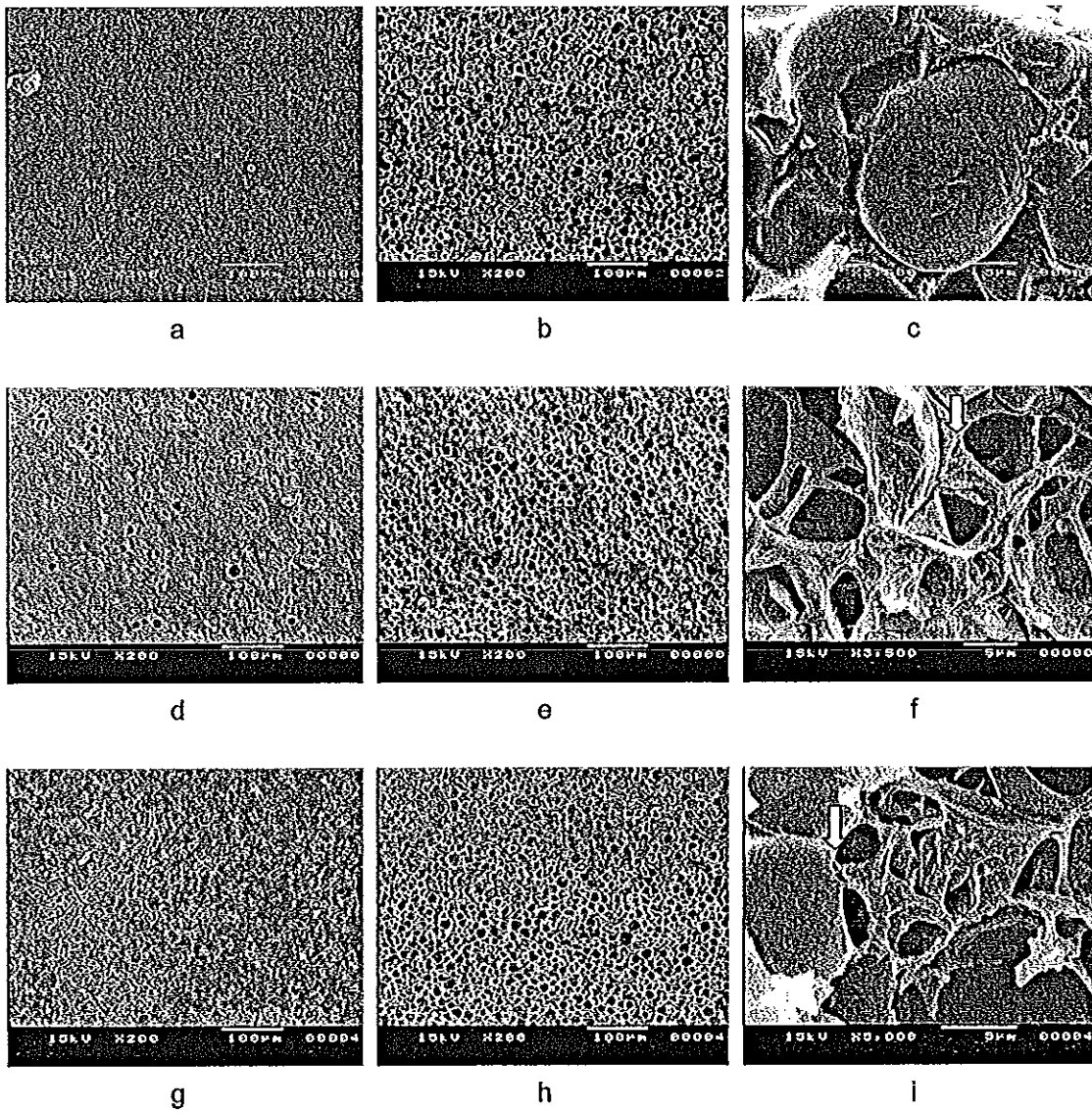
นอกจากการหายไปของเม็ดแป้งของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการผังดินแล้ว ยังพบสปอร์และเส้นใยของเชื้อจุลินทรีย์ในเฟสของ LDPE หลังจากที่เม็ดแป้งเกิดการย่อยสลายไปแล้วดังเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.52, 4.53 และ 4.55 LDPE สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์แต่อัตราในการย่อยสลายต่ำมากเนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูง แต่หากมีมวลโมเลกุลน้อยกว่า 450 g/mol จุลินทรีย์ก็สามารถเข้าย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (Bikiris and Panayiotou, 1998) แต่อย่างไรก็ตามการผสม LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง เมื่อแป้งถูกย่อยสลายไปก็จะทำให้เกิดรูและช่องว่างขึ้นบนเฟสของ LDPE ส่งผลทำให้ LDPE สามารถเสื่อมสลายด้วยแรงกล หรือหากสัมผัสกับแสงก็จะเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดผิวสัมผัสของเชื้อจุลินทรีย์บนเฟสของ LDPE เกิดขึ้นได้มากกว่าในกรณีไม่ผสมกับแป้ง



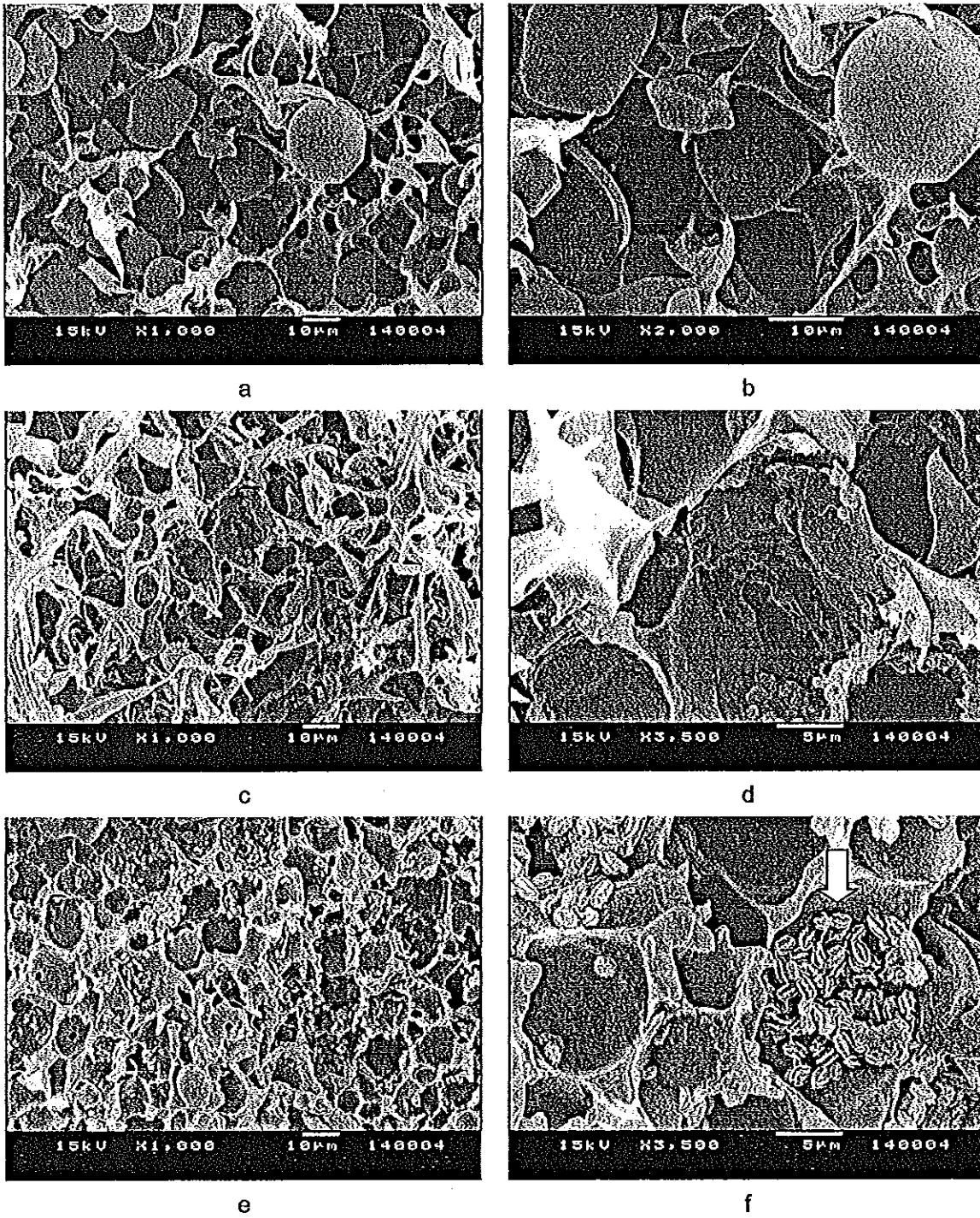
รูปที่ 4.52 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 50 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาของ  
 ชินงานหลังจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b),  
 12 สัปดาห์ (c, d) และ 24 สัปดาห์ (e, f)



รูปที่ 4.53 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)



รูปที่ 4.54 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 70 wt% ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ ฝังดินเป็นเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b, c), 12 สัปดาห์ (d, e, f) และ 24 สัปดาห์ (g, h, i)



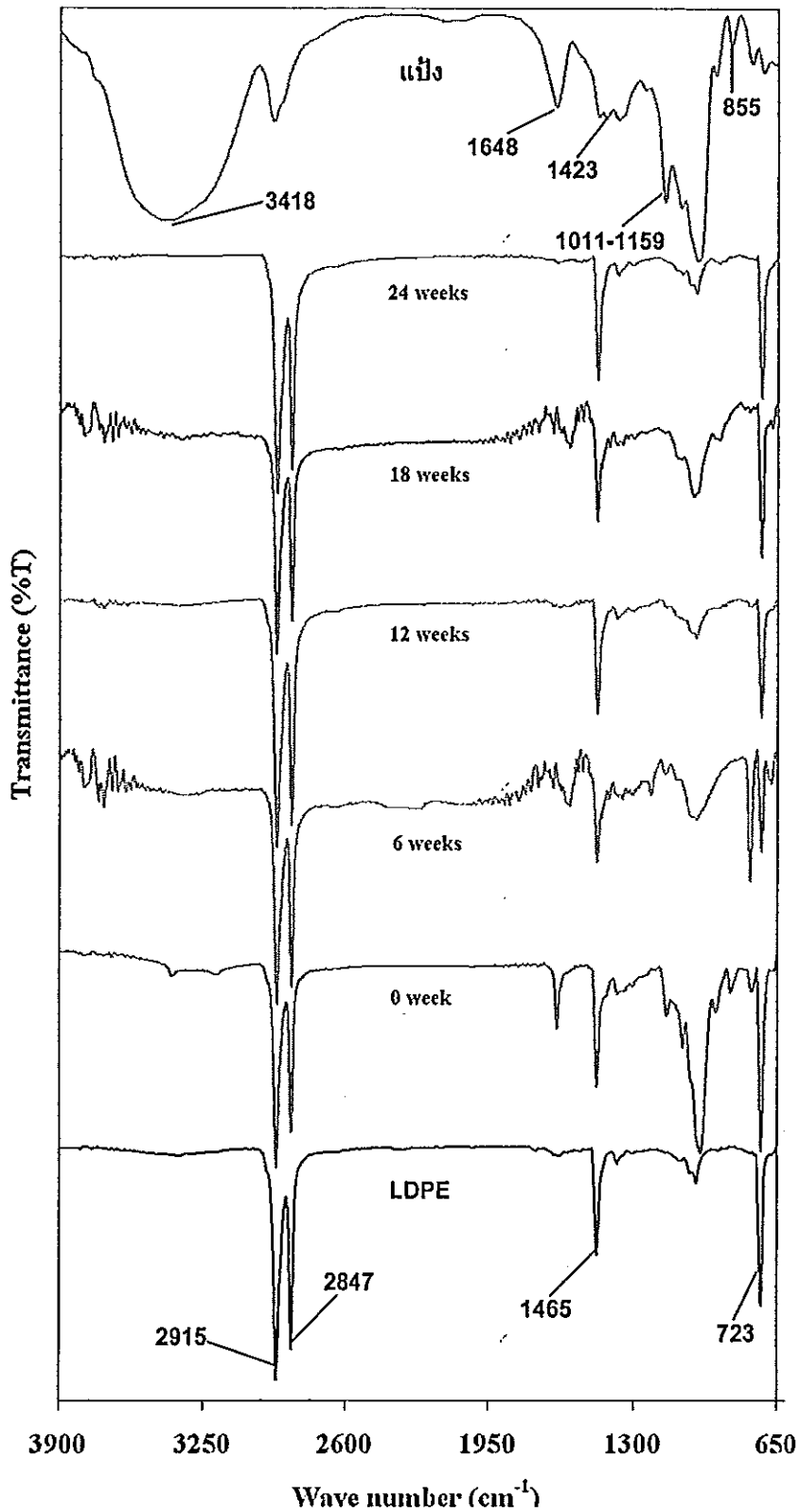
รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายของพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้ง 70 wt% ที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาของชิ้นงาน หลังการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่ฝังดินเป็นระยะเวลา: 0 สัปดาห์ (a, b), 12 สัปดาห์ (c, d) และ 24 สัปดาห์ (e, f)

#### 4.8.6 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมหลังการฝังดินโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์-ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

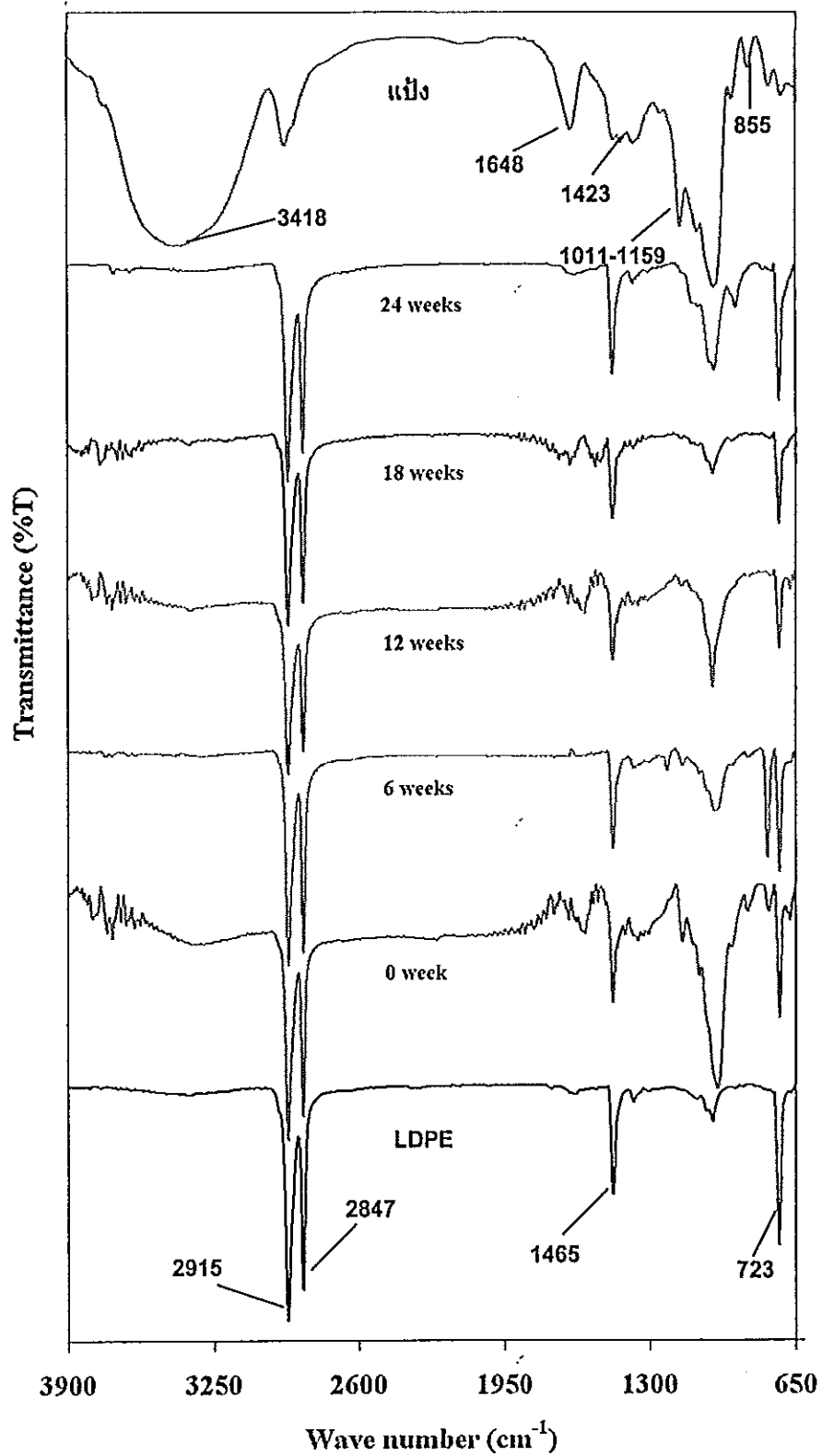
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของ LDPE และพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบริ่งมันสำปะหลัง 50 wt% หลังจากฝังดินที่ระยะเวลาต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แบริ่งมันสำปะหลังปรากฏแถบการสั่นของหมู่  $\text{CH}_2$  บนแกนหลักของโมเลกุลแบริ่งที่เลขคลื่น  $858 \text{ cm}^{-1}$  ช่วง  $1750-1550 \text{ cm}^{-1}$  และที่ช่วง  $900-750 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ (Raj *et al.*, 2004) ส่วน LDPE ปรากฏแถบดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2915, 2847, 1465 และ  $723 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของ C-H แถบการยืดของ  $\text{CH}_2$  แถบการงอของ  $\text{CH}_3$  และแถบการสั่นหมู่  $\text{CH}_2$  บนแกนหลักของโมเลกุล LDPE ตามลำดับ โดยหาก LDPE เกิดการเสื่อมสภาพจะเกิดแถบดูดกลืนที่ตำแหน่ง  $1715 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบดูดกลืนของ (-CO-) ของหมู่คีโตน ตำแหน่งเลขคลื่น  $1467 \text{ cm}^{-1}$  แถบดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล (-CO-) ตำแหน่ง  $1640 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1465 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบดูดกลืนของพันธะคู่ (-C=C-) (Chandra and Rustgi, 1997)

หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0-24 สัปดาห์ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 4.56 และ 4.57 ตามลำดับ และมีปริมาณแบริ่งมันสำปะหลัง 50 wt% พบว่าพีคที่แสดงแถบดูดกลืนของแบริ่งมันสำปะหลังมีความเข้ม (intensity) ลดลง เมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น โดยในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาก็ให้ผลเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา แต่ความเข้มของพีคที่แสดงแถบดูดกลืนของแบริ่งหายไปน้อยกว่า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการฝังดินโดยพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาน้ำหนักหายไปหลังฝังดินมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลังจากการฝังดิน ส่วนที่เกิดการย่อยสลายหรือเสื่อมสภาพไปจะเป็นส่วนของแบริ่งมันสำปะหลังที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดย LDPE ไม่มีการเสื่อมสภาพหรืออาจเกิดการเสื่อมสภาพในสัดส่วนที่น้อยมาก จนไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงแถบการดูดกลืนโดยใช้เทคนิค FT-IR ถ้า LDPE เกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนหรือแสงจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $1706 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแถบดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล อันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน หลังจากสัมผัสแสงหรือความร้อนที่ระยะเวลาหนึ่ง





รูปที่ 4.56 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (50 %แป้ง) ที่ฝังดินในระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.57 FT-IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (50 %แป้ง) ที่ฝังดินในระยะเวลาต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 อิทธิพลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

##### 5.1.1 ขั้นตอนการผสมและความเร็วรอบของการผสม

วิธีการหลอม LDPE ก่อนแล้วค่อยเติมแป้งมันสำปะหลังในเครื่องผสมแบบปิด ให้ค่า  $E_y$  และค่า  $E_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้วิธีผสม LDPE กับแป้งมันสำปะหลังในถุงพลาสติกจนเข้ากันดีก่อนนำไปผสมในเครื่องผสมแบบปิด แต่วิธีการผสมทั้งสองวิธีให้ค่า  $E$ ,  $\sigma_y$  และ  $\sigma_b$  ใกล้เคียงกัน และพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์ 100 rpm ให้ค่า  $E_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ส่วน  $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $E_y$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน

##### 5.1.2 ระยะเวลาของการผสม

พอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 8 min ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้เวลาในการผสม 10 min

#### 5.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มแป้งผสมกลีเซอรอลปริมาณต่าง ๆ ต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งผสมกลีเซอรอลในทันทีให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีระยะเวลาในการบ่มแป้งผสมกลีเซอรอล 24 h

#### 5.3 อิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลและลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

##### 5.3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่า  $E$  และ  $\sigma_b$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า  $E_y$ ,  $E_b$  ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง

### 5.3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมกลีเซอรอล

### 5.3.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเม็ดแป้งมันสำปะหลังสำมะอในเฟสของ LDPE และไม่พบการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้ง

## 5.4 อิทธิพลของชนิดแป้งที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งดิบให้ค่า  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\sigma_b$ ,  $\epsilon_b$  ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้แป้งพรีเจล แต่ให้ค่า E ต่ำกว่าเล็กน้อย

## 5.5 ผลของปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

การเติมน้ำลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมน้ำ

## 5.6 อิทธิพลของปริมาณแป้ง

### 5.6.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด

เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่า E มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่  $\sigma_b$ ,  $\epsilon_b$  และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง

### 5.6.2 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นและเวลาในการทดสอบนานขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

### 5.6.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อดึงน้ำมันสำปะหลังทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย ส่วน LDPE ทำหน้าที่เป็นเฟสต่อเนื่อง โดยไม่พบการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของน้ำมันสำปะหลังกับ LDPE

### 5.6.4 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

ค่า  $T_g$  และ  $T_m$  ของ LDPE มีค่าเท่ากับ 94.0 และ 109.9°C ตามลำดับ และมีปริมาณผลึกของ LDPE เท่ากับ 20.8 %

ปริมาณน้ำมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นให้  $T_m$  มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า  $T_g$  และ  $T_c$  ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

### 5.6.5 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

LDPE มีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 458°C โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียประมาณ 99.04% ส่วนการสลายตัวของน้ำมันสำปะหลังมี 2 ตำแหน่งที่อุณหภูมิ 30-100°C ซึ่งเป็นการระเหยของความชื้นภายในแป้ง และที่อุณหภูมิประมาณ 316°C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง

ส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับน้ำมันสำปะหลัง พบการสลายตัวทางความร้อนเป็น 3 ตำแหน่ง ที่อุณหภูมิ 30-100°C อุณหภูมิประมาณ 316°C และที่อุณหภูมิประมาณ 458°C

### 5.6.6 ผลการศึกษาด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

เมื่อปริมาณน้ำมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น  $E'$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่า  $E''$  และ  $\tan \delta_{\max}$  เลื่อนตำแหน่งไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น

## 5.7 อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (BPO และ PPS) ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

### 5.7.1 การแปรปริมาณ PPS ที่มีปริมาณ BPO คงที่

#### 5.7.1.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด

ปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น ค่า  $E$  เพิ่มขึ้น ส่วน  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน แต่  $\epsilon_b$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PPS เพิ่มขึ้น โดยค่า  $\epsilon_b$  มีค่าสูงสุด เมื่อปริมาณ PPS เป็น 0.5 pphr และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณของ PPS เพิ่มขึ้น

### 5.7.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมที่เติม PPS 0 pphr จะไม่พบการเชื่อมกันระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง เมื่อปริมาณของ PPS เพิ่มขึ้นจะพบการเชื่อมต่อทั้งระหว่างเม็ดแป้งด้วยกัน และระหว่างเม็ดแป้งกับ LDPE และที่ปริมาณของ PPS เป็น 2 pphr พบว่าเม็ดแป้งบางส่วนเกิดการแตกออก และรวมตัวเป็นแผ่นขนาดใหญ่

## 5.7.2 การแปรปริมาณ BPO ที่มีปริมาณ PPS คงที่

### 5.7.2.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด

ปริมาณ BPO เพิ่มขึ้น ค่า E มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า  $\epsilon_b$  มีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งที่ปริมาณของ BPO 1 pphr จะให้ค่า  $\epsilon_b$  มากที่สุด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของ BPO เพิ่มขึ้น และปริมาณ BPO ที่ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุดคือ 1 pphr

### 5.7.2.2 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

ปริมาณของ BPO เพิ่มมากขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง

### 5.7.2.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ปริมาณ BPO เท่ากับ 0 pphr พบการเชื่อมติดกันที่ผิวของเม็ดแป้งทำให้แป้งเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน แต่ไม่พบการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของแป้งและ LDPE และเมื่อมีการเติม BPO เพิ่มเข้าไป จะพบทั้งการเชื่อมโยงกันระหว่างเม็ดแป้งด้วยกันเอง และระหว่างเฟสของ LDPE กับแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อปริมาณ BPO เพิ่มมากขึ้น การเชื่อมโยงระหว่าง LDPE กับแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น

## 5.7.3 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

### 5.7.3.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะให้ค่า E,  $\sigma_y$ ,  $\epsilon_y$  และ  $\sigma_b$  สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ส่วนค่า  $\epsilon_b$  และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเล็กน้อยเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมมากกว่า 40 wt% ขึ้นไป

### 5.7.3.2 ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ

ปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ ทั้งที่เดิมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะ ให้ความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

### 5.7.3.3 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทนต่อตัวทำละลายไม่มีขั้วได้ดีกว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา และปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ ผสมจะสามารถทนตัวทำละลายไม่มีขั้วได้สูงขึ้น

### 5.7.3.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ไม่มีการเชื่อมติดกันระหว่างเม็ดแบริ่งมันสำปะหลังกับ LDPE ในพอลิเมอร์ผสม ที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา สามารถสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเฟสทั้งสองอย่างชัดเจน แต่ ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบการเชื่อมโยงกันระหว่างเฟสของ LDPE กับ แบริ่งมันสำปะหลัง

### 5.7.3.5 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเฟอร์เรนเชียล สแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

เมื่อปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มีและไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิ- เมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะให้ปริมาณผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัว ริเริ่มปฏิกิริยาเล็กน้อย

### 5.7.3.6 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตตริก

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ตำแหน่ง แต่พบว่าตำแหน่งการสลายตัวของแบริ่งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิประมาณ  $316^{\circ}\text{C}$  และ ตำแหน่งการสลายตัวของ LDPE ที่อุณหภูมิประมาณ  $458^{\circ}\text{C}$  มีแนวโน้มเลื่อนมายังอุณหภูมิที่ ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $316^{\circ}\text{C}$  และ  $450^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

### 5.7.3.7 ผลการศึกษาด้วยเทคนิคทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

ที่อุณหภูมิมากกว่า  $0^{\circ}\text{C}$  ค่า  $E'$  ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ค่า  $E''$  น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาและพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตำแหน่งดังกล่าวจะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา  $\tan \delta_{\max}$  จะเลื่อนไปยังตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมริเริ่มปฏิกิริยา

5.7.3.8 ผลการศึกษาหุ้ฟ้งักัชนัของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

เมื่อพิจารณาพีคของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมจะปรากฏพีคทั้งของ LDPE และแป้งมันสำปะหลังโดยสัดส่วนความสูงของพีคที่ตำแหน่งต่างๆ แปรผันโดยตรงกับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมและตำแหน่งพีคที่ปรากฏอยู่ในพอลิเมอร์ผสมจะมีตำแหน่งเดียวกันกับแป้งมันสำปะหลังและ LDPE

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าตำแหน่งพีคส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

## 5.8 การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมหลังการฝังดิน

### 5.8.1 ผลการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา น้ำหนักที่หายไปหลังจากการฝังดินเพิ่มขึ้น ส่วน LDPE แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังจากฝังดิน

เปรียบเทียบการหายไปของน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยามีการหายไปของน้ำหนักหลังจากการฝังดินสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

### 5.8.2 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

ค่าความทนต่อแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปของ LDPE พบว่าเมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ให้ค่า  $\sigma_y$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่า  $E$  และ  $\sigma_b$  มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า  $E_b$  มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า LDPE มีการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อยหลังจากการฝังดิน ส่วนพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ไม่เติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะให้สมบัติความทนต่อแรงดึงลดลง



เมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น แต่อัตราการลดลงของสมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

#### 5.8.3 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

หลังจากทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นน้ำหนักที่หายไปของแบ่งที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA มีค่าลดลง นอกจากนี้ส่วนที่เหลืออยู่ที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  มีค่าน้อยลงเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาการหายไปของน้ำหนักในส่วนแบ่งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา

#### 5.8.4 การตรวจสอบหาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

เมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ค่า  $T_c$  และ  $T_m$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ปริมาณผลึกมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย

#### 5.8.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

หลังจากการฝังดินเกิดรูและช่องว่างทั้งผิวด้านนอกและผิวหน้าที่เกิดจากการหักชิ้นงานทั้งในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา เมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้น พอลิเมอร์ผสมจะเกิดรูและช่องว่างในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น และปริมาณแบ่งเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดรูและการย่อยสลายของแบ่งมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณแบ่งในสัดส่วนที่น้อยกว่า

เปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเวลาในการฝังดินนานขึ้นการหายไปของเม็ดแบ่งในพอลิเมอร์ผสมได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาหลังจากการย่อยสลายเม็ดแบ่งจะพบการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของแบ่งมันสำปะหลังและ LDPE

#### 5.8.6 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

พีกที่แสดงแถบดูดกลืนของแบ่งมันสำปะหลังมีความเข้มลดลง เมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น โดยในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาก็ให้ผลเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา แต่ความเข้มของพีกที่แสดงแถบดูดกลืนของแบ่งหายไปให้อัตราส่วนที่น้อยกว่า

## บรรณานุกรม

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

โครงสร้างของอะมิโลเพกติน. เข้าถึงได้จาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/Amylopectin> (วันที่สืบค้น 21 กันยายน 2549)

โครงสร้างของอะมิโลส. เข้าถึงได้จาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/Amylose> (วันที่สืบค้น 8 ตุลาคม 2551)

ธนาดี ลีจากภัย. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ จำกัด: กรุงเทพฯ.

ปาเจรา พัฒนถาบุตร. 2549. ข่าวโพลิเมอร์. เข้าถึงได้จาก: [http://www.thaipolymersociety.org/Polymernews\\_5.pdf](http://www.thaipolymersociety.org/Polymernews_5.pdf). (วันที่สืบค้น 2 ตุลาคม 2551)

พอลิเอทิลีน. เข้าถึงได้จาก: <http://en.wikipedia.org/wiki/polyethylene> (วันที่สืบค้น 8 ตุลาคม 2551)

ลักษณะการจัดเรียงตัวผลึกแบบ A และ B ของแป้ง. เข้าถึงได้จาก: [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2\\_3.html](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html) (วันที่สืบค้น 6 มกราคม 2552)

สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพลาสติกย่อยสลายได้. เข้าถึงได้จาก: [http://www.thaipolymersociety.org/Polymernews\\_5.pdf](http://www.thaipolymersociety.org/Polymernews_5.pdf). (วันที่สืบค้น 2 ตุลาคม 2551)

สเปกตรัมจากเครื่อง XRD ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B. เข้าถึงได้จาก: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2.html> (วันที่สืบค้น 6 มกราคม 2552)

หน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก. เข้าถึงได้จาก: [http://web-arjarn.muic.mahidol.ac.th/ewt/andrew\\_k/download/starch%20structure.pdf](http://web-arjarn.muic.mahidol.ac.th/ewt/andrew_k/download/starch%20structure.pdf) (วันที่สืบค้น 21 กันยายน 2549)

อรอุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

Abd El-Rehim, H.A., Hagazy, E.S.A., Ali, A.M., Rabie, A.M. 2004. Synergistic effect of combining UV-sunlight-soil burial treatment on the biodegradation rate of LDPE/starch blends. *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.* 163, 547-556.

Aburto, J., Thiebaud, S., Alric, I., Borredon, E., Bikiaris, D., Prinos, J. 1997. Properties of octanoated starch and its blends with polyethylene. *Carbohydr. Polym.* 34, 101-112.

Aht-ong, D., Charoenkongthum, K. 2002. Thermal properties and moisture absorption of LDPE/banana starch biocomposite films. *J. Met. Mater. Miner.* 12(1), 1-10.

Aht-Ong, D., Ratanakamnuan, U. 2006a. Photobiodegradation of low-density polyethylene/banana starch films. *J. Appl. Polym. Sci.* 100(4), 2725-2736.

Aht-Ong, D., Ratanakamnuan, U. 2006b. Preparation and characterization of low-density polyethylene/banana starch films containing compatibilizer and photosensitizer. *J. Appl. Polym. Sci.* 100(4), 2717-2724.

Arvanitoyannis, I., Biliaderis, C.G., Ogawa, H., Kawasaki, N. 1998. Biodegradable films made from low-density polyethylene (LDPE), rice starch and potato starch for food packaging applications: Part 1. *Carbohydr. Polym.* 36, 89-104.

Bae, Y.C., Jang, B.C., Huh, S.Y., Jang, J.G. 2001. Mechanical properties and morphology of the modified HDPE/starch reactive blend. *J. Appl. Polym. Sci.* 82(13), 3313-3320.

- Bhattacharya, M., Mani, R. 1998. Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blends—III. Effect of amylopectin to amylose ratio in starch. *Eur. Polym. J.* 34(10), 1467-1475.
- Bikiaris, D., Panayiotou, C. 1998. LDPE/starch blends compatibilized with PE-g-MA copolymers. *J. Appl. Polym. Sci.* 70, 1503–1521.
- Bikiaris, D., Pavlidou, E., Prinos, J., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Panayiotou, C. 1998. Biodegradation of octanoated starch and its blends with LDPE. *Polym. Degrad. Stab.* 60, 437-447.
- Bikiaris, D., Prinos, J., Koutsopoulos, K., Vouroutzis, N., Pavlidou, E., Frangis, N. 1998. LDPE/plasticized starch blends containing PE-g-MA copolymer as compatibilizer. *Polym. Degrad. Stab.* 59, 287-291.
- Bikiaris, D., Prinos, J., Panayiotou, C. 1997. Effect of EAA and starch on the thermooxidative degradation of LDPE. *Polym. Degrad. Stab.* 56, 1-9.
- Bonhomme, S., Scott, G., Cuer, A., Delort, A.M., Lemaire, J., Sancelme, M. 2003. Environmental biodegradation of polyethylene. *Polym. Degrad. Stab.* 81, 441-452.
- Chanda, M., Sailaja, R. R. N. 2005. Use of maleic anhydride-grafted polyethylene as compatibilizer for HDPE-tapioca starch blends: Effects on mechanical properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 80(6), 863-872.
- Chandra, R., Rustgi, R. 1997. Biodegradation of maleated linear low density polyethylene and starch blends. *Polym. Degrad. Stab.* 56, 185-202.
- Chang, Y.P., Abd Karim, A., Seow, C.C. 2006. Interactive plasticizing–antiplasticizing effects of water and glycerol on the tensile properties of tapioca starch films. *Food Hydrocolloids.* 20, 1–8.

- Chiellini, E., Corti, A., Swift, G. 2003. Biodegradation of thermally-oxidized, fragmented low-density polyethylene. *Polym. Degrad. Stab.* 81, 341-351.
- Danjaji, I.D., Nawang, R., Ishiaku, U.S., Ismail, H., Ishak, Z.A.M. 2001. Sago starch-filled linear low-density polyethylene (LLDPE) films: their mechanical properties and water absorption. *J. Appl. Polym. Sci.* 79, 29-37.
- Danjaji, I.D., Nawang, R., Ishiaku, U.S., Ismail, H., Mohd Ishak, Z.A.M. 2002. Degradation studies and moisture uptake of sago-starch-filled linear low-density polyethylene composites. *Polymer testing.* 21, 75-81.
- De Graaf, R.A., Janssen, L.P.B.M. 2000. The production of a new partially biodegradable starch plastic by reactive extrusion. *Polym. Eng. Sci.* 40(9), 2086-2094.
- Devi, S., Thakor, I.M., Lyer, S., Desai, A., Lele, A. 1999. Morphology, thermomechanical properties, and biodegradability of low density polyethylene/starch blends *J. Appl. Polym. Sci.* 74(12), 2791.
- Favis, B.D., Rodriguez-Gonzalez, F.J., Ramsay, B.A. 2003. High performance LDPE/thermoplastic starch blends: a sustainable alternative to pure polyethylene. *Polymer.* 44, 1517-1526.
- Folkes, M.J., and Hopes, P.S. 1993. *Polymer blends and alloys.* 3<sup>rd</sup> ed.; Chapman and Hall: London. 46-74.
- Follain, N., Joly, C., Dole, P., Roge, B., Mathlouthi, M. 2006. Quaternary starch based blends: Influence of a fourth component addition to the starch/water/glycerol system. *Carbohydr. Polym.* 63, 400-407.
- Gilan, I., Hadar, Y., Sivan, A. 2004. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhococcus ruber*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 65, 97-104.

- Girija, B.G., Sallaja, R.R.N. 2006. Low-density polyethylene/plasticized tapioca starch blends with the low-density polyethylene functionalized with maleate ester: mechanical and thermal properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 101, 1109–1120.
- Godbillot, L., Dole, P., Joly, C., Roge, B., Mathlouthi, M. 2006. Analysis of water binding in starch plasticized films. *Food Chem.* 96, 380-386.
- Graff, R.A.D., Janssen, L.P.B.M. 2000. The production of a new partially biodegradable starch plastic by reactive extrusion. *Polym. Eng. Sci.* 40(9), 2086-2094.
- Ha, C.S., Park, H.M., Lee, S.r., Chowdhury, S.R., Kang, T.K., Kim, H.K, Park, S.H. 2001. Tensile properties, morphology, and biodegradability of blends of starch with various thermoplastics. *J. Appl. Polym. Sci.* 86(11), 2907-2915.
- Hadad, D., Geresh, S., Sivan, A. 2005. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *J. Appl. Microbiol.* 98, 1093-1100.
- Huang, C.Y., Roan, M.L., Kuo, M.C., Lu, W.L. 2005. Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high-content starch/low-density polyethylene blends. *Polym. Degrad. Stab.* 90, 95-105.
- Jagannath, J.H., Nadasabapathi, s., Bawa, A.S. 2006. Effect of starch on thermal, mechanical, and barrier properties of low density polyethylene film. *J. Appl. Polym. Sci.* 99, 3355-3364.
- Jakubowicz, I., Yarahmadi, N., Petersen, H. 2006. Evaluation of the rate of abiotic degradable polyethylene in various environments. *Polym. Degrad. Stab.* 91, 1556-1562.
- Jinlin, Y., Jipin, P., Shujun, W., Jiugau, Y. 2007. Effect of anhydrides on the mechanical, thermal, and morphological properties of TPS/PE blends made by one-step extrusion. *Polym. Polym. Compos.* 15(3), 249-253.

- Joseph, P.V, Joseph, K., Thomas, S. 1999. Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polyethylene composites. *Compos. Sci. Technol.* 59, 1625-1640.
- Kaczmarek, H., Oldak, D. 2006. The effect of UV-irradiation on composting of polyethylene modified by cellulose. *Polym. Degrad. Stab.* 91, 2282-2291.
- Kaewtatip, K., Tanrattanakul, V. 2008. Preparation of cassava starch grafted with polystyrene by suspension polymerization. *Carbohydr. Polym.* 73, 647-655.
- Kim, M. 2003. Evaluation of degradability of hydroxypropylated potato starch/polyethylene blend films. *Carbohydr. Polym.* 54, 173-181.
- Kiratitanavit, W., 2001. Master's thesis: Synthesis of graft copolymers of cassava starch and styrene by free-radical polymerization. Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University. ISBN 974-17-0596-4.
- Liu, W., Wang, Y.J., Sun, Z. 2003. Effects of polyethylene-grafted maleic anhydride (PE-g-MA) on thermal properties, morphology, and tensile properties of low-density polyethylene (LDPE) and corn starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 88, 2904-2911.
- Lourdin, D., Bizot, H., Colonna, P. 1996. Antiplasticization in starch-glycerol film. *J. Appl. Polym. Sci.* 63, 1047-1053.
- Maharana, T., Singh, B.C. 2006. Synthesis and characterization of biodegradable polyethylene by graft copolymerization of starch using glucose-Ce(IV) redox system. *J. Appl. Polym. Sci.* 100, 3229-3239.
- Mano, J.F., Koniarova, D., Reis, R.L. 2003. Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blend with potential biomedical applicability. *J. Mater. Sci. - Mater. Med.* 14, 127-135.

- Moad, G. 1999. The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion. *Prog. Polym. Sci.* 24, 81–142.
- Muller, R.J. 2008. Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing. 365-388. เข้าถึงจาก [http://www.wiley-vch.de/books/biopoly/pdf\\_v10/vol10\\_19.pdf](http://www.wiley-vch.de/books/biopoly/pdf_v10/vol10_19.pdf)
- Nakamura, E.M., Cordi, L., Ameida, G.S.G., Duran, N., Mei, L.H.I. 2005. Study and development of LDPE/starch partially biodegradable compounds *J. Mater. Process. Technol.* 162, 236-241.
- Nikazae, M., Safari, B., Bonakdarpour, B., Milani, Z. 2005. Improving the biodegradability and mechanical strength of corn starch-LDPE blends through formulation modification. *Iran. Polym. J.* 14, 1050-1057.
- Nouri, M.R., Hay, J.N. 2004. Time-temperature superposition and dynamic mechanical properties of metallocene polythylenes. *Iran. Polym. J.* 13(5), 363-370.
- Onodera, K.Y., Mukumoto, H., Katsuyaya, Y., Saiganji, A., Tani, Y. 2001. Degradation of polyethylene by fungus, *Penicillium simplicissimum* YK. *Polym. Degrad. Stab.* 72, 323-327.
- Panayiotou, C., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Botev, M., Betchev, C. 1999. Mechanical properties and biodegradability of LDPE blends with fatty-acid esters of amylose and starch. *J. Appl. Polym. Sci.* 71(7), 1089-1100.
- Panayiotou, C., Bikiaris, D. 1998. LDPE/starch blends compatibilized with PE-g-MA copolymers. *J. Appl. Polym. Sci.* 70(8), 1503-1521.
- Panayiotou, C., Thiebaud, S., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Bikiaris, D., Prinos, J. 1998. Properties of fatty-acid esters of starch and their blends with LDPE. *J. Appl. Polym. Sci.*, 65(4), 705-721.



- Park, H.M., Lee, S.R., Chowdhury, S.R., Kang, T.K., Kim, H.K., Park, S.H., Ha, C.S. 2002. Tensile properties, morphology, and biodegradability of blends of starch with various thermoplastics. *J. Appl. Polym. Sci.* 86, 2907-2915.
- Park, E.S., Yoon, J.S. 2003. Synthesis of polyethylene-graft-poly(styrene-co-maleic anhydride) and its compatibilizing effects on polyethylene/starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 88(10), 2434-2438.
- Pedroso, A.G., Rosa, D.S. 2005. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. *Carbohydr. Polym.* 59, 1-9.
- Pedroso, A.G., Rosa, D.S. 2005 (a). Effects of the compatibilizer PE-g-GMA on the mechanical, thermal and morphological properties of virgin and reprocessed LDPE/corn starch blends. *Polym. Adv. Technol.* 16, 310-317.
- Prinos, J., Bikiaris, D., Theologidis, S., Panayiotou, C. 1998. Preparation and characterization of LDPE/starch blends containing ethylene/vinyl acetate copolymer as compatibilizer. *Polym. Eng. Sci.* 38(6), 954-964.
- Qudsieh, I.Y.M., Fakhru'l-Razi, A., Muyibi, S.A., Ahmad, M.B., Rahman, M.Z.Ab., Wan Yunus, W.Md.Z. 2004. Preparation and characterization of poly(methyl methacrylate) grafted sago starch using potassium persulfate as redox Initiator. *J. Appl. Polym. Sci.* 94, 1891-1897.
- Raj, B., Sankar, K.U., Siddaramaiah. 2004. Low density polyethylene/starch blend films for food packaging applications. *Adv. Polym. Tech.* 23(1), 32-45.
- Raquez, J.M., Narbar, Y., Narayan, R., Dubois, P. 2008. In situ compatibilization of maleated thermoplastic starch/polyester melt-blends by reactive extrusion. *Polym. Eng. Sci.* 48(9), 1747-1754.

- Ratanakamnuan, U., Aht-Ong D. 2006. Preparation and Characterization of Low-Density Polyethylene/Banana Starch Films Containing Compatibilizer and Photosensitizer. *J. Appl. Polym. Sci.* 100, 2717-2724.
- Rivero, I.E., Balsamo, V., Muller, A.J. 2008. Microwave-assisted modification of starch for compatibilizing. *Carbohydr. Polym.* doi:10.1016/j.carbpol.2008.08.012.
- Rosa, D.S., Guedes, C.G.F., Pedroso, A.G. 2004. Gelatinized and nongelatinized corn starch/poly( $\epsilon$ -caprolactone) blends: characterization by rheological, mechanical and morphological properties. *Ciência e Tecnologia.* 14 (3), 181-186.
- Rosa, D.S., Pedroso, A.G. 2005. Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. *Carbohydr. Polym.* 59,1-9.
- Roz, A.L.D, Carvalho, A.J.F., Gandini, A., Curvelo, A.A.S. 2006. The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing. *Carbohydr. Polym.* 63, 417-424.
- Rutkowska, M., Heimowska, A., Krasoska, K., Janik, H. 2002. Biodegradability of polyethylene starch blends in sea water. *Pol. J. Environ. Stud.* 11(3), 267-274.
- Sallaja, R.R.N., Chanda, M.J. 2002. Use of poly(ethylene-co-vinyl alcohol) as compatibilizer in LDPE/thermoplastic tapioca starch blends. *Appl. Polym. Sci.* 86, 3126-3134.
- Sanchez, J., Myers, T.N. 1996. Synthesis, characterization and properties of vinyl ester matrix resins. *Polymeric Materials Encyclopedia*, J. C. Salamone ed., CRC Press, p4927.
- Saramaiah, S., Raj, B., Annadurai, V., Somashekar, R., Raj, M. 2001. Structure-property relation in low-density polyethylene-starch immiscible blends *Eur. Polym. J.* 37, 943-948.

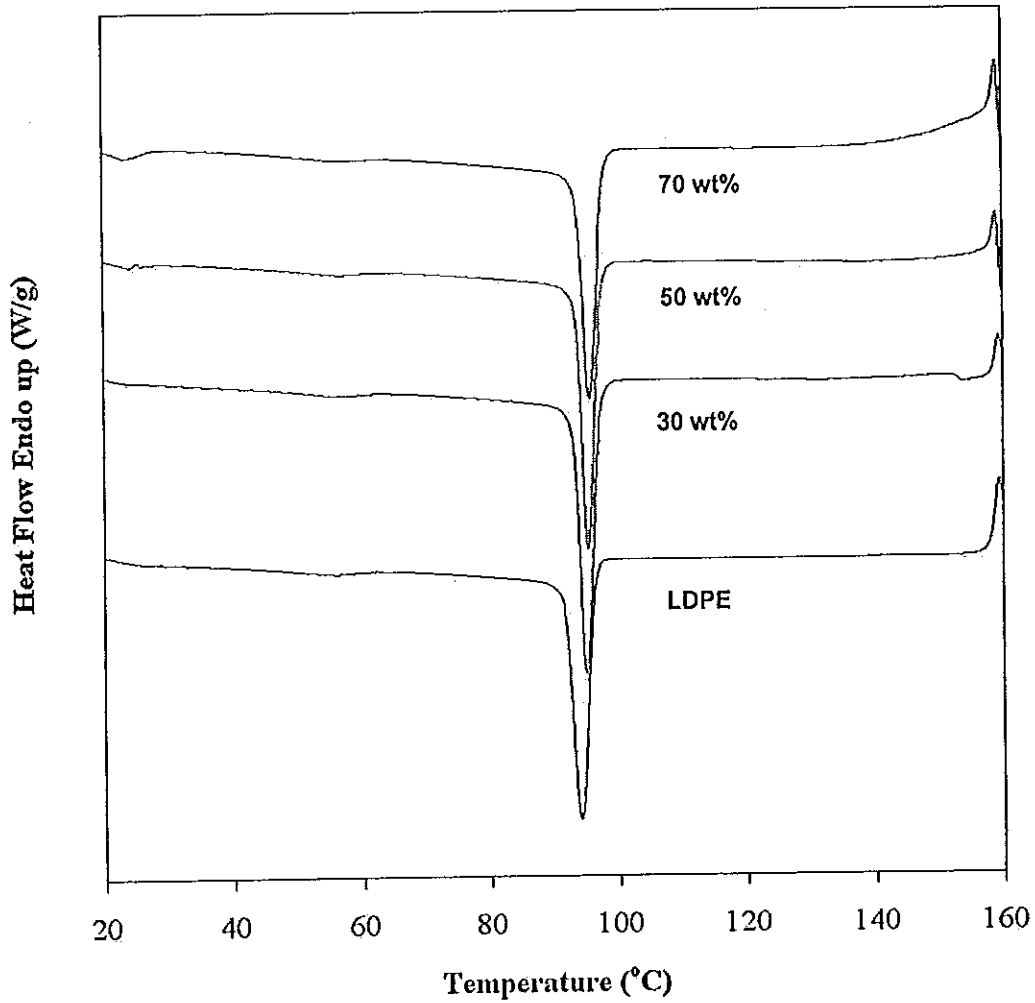
- Senna, M. M., Hossam, F.M., El-Naggar, A.W.M. 2008. Compatibilization of low density polyethylene/plasticized starch blends by reactive compounds and electron beam Irradiation. *Polym. Compos.* DOI 10.1002/pc.20393.
- Shujun, J., Jiugao, Y., Jinglin, Y. 2005. Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends. *Polym. Degrad. Stab.* 87, 395-401.
- Shujun, W., Jiugao, Y., Jinglin, Y. 2006. Preparation and characterization of compatible and degradable thermoplastic starch/polyethylene film. *J. Polym. Environ.* 14(1), 55-70.
- Sriroth, K., Piyachomwan, K., Sangseethong, K., Oates, C. 2002. Modification of cassava starch. X International Starch Convention. Cracow, Poland. June 11-14, 2002, pp. 1-14.
- Sudhakar, M., Doble, M., Murthy, P.S., Venkatesan, R. 2008. Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 61, 203-213.
- Thakore, M., Iyer, S., Desai, A., Lele, A., Devi, S. 1999. Morphology, thermomechanical properties, and biodegradability of low density polyethylene/starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 74, 2791-2802.
- Thakore, IM., Desai, S., Sarawade, BD., Devi, S. 2001. Studies on biodegradability, morphology and thermomechanical properties of LDPE/modified starch blends. *Eur. Polym. J.* 37, 151-160.
- Wang, Y.J., Liu, W., Sun, Z. 2004. Effects of glycerol and PE-g-MA on morphology, thermal and tensile properties of LDPE and rice starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 92(1), 344-350.

- Yagci, C., Yildiz U. 2005. Redox polymerization of methyl methacrylate with allyl alcohol 1,2-butoxylate-block-ethoxylate initiated by Ce(IV)/HNO<sub>3</sub> redox system. *Eur. Polym. J* 41, 177-184.
- Yoo, Si., Lee, TY., Yoon, JS., Lee, IM., Kim, MW., Lee, HS. 2002. Interfacial adhesion reaction of polyethylene and starch blends using maleated polyethylene reactive compatibilizer *J.Polym. Sci.* 83, 767-776.
- Yu, J., Wang, S., Yu, J. 2004. Influence of maleic anhydride on the compatibility of thermal plasticized starch and linear low-density polyethylene. *J. Appl. Polym. Sci.* 93(2), 686.
- Yu, J., Wang, S., Yu, J. 2005. Influence of maleic anhydride on the compatibility of thermal plasticized starch and linear low-density polyethylene. *Polym. Degrad. Stab.* 87, 395-401.
- Zheng, Y., Yanful, E.K., Bassi, A.S. 2005. A review of plastic waste biodegradation. *Crit. Rev. Biotechnol.* 25, 243-250.
- Zhiqiang, L., Xiao-su, Y., Yi, F. 2000. Effect of bound water on thermal behaviors of native starch, amylose and amylopectin. *Starch.* 51(11-12), 406-410.
- Zuchowska, D., Steller, R., Meissner, W. 1998. Structure and properties of degradable polyethylene-starch blends. *Polym. Degrad. Stab.* 60, 471-480.

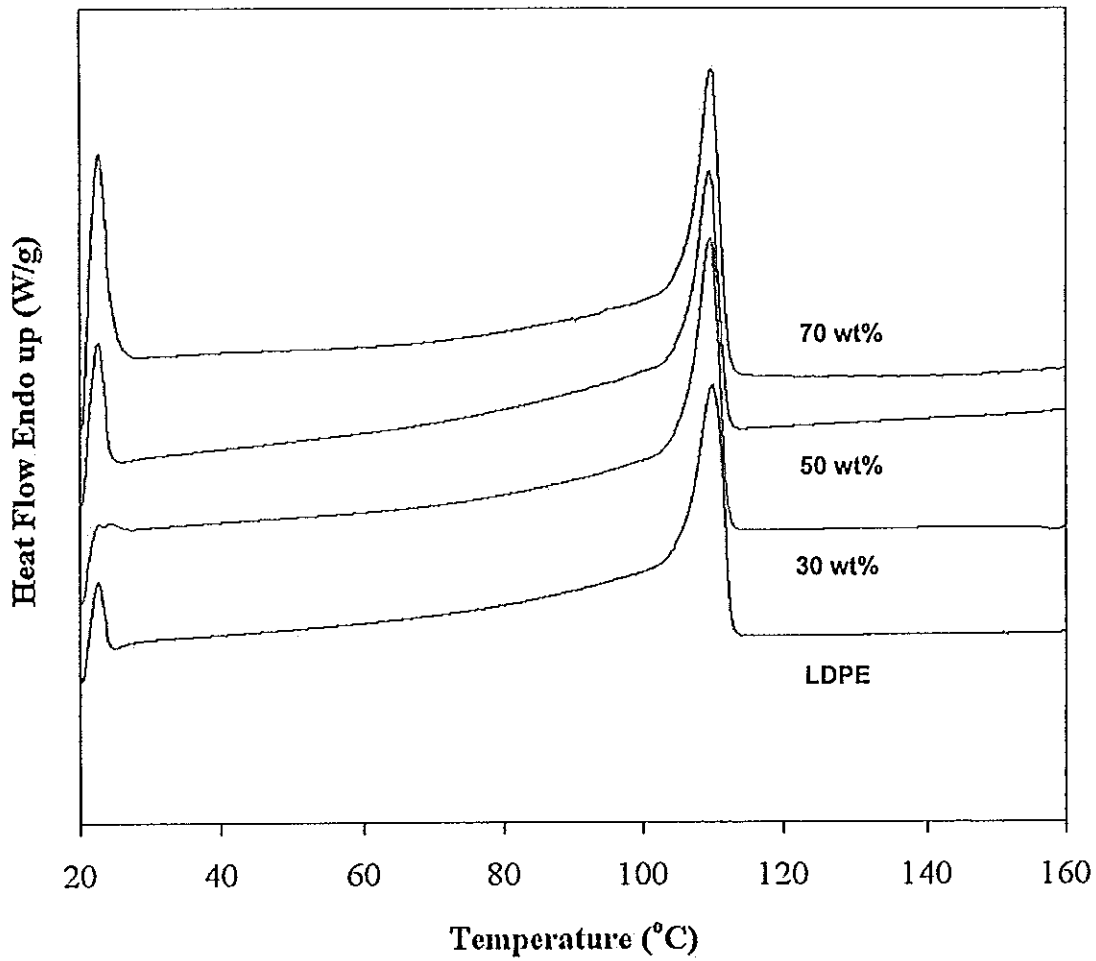
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

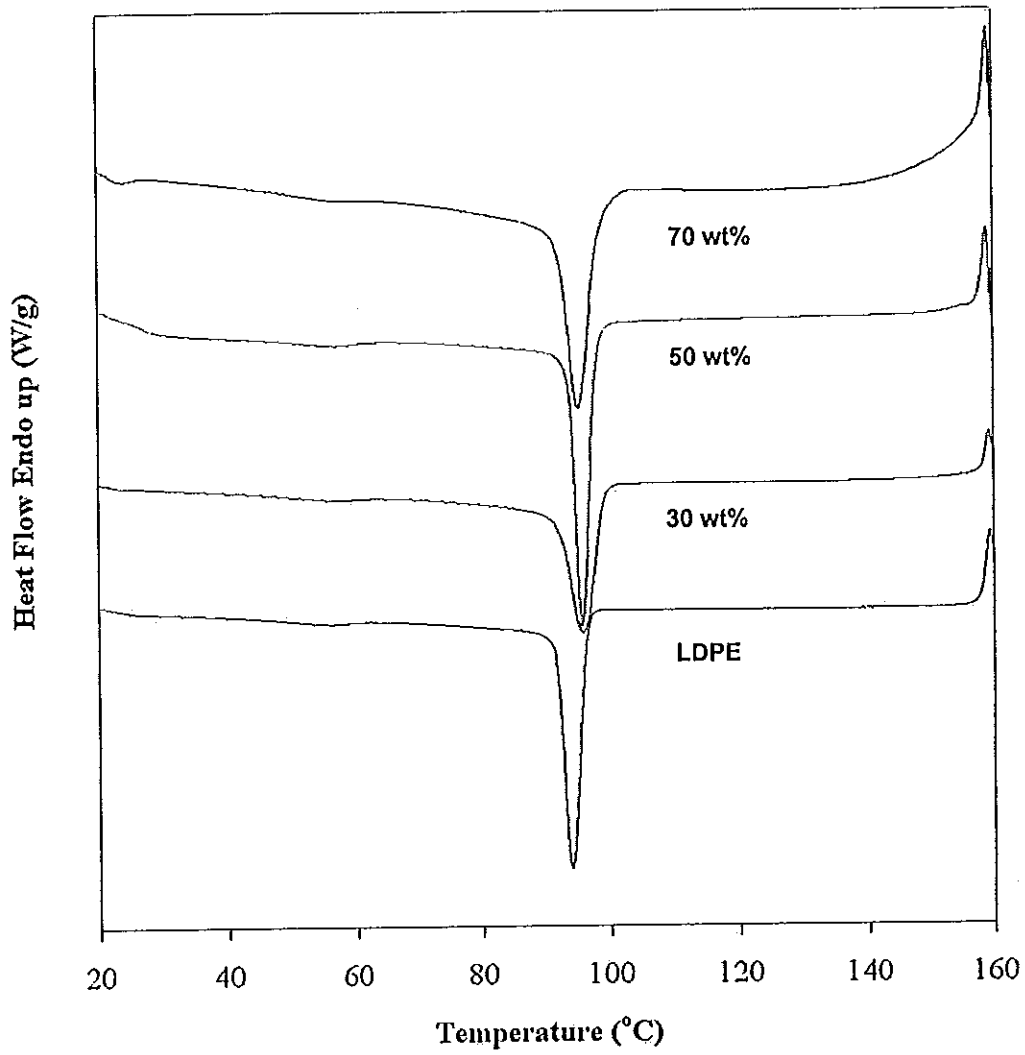
## DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ ก.1 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

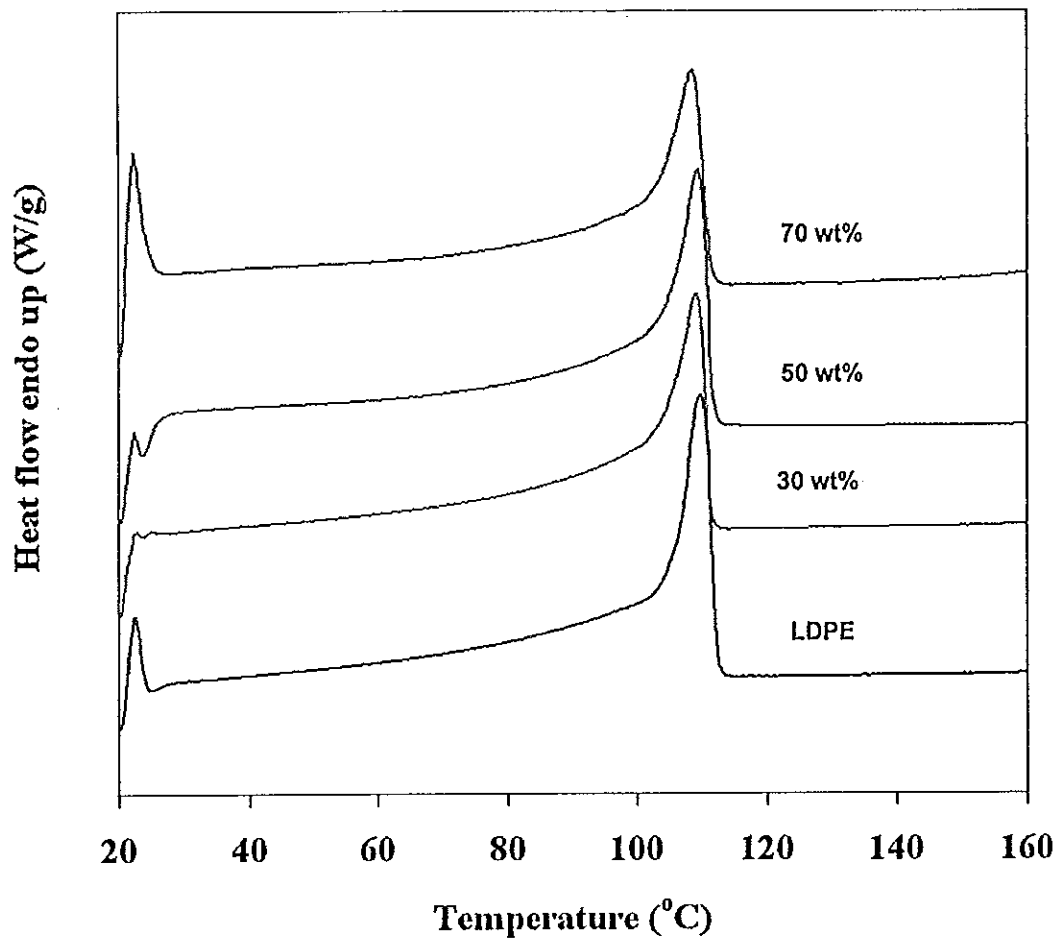


รูปที่ ก.2 DSC thermogram (heating) ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดย  
แปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

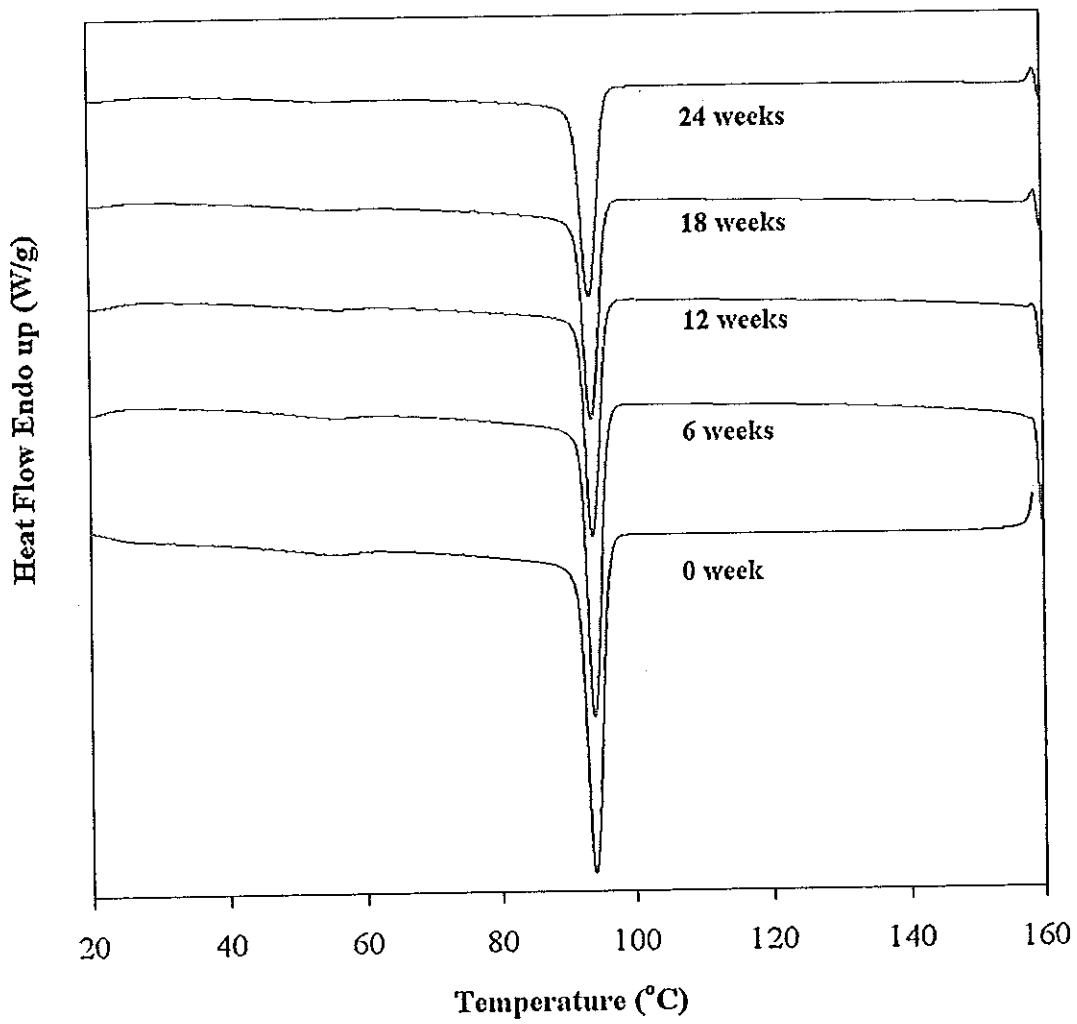


รูปที่ ก.3 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%

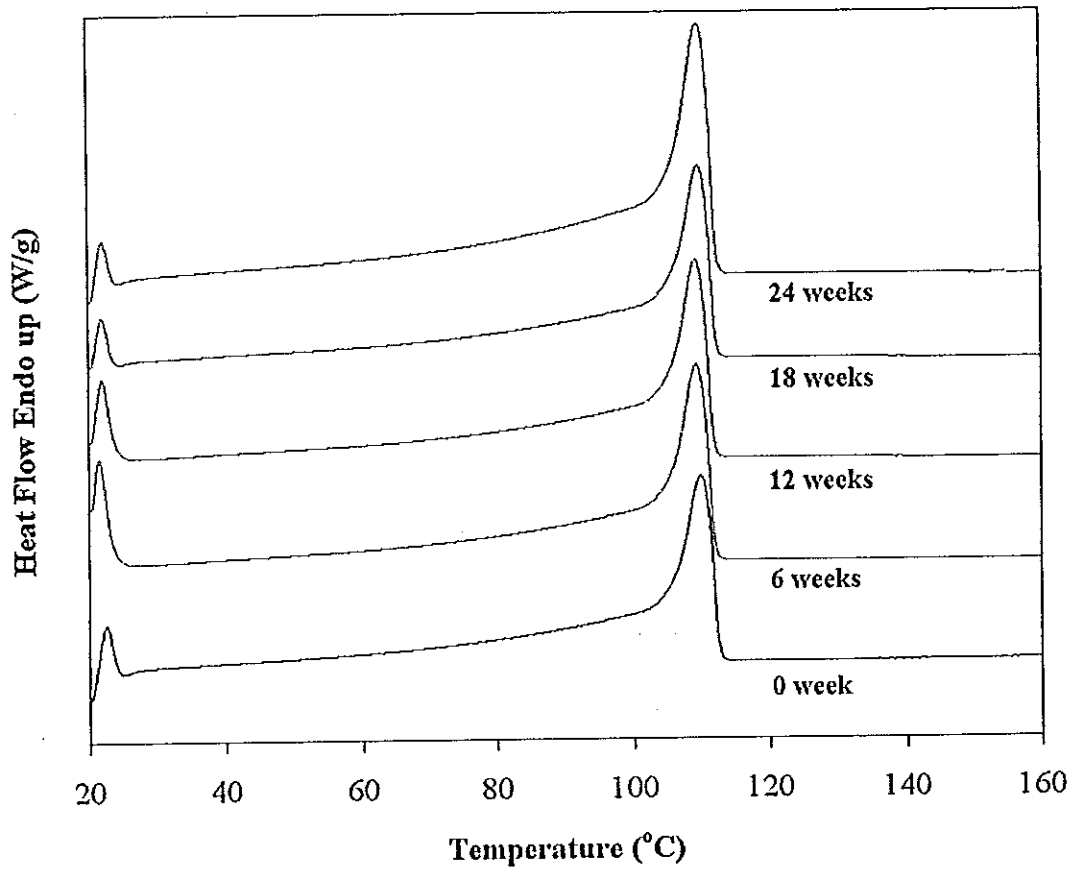




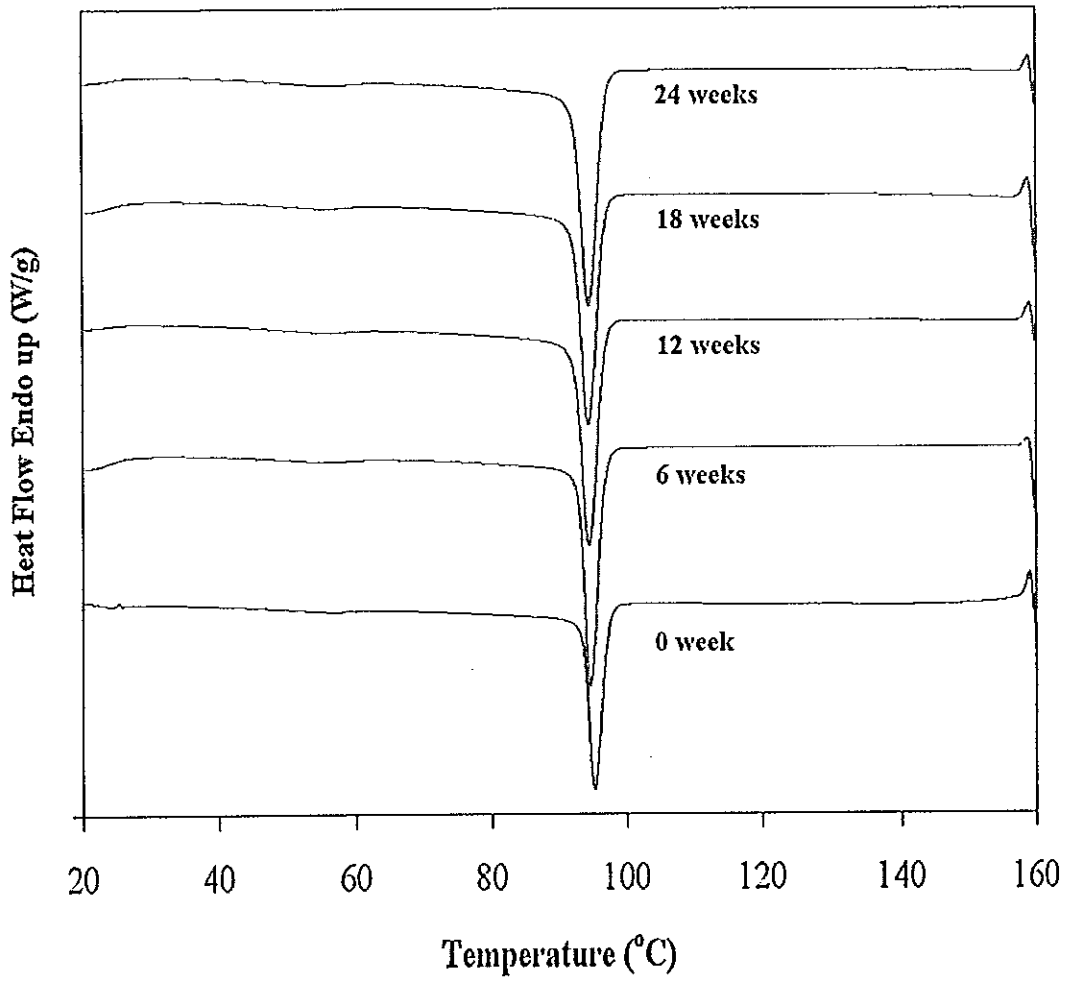
รูปที่ ก.4 DSC thermogram (2-heating) ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยแปรปริมาณแบ่ง 0-70 wt%



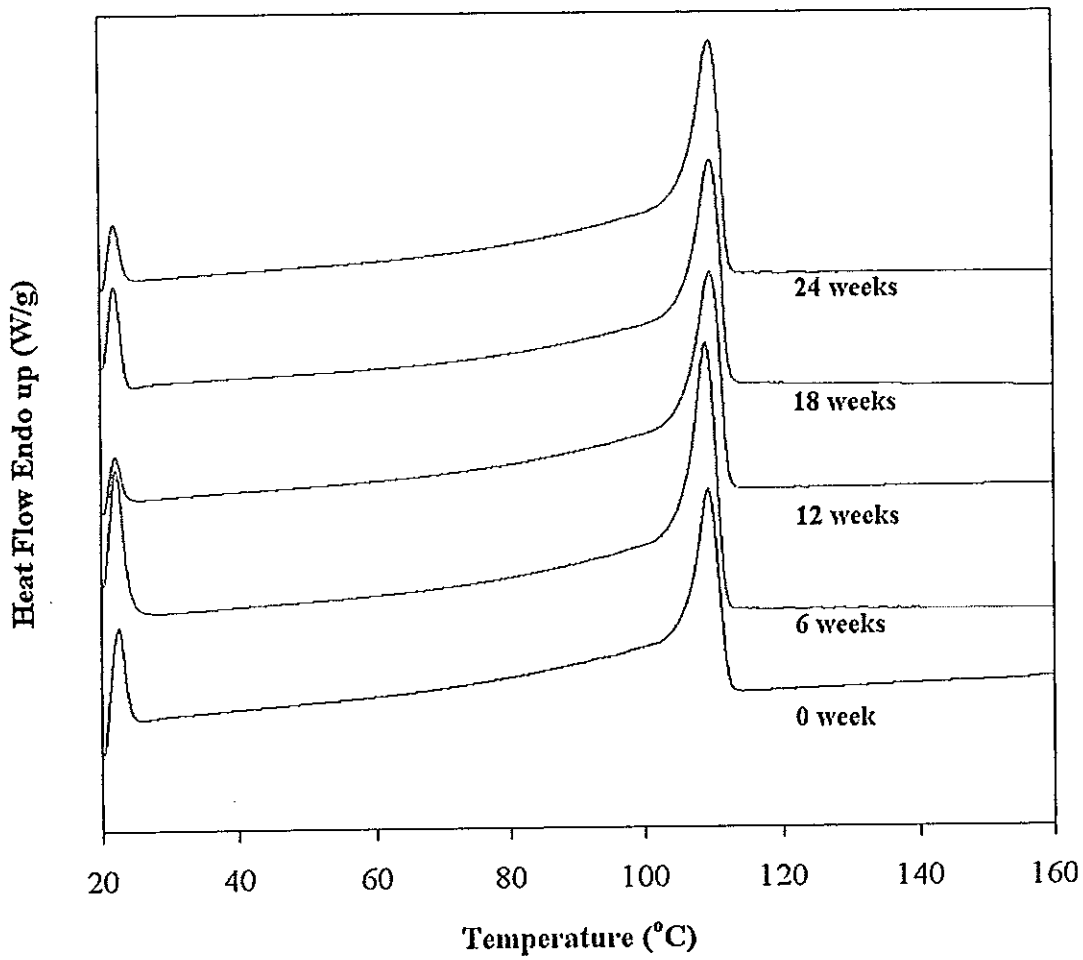
รูปที่ ก.5 DSC thermogram (cooling) ของ LDPE ที่ฝังดินในเวลาต่างๆ



รูปที่ ก.6 DSC thermogram (heating) ของ LDPE ที่ฝังดินในเวลาต่างๆ



รูปที่ ก.7 DSC thermogram (cooling) ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ปฏิกริยาที่ฝังดินในเวลาต่างๆ



รูปที่ ก.8 DSC thermogram (heating) ของพอลิเมอร์ผสม (50 %แป้ง) ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ปฏิกริยาที่ฝังดินในเวลาต่างๆ

## ภาคผนวก ข

### เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อิทธิพลของตัวริเริ่มต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง

EFFECTS OF INITIATORS ON MECHANICAL PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF  
LOW DENSITY POLYETHYLENE AND CASSAVA STARCH BLENDS

วรรณรัตน์ หันธุ์วิริรัตน์ และ วรากรณ์ ดันรัตน์กุล\*

สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวริเริ่มที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก โดยใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 120°C ทำการแปรปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.05 ถึง 2 phr (parts per hundred) เทียบกับปริมาณพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กำหนดให้ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและน้ำในพอลิเมอร์ผสมคงที่ที่ 0.5 และ 8 phr เทียบกับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง จากผลการทดลองพบว่าค่าความเค้น ณ จุดขาด ความเครียด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้เบนโซิลเปอร์ออกไซด์น้อยกว่า 0.1 phr เมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็น 0.5 และ 1.0 phr พบว่าสมบัติทั้งสามมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อมีการเติมตัวริเริ่ม โดยปริมาณเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 1 phr ให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีที่สุด ซึ่งให้ค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ารอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงเมื่อใช้ตัวริเริ่มทั้งเบนโซิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แป้งมันสำปะหลัง พอลิเมอร์ผสม การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสม

### Abstract

Mechanical properties and morphology of polymer blends prepared from low density polyethylene (LDPE) and cassava starch have been investigated. The ratio of LDPE and cassava starch was 50:50 by weight. Mechanical blending was carried out in an internal mixer at 120 °C. Benzoyl peroxide (BPO) and potassium persulfate (PPS) were used as initiators. BPO was added in the range of 0.05–2.00 parts per hundred (phr) based on LDPE weight. The LDPE/starch blends contained 0.50 phr of PPS and 8 phr of water based on starch weight. The blends, which filled PPS and BPO as initiators were compared with the controlled sample containing no any initiators to study the effects of initiators on mechanical properties of the polymer blends. Tensile test results showed that increasing BPO in the range of 0 – 0.10 phr led to a decrease in tensile strength, elongation at break and tear strength whereas further increasing BPO up to 0.50 and 1.00 phr provided these values higher than the controlled sample. In contrast, the addition of initiators decreased notched Izod impact strength of the blends. The blend containing 1.00 phr of BPO presented the best mechanical properties. Scanning electron micrographs showed the improvement in interfacial adhesion between LDPE and cassava starch due to the presence of PPS and BPO.

Keywords: Low density polyethylene/ cassava starch/ polymer blend/ reactive blending

### บทนำ

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้ถึง 60 ล้านตันต่อปีทั่วโลก โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ส่วนใหญ่มีกนำมาทำเป็นฟิล์มและถุงพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกเหล่านี้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปี จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากปัญหาขยะล้นโลก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่พลาสติกเหล่านี้ โดยทั่วไปในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่พอลิเอทิลีนมักทำการผสมกับพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งได้แก่แป้ง โปรตีนและโคโครชาน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แป้งในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเนื่องจากแป้งเป็น พอลิแซ็กคาไรด์ที่หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีราคาไม่แพง และที่สำคัญสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุดในประเทศไทย แม้ว่าแป้งถูกใช้ในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่พอลิเอทิลีน แต่ความแตกต่างของความเป็นขั้วระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติต่ำลงมาก เนื่องมาจากแป้งมีความเป็นขั้วสูงเนื่องจากภายในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนพอลิเอทิลีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ เพื่อเป็นการปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวทำให้นักวิจัยพยายามปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง เช่นการคัดแปร โมดูลของแป้ง ให้มีความเป็นขั้วลดลง (Panayiotou และคณะ (1997), Panayiotou และคณะ (1999), Devi และคณะ (1999)) หรือทำการคัดแปร โมเลกุลของพอลิเอทิลีน และเติมสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibilizer) ในพอลิเมอร์ผสม (Chandra และ Rustgi (1997), Shujun และคณะ (2005)) การใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็นการเพิ่ม อันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิเอทิลีนกับแป้ง ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการกราฟที่ระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยตรงน้อยมาก (Maharana และ Singh (2006))

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มที่แตกตัวด้วยความร้อนในเครื่องผสมแบบปิด คาดว่าก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งระหว่างทำการผสม (Reactive blending) ซึ่งการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ตัวริเริ่มทั้งสองนี้ยังไม่มีรายงานการวิจัย ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยดัดแปลงมาจากการเตรียมกราฟท์โพลิเมอร์ระหว่างแป้งกับ สไตรีนมอนอเมอร์จากงานวิจัยของ De Graaf และ Janssen (2000) ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยตัวริเริ่มทั้งสองมีครึ่งชีวิต (Half-life) ดังนี้ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็นเวลา 1 min ที่อุณหภูมิ 130 °C และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์แตกตัวที่อุณหภูมิ 137 °C เป็นเวลา 2 min ส่งผลให้เกิดฟรีเรดิคัลบนสายโซ่โมเลกุลของแป้งและพอลิเอทิลีนตามลำดับ (De Graaf และ Janssen (2000), Moad (1999) ) วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของการแปรปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง

### วิธีการทดลอง

#### 1. สารเคมีและอุปกรณ์

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรด LD1905F/FA ชื่อทางการค้า El-Lene ผลิตโดยบริษัทไทยพอลิเอทิลีน (1993) จำกัด ความหนาแน่นเท่ากับ 0.919 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลวเท่ากับ 110 °C และค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 5.0 g/10 min แป้งมันสำปะหลังผลิตโดยบริษัทเขนเนรัลสตาร์ช จำกัด ก่อนนำมาใช้ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate, PPS) ผลิตโดยบริษัท Merck และ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) ผลิตโดยบริษัท Ajex finechem เครื่องผสมแบบปิด รุ่น Brabender™ Mixer 350E เครื่องอัดความดัน ผลิตโดยบริษัท Kao Tieh รุ่น KT-7014 เครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด ผลิตโดยบริษัท LLOYD instrument รุ่น LR10K เครื่องผสม บี้ห่อ OTTO เครื่องทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกระแทก ผลิตโดยบริษัท ZWICK กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-5200LV

#### 2. การผสมและขึ้นรูปรีนทดสอบ

ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนักในเครื่องผสมแบบปิด โดยทำการผสมแป้งมันสำปะหลังกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตในน้ำในเครื่องผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 min ก่อนจะนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในเครื่องผสมแบบปิด ทำการผสมภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 120 °C ความเร็วรอบในการผสมเท่ากับ 100 rpm เป็นเวลา 8 min แปรปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ใช้เป็น 0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0 และ 2.0 parts per hundred (phr) โดยเทียบกับน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทุกสูตรการผสมใช้ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและน้ำคงที่ที่ 0.5 และ 8 phr เทียบกับน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เท่ากับ 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีสารเติมตัวริเริ่มใช้เป็นตัวควบคุม (Control) จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มารีดด้วย



เครื่องบดสองลูกกลิ้งเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ 120°C ความดัน 200 kg/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 3 min และชิ้นงานมีความหนาประมาณ 1.0 mm

### 3. การทดสอบสมบัติเชิงกลและการตรวจสอบสัณฐานวิทยา

#### 3.1 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tensile and tear testing)

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM-D624 (right angle, die C) ตามลำดับ ความหนาชิ้นตัวอย่าง 1.0 mm ใช้ความเร็วในการทดสอบ 50 mm/min การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงรายงานค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ค่าความเค้น ณ จุดขาด (Stress at break,  $\sigma_b$ ) และค่าความเครียด ณ จุดขาด (Elongation at break,  $\epsilon_b$ ) และรายงานค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength, N/mm) ดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิ 25°C และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH โดยทำการทดสอบ 8 ชิ้น/ตัวอย่าง

#### 3.2 การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact property testing)

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod ชิ้นทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 12.7 mm และความยาว 63.5 mm บากขึ้นทดสอบเป็นรูปตัววี (V shape) ให้มีความลึก 2.54 mm เป็นมุม 45° ใช้ลูกตุ้ม (Pendulum) ที่มีขนาด 2 J รายงานค่าการต้านแรงกระแทก (Notch Izod Impact Strength, kJ/m<sup>2</sup>) ดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิห้อง (27 °C) และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %RH โดยทำการทดสอบ 8 ชิ้น/ตัวอย่าง

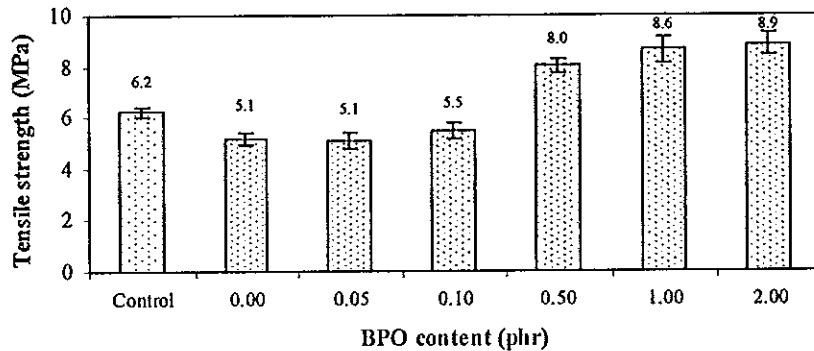
#### 3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่กระจายอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานขนาดประมาณ 0.5 x 5 x 0.1 cm จุ่มในไนโตรเจนเหลวประมาณ 1-2 h และทำการหักทันที ติดตัวอย่างบนแท่งทองเหลือง เคลือบด้วยทอง และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 1. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

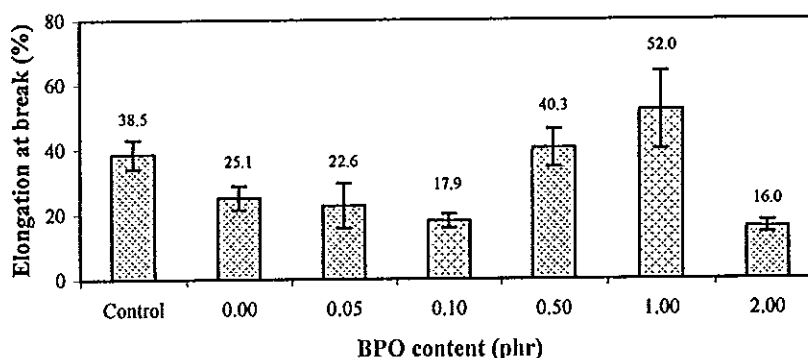
จากการศึกษาผลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์น้อยกว่า 0.1 phr ค่าความเค้น ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มที่ลดลงจาก 6.2 MPa เป็น 5.1, 5.1 และ 5.5 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็น 0.5, 1.0 และ 2.0 phr พบว่าค่าความเค้น ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นไปเป็น 8.0, 8.6 และ 8.9 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 1 อิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความเค้น ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม

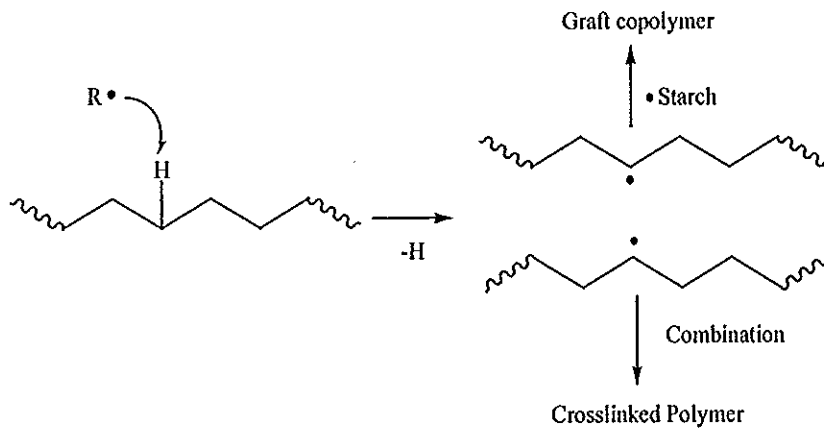
ส่วนอิทธิพลของปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความเครียด ณ จุดขาด แสดงในรูปที่ 2 พบว่าแนวโน้มเหมือนกับค่าความเค้น ณ จุดขาด คือในช่วงแรกค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลงจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมตัวริเริ่มเมื่อปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วง 0-0.1 phr เมื่อเพิ่มปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็น 0.5 และ 1.0 phr ค่าความเครียด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็น 2.0 phr ค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ทั้งค่าความเค้น ณ จุดขาด และค่าความเครียด ณ จุดขาด มีแนวโน้มเหมือนกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมเฉพาะโทแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและใช้ปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์น้อยกว่า 0.1 phr จะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าตัวควบคุม (Control) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง จำเป็นต้องใช้ทั้งโทแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดอันตรกิริยาคิวลิสม์ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสอง อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยปฏิกิริยาการกราฟท์จะเกิดบริเวณผิวของเม็ดแป้ง (Cho และ Lee (2002)) ดังแสดงกลไกในรูปที่ 3

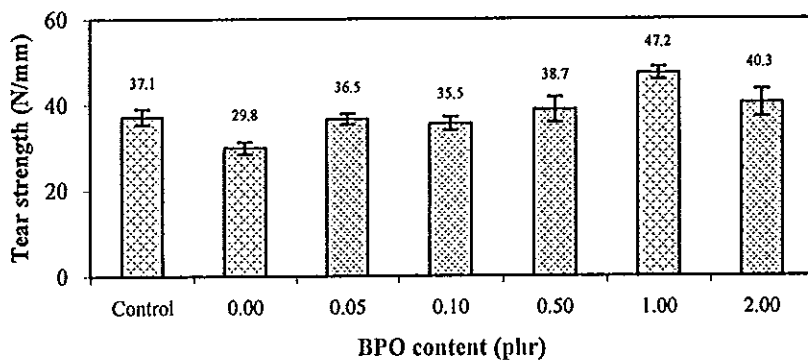


รูปที่ 2 อิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความเครียด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมเฉพาะโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงจากตัวควบคุมเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็น 0.05, 1.0 และ 0.5 phr ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกับตัวควบคุม โดยปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุดคือ 1 phr แต่เมื่อปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 2 phr ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของตัวริเริ่มที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) ของพอลิเอทิลีนก่อให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลของพอลิเอทิลีนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง โดยแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



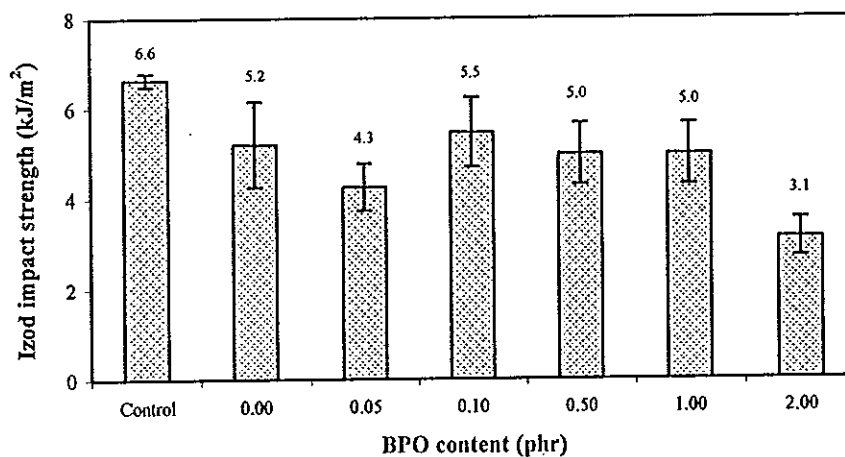
รูปที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาราดิคัลโคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนกับแป้งมันสำปะหลัง และปฏิกิริยาข้างเคียงของพอลิเอทิลีน (Moad (1999))



รูปที่ 4 อิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสม

แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมตัวริเริ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 อธิบายเหตุผลได้ว่าเมื่อมีการเติมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสของแข็งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม

Shujun และคณะ (2005) และ Taha และ Ziegmann (2006) กล่าวว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีอันตรกิริยาระหว่างเฟสสูงคือมีการเชื่อมติดกันระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด จะมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างเฟสได้ดีขึ้น จึงใช้พลังงานในการกระแทกน้อย ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเหนียวต่ำ และให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงรอยต่อระหว่างเฟส เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงรอยต่อระหว่างเฟส จะมีผิวหน้าใหม่ระหว่างเฟสทั้งสองขึ้นก่อนให้เกิดการดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงมีค่าสูง ซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการเติมตัวริเริ่มนี้ ให้ค่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่เติมเส้นใยเพื่อเสริมความแข็งแรงแก่พอลิโอฟีนเมื่อมีการเติมสารเพิ่มความสามารในการเข้ากันได้ (compatibilizer) ระหว่างเส้นใยกับพอลิโอฟีน (Shujun และคณะ (2005), Taha และ Ziegmann (2006))

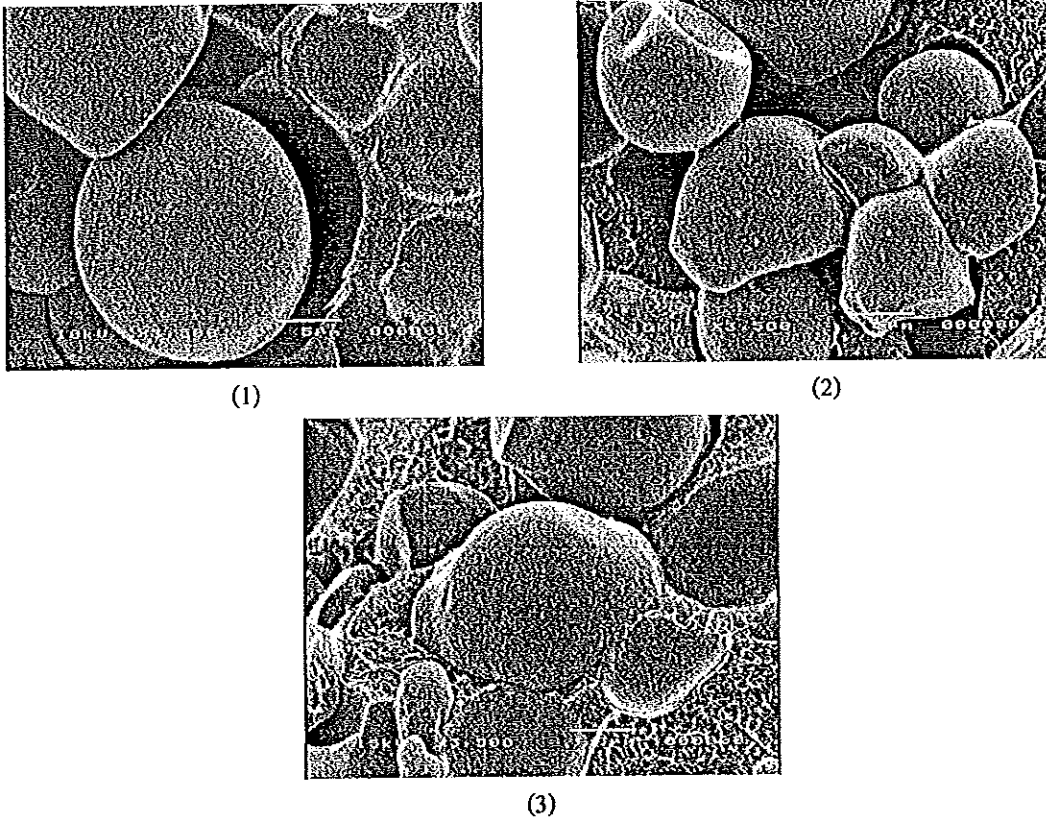


รูปที่ 5 อิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้น ณ จุดขาด ความเครียด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจากตัวควบคุม เมื่อเติมตัวริเริ่มในสัดส่วนที่เหมาะสม และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมตัวริเริ่ม เป็นผลของการเกิดกิริยาการกราฟที่โคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างเฟสของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากการเติมตัวริเริ่มทำให้เกิดฟรีเรดิคัลบนสายโซ่โมเลกุลแป้งและพอลิเอทิลีน ส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสทั้งสองเพิ่มขึ้น (Moad (1999)) ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าตัวควบคุม ดังนั้นการใช้ทั้งเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มร่วมกันเป็นการช่วยสนับสนุนการผสมแบบรีแอกทีฟ

## 2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

จากลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลังดังแสดงในรูปที่ 6 ช่วยอธิบายผลการทดลองในส่วนของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 6 อิทธิพลของปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม: (1) ตัวควบคุม (Control) (2) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0 phr และ (3) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1 phr

พบว่าไม่มีการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของแป้งกับพอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม สามารถสังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเฟสทั้งสองอย่างชัดเจน อันเป็นผลมาจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างแป้งกับพอลิเอทิลีน โดยแป้งจะเป็นเฟสกระจายในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เมื่อมีการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เพียงอย่างเดียว พบว่าเกิดการเชื่อมติดกันที่ผิวของเม็ดแป้งทำให้แป้งเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน แต่ไม่พบการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของแป้งและพอลิเอทิลีน เป็นผลมาจากโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตก่อให้เกิดฟิสิกัลบนสายโซ่โมเลกุลของเม็ดแป้งเพียงอย่างเดียว De Graaf และ Janssen (2000) จึงทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างของเม็ดแป้งเท่านั้น จากลักษณะดังกล่าวจึงส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมที่เติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่ม

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1 phr พบว่าเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างผิวสัมผัสระหว่างเฟสของเม็ดแป้งกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด

ความเครียด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นและให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสในระหว่างการผสม

#### สรุปผลการทดลอง

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมได้แก่ ค่าความเค้น ณ จุดขาด ค่าความเครียด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะมีค่าลดลงเล็กน้อยจากตัวควบคุมเมื่อใช้ปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์น้อยกว่า 0.1 phr และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 1 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลเหล่านี้มีค่าสูงที่สุด แต่ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อมีการเติมตัวริเริ่ม จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพบรอยต่อระหว่างเฟสของแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบางส่วนได้รับการปรับปรุง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสในระหว่างการผสมเมื่อมีการเติมตัวริเริ่มส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และ โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่สนับสนุนทุนวิจัย สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ และบริษัทเขนเนรัลสตาร์ช ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง

#### เอกสารอ้างอิง

- Chandra, R., Rustgi, R. (1997), Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends, *Polymer Degradation and Stability*, 56, 185-202.
- Cho, C. G., Lee, K. (2002), Preparation of starch-g-polystyrene copolymer by emulsion polymerization, *Carbohydrate polymer*, 48, 125-130.
- De Graaf, R. A., Janssen, L. P. B. M. (2000), The production of a new partially biodegradable starch plastic by reactive extrusion, *Polymer Engineering and Science*, 40(9), 2086-2094.
- Devi, S., Thakor, I. M., Lyer, S., Desai, A., Lele, A. (1999), Morphology, thermomechanical properties, and biodegradability of low density polyethylene/starch blends, *Journal of Applied Polymer Science*, 74(12), 2791-2802.

Maharana, T., Singh, B. C. (2006), Synthesis and characterization of biodegradable polyethylene by graft copolymerization of starch using glucose–Ce(IV) redox system, *Journal of Applied Polymer Science*, 100, 3229–3239.

Moad, G. (1999), The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion, *Progress in Polymer Science*, 24, 81-142.

Panayiotou, C., Thiebaud, S., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Bikiaris, D., Prinos, J. (1997), Properties of fatty-acid esters of starch and their blends with LDPE, *Journal of Applied Polymer Science*, 65(4), 705-721.

Panayiotou, C., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Botev, M., Betchev, C. (1999), Mechanical properties and biodegradability of LDPE blends with fatty-acid esters of amylose and starch, *Journal of Applied Polymer Science*, 71(7), 1089-1100.

M. Sain, M., Suhara, P., Law, S., Bouilloux, A. (2005), Interface modification and mechanical properties of natural fiber–polyolefin composite products, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(2), 121-128.

Shujun, W., Jiugao, Y., Jinglin, Y. (2005), Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends, *Polymer Degradation and Stability*, 87, 395-401.

Taha, I., G. Ziegmann, G. (2006), A Comparison of mechanical properties of natural fiber filled biodegradable and polyolefin polymers, *Journal of Composite Materials*, 40 (21), 1933-1946.

## Mechanical Properties of Cassava Starch blended with Low Density Polyethylene and Potassium Persulfate

*W. Panwiryarat, and V. Tanrattanakul*  
*Bioplastic Research Unit, Polymer Science Program,*  
*Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai,*  
*Songkla, 90112, Thailand*  
*Email: varaporn.1@psu.ac.th*

**Introduction.** In the last three decades there has been tremendous interest in bioplastic and biodegradable polymers. In the beginning, there were many attempts to use starch as a bio-filler in thermoplastic polymers. Starch is used as filler because it is a natural polymer, abundant, inexpensive and a renewable resource. Starch is degraded by microorganisms and is suitable for blending with bioplastics and biodegradable polymers. Low density polyethylene (LDPE) blended with starch has been widely studied [1-22]. Various kinds of starch were used, i.e. wheat starch [1,2,12], corn starch [3,4,6,10,14,16-18,22], potato starch [5,7], cassava starch [9,15,19], rice starch [13] and banana starch [20]. Unfortunately, the mechanical properties of thermoplastic polymer/starch blends are very poor due to the incompatibility and hydrophilic nature of starch. As a result, there were many methods used to improve compatibility between LDPE and starch such as an addition of a compatibilizer [3,4,6,9,10,11,13,15,17,20], preparation of an *in situ* graft copolymer or reactive blends [16], or modification of starch [5,7,11,16,19,22]. Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) and maleic anhydride grafted LDPE were employed as the compatibilizer in LDPE/cassava starch blend [9,15]. Nakamura *et al* [19] used adipate- and acetylated-cassava starch in LDPE/starch blend to improve compatibility of this blend. There was attempt to apply reactive extrusion for linear low density polyethylene blended with starch by using maleic anhydride [23] and dicumyl peroxide with maleic anhydride [24-25]. Graft copolymerization of LDPE onto starch by using glucose-cerium (IV) redox initiator in an aqueous sulfuric acid medium was reported by Maharana and Singh [26]. Potassium persulfate (PPS) was frequently used graft copolymerization between starch and other polymers during polymerization, i.e. methyl methacrylate [27-28] and styrene [29-31]. Benzoyl peroxide (BPO) was used as an initiator for starch-g-poly(methyl methacrylate) [32]. Reactive extrusion of starch blended with styrene monomer and initiators (BPO, PPS and dodecylmercaptane) was reported by Graaf and Janssen [33]. The objective of this work is to increase compatibility of cassava starch/LDPE blend by using PPS as the initiator. It is assumed that reactive blending should be achieved. This experiment was focus on the blend containing 50 % of cassava starch.

**Methods.** Native cassava starch was supplied by General Starch Limited, Thailand. Low density polyethylene (LDPE, EL-Lene®1905F/FA, MI 5.0 dg/min) was produced by Thai Polyethylene (1993) Co. Ltd., Thailand. Potassium persulfate (PPS) produced by Ajax finechem and benzoyl peroxide (BPO) produced by Merck were analytical grade and used as received. Starch was dried at 100 °C for 48 h and kept in a desiccator prior to using. Starch was mixed with PPS aqueous solution in a blender for 3 min at room temperature prior to blending with LDPE by using an internal mixer. Polymer blending was carried out at 120 °C with a rotor speed of 100 rpm for 8 min. The polymer blend consisted of 50/50 by weight of starch/LDPE. Initiator content was based on starch content. Compression molded specimens with thickness of 1 and 3 mm were prepared at 120 °C for 5 min. Specimens were kept in the desiccator before testing. Tensile properties, tear strength and notched Izod impact strength were investigated at 25 ± 2 °C and 50 ± 5 % RH. Tensile and tear testing were operated at the speed of 50 mm/min. SEM micrographs were obtained from the freeze fractured surface.

**Results and Discussion.** Before investigating effect of PPS content on mechanical properties of the starch/LDPE blends, it was necessary to verify that PPS could be used as a single initiator or BPO should be used as a co-initiator. The 50/50 starch/LDPE blends with and without initiators were prepared. Sample nomenclature is identified in Table 1. The 'control' is the blend without any initiator. Tensile properties of the blends are shown in Table 2.



Table 1 Sample nomenclature

Code	PPS (phr)	BPO (phr)
Control	0	0
BPO	0	0.5
PPS	0.5	0
PPS/BPO	0.5	0.5

It is well established that starch decreases tensile strength ( $\sigma_b$ ) and elongation at break ( $\epsilon_b$ ) of the blends and modulus could be increased or decreased with increasing starch content [1,4,6,8,10,13-15,18]. There are few articles showed modulus of the blends [1,17-18]. Therefore, tensile strength and elongation at break were the criteria for comparison. It is observed that elongation at break of all samples is quite low (< 50 %) but all the samples still showed a yield point. The single initiator system lowered elongation at break. The addition of BPO decreased modulus and slightly increased tensile strength while PPS increased modulus and decreased tensile strength. The mixed initiator system slight increased tensile strength and elongation at break. Consequently, the mixed initiator system was selected. It is believed that PPS caused free radicals in on starch molecules and BPO initiated free radicals in LDPE molecules.

Table 2 Tensile properties of the blends (50/50 starch/LDPE) with and without initiators

Code	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
Control	214.4±15.7	6.6±0.3	10.0±0.3	6.2±0.2	38.5±4.5
BPO	160.6±27.8	8.0±0.4	12.8±1.2	8.0±0.5	22.8±1.7
PPS	258.0±27.2	6.5±0.1	8.0±0.6	5.1±0.2	25.1±3.6
PPS/BPO	193.5±21.0	8.5±0.1	14.5±0.7	8.0±0.3	40.3±5.8

Tensile properties of the blends containing various PPS content are listed in Table 3. Except the control sample, all samples consisted of 0.5 phr of BPO. Modulus decreased with addition of initiators, excluding the blend containing 2.00 phr of PPS. The moduli shown in Table 3 are in the same range as reported by Pedroso and Rosa [17-18] and higher than those reported by Psomiadou *et al* [1]. Yield stress seemed to increase with increasing PPS content. Yield strain and tensile strength also increased with the addition of initiators but did not correlate with PPS content. Tensile strength derived in this work was higher than that reported in [1,4,6,8,10,13-15,18]. Changes in elongation at break with increasing PPS content could not make conclusion. The composition of 0.50 phr showed the highest elongation at break. Addition of starch (30-50%) decreased elongation at break of the blends remarkably (< 10%) as reported in [15,17,18]. Notched Izod impact strength and tear strength of the blends are displayed in Table 4. Impact strength slightly decreased with addition of initiators whereas tear strength were in the same range. No report in notched Izod impact strength and tear strength of starch/LDPE blends are found based on literature review. It is unsurprised to obtain low impact strength. This is because starch granules are not both an impact modifier and a reinforcing material. In contrast, the agglomeration of starch granules was attributed to an deterioration in mechanical properties. Noticeably, the present starch/LDPE blends showed higher tensile properties than those reported earlier as mentioned above. Although the sample containing 2.00 phr of PPS exhibited highest modulus and tensile strength but the elongation at break was lowest. The best sample was the one containing 0.50 phr of PPS.

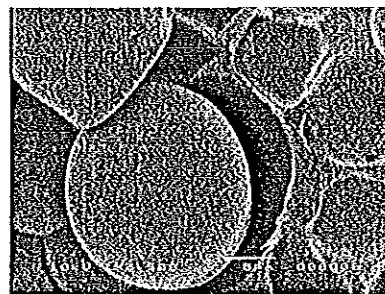
Table 3 Effect of PPS content on tensile properties of the blends (50/50 starch/LDPE) containing 0.5 phr of BPO

PPS (phr)	E (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\sigma_b$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)
Control	214.4±15.7	6.6±0.3	10.0±0.3	6.2±0.2	38.5±4.5
0.00	160.6±27.8	8.0±0.4	12.8±1.2	8.0±0.5	22.8±1.7
0.05	183.2±11.5	8.1±0.2	11.5±0.3	7.3±0.4	18.6±2.2
0.10	131.4±14.7	8.0±0.4	13.4±0.8	7.8±0.3	32.2±2.1
0.50	193.5±21.0	8.5±0.1	14.5±0.7	8.0±0.3	40.3±5.8
1.00	167.5±18.0	9.0±0.4	13.3±0.6	7.3±0.6	21.7±1.8
2.00	339.8±33.28	9.4±0.3	11.8±0.8	9.1±0.4	17.0±3.0

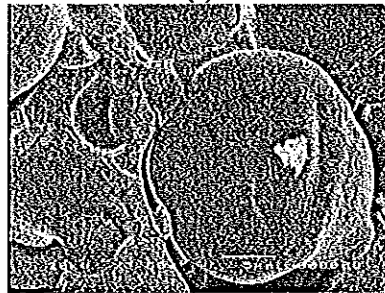
Table 4 Effect of PPS content on notched Izod impact strength and tear strength of the blends (50/50 starch/LDPE) containing 0.5 phr of BPO

PPS (phr)	Izod impact strength (KJ/m <sup>2</sup> )	Tear strength (N/mm)
Control	6.63±0.15	37.06±1.84
0.00	5.22±0.58	40.48±2.80
0.05	2.24±0.20	38.42±2.87
0.10	3.97±0.40	39.96±1.96
0.50	4.67±0.27	38.70±2.91
1.00	2.42±0.25	37.84±1.23
2.00	3.11±0.22	38.49±2.58

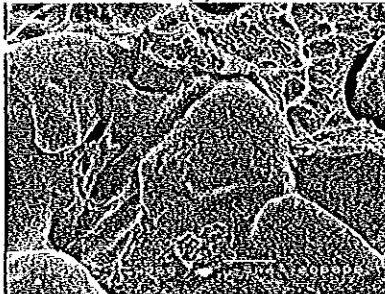
SEM micrographs of the blends show in Fig. 1a - 1c. Obviously, the blend without initiators (Fig. 1a) showed no connection between the starch granules and LDPE matrix. On the other hands, PPS and BPO increased interfacial adhesion between starch and LDPE as shown in Fig. 1b. Further increase PPS content (Fig. 1c) the adhesion between two phases seemed to be higher. Surface of a starch granule and LDPE matrix became one surface as indicated with an arrow. Figure 2 represents the freeze fractured surface of the blend after burying in soil. The biodegraded starch granule was observed. The arrow indicates good adhesion between starch and LDPE.



(a)



(b)



(c)

Figure 1 SEM micrographs of the blends containing different PPS content: (a) 0 phr (control), (b) 0.5 phr and (c) 2 phr. Samples b and c contained 0.5 phr of BPO. The arrows show the connection between a starch granule and LDPE matrix.



Figure 2 SEM micrograph of the blend containing 0.5 phr of BPO and PPS after burying in soil for 6 weeks. The arrow shows the connection between a starch granule and LDPE matrix.

**Conclusion.** The present study shows that the starch/LDPE (50/50) blend was prepared. Tensile properties were higher than those reported earlier. Addition of PPS and BPO slightly increased tensile properties and slightly decreased impact strength of the blends whereas tear strength of the blends was in the same range. SEM analysis indicated good interfacial adhesion between starch granules and LDPE matrix.

#### Acknowledgements

We acknowledge financial support from Graduate school of Prince of Songkla University and the Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST). We would like to thank General Starch Ltd., Thailand for their cassava starch support.

#### References:

- [1] Psomiadou, E.; Arvanitoyannis, I.; Biliaderis, C. G.; Ogawa, H.; Kawasaki, N.; *Carbohydr. Polym.* 1997, 33, 227.
- [2] St-Pierre, N.; Favis, B. D.; Ramsay, B. A.; Ramsay, J. A.; Verhoogt, H.; *Polymer* 1997, 38, 647.
- [3] Prinos, J.; Bikiaris, D.; Theologidis, S.; Panayiotou, C.; *Polym. Eng. Sci.* 1998, 38, 954.
- [4] Bikiaris, D.; Prinos, J.; Koutsopoulos, K.; Vouroutzis, N.; Pavlidou, E.; Frangis, N.; Panayiotou, C.; *Polym. Degrad. Stabil.* 1998, 59, 287.
- [5] Bikiaris, D.; Pavlidou, E.; Prinos, J.; Aburto, J.; Alric, I.; Borredon, E.; Panayiotou, C.; *Polym. Degrad. Stabil.* 1998, 60, 437.
- [6] Panayiotou, C.; Bikiaris, D.; *J. Appl. Polym. Sci.* 1998, 70, 1503.
- [7] Thakore, I. M.; Iyer, S.; Desai, A.; Lele, A.; Devi, S.; *J. Appl. Polym. Sci.* 1999, 74, 2791.
- [8] Raj, B.; Annadurai, V.; Somashekar, R.; Raj, M.; Siddaramaiah, S.; *Eur. Polym. J.* 2001, 37, 943.
- [9] Sailaja, R. R. N.; Chanda, M.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2002, 86, 3126.
- [10] Liu, W.; Wang, Y. J.; Sun, Z.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2003, 88, 2904.
- [11] Kim, M.; *Carbohydr. Polym.* 2003, 543, 173.
- [12] Rodriguez-Gonzalez, F. J.; Ramsay, B. A.; Favis, B. D.; *Polymer* 2003, 44, 1517.
- [13] Wang, Y. J.; Liu, W.; Sun, Z.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2004, 92, 344.
- [14] Raj, B.; Sankar, K. U.; Siddaramaiah, S.; *Adv. Polym. Tech.* 2004, 23, 32.
- [15] Huang, C. Y.; Roan, M. L.; Kuo, M. C.; Lu, W. L.; *Polym. Degrad. Stabil.* 2005, 90, 95.
- [16] Nikazae, M.; Safari, B.; Bonakdarpour, B.; Milani, Z.; *Iran. Polym. J.* 2005, 14, 1050.
- [17] Pedrosa, A. G.; Rosa, D. S.; *Polym. Adv. Technol.* 2005, 16, 310.
- [18] Pedrosa, A. G.; Rosa, D. S.; *Carbohydr. Polym.* 2005, 59, 1.
- [19] Nakamura, E. M.; Cordi, L.; Ameida, G. S. G.; Duran, N.; Mei, L. H. I.; *J. Mater. Process. Technol.* 2005, 162, 236.
- [20] Ratankamnuan, U.; Aht-Ong, D.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 100, 2717.
- [21] Jagannath, J. H.; Nadanasabapathi, S.; Bawa, A. S.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 99, 3355.
- [22] Garg, S.; Jana, A. K.; *Eur. Polym. J.* 2007, 43, 3976.
- [23] Wang, S.; Yu, J.; Yu, J.; *Polym. Int.* 2005, 54, 279.
- [24] Shujun, W.; Jiugao, Y.; Jinglin, Y.; *Polym. Degrad. Stabil.* 2005, 87, 395.
- [25] Shujun, W.; Jiugao, Y.; Jinglin, Y.; *J. Polym. Environ.* 2006, 14, 65.
- [26] Maharana, T.; Singh, B. C.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 100, 3229.
- [27] Fakhru'l-razi, A.; Qudsieh, I. Y. M.; Wan Yunus, W. Md. W.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2001, 82, 1375.

- [28] Qudsieh, I. Y. M.; Fakhru'l-razi, A.; Muyibi, S. A.; Ahmad, M. B.; Rahman M. Z. Ab.; Wan Yunus, W. Md. W.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2004, 94, 1891.
- [29] Cho, G. C.; Kiho, L.; *Carbohydr. Polym.* 2002, 48, 125.
- [30] Fang, J. M.; Fowler, P. A.; Hill, C. A. S.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2005, 96, 452.
- [31] Keawtatip, K.; Tanrattanakul, V.; *Carbohydr. Polym.* 2008, doi:10.1016/j.carbpol.2008.01.006.
- [32] Pimpan, V.; Thothong, P.; *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 101, 4089.
- [33] De Graff, R. A.; Janssen, L. P. B. M.; *Polym. Eng. Sci.* 2000, 40, 2086.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาววรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910220076	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

ทุนผู้ช่วยวิจัย (Research Assistance, RA) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์ และ วราภรณ์ ตันรัตน์กุล. 2551. อิทธิพลของตัวริเริ่มต่อสมบัติเชิงกลและสถานะวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง. บทความคัดย่อจากงานการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี, 14-15 มีนาคม 2551. หน้า 129.

วรรณรัตน์ พันธุ์วิริยรัตน์ และ วราภรณ์ ตันรัตน์กุล. 2551. Mechanical Properties of Cassava Starch Blends with Low Density Polyethylene and Potassium Persulfate. บทความคัดย่อจากการประชุมวิชาการนานาชาติ (The 42<sup>nd</sup> World Polymer Congress (MACRO 2008). ณ Taipei International Convention Center (TICC) กรุงไทเป ประเทศไต้หวัน, 29 มิถุนายน – 4 กรกฎาคม 2551. หน้า 90.