



การเตรียมและการวิเคราะห์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยธรรมชาติ
**Preparation and Characterization of Natural Fiber –Thermoplastic Cassava
Starch Biodegradable Polymer Composites**

พันธ์ฐิณี สมวงศ์ษา
PHUNTHINEE SOMWONGSA

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University
2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการวิเคราะห์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้
ทางชีวภาพเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยธรรมชาติ
ผู้เขียน นางสาวพันธัญญ์ณี สมวงศ์ษา
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตน์กุล)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตน์กุล)
..... (ดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต) กรรมการ (ดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต)
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์)กรรมการ (ดร.อศิรา เฟื่องฟูชาติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการวิเคราะห์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยธรรมชาติ
ผู้เขียน	พันธรัฐณี สมวงค์ษา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เส้นใยธรรมชาติ และสารเติมแต่ง คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และแป้งท้าวยายม่อม โดยแมทริกซ์ (matrix) ที่ใช้ คือ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่อะซิเตท และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ออกทิลซัคซิเนต โดยมีสารเสริมแรง (reinforcing agent) สองชนิดคือ เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยยูคาลิปตัส ทำการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณแป้งร้อยละ 70-80 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณสารเสริมแรงร้อยละ 5-15 (โดยน้ำหนัก) สารเติมแต่งร้อยละ 5-20 (โดยน้ำหนัก) และปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20-30 (โดยน้ำหนัก) โดยขั้นตอนแรกผสมแป้งและกลีเซอรอล เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการขึ้นรูป จากนั้นทำการผสมกับสารเสริมแรงและสารเติมแต่ง ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 77:23 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูป จากนั้นเติมเส้นใยลงในส่วนผสมดังกล่าว พบว่า อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลต่อเส้นใยยูคาลิปตัส เท่ากับ 67:23:10 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ไม่ได้เติมเส้นใย ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าที่อัตราส่วนที่ดีที่สุดสำหรับแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 90:10 ที่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต และค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น 2-3 % นอกจากนี้ แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมแป้งท้าวยายม่อมทุกอัตราส่วนให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต ในการทดสอบการย่อยสลายแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับพลาสติกทางการค้าคือพอลิเอทิลีน พบว่า แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน

Thesis Title Preparation and Characterization of Natural Fiber –Thermoplastic Cassava Starch Biodegradable Polymer Composites
Author Miss Phunthinee Somwongsa
Major Program Polymer Science and Technology
Academic Year 2011

ABSTRACT

Natural fiber–thermoplastic starch biodegradable polymer composites have been prepared and characterized. The composites were composed of cassava starch, natural fiber and additives (poly(vinyl alcohol)) and arrow root starch. Three types of cassava starch were employed including native starch, acetate starch and octenyl succinate starch. Coconut fiber and eucalyptus fiber were used as a reinforcing agent. Thermoplastic starch and thermoplastic starch composite were prepared by using a twin screw extruder. Glycerol was used as a plasticizer. The studied parameters included the content of starch (70-80 wt.%), glycerol (20-30 wt.%), fiber (5-15 wt.%) and additive (5-30 wt.%). The first step was determination of the optimized ratio between starch and glycerol to obtain good extrusion. It was found that the ratio of starch:glycerol at 77:23 gave the best thermoplastic starch. The second step was a preparation of the thermoplastic starch composite. It was observed that the thermoplastic starch composite with a ratio of starch:glycerol:fiber at 67:23:10 yielded higher stress at break than that of the thermoplastic starch. The last step was mixing the thermoplastic starch composites with poly(vinyl alcohol) or arrow root starch. The results showed that the optimization ratio of fiber reinforced thermoplastic starch : poly(vinyl alcohol) at 90:10 provided lower water vapor absorption and higher stress at break about 2-3 % and all ratio of fiber reinforced thermoplastic starch mixed with arrow root starch gave lower water vapor absorption compared to the fiber reinforced thermoplastic starch. The biodegradation by microorganisms experiment was carried out. The thermoplastic starch composite containing poly(vinyl alcohol)) or arrow root starch demonstrated higher efficiency in biodegradation of the microorganism decomposition than that of a commercial polyethylene.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ตันรัตนกุล ผศ.ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาแนะนำแนวทางในการทำวิจัย และคอยให้คำปรึกษาที่ดี โดยตลอดมา ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์ ที่กรุณารับเป็น ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ดร.อศิรา เฟื่องฟูชาติ และดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต ที่รับเป็นกรรมการสอบและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนทุนโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการภาคีบัณฑิต สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องอัดรีดชนิด สกรูคู่ในการทำวิจัย และต้องขอขอบพระคุณบริษัทเยื่อกระดาษไทยที่เอื้อเฟื้อ และให้ความอนุเคราะห์เยื่อคาลิปัตสในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณแม่บุญเจือ สมวงศ์ษา และญาติพี่น้อง ที่ให้ทั้งกำลังใจที่ดี และกำลังทรัพย์สนับสนุนการศึกษา และคอยเป็นที่ปรึกษาปัญหาต่างๆเป็นอย่างดี และขอขอบคุณน้องๆ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และน้องๆที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการเรียน นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณณัชชยาตา หมวกทอง และคุณอมรรัตน์ ทองน้อย ที่ให้ที่พักอาศัยตลอดจนกำลังใจและให้คำปรึกษาในการเรียน ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ ที่ให้กำลังใจและช่วยในการให้คำปรึกษา และสุดท้ายขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ตั้งแต่เริ่มเรียนรู้อันจนถึงปัจจุบันนี้

พันธัญณี สมวงศ์ษา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการรูป	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	6
2.2 สารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติก	23
2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	26
2.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	
2.5 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	36
2.6 การตรวจสอบเอกสาร	37
3. วิธีการวิจัย	43
3.1 สารเคมี	43
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	44
3.3 วิธีการทดลอง	46
3.3.1 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว	46
3.3.2 การเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก	46
3.3.3 การเตรียมแป้งเสริมแรงด้วยเส้นใย	47
3.3.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	47
3.4 วิธีวิเคราะห์ ทดสอบ	48
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	48
4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ	52
4.1.1 แป้งดิบและแป้งดัดแปร	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยสำหรับเสริมแรง	57
4.2 ผลการวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติก	58
4.2.1 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค FTIR	58
4.2.2 ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค XRD	61
4.2.3 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก	63
4.2.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติก	64
4.3 ผลการวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	65
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM	65
4.3.2 ผลวิเคราะห์เทคนิค FTIR	68
4.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยเทคนิค XRD	69
4.3.4 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	71
4.3.5 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	73
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป้งท้าวยาย่ม่อม	75
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM	75
4.4.2 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ	79
4.4.3 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA และแป้ง Ar ด้วยเทคนิค FTIR	81
4.4.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึง	83
4.4.5 ผลการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	89
5. สรุปผลการทดลอง	91
5.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ	91
5.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งดิบและแป้งดัดแปร	91
5.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดิบและแป้งดัดแปร	91
5.2 ผลการตรวจวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติก	91
5.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติก	91
5.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก	92
5.2.3 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยึดของแป้งเทอร์โมพลาสติก	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	92
5.3.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM	92
5.3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	92
5.3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยเทคนิค XRD	92
5.3.4 ทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	92
5.3.5 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต	93
5.4 ผลการวิเคราะห์ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์หรือแป้งท้าวยาย่ม่อม	93
5.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM	93
5.4.2 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ	93
5.4.3 ผลวิเคราะห์หุ้ผึ้งกัซันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์หรือแป้งท้าวยาย่ม่อม	93
5.4.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึง	94
5.4.5 ผลทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	101
ประวัติผู้เขียน	112

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงปริมาณและมูลค่าส่งออกแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ จำแนกตามประเภทสินค้า	2
2.1 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	8
2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	10
2.3 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ	11
2.4 สัญลักษณ์แสดงการรับรองผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้ มาตรฐานสากล	37
3.1 รายชื่อสารเคมี	43
4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้ง NST NE และ OP ด้วยเครื่อง FTIR	54
4.2 ปริมาณผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD	63
4.3 ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST เสริมแรงด้วย เส้นใยยูคาลิปตัสในปริมาณต่างกันและเส้นไหมมะพร้าว	72
4.4 ผลการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิท ผสม PVA หรือแป้ง Ar	90

รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างในเม็ดแป้ง	6
2.2 โครงสร้างของอะมิโลส	6
2.3 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	8
2.4 โครงสร้างสายโซ่ของอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน	9
2.5 การพองตัวของเม็ดแป้ง	13
2.6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	14
2.7 DSC thermogram ของแป้ง	16
2.8 การคืนตัวของแป้ง	17
2.9 ปฏิกริยาระหว่างแป้งกับอะซิดิกแอนไฮไดรต์ ได้เป็นแป้งอะซิเตรท	21
2.10 ปฏิกริยาระหว่างแป้งกับไวนิลอะซิเตรท ได้เป็นแป้งอะซิเตรท	21
2.11 ปฏิกริยาการสังเคราะห์แป้งออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮไดรต์	22
2.12 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล	24
2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลอัลกอฮอล์	25
2.14 รูปแบบการผสมของเส้นใย	27
2.15 กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์	32
3.1 ภาพเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	44
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	44
3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	45
3.4 เครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	45
3.5 ภาพพื้นที่แสดงส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นกึ่งผลึก	49
4.1 โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง NST (ก) อะมิโลส และ (ข) อะมิโลเพกทิน	52
4.2 โครงสร้างของแป้งตัดแปร (ก) แป้ง NE และ (ข) แป้ง OP	52
4.3 FTIR สเปกตรัมของตัวอย่างแป้งสามชนิด คือ NST, NE และ OP	53
4.4 FTIR สเปกตรัมของแป้งที่แปรปริมาณอะซิเตรทสามชนิด คือ SS SMS FT และ NE	55
4.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างแป้ง NST NE และแป้ง OP จากเทคนิค XRD	56

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้ง (ก) NST (ข) NE และ (ค) OP ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (ก) พื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง	56
4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (ก) พื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง	57
4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพแล้ว (ก) ถ่ายที่กำลังขยาย 250 เท่า และ (ข) ถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า	57
4.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยยูคาลิปตัสที่ปรับสภาพและฟอกขาว (ก) ถ่ายที่กำลังขยาย 250 เท่า และ (ข) ถ่ายที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	58
4.10 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST Gly และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST ที่อัตราส่วนแป้ง NST:Gly เท่ากับ 77:23 75:25 และ80:20	59
4.11 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NE Gly และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NE ที่อัตราส่วนแป้ง NE: Gly เท่ากับ 70:30 77:23 75:25 และ80:20	60
4.12 FTIR สเปกตรัมของแป้ง OP Gly และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด OP ที่อัตราส่วนแป้ง OP: Gly เท่ากับ 70:30 77:23 75:25 และ80:20	60
4.13 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง NST บริสุทธิ์ และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST ที่อัตราส่วน NST : Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77 :234.8	61
4.14 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง NE และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NE ที่อัตราส่วนแป้ง : Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77 :23	62
4.15 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง OP และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด OP ที่อัตราส่วนแป้ง : Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77 :23	62
4.16 ผลการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่แปรชนิดของแป้ง ที่อัตราส่วน 75:25 และ 77:23	64
4.17 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 77:23	65
4.18 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 77:23	65

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.19 ภาพ FESEM ภาพตัดขวางของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสที่ปริมาณร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 และ(ค)15	66
4.20 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ร้อยละ 5 (ก) เส้นใยมะพร้าวไม่พอกขาว และ(ข) เส้นใยมะพร้าวพอกขาว	67
4.21 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิท เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ: 10 (ก) แป้ง SS และ (ข) แป้ง SMS FT	68
4.22 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิท เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ: 10 (ก) แป้ง NE และ (ข) แป้ง OP	68
4.23 FTIR สเปกตรัมของเส้นใยยูคาลิปตัส แป้งเทอร์โมพลาสติก NST และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิท	69
4.24 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 และเส้นใยยูคาลิปตัส	70
4.25 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยยูคาลิปตัส ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 5 และเส้นใยยูคาลิปตัส	70
4.26 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยยูคาลิปตัส แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด NE และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด OP ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 10	71
4. 27 อิทธิพลชนิดแป้งต่อค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทผสมเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 10	72
4.28 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทที่มีปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 5 10 และ15	73
4.29 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทที่มีปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 5 10 และ15	74

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.30 ความเค้น ณ จุดขาด ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีการแปรชนิดของแปรงตัดแปร	75
4.31 ความเครียด ณ จุดขาด ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีการแปรชนิดของแปรงตัดแปร	75
4.32 ภาพถ่าย FESEM ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรง ด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ (ก) 5 (ข) 10 และ(ค) 15	76
4.33 ภาพ FESEM ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสคอมโพสิตผสมแปรง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ (ก) 10 (ข) 20 และ(ค) 30	77
4.34 ภาพถ่าย FESEM ของแปรงตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (ก) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SS (ข) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SMS FT	77
4.35 ภาพถ่าย FESEM ของแปรงตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (ก) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NE (ข) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด OP	78
4.36 ภาพถ่าย FESEM ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยยูคาลิปตัสผสมแปรง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 (ก) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SS (ข) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SMS FT	78
4.37 ภาพถ่าย FESEM ของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยยูคาลิปตัสผสมแปรง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 (ก) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NE (ข) แปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด OP	79
4.38 ค่าการดูดซึมน้ำของแปรงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผสม PVA หรือแปรง Ar	79
4.39 ค่าการดูดซึมน้ำของแปรงตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA	80
4.40 ค่าการดูดซึมน้ำของแปรงตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตแปรง Ar	81
4.41 FTIR สเปกตรัมของแปรง NST บริสุทธิ์ PVA และแปรงเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสม PVA	82
4.42 FTIR สเปกตรัมของแปรง NST บริสุทธิ์ PVA แปรงเทอร์โมพลาสติกชนิด NST NE และOP คอมโพสิตผสม PVA	82

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.43 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST บริสุทธิ์ แป้ง Ar และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพลีผสมแป้ง Ar	83
4.44 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพลีผสม PVA ที่แปรค่า PVA ร้อยละ 5 10 และ 15	84
4.45 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพลีผสม PVA ที่แปรค่า PVA ร้อยละ 5 10 และ 15	84
4.46 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพลีผสมแป้ง Ar ที่แปรค่า Ar ร้อยละ 10 20 และ 30	85
4.47 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST ผสมแป้ง Ar ที่แปรค่า Ar ร้อยละ 10 20 และ 30	85
4.48 ความเค้น ณ จุดขาด แป้งเทอร์โมพลาสติกผสม PVA ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10	86
4.49 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีผสม PVA ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10	87
4.50 ความเค้น ณ จุดขาด แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีแป้ง Ar ที่แปรค่าแป้ง Ar ร้อยละ 10 20 และ 30	88
4.51 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีผสมแป้ง Ar ที่แปรปริมาณแป้ง Ar ร้อยละ 20	88

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
NST	Native Starch	แป้งมันสำปะหลังดิบ
SS	Low Acetate Starch	แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ต่ำ
SMS	Medium Acetate Starch	แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ปานกลาง
NE	High Acetate Starch	แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่สูง
OP	Octenyl succinate Starch	แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ ออกทีนิลซัคซิเนต
Ar	Arrowroot starch	แป้งท้าวยายม่อม
Gly	Glycerol	กลีเซอรอล
PVA	Polyvinyl alcohol	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
Eu	Eucalyptus	เยื่อยูคาลิปตัสฟอกขาว
Co	Coir	เส้นใยมะพร้าว
NbCo	Non bleach coir	เส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาว
BCo	Bleach coir	เส้นใยมะพร้าวฟอกขาว
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
NaOCl	Sodium hypochlorite	โซเดียมไฮโปคลอไรท์
HNO ₃	Nitric acid	กรดไนตริก
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
XRD	X-ray diffractometer	เครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
KB	Potassium bromide	โพแทสเซียมโบรไมด์
PE	Poly(ethylene)	พอลิเอทิลีน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
°C	degree celsius	องศาเซลเซียส
g	gram	กรัม
%	percent	ร้อยละ
hr	hour	ชั่วโมง
min	minute	นาที
M	molar	โมลาร์
kg	kilogram	กิโลกรัม
rpm	round per minute	รอบต่อนาที
mm	millimeter	มิลลิเมตร
mm/min	millimeter per minute	มิลลิเมตรต่อนาที

บทที่ 1

บทนำ

พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มาหลายสิบปี นับจากมีการค้นพบพลาสติกตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน เช่น เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ยารักษาโรค ภาชนะบรรจุอาหารและยานพาหนะ เนื่องจากพลาสติกสามารถปรับแต่งสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน ราคาถูกและอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อมีความต้องการใช้งานในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้เกิดผลกระทบตามมาทั้งเรื่องการจัดทิ้งที่ทุกประเทศประสบปัญหา เรื่องพื้นที่สำหรับการฝังกลบที่ต้องใช้เวลาหลายร้อยปีในการย่อยสลาย กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้ต้นทุนสูงและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ แหล่งวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียมเริ่มลดลง พร้อมกับราคาที่สูงขึ้น ในปัจจุบันจากปัญหาเหล่านี้ทำให้มีการศึกษาวิจัยพลาสติกชนิดใหม่ที่หาทดแทนได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พลาสติกชนิดใหม่ หรือที่รู้จักกันในชื่อว่า พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติ หรือสังเคราะห์จากปิโตรเคมีที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือโดยการฝังกลบ แหล่งวัตถุดิบที่นำมาเป็นสารตั้งต้นเช่น แป้งผลิตจากข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นต้น

แป้งมันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับสามของไทยรองจากข้าวและยางพารา ที่มีปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปี แสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีราคาถูก แป้งมันสำปะหลังมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อะมิโลส และอะมิโลเพกติน ทำให้แป้งมีโครงสร้างเป็นแบบสัณฐาน และอสัณฐาน มีสมบัติชอบน้ำ มีความเหนียวสูง เปราะ แตกหักง่าย สามารถคืนกลับสภาพได้ ดังนั้น การนำแป้งมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบ สำหรับผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะต้องมีกระบวนการที่ทำให้เม็ดแป้งหลอมตัวก่อนที่จะสลายตัว เนื่องจากเม็ดแป้งมีอุณหภูมิหลอมตัวที่ 220-265°C อุณหภูมิสลายตัวอยู่ที่ 220°C ส่งผลให้เม็ดแป้งสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว แต่การผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ในสถานะที่มีความร้อน ความดัน และแรงเฉือน หรือที่เรียกว่า แป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการหลอมหรือ การให้ความร้อนเข้าช่วย อย่างไรก็ตาม แป้งเทอร์โมพลาสติก มีข้อจำกัดในเรื่อง ความไวต่อความชื้น ความยืดหยุ่น เปราะ แตกหักง่าย และความคงทนต่อความร้อน ดังนั้น การนำแป้งเทอร์โมพลาสติก มาใช้งานจึงต้องมีการ

ปรับปรุงสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของเม็ดแป้ง การผสมทางกายภาพระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติกกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติก อีกวิธีหนึ่งคือการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ เช่น ป่าน ปอ เซลลูโลส ยูคาลิปตัส ไยมะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีน้ำหนักเบา ราคาถูก มีปริมาณมาก หาทดแทนได้ง่าย และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อแมทริกซ์ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแมทริกซ์ดีขึ้น นอกจากนี้ การเสริมแรงด้วยเส้นใยยังช่วยปรับปรุงสมบัติได้หลายประการ เช่น ความสามารถในการทนความร้อน การลดอัตราการดูดซับความชื้น เป็นต้น

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าส่งออกแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ จำแนกตามประเภทสินค้า

รายการ	ปริมาณและมูลค่าส่งออก (ปริมาณ : ตัน มูลค่า : ล้านบาท)					
	2553		2554		2555 (ถึงเดือน มี.ค.)	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
แป้งมันสำปะหลัง	1,740,805.7	24,552.7	1,888,147.1	28,238.1	506,875.4	7,352.3
มันสำปะหลังอัดเม็ด	156,069.3	785.1	36,694.2	283.9	2,016.4	15.5
สา쿠ที่ทำจากแป้งมัน	25,005.7	560.9	30,892.5	675.8	5,675.4	138.9
กากมันสำปะหลัง	537,272.1	1614.3	421,532	1,969	149,189	652
มันเส้น	4,116,726	25,192.5	369,351.6	29,252.1	1,036,969.6	7,961.7

(http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php., 2555)

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาแป้งเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดยใช้เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยมะพร้าว เป็นสารเสริมแรง มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในแป้ง นำไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA) และแป้งทำวยายม่อม (arrow root starch, Ar) เป็นสารเติมแต่งในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ลดความชอบน้ำ โดยใช้กระบวนการอัดรีดด้วยความร้อน เป็นเทคนิคในการผสมแป้งเทอร์โมพลาสติก และสารเติมแต่งให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งเทอร์โมพลาสติก ระหว่างแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปร และกลีเซอรอล
2. เพื่อศึกษาการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ในข้อ 1 ผสมกับพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ หรือแป้งท้าว ยายม่อม มีเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยยูคาลิปตัสเป็นสารเสริมแรง
3. เพื่อศึกษาสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.3 ขอบเขตการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแป้งเทอร์โมพลาสติก ระหว่างแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ปริมาณร้อยละ 70-80 (โดยน้ำหนัก) ต่อปริมาณกลีเซอรอล ร้อยละ 20-30 (โดยน้ำหนัก)
2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1 ต่อสารเสริมแรงโดยใช้ เส้นใยมะพร้าว และ เส้นใยยูคาลิปตัสเป็นสารเสริมแรง ปริมาณเส้นใยร้อยละ 5-15 (โดยน้ำหนัก)
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2 ต่อสารเติมแต่งคือ พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ และแป้งท้าว ยายม่อม ปริมาณสารเติมแต่งร้อยละ 5-30
4. ตรวจสอบคุณลักษณะและทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยยูคาลิปตัส เส้นใยมะพร้าว แป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared analysis, FTIR)
 - ตรวจสอบลักษณะพื้นฐานของเส้นใยยูคาลิปตัส เส้นใยมะพร้าว แป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscop, FESEM)
 - วิเคราะห์ปริมาณผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)
 - ทดสอบหาค่าสมบัติการทนต่อการดึง

- ทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกและแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- ทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการทดสอบที่ดัดแปลงมาจากวิธี Static-Incubation Titrimetric Determination

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดใหม่ ที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยธรรมชาติ และ พอลิไวนิลอัลกอฮอล์
2. ได้แนวทางในการขึ้นรูปแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยเครื่องอัดรีด
3. ได้แนวทางในการเพิ่มมูลค่าแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2550)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ด และหัว แหล่งที่นำมาใช้ผลิตในทางการค้าได้มาจากเมล็ดพืช (ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี และข้าว) แป้งบางชนิดได้มาจากราก (มันเทศ มันสำปะหลัง และต้นท้าวยายม่อม) และได้จากเนื้อเยื่อส่วนในของต้นปาล์มสาแคว เนื่องจากสภาพการปลูกพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันจึงทำให้แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดมีรูปลักษณ์ องค์ประกอบ และสมบัติแตกต่างกัน เพราะฉะนั้นการอธิบายจึงต้องบอกแหล่งที่มาของแป้งแต่ละชนิดเช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันเทศ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวสาลี เป็นต้น

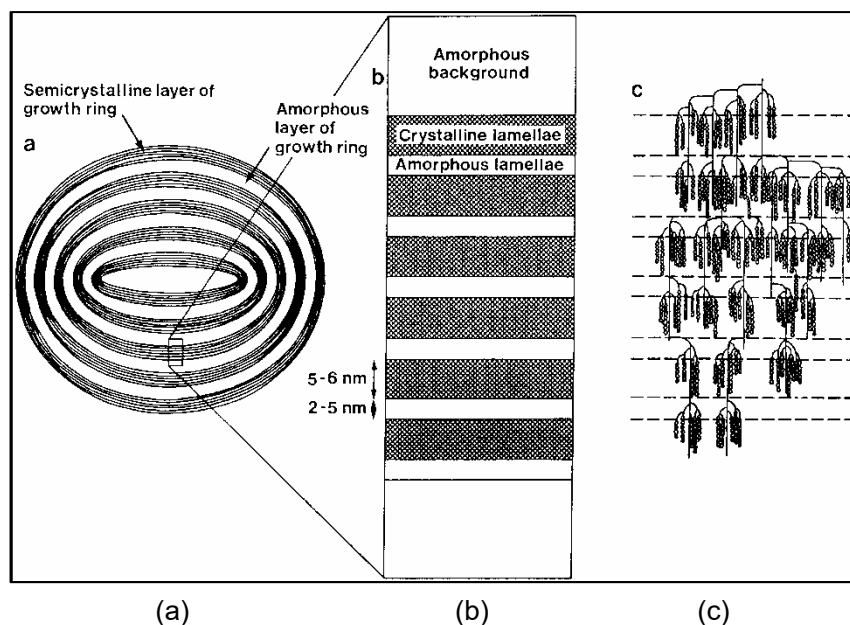
แป้งในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง ก็จะจัดอยู่ในประเภทฟลาวัวร์ เรียกว่า corn flour และ wheat flour แต่เมื่อโปรตีน ไขมัน และเกลือแร่ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (starch) เช่น corn starch และ wheat starch เป็นต้น

สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตในประเทศไทย ปัจจุบันผลิตโดยกรรมวิธีที่ทันสมัย มีความบริสุทธิ์ของแป้งสูง จัดเป็นแป้งสตาร์ช (cassava starch) แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการดัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่าแป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งตรงกันข้ามกับแป้งที่ถูกดัดแปรหรือแปรรูปแล้วที่เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch) หรือแป้งดัดแปร

2.1.1 องค์ประกอบภายในของแป้ง

แป้งประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ($C_6H_{10}O_5$) แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น

(อะมิโลส, amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน, amylopectin) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งในรูปที่ 2.1

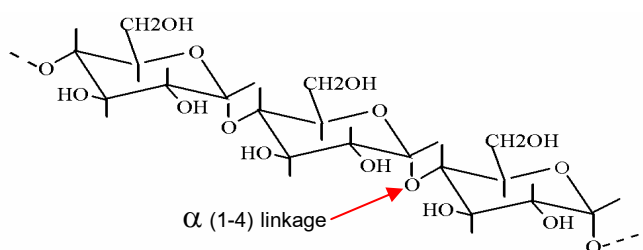


รูปที่ 2.1 โครงสร้างในเม็ดแป้ง (a) เม็ดแป้งที่ประกอบด้วยวงปีกิ่งอสังฐานและวงปีสังฐาน สลับกัน (b) ภาพขยายของวงปีกิ่งอสังฐานประกอบด้วยชั้นสังฐานและชั้นอสังฐาน (c) โครงสร้างของอะมิโลเพกทินที่มีวงปีกิ่งอสังฐาน (Jenkins *et al.*, 1995)

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย 1) อะมิโลส 2) อะมิโลเพกทิน 3) สารตัวกลาง (intermediate material) และ 4) ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

1) อะมิโลส (amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด แอลฟา-1, 4 (α -1, 4) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลส

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาคร มีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียวไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) มีอะมิโลสสูงถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกันมาก แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง มีขนาดโมเลกุลอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 ดาลตัน สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 ดาลตัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านสาขาอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆ ชนิด แสดงในตารางที่ 2.1 อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และ สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บีวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายน้ำ โดยอะมิโลสจะเข้าไปพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ (Galliard and bowler, 1987) นอกจากนี้ อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สารสีน้ำเงินเกิดขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส

2) อะมิโลเพกทิน (amylopectin)

อะมิโลเพกทิน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาของพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 ดังรูปที่ 2.3 หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทิน ประกอบด้วยสายไซโซ (chain) 3 ชนิด คือ

1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)

2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8 - 0.9:1

3) สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส (กล้านรงค์ และเกี๋ยกุล, 2550)

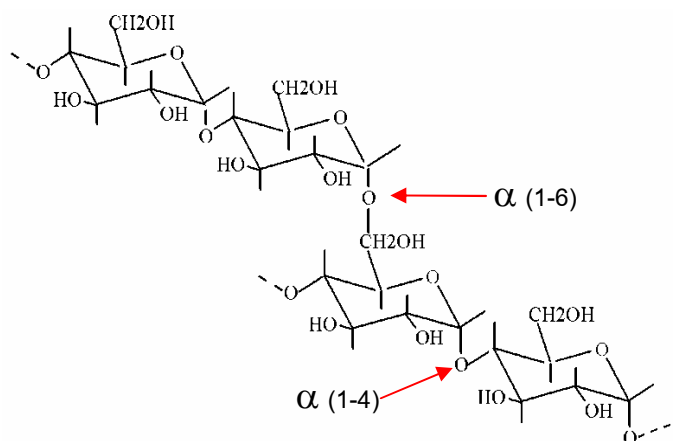
แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (%)	β -Amylolysis Limit (%)	ขนาดโมเลกุล(DPเฉลี่ย)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
อินดิกา (Indica)	-	73	1,000	4.0	250	49
จาโปนิก (Japonica)	-	81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	-

หมายเหตุ : β -Amylolysis = % การย่อยแป้งโดย β -Amylase

DP = Degree of Polymerization

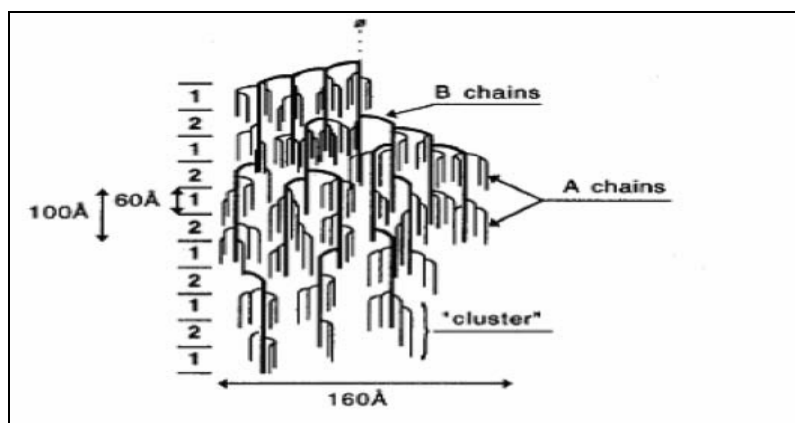
NC = Average number of chain

CL = Average chain length



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างละเอียดของอะมิโลเพกทิน โดยการย่อยอะมิโลเพกทินด้วยเอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่งและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบการแลกเปลี่ยนประจุแอนไอออน (anion-exchange chromatography) พบว่าขนาดของสายโซ่ในโครงสร้างอะมิโลเพกทินจะมีตั้งแต่ขนาดโมเลกุลเล็ก (DP 6) จนถึงขนาดโมเลกุลใหญ่ (DP 50-60) ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) (Robin *et.al.*, 1974) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะมิโลเพกทินโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และเบต้าอะมิเลส (β -amylase) ย่อยอะมิโลเพกทินจากมันฝรั่ง แสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (crystalline region) ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อมแสดงส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสายโซ่ของอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน 1 คือ ส่วนผลึก 2 คือ ส่วนอสัณฐาน (Sajilata *et al.*, 2006)

สำหรับอะมิโลเพกทินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายโซ่ส่วนใหญ่ประมาณ 80 - 90% ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีก 10 - 20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อกันของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22- 25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อปฏิกิริยาด้วยกรด และเอนไซม์ การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน (Oates, 1997) สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน (กล้านรงค์ และเกี๋ยกุล, 2550)

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลเพกทิน (%)	ขนาดโมเลกุล (DP)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย (ECL)	ความยาวสายภายในเฉลี่ย (ICL)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83	-	-	-	-	-
อินดิกา (indica, IR36)	-	4,700	21	220	14	6
จาโปนิกา (Japonica)	-	12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว (waxy Rice)	-	18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันฝรั่ง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันสำปะหลัง	83	18,000	21.2	-	-	-

3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะมิโลส

4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

4.1 ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง

4.2 ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์

4.3 ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (internal components) สามารถแยกออกได้ โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และ สารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ (กล้านรงค์ และเก็อกูล, 2550)

ชนิดแป้ง	ความชื้น 65% RH, 20 °C	%ไขมัน	%โปรตีน	%เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	13	0.6	0.35	0.1	0.015
แป้งมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.4	0.08
แป้งสาลี	14	0.8	0.4	0.15	0.06
แป้งมันสำปะหลัง	13	0.1	0.1	0.2	0.01
แป้งข้าวโพดเหนียว	13	0.2	0.25	0.07	0.007
แป้งข้าวฟ่าง	13	0.7	0.3	0.08	ไม่มีรายงาน
แป้งข้าวเจ้า	ไม่มีรายงาน	0.8	0.45	0.5	0.1
แป้งสาคุ	ไม่มีรายงาน	0.1	0.1	0.2	0.02
แป้งข้าวโพดอะมิโลเมส	13	0.4	ไม่มีรายงาน	0.2	0.07
แป้งมันเทศ	13	ไม่มีรายงาน	ไม่มีรายงาน	0.1	ไม่มีรายงาน

1) ไขมัน

ส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1% ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความเหนียวของแป้ง ดังนั้น ในการวิเคราะห์สมบัติของแป้งจะต้องกำจัดไขมันออกจากแป้ง โดยสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือย่อยสลายโดยใช้น้ำย่อยไขมันภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิพิด (glucolipids) ฟอสฟอลิพิด (phospholipids) และไขมันที่อยู่กระจายทั่วไปภายในเม็ดแป้ง โดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวมๆ ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะ และสมบัติของแป้ง โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง เมื่อเกิดฟิล์ม และแป้งเปียกหรือเพสต์ (paste) ไขมันจะรวมตัวกับอะมิโลสเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเฉื่อย (inert complex) ทำให้ฟิล์ม และแป้งเปียกมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่สำหรับไขมันที่รวมตัวเชิงซ้อนกับอะมิโลสจะไม่

ก่อให้เกิดกลิ่น เนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ แบ่งจากธาตุพืช เช่น แป้ง ข้าวโพด และแป้งข้าวสาลี มีกลิ่นแรงกว่าแป้งข้าวโพดเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบของไขมันสูง

2) ไนโตรเจน (โปรตีน)

ภายในแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1% โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของแป้ง คือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาที่ไนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป (โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเช่นนี้เกิดขึ้นกับแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง)

3) เถ้า

แป้งโดยทั่วไปมีสารประกอบอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียมและแคลเซียม

4) ฟอสฟอรัส

แป้งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1% โดยแป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ประมาณ 0.02% ถึง 0.06% และสำหรับแป้งจากพืชหัวและราก เช่น แป้งจากมันฝรั่ง มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสประมาณ 0.03% ถึง 0.4%

2.1.2 โครงสร้างและการรวมตัวของเม็ดแป้ง (วรรณภา, 2552)

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็ก (granule) เมื่อตรวจดูพบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน

เม็ดแป้งจะมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่า ไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) แป้งที่มาจากหัวหรือรากจะมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ 25-50% แป้งจากธัญพืชในส่วนอะมิโลเพกตินจะมีโครงสร้างบางส่วนที่เป็นผลึก และในส่วนอะมิโลสจะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน ส่วนอะมิโลเพกตินจะรวมกันเป็นผลึก ส่วนอะมิโลสจะรวมตัวกันเป็นไขมันเป็น

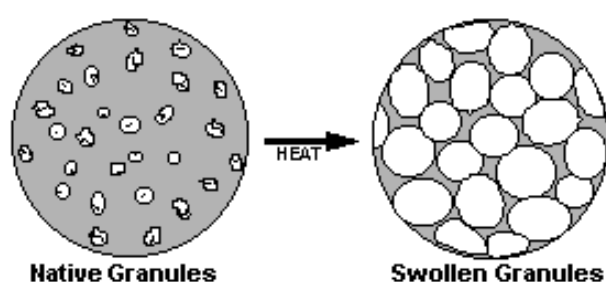
สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งจากธัญพืชพองตัวได้ช้า

2.1.3 สมบัติของแป้ง

(<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2.html>, 2555)

1. การพองตัวและการละลาย (swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วนผลึก (crystallite) โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60°C ขึ้นไป ส่วนอสัณฐานจับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วนผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 2.5 โมเลกุลในส่วนผลึกที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกติน ซึ่งมีขนาดเล็ก และอิสระ กระจายตัวออกจากเม็ดแป้งเมื่อทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก ส่วนผลึกที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น

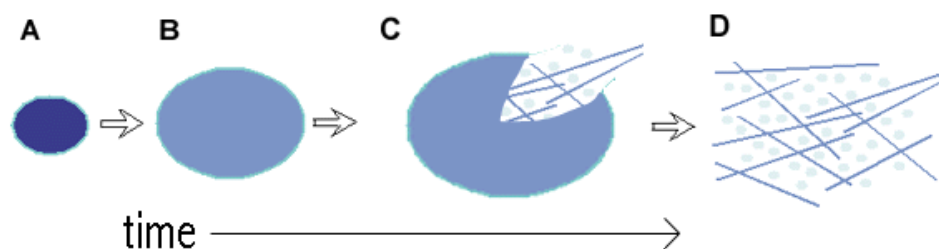


รูปที่ 2.5 การพองตัวของเม็ดแป้ง ([www.opta-food.com/ access/starch2.html](http://www.opta-food.com/access/starch2.html), 2555)

2. การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัด ปริมาณหนึ่งแต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก (Collison, 1968) สังเกตการณ์

พองตัวของเม็ดแป้งสาลีในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะมิโลส และอะมิโลเพกตินในส่วนที่เป็นผลึกจับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบ และมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60°C แก่แป้งสาลีจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนผลึกลดลง แสดงในรูป 2.6 เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้ง และเครื่องหมายกากบาท (maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วนผลึกที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันอาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ที่ห่างกันถึง 8-10°C โดยทั่วไป เม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก (Morrison and Laignelet, 1984; Collison, 1968) แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน (Goering *et.al.*, 1960) แป้งอาจเกิดเจลาติไนซ์ได้ที่อุณหภูมิ 25°C โดยการละลายในตัวทำละลาย เช่น อัลคาไลน์ แอมโมเนียเหลว ไดมเทรล ซัลฟอกไซด์ และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน (www.engin.umich.edu/.../potato/starch3.htm, 2555)

ลำดับการเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วนอสัณฐาน

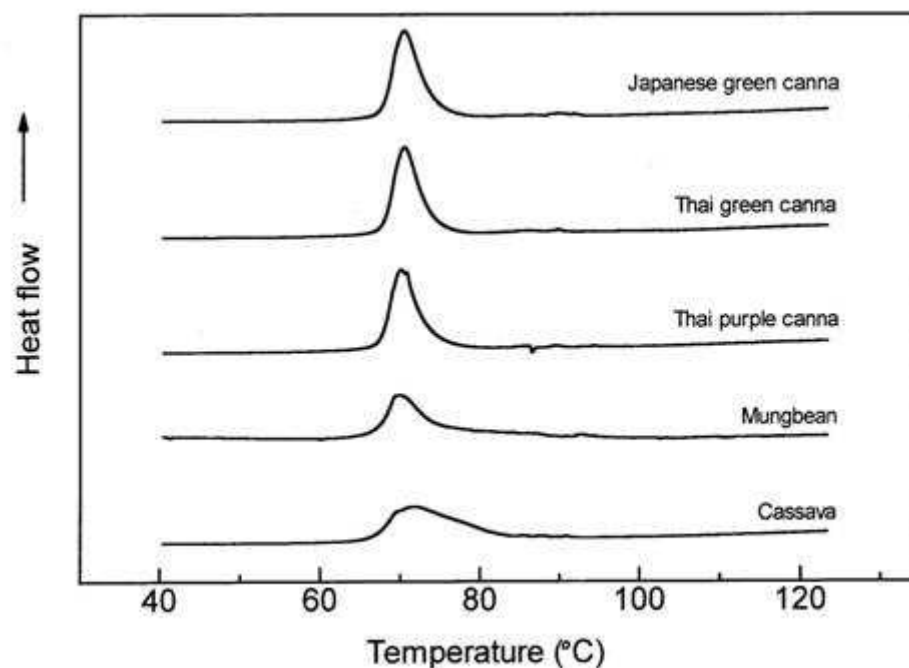
2. การพองตัวจะทำให้เกิดความเครียดต่อผลึกที่อยู่ข้างเคียง ทำให้โครงสร้างผลึกเสียหาย

3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิดการคลายตัวหรือการแตกตัวของเกลียวคู่เกิดการแตกออกของโครงสร้างผลึกของสายโซ่ของอะมิโลเพกตินที่แยกตัวออกมา จะรวมตัวกับน้ำ และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิดความเครียดต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่

4. การเกิดการรวมตัวกับน้ำต่อไปจะเพิ่มความคล่องตัวของโมเลกุล ทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุล โมเลกุลของอะมิโลส ซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจากเม็ดแป้งที่พองตัว (swollen granule) การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งแตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย

วิธีตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ของแป้งวิธีที่ง่าย และแม่นยำคือ วัดอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสูญเสียเครื่องหมายกากบาท เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (kofler hot stage microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนื่อง ในอัตรา 2°C ต่อนาที เมื่อมองผ่านแสงโพลาไรซ์ พบว่าจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เห็นคือเม็ดแป้งประมาณ 2% เริ่มพองตัวและสูญเสียเครื่องหมายกากบาท ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตไนซ์ (initial of gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายกากบาทไป 50% จะเรียกเป็นจุดกลางของเจลลิตไนซ์ (midpoint of gelatinization) และเมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายไปประมาณ 98% จะเรียกเป็นจุดสุดท้ายของเจลลิตไนซ์ (final of gelatinization หรือ completion point) (Schoch and Maywald, 1956; Watson, 1964) ดังนั้น ส่วนใหญ่มักแสดงช่วงอุณหภูมิเจลลิตไนซ์ของแป้งเป็นตัวเลขชุด แต่ถ้าวเป็นอุณหภูมิเดียวมักเป็นจุดสุดท้ายของเจลลิตไนซ์หรือที่เรียกกันว่า birefringence end point temperature (BEPT) นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง birefringence ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ โดยใช้เครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์จะมีโครงสร้างในรูปผลึกและอสัณฐาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (Tm) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลงเมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70% แป้งจะเกิดเจลลิตไนซ์ โดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสูงสุด (peak temperature) คืออุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ สำหรับการตรวจสอบการเกิด เจลลิตไนซ์ของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยการให้

ความร้อนแก่ตัวอย่างแบ่งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลลาติไนเซชัน จะได้เทอร์โมแกรม (thermogram) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความร้อน (heat flow) และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน มีหน่วยเป็น cal/g คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแบ่งตัวอย่าง

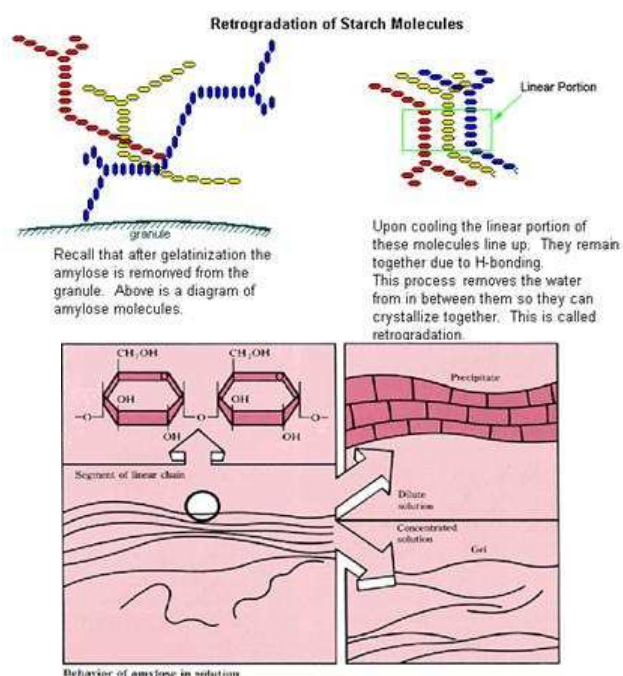


รูปที่ 2.7 DSC thermogram ของแป้ง (<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2.html>, 2555)

3. การคืนตัวของแป้งสุก (retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิต่ำลงโมเลกุลอิสระของอะมิโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน และจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.8 ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction (Collison, 1968) ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมาก และระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงแตกต่างกัน โดยทั่วไป แป้งจากราก และหัวมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก และหัวเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมาก เร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้งยากที่โมเลกุลอะมิโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืชเมื่อได้รับความร้อนพองตัวน้อยกว่าเม็ดแป้งแตกน้อยโมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกัน ทำให้เคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะมิโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็นแมทริกซ์ (matrix) ซึ่งยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะมิโลเพกตินอยู่ด้วย ทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะมิโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะเกาะยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภทไขมัน (waxy) มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสูง ด้วยโมเลกุลอะมิโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะมิโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน



รูปที่ 2.8 การคืนตัวของแป้ง (<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2.html>, 2555)

4. แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS)

(http://rde.biotec.or.th/Starch3_2.pdf, 2555)

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินมีการจัดเรียงตัวกันโดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่าอุณหภูมิสลายตัว (decomposition temperature) ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้นั้นคือถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 256°C) แป้งจะเกิดการเผาตัวไหม้ก่อนการหลอมตัว

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัว และนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆได้ โดยการใช้ความร้อน และความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย อย่างไรก็ตาม แป้งสามารถทำให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้ โดยการใช้สารเติมแต่งหรือพลาสติกไซเซอร์ ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้น แป้งจึงสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆได้ พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยวิธีนี้ เรียกว่า แป้งเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic starch, TPS) ตัวอย่างของ พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในกรณีของแป้งที่เห็นชัดที่สุดคือ น้ำ อย่างไรก็ตาม ในการผลิต TPS นั้น น้ำจัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากน้ำสามารถระเหยและเกิดการสูญเสียออกจาก TPS ได้ ซึ่งจะส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ผลิตขึ้นมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษา พลาสติกไซเซอร์ที่สามารถใช้ในการผลิต TPS มีหลายชนิด ที่นิยมส่วนมากอยู่ในกลุ่มของ พอลิไฮดรอลกอฮอล์ (poly(hydric alcohols)) เช่น กลีเซอรอล เอทิลีนไกลคอล ซอร์บิทอล พอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น

โมเลกุลของแป้งจะมีลักษณะเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ผลิตขึ้นมีความไวต่อความชื้นกล่าวคือ ถ้าเก็บไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง โมเลกุลแป้งจะมีการดูดซับน้ำจากสิ่งแวดล้อมทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะอ่อนตัว และมีสมบัติการดึงยืด (elongation) ได้มากขึ้น ในทางกลับกันหากเก็บไว้ในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำสู่สิ่งแวดล้อมทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะแห้งกรอบและเปราะ (brittle) นอกจากนี้ TPS ยังมีสมบัติไม่ทนน้ำอีกด้วย หากสัมผัสน้ำจะเกิดการพองตัวและละลาย โมเลกุลของแป้งได้ การปรับปรุงสมบัติการทนน้ำให้ดีขึ้น อาจทำได้โดยการผสม TPS กับสารเติมแต่ง เส้นใย พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติทนน้ำหรือทำการดัดแปรโมเลกุลของแป้งให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มากขึ้น

2.1.4 การดัดแปรแป้ง

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมหรือไม่เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติ เช่น แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางอย่างไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรมได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆ ต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิต ดังนั้น จึงมีการดัดแปรสมบัติของแป้งดิบให้เหมาะสมต่อการใช้งาน การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร แบ่งออกเป็นสามกลุ่ม ดังนี้

1. การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) แบ่งออกเป็น

1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

- การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งอะซิเตท (acetate starch) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch)

- การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งคลอสลิง (cross-linked starch)

1.2 การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

1.3 เดกซ์ทรินในเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization/transglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น เดกซ์ทริน (dextrin)

1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) เช่น แป้งออกซิไดส์ (oxidized starch)

1.5 การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้ น้ำย่อยสลาย หรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกรีซท์ทริน (maltodextrin)

2. การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

2.1 เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนกับแป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)

2.2 แป้งละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch, GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

2.3 การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล การทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกล จะ

ได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

2.4 annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาทีไนเซชัน

2.5 การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาทีไนเซชันแก่แป้งในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

3. การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

3.1 waxy starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

3.2 high-amylose starch คือแป้งที่มีอะมิโลสสูง

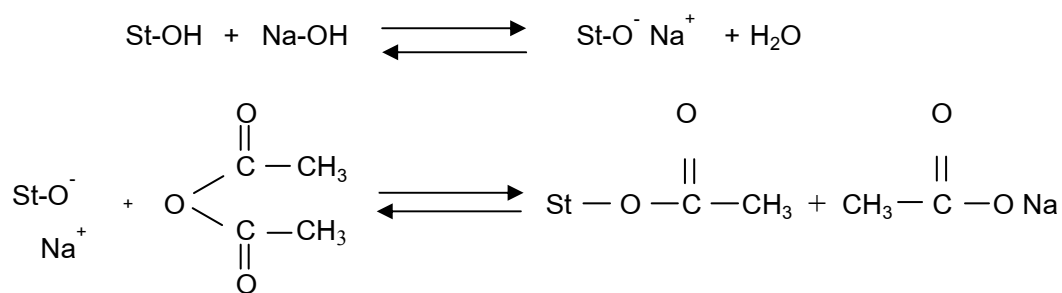
2.1.5 ชนิดของแป้งตัดแปร

1. แป้งอะซิเตท (acetate starch)

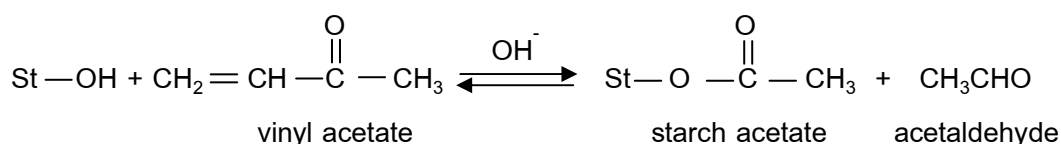
แป้งอะซิเตทเป็นแป้งตัดแปรทางเคมีที่เกิดจากการตัดแปรที่อนุพันธ์ของแป้งที่ได้จากปฏิกิริยาอะซิทิเลชัน (acetylation) ระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่อะซิทิล เช่น อะซิตรีก แอนไฮไดรด์ ไวนิลอะซิเตรท หรือกรดอะซิตรีก หมู่อะซิเตรทที่เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลของแป้งจะยับยั้งการรวมตัวกันของอะมิโลส และอะไมโลเพกทิน ทำให้แป้งสามารถต้านทานการคืนตัวหลังจากการเกิดแป้งเปียกและทำให้เย็นลง แป้งตัดแปรชนิดนี้ใช้เป็นสารให้ความคงตัว (stabilizer) และสารเพิ่มความข้น (thickner) ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผงชูรส ซอส พุดดิ้ง และใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ

สารเคมีที่สามารถใช้ในการตัดแปรแป้งเพื่ออุตสาหกรรมอาหารมี 2 ชนิด ได้แก่ อะซิติกแอนไฮไดรด์ และไวนิลอะซิเตรท โดยอนุญาตให้ใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 7.5 และมีหมู่เอซิทิลไม่เกินร้อยละ 2.5 แป้งตัดแปรที่ได้ต้องมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบที่นำมาตัดแปรและรักษาความหนืดไว้ได้ดี มีลักษณะเจลใส ยืดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีลักษณะอ่อน (cohesive flow) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

ปฏิกิริยาอะซิทิเลชันเกิดขึ้นระหว่างเม็ดแป้ง หรือแป้งที่ผ่านกระบวนการเจลาทีไนซ์แล้วกับสารเคมีโดยใช้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ในการควบคุม pH ในรูปที่ 2.9 เป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับอะซิติกแอนไฮไดรด์ และปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับไวนิลอะซิเตรทแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับอะซิติกแอนไฮไดรด์ ได้เป็นแป้งอะซิเตท (Sanders, 1996)



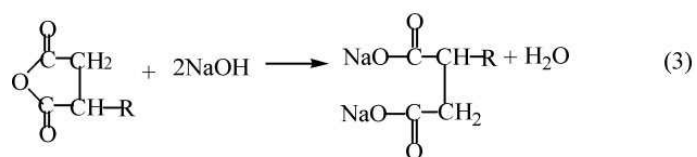
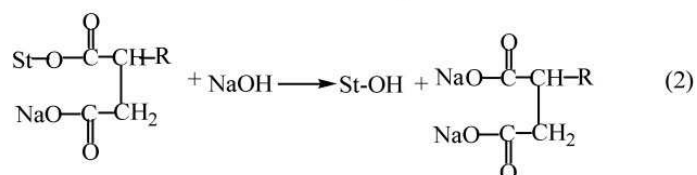
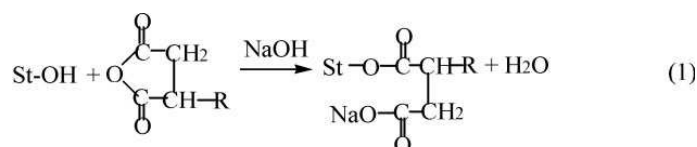
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับไวน์อะซิเตรท ได้เป็นแป้งอะซิเตท (Sanders, 1996)

โครงสร้างของเม็ดแป้งดัดแปรเหมือนกับแป้งดิบ แป้งดัดแปรที่มีสมบัติการละลายได้มากขึ้น ถ้าระดับการแทนที่ของหมู่อะซิทิลเพิ่มขึ้น (Khalil *et al.*, 1995) มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ต่ำลง มีอัตราการคืนตัวลดลง ความหนืดคงที่ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่เกิดการบีบตัวของน้ำออกมานอกเจล (syneresis) และทำให้สีของแป้งไม่ขุ่น फिल्मที่ได้จากแป้งอะซิเตทมีความใส มันเงา ยืดหยุ่นละลายน้ำได้มาก และมีแนวโน้มที่จะแตกน้อยลง ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้แป้งอะซิเตทเป็นส่วนประกอบในอาหารแช่แข็งเนื่องจากแป้งมีสมบัติในการละลายน้ำได้มาก (Aiyeye *et al.*, 1993) แป้งอะซิเตทที่ดัดแปรร่วมกับวิธีโครอสลิงใช้เป็นสารเพิ่มความชื้นในอาหารกระป๋อง อาหารแช่แข็ง อาหารแห้ง เบเกอรี่ อาหารเด็กอ่อน หรือแป้งอะซิเตทที่ดัดแปรร่วมกับการพรีเจลลาติไนเซชัน ใช้สำหรับผลิต น้ำเกรวี่ และพุดดิ้ง เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่น เพิ่มความมันเงา และเนื่องจากแป้งอะซิเตทมีสมบัติในการยึดติดกับเซลลูโลสได้ดี จึงนำมาใช้ในการเคลือบกระดาษซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการพิมพ์ดีขึ้น ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้แป้งอะซิเตทเคลือบเส้นด้าย ทำให้เส้นด้ายแข็งแรง มีความยืดหยุ่น ยืดเกาะกันได้ดี และแยกออกได้ง่าย เนื่องจากละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังมีการผสมแป้งอะซิเตทกับพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตใช้ผลิตน้ำมันชักเงา (Solarek, 1984)

2. แป้งออกทิลซัคซิเนต (Xiaoyan, 2006; Junping, 2009)

แป้งออกทิลซัคซิเนต เป็นแป้งดัดแปรที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Caldwell และ Wurzburg ในปี 1953 และได้จดสิทธิบัตรที่สหรัฐอเมริกา สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) ได้ให้การยอมรับแป้งออกทิลซัคซิเนตที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ในปี 1972 โดยอนุญาตให้ใช้ปริมาณออกทิลซัคซิเนตแอนด์ไฮไดรด์ได้มากที่สุด 3% (degree of substitution, DS) หรือประมาณ 0.02 แป้งออกทิลซัคซิเนตสังเคราะห์ในระบบสารแขวนลอย ปฏิกริยาของการสังเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.11 โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกทำให้เข้าไปในนิวเคลียสของหมู่ไฮดรอกซิล และทำให้ขนาดของแป้งบวมขึ้น แต่โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยาข้างเคียงในตำแหน่งที่ไม่ต้องการได้ หลังจากการดัดแปรแป้งด้วยหมู่ออกทิลซัคซิเนตแอนด์ไฮไดรด์ จะทำให้แป้งมีสมบัติเป็นอิมัลชัน เนื่องจากการเติมหมู่ฟังก์ชันเข้าไปสองหมู่คือ หมู่ที่ชอบน้ำ และหมู่ไม่ชอบน้ำ แป้งออกทิลซัคซิเนต ถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเช่น ซอส พุดดิ้ง และอาหารสำหรับเด็กมากกว่า 30 ปี



รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาการสังเคราะห์แป้งออกทิลซัคซิเนต (Xiaoyan, 2006)

3. แป้งท้าวยายม่อม (arrowroot starch)

(<http://www.thaidesserts.org/seasoning/toeyeymomflour.php>, 2555)

แป้งท้าวยายม่อม คือแป้งที่ได้จากหัวท้าวยายม่อม ซึ่งเป็นพันธุ์ไม้ชนิดหนึ่ง มีลักษณะคล้ายมันฝรั่ง เมื่อผ่าดูเนื้อในจะเป็นสีขาวนวล เวลานำมาทำแป้งต้องปอกหัวท้าวยายม่อมให้หมดตาและเปลือก ล้างน้ำให้สะอาด นำไปชูด หรือฝน ฝนที่ละหัว เมื่อฝนแล้วจะมี

ลักษณะคล้ายมะพร้าวขูด แต่เปียกกว่า นำหัวท้าวยายม่อมที่ฝนแล้ว ผสมน้ำคนให้เข้ากัน กรองด้วยผ้าขาวบาง จะได้เนื้อแป้งสีขาวขุ่น ส่วนกากทิ้งไป ปล่อยให้แป้งที่ได้ตกตะกอน แล้วค่อยๆ รินน้ำใสๆ ทิ้ง หมั่นเปลี่ยนน้ำ 3-4 ครั้ง จะทำให้แป้งไม่ขม เมื่อเปลี่ยนน้ำจนใช้ได้แล้ว รินน้ำใสๆ ตอนบนทิ้ง ใส่น้ำแป้งลงในถุงแป้งทับแป้งพอหมาด จึงนำแป้งไปตากแดดให้แห้งแล้วบดให้ละเอียดอีกครั้ง ลักษณะของแป้งท้าวยายม่อม เป็นละอองแป้ง เป็นก้อนเล็กๆ สีขาว เป็นเงาเนียน มันลื่นเวลาใช้ต้องบดให้ละเอียดเป็นผง

สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม เมื่อนำแป้งท้าวยายม่อมไปหุงต้มสุก จะให้ความชื้นเหนียวหนืดและใส เมื่อทิ้งไว้ให้เย็น จะเหนียวตัวกว่าแป้งมันสำปะหลัง มีความใส นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับแป้งชนิดอื่น เพื่อให้ขนมมีความชื้นเหนียว เป็นมันวาว ใส่น้ำรับประทาน เช่น การทำขนมชั้น หรือนำไปทำขนมไทย ประเภทเปียกที่ใช้แป้ง จะทำให้น้ำใสไม่ขุ่นขาวและขึ้นเกินไป เช่น การทำเต้าส่วน

2.2 สารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติก (อังศุมา, 2554)

การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยทั่วไปจะต้องใช้วัสดุและสารเคมีอื่นมาผสม เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ของผสมที่จากการเจือวัสดุและสารเคมีลงไป ในอุตสาหกรรมพลาสติกเรียกว่า คอมพาวด์ (compound) ส่วนประกอบที่สำคัญของคอมพาวด์ อาจแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.1 พลาสติไซเซอร์ (plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ คือ สารเติมแต่งที่ใส่ลงไป เพื่อให้พลาสติกนิ่มเป็นการเพิ่มสมบัติในทางอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (flexibility) ความสามารถในการยืดออก (stretchability) โดยการทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนสิชัน (Tg) ของพลาสติกลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้องเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) และลดความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น สามารถแบ่งพลาสติไซเซอร์ ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (primary plasticizers) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพสูงใช้ได้โดยตรงแต่มีราคาแพง
2. พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizers) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าชนิดแรก นำไปใช้โดยตรงไม่ได้จะต้องมีการนำไปใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ แต่พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิจะเพิ่มสมบัติเฉพาะอย่างได้ดีกว่า

กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

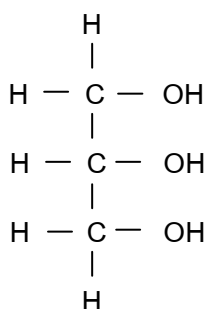
1. Lubricity Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านกันไปได้

2. Gel Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ที่จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการแยกส่วนที่มีของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน

3. Free Volume Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซออร์ โดยจะเพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

2.2.2 กลีเซอรอล (glycerol)

กลีเซอรอล เป็นสารประกอบอินทรีย์พวกอัลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอน 3 อะตอม และมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) ทั้ง 3 หมู่ มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_3H_8O_3$ สูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 2.12 กลีเซอรอลเป็นของเหลวขุ่น ไม่มีสี มีจุดเดือด $290^{\circ}C$ ละลายน้ำได้ โดยกลีเซอรอลดิบเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยชั้นของสารอินทรีย์ในกลีเซอรอลดิบถูกนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล เพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต และชั้นของกลีเซอรอลถูกนำไปหมักด้วยกระบวนการทางชีวภาพในอนาคต



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล

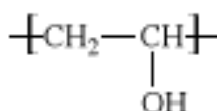
2.2.3 สารเติมแต่ง (additive)

สารเติมแต่ง เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ด้วยวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น และคงทนต่อการใช้งานได้มากขึ้น ช่วยให้กระบวนการผลิตหรือกระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่น สมบัติของสารเติมแต่งพอลิเมอร์ที่สำคัญ ได้แก่ การทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับ

เป็นสารเติมแต่ง เสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูป เสถียรภายใต้สภาวะการใช้งาน ไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรส ไม่ทำให้เกิดการคายสี (bleeding) หรือการเกิดเป็นฝ้า (blooming) มีราคาถูก และไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป

2.2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถละลายน้ำได้ดีและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความหนาแน่น 1.298 g/cm³ มีสมบัติคล้ายแป้ง คือเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 2,500-250,000 ดาลตัน เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ จึงมีความสามารถในการเข้ากันได้สูง (วรรณภา, 2551; อังศุมา, 2554) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นผงสีขาวที่ได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพอลิไวนิลอะซิเตต (poly(vinyl acetate)) ลักษณะโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นสายโซ่แบบเส้นตรงที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล แสดงดังรูปที่ 2.13 ทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติที่พร้อมละลายน้ำได้ โดยเฉพาะจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายเป็นวิธีการผลิตที่สะดวก และนิยมใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งสามารถแยกตะกอนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ออกมาได้โดยตรง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และการเคลือบต่างๆ (Modi *et al.*, 1980; ปรีชา, 2530; ขวัญชนก, 2550; อังศุมา, 2554)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

(<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/469236/polyvinyl-alcohol>, 2555)

นอกจากนั้นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1) อาศัยสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และสารแขวนลอยต่างๆ ขึ้นขึ้น (คือใช้ เป็น thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน

2) นำพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายน้ำ แล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่งพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำ และความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลอัลกอฮอล์นี้ สวมใส่สบาย ชักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี (http://www.nppointasia.com/siamrecycle/plastic_selection.htm, 2555)

2.2.5 แป้งเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใย (Analía and Vera Alejandra, 2009)

การใช้เส้นใยเป็นสารเสริมแรงในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ข้อได้เปรียบของเส้นใยจากธรรมชาติคือ มีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก สามารถปลูกทดแทนได้ และเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพร้อยเปอร์เซ็นต์ (Rosa, 2006)

วัสดุเสริมแรง (reinforcing material) จะถูกผสมลงในพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านมอดุลัสและความต้านทานต่อแรงกระแทกให้สูงขึ้น วิธีการขึ้นรูปมีหลากหลายวิธี เช่น การนวด (kneading) การอัดรีด (extrusion) การอัดด้วยความร้อน (compression molding) หรือการฉีด (injection molding) ข้อสำคัญในการผสมเส้นใยลงในเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือเส้นใยจะต้องมีการกระจายตัวอย่างดีและสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถใช้วิธีการนวด หรือการผสมโดยใช้เครื่องที่สามารถให้ค่าแรงเฉือนแก่เส้นใย ทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน และสามารถกระจายอยู่ทั่วแมทริกซ์ แสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของแรงเฉือนและการใช้สารเคมีในการช่วยกระจายตัวของเส้นใย

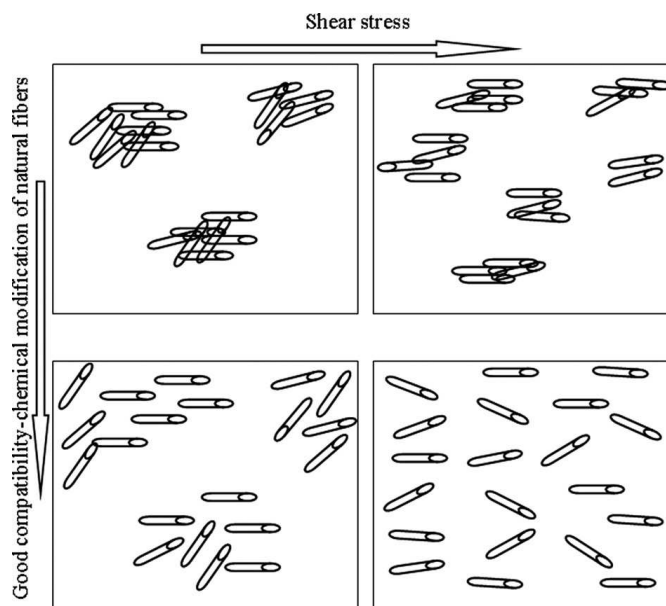
กระบวนการผสมมี 2 แบบคือ

1. แบบ dispersive mixing

คือ การลดพื้นที่ของแมทริกซ์ โดยเส้นใยเข้าไปแทรกตัวระหว่างแมทริกซ์ ทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาค หรือของแข็งที่ถูกผสมเข้าไปส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ดี โดยกลไกที่ทำให้เกิดการแตกตัวของเส้นใยคือแรงเครียดภายใน (intensive stress) ที่มีค่ามากกว่าแรงระหว่างอนุภาคที่จับตัวกัน นอกจากนี้ขนาดของเส้นใยก็มีผลต่อการแตกตัวด้วย

2. แบบ distributive mixing

คือการลดความเข้มข้นหรือปริมาณของเฟสที่จับตัวกันจะช่วยให้เกิดการเข้ากันได้ของเฟสแมทริกซ์ และเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากสารที่จับตัวกันเป็นก้อนจะถูกทำให้แตกและแยกออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่สัมผัสกับผิวพอลิเมอร์แมทริกซ์ได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.14 รูปแบบการผสมของเส้นใย (Analía และ Vera Alejandra, 2009)

2.2.6 พอลิเมอร์ผสมแป้งเทอร์โมพลาสติก (Analía และ Vera Alejandra, 2009)

แป้งเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แป้งเพียงอย่างเดียว ยังไม่เหมาะสมมากนักทั้งในด้านการขึ้นรูปและสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้น จึงได้มีการนำแป้งเทอร์โมพลาสติกผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ที่เรียกว่า starch based blend โดยพอลิเมอร์เหล่านั้นจะมาจากธรรมชาติหรือที่สังเคราะห์ขึ้นมาก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เหล่านี้ยังคงมีราคาแพง

เนื่องจากแป้งมีอยู่เป็นจำนวนมากในธรรมชาติ และราคาถูก จึงได้มีการนำแป้งมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่เรียกว่า แป้งเทอร์โมพลาสติก แต่สมบัติบางอย่างไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน ได้แก่ ความคงทนต่อการใช้งาน เพราะมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้ดูดความชื้นได้เร็ว มีสมบัติเชิงกลต่ำ และกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีราคาถูกจึงมีความสำคัญและจำเป็น โดยพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นจะถูกผลิตจากการใช้แป้งเป็นวัตถุดิบหลักและสามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกับแป้งจะอยู่ในรูป อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิคาร์โปแลคโตน (poly(caprolactone), PCL) พอลิแลคติก แอซิด ((poly(lactic acid), PLA) พอลิไฮดรอกซีบิวทอริลเลทโควาเลอเลท (poly(hydroxybutyrate-co-valerate), PHBV) และ พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (poly(ester amide), PEA) ปัจจุบันได้มีการผลิตแป้งผสมพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานทางการค้าแล้ว

เช่น มาสเตอร์ไบ (Masterbi[®]) ผลิตโดยบริษัทโนวามอนต์ ประเทศอิตาลี และ ไบโอพลาส (Bioplast[®]) ผลิตโดยบริษัทไบโอเทค ประเทศเยอรมัน เป็นต้น

2.2.7 กระบวนการอัดรีด (Extrusion)

กระบวนการอัดรีด เป็นกระบวนการสำหรับผสมสารเติมแต่งให้เข้ากับพอลิเมอร์ ในลักษณะแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สารผสมที่มีคุณลักษณะ และสมบัติตามต้องการเครื่องมือที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้คือ เครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ข้อจำกัดของพอลิเมอร์ในการใช้เทคนิคนี้คือ พอลิเมอร์เมื่ออ่อนตัวต้องมีความหนืดสูง เพราะเมื่อพอลิเมอร์ผ่านหัวรีดออกมาต้องทรงรูปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่งไม่ไหลมารวมกัน นอกจากนี้เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพสูงสุดต้องคำนึงถึงการกำหนดตัวแปรต่างๆของเครื่องผสมด้วย ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู อุณหภูมิ ความดัน ขนาดและความยาวของสกรู โดยนิยมแสดงด้วยอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู (L/D) (www2.dede.go.th, 2555)

2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.3.1 ความเป็นมาของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

(www.nia.or.th/bioplasticsdownloadbioplast_roadmap.pdf, 2555)

พลาสติกนับเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากน้ำหนักเบา ราคาถูก ทนความชื้น และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่น การใช้พลาสติกทั่วโลกมีอัตราการเติบโตสูงมาก ดังเห็นได้จากกำลังการผลิตพลาสติกในโลกปี ค.ศ. 2003 เป็นปริมาณ 169 ล้านตัน และปัจจุบันสูงกว่า 200 ล้านตันปี โดยมีการเติบโตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 ระหว่างปี ค.ศ. 1985 - ค.ศ. 2000 และคาดการณ์ว่าความต้องการบริโภคพลาสติกจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ได้แก่ การบริโภคพลาสติกในกลุ่มประเทศยุโรป ตะวันตกในปี ค.ศ. 2003 เป็นปริมาณ 38 ล้านตัน และคิดเป็นการประมาณการบริโภคพลาสติกที่สูงถึง 98 กิโลกรัม/คน/ปี เนื่องจากผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่หาได้ง่าย ราคาถูก สะดวก และมีความทนทาน จึงถูกออกแบบสำหรับการใช้งานครั้งเดียว ดังนั้น ด้วยสมบัติเด่นเหล่านี้ของพลาสติก จึงเป็นปัจจัยที่เร่งให้เกิดการทิ้งเป็นขยะเป็นจำนวนมากในแต่ละปี และส่งผลกระทบต่อด้านการกำจัด ถึงแม้ว่าจะมีการรณรงค์โดยมาตรการ 3R ทั้งการลดปริมาณการใช้พลาสติก (reduce) การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) และการกลับคืนเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ (recovery) แต่ก็ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มที่เพราะค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะเพื่อนำมาใช้ใหม่ค่อนข้างสูงทำให้การรณรงค์ด้านการเก็บรวบรวมและการคัดแยกขยะเพื่อนำมาใช้ใหม่ไม่บรรลุผลและทำให้ปริมาณขยะพลาสติกของโลกยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งนับเป็นสาเหตุ

ของปัญหาและภาระด้านสิ่งแวดล้อม ที่เกิดจากความสะดวกสบาย อย่างปราศจากความรับผิดชอบของมวลมนุษย์

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เซลลูโลสพอลิเมอร์ (cellulose polymers) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากทรัพยากรชีวมวลที่มนุษย์ผลิตได้เองเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำคัญในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องแต่งกาย บรรจุกุภัณฑ์ ฯลฯ ได้ถูกทดแทนด้วยผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันทำให้ราคาน้ำมันดิบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันและเกิดการขาดแคลน ส่งผลให้เกิดการชะลอการเติบโตด้านเศรษฐกิจเป็นช่วงเวลาหนึ่งซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความสนใจในการค้นหาแหล่งพลังงาน และวัตถุดิบทดแทนอย่างจริงจัง อย่างไรก็ตาม ในช่วงทศวรรษ 1980 จัดได้ว่าเป็นช่วงเวลาที่ยุทธศาสตร์ปิโตรเคมี และเทคโนโลยีตั้งแต่ระดับต้นน้ำถึงปลายน้ำได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากพลาสติกใหม่ขึ้นมากมายหลายชนิด ในช่วงปี ค.ศ. 1990 งานวิจัยด้านพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers) ที่ได้จากทรัพยากรชีวมวล (biomass) หรือทรัพยากรที่เกิดทดแทนใหม่ได้ (renewable raw materials, RRM) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ เทคโนโลยีชีวภาพเป็นแกนสำคัญตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการทดลองจนถึงระดับทดสอบอุตสาหกรรมนาร่องเป็นไปอย่างเข้มข้น และมีความต่อเนื่องทั้งในระดับต้นน้ำถึงปลายน้ำ เนื่องจากเป็นนวัตกรรมวัสดุโดยที่มีจุดแข็ง 2 ประการคือ (1) ลดปริมาณขยะที่เป็นภัยคุกคาม และ (2) สร้างภาพพจน์ของการเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ต้องแข่งขันได้กับพลาสติกโอเลฟินส์ที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีด้วย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ สมบัติเชิงกล รูปลักษณะและความหลากหลาย ตลอดจนราคาที่ผู้บริโภคสามารถยอมรับได้

2.3.2 ประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปัจจุบัน การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีได้หลายลักษณะแตกต่างกันออกไป แต่เมื่อพิจารณาจากกลไกการย่อยสลายสามารถแบ่งพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักได้ง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว สัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ

กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกล โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัย และพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พลาสติกโอเลฟินส์เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิลัน ซึ่งทำหน้าที่ชะลอการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (catalytic hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์

นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)

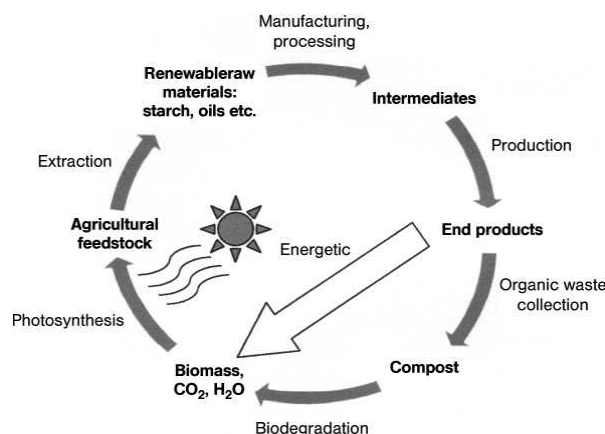
การย่อยสลายพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือพลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ในรูปที่ 2.15 แสดงกลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์

2.3.3 วัฏจักรของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อม

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นทางเลือกใหม่ด้านพลาสติกเพื่อสิ่งแวดล้อม โดยเป็นตัวแทนวัสดุประเภทใหม่ซึ่งมีสมบัติการใช้งานเหมือนพลาสติกทั่วไป แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หรือถูกหมักเป็นปุ๋ยได้ในสภาวะที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการย่อยสลายในธรรมชาติ โดยเริ่มจากการที่ชีวมวลหลายพันล้านตันได้ถูกผลิตขึ้น โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชตามธรรมชาติ ซึ่งชีวมวลจำนวนเท่ากันนี้จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และปล่อยคืนกลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืช เพื่อใช้ในการผลิตชีวมวลใหม่ เกิดเป็นวัฏจักรของธรรมชาติอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้องจึงไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และไม่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น วัฏจักรของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีจุดประสงค์ที่จะเลียนแบบวงจรของธรรมชาติ ที่กล่าวข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 2.15 กล่าวคือหลังจากผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานโดยผู้บริโภค และถูกนำไปกำจัดโดยการย่อยเป็นปุ๋ย เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นวัฏจักรนี้ทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากร

ปลูกทดแทนได้ (renewable resources) อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะสิ่งแวดล้อมหลังจากหมดอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.15 กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์ (Wojtowicz, 2009)

ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในเชิงบวกที่สำคัญของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พบว่าปริมาณการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจก (green house gas, GHG) ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้วจะไม่มีการผลิตคาร์บอนในรูปแบบอื่น ๆ ออกสู่บรรยากาศซึ่งเห็นชัดเจน ในกรณีของพลาสติกที่ใช้แบ่งเป็นวัตถุชีวภาพคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตของพืช ที่ปลูกขึ้น ใหม่นี้ทำให้เกิดการหมุนเวียนและเกิดสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ นอกจากนี้ ผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในเชิงบวกที่เกิดจากการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลาสติกทั่วไปมีดังนี้

- การหมักปุ๋ย ปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยช่วยเพิ่มสารอาหาร ความชื้น และสารอินทรีย์ให้แก่ดินพร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี และลดการเกิดโรคในพืช

- การย่อยสลายโดยการฝังกลบ การใช้ถุงใส่ของหรือถุงใส่ขยะที่เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพทดแทนพลาสติกทั่วไป เมื่อนำไปกำจัดโดยการฝังกลบจะไปช่วยเพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ โดยจะช่วยลดเนื้อที่การ

ใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับในกรณีที่บ่อฝังกลบถูกออกแบบมาให้ผลิต และใช้ประโยชน์จากก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้ การใช้ฟิล์มของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อปกคลุมด้านบนของการฝังกลบ จะช่วยเพิ่มวงจรชีวิตของบ่อฝังกลบ โดยสามารถใช้แทนวิธีเดิม คือใช้ดินคลุมซึ่งจะใช้พื้นที่ประมาณร้อยละ 25 ของเนื้อที่การฝังกลบทั้งหมด

- การนำไปใช้คัดแยกขยะอินทรีย์ ในประเทศญี่ปุ่น ที่เมืองฟูราโน ได้มีการนำถุงใส่ขยะที่เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้คัดแยกขยะอินทรีย์ได้ถึง ร้อยละ 90 โดยจะสามารถนำขยะอินทรีย์พร้อมถุงใส่ขยะจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไปหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง หรือสามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตไฟฟ้า ซึ่งนับว่าเป็นรูปแบบของการจัดการขยะที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.4 คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในอนาคตแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาที่ต่ำลง และมีสมบัติต่างๆดีขึ้น มีกฎข้อบังคับรวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกันบางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริงเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น (Biodegradable Plastics) และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

- ASTM D6400-99 – biodegradable plastic is a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi and algae.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย

- ISO 472:1998 – Biodegradable plastics are plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastics and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก และการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าว ต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

- BPS Japan (1994) – Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism.

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอน ในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

- DIN FNK103.2 (1993) – A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods. วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่า พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อ สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน

- CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass

วัสดุย่อยสลายได้คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1. การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2. สารเคลือบกระดาษ หรือ โฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้แทนเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแฮมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3. ฟิล์มคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการกำจัดเก็บ และกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้น ในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

4. ถุงสำหรับใส่ของ

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูง และยังไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาดรวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

5. ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร

ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารเหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้

เกิดความสะดวกรไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ตันต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

6. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

7. โฟมเม็ดกันกระแทก





โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่า จะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้ง และพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน และสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

2.5 สัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในเชิงการค้าระหว่างประเทศนั้น จะต้องมีการกำหนดมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ดังนั้นการกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจึงนับว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของการผลักดันให้เกิดอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ย่อยสลายย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและได้มาตรฐานสากล ทั้งนี้

ในแต่ละประเทศจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้บ่งบอกการรับรองผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้มาตรฐานสากลของแต่ละประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.4 สัญลักษณ์แสดงการรับรองผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้มาตรฐานสากล

สัญลักษณ์	สถาบันรับรอง/ประเทศ	มาตรฐานรับรอง
	AIB-Vincotte International (AVI) เบลเยียม	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตามมาตรฐาน EN 13432:2000
	DIN CERTCO เยอรมนี	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตามมาตรฐาน ASTM 6400 DIN EN 13432
	BPI (Biodegradable ProductInstitute) สหรัฐอเมริกา	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตามมาตรฐาน ASTM 6400 ASTM 6868
	PBS (Biodegradable Plastics Society) ญี่ปุ่น	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตามมาตรฐาน OECD301C JIS K 6950 (ISO 14851) JIS K 6951 (ISO14852) JIS K 6953 (ISO 14855)

2.6 การตรวจเอกสาร

การเตรียมและสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติก

ศุภยัชญ วรธนา และคณะ (2549) ศึกษาการใช้เครื่อง Brabender viscoamylograph (BV) Differential scanning calorimeter (DSC) และอุปกรณ์วัดปริมาณลำแสงระนาบตรวจวัดอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง แป้งผ่านการโม่แบบบอลล์มิลเป็นเวลา 3 ถึง 12 hr เพื่อให้ได้ระดับความเสียหายต่างๆ บนเม็ดแป้ง ผลที่ตรวจสอบจาก X-ray Powder Diffraction พบว่าแป้งมันฝรั่ง เป็น B-type และแป้งมันสำปะหลัง

เป็น C-type ผลการวิเคราะห์ด้วย BV DSC และอุปกรณ์ที่วัดปริมาณแสงระนาบพบว่า เวลาการไม่แข็งนานครึ่งทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของเจลลาคีไนเซชันลดลง เมื่อตรวจวัดตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาคีไนเซชัน มีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำการวิเคราะห์แบบถดถอยแบบปริมาตรของอุณหภูมิเริ่มต้นของเจลลาคีไนเซชัน พบความสัมพันธ์ที่สูง ($R^2 > 0.95$)

US Patent number 5,362,777 (2001) ในกระบวนการผลิตแป้งเทอร์โมพลาสติก สารเติมแต่งหรือพลาสติกไซเซออร์จะถูกผสมด้วยแป้งจากธรรมชาติ และการผสมจะต้องหลอมโดย การใช้ความร้อน และพลังงานกล สารเติมแต่งที่จะนำมาใช้จะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมตัวของแป้ง ซึ่งจุดหลอมเหลวของแป้ง และสารเติมแต่งจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวของแป้ง และสารเติมแต่ง นอกจากนี้ ค่าการละลาย (solubility parameter) จะต้องมากกว่า $15 \text{ cal}^{1/2} \text{ cm}^{-3/2}$ หลังจากการผสมแป้ง และสารเติมแต่งจนหลอมเหลว การหลอมเหลวจะผสมจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ความดันไอของสารเติมแต่งภายในช่วงการหลอมแป้งกับสารเติมแต่งไม่ควรต่ำกว่า 1 bar ในกระบวนการผสมถ้าไม่มีน้ำอยู่จะเป็นการดี

US Patent number 6,472,497 (2002) กล่าวถึงการผลิตแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยการเปลี่ยนแป้งธรรมชาติ หรืออนุพันธ์ของแป้งให้เป็นแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยการเติมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ไม่ชอบน้ำอย่างน้อย 1 ชนิด ที่เป็นเหมือนพลาสติกไซเซออร์หมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อาจจะได้จากอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) โคพอลิเอสเทอร์-อะลิฟาติก (copolyester-aliphatic) และบล็อกอะโรมาติก (aromatic blocks) พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyester amide) พอลิเอสเทอร์ยูรีเทน (polyester urethane) พอลิเมอร์พอลิเอทิลีนออกไซด์ (polyethylene oxide polymer) และ/หรือพอลิไกลคอล (polyglycol) และ/หรือสารผสมของพอลิเมอร์เหล่านี้ เมื่อแป้งโดยเฉพาะแป้งธรรมชาติและอนุพันธ์ของแป้งถูกผสมโดยการหลอมกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ไม่ชอบน้ำที่เป็นเหมือนพลาสติกไซเซออร์หรือสารบวมน้ำเพื่อให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณน้ำต้องลดลงน้อยกว่า 5 wt% เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสารผสม

US Patent number 6,235,815 B1 (2001) กล่าวถึงการเปลี่ยนแป้งธรรมชาติ หรืออนุพันธ์ของแป้งให้เป็นแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยการเติมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีหมู่ไม่ชอบน้ำอย่างน้อย 1 หมู่ ซึ่งพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่ไม่ชอบน้ำนี้จะต้องทำหน้าที่เป็นเหมือนพลาสติกไซเซออร์ หรือสารบวมตัวด้วยอาจจะเลือกพอลิเมอร์ ตามรายการต่อไปนี้ อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ โคพอลิเอสเทอร์บล็อกกับอะลิฟาติกหรือกับอะโรมาติก พอลิเอสเทอร์เอไมด์ พอลิเอสเทอร์ยูรีเทน พอลิเอทิลีนออกไซด์พอลิเมอร์ และ/หรือพอลิไกลคอล และ/หรือสารผสมของพอลิเมอร์เหล่านี้ เมื่อแป้งโดยเฉพาะแป้งธรรมชาติหรืออนุพันธ์ของแป้งผสมกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ หรือสารบวมตัว

โดยการหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณน้ำจะต้องลดลงเหลือน้อยกว่า 1 wt% เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสารผสม

แปงเทอร์โมพลาสติกผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์

Imam และคณะ (2005) ทำการศึกษาถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ และการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิไวนิลอัลกอฮอล์กับเส้นใยลิกโนเซลลูโลส โดยเส้นใยลิกโนเซลลูโลสตัดแปลงจากกากผลส้มที่เหลือทิ้ง การผสมเส้นใยลิกโนเซลลูโลสกับพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ จะมีการเติมแป้งข้าวโพด และไม่เติมแป้งข้าวโพด จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มฟิล์มที่ได้มีการยึดเกาะกันดี และพียงอได้ ฟิล์มจะถูกทดสอบหาค่าการทนต่อความร้อน การป้องกันการซึมผ่านของน้ำ และสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การทดสอบหาค่าความทนต่อความร้อนทำให้ทราบถึงสูตรที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการหลอม และการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นฟิล์มสำหรับงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งฟิล์มจะต้องป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ในขณะเดียวกันจะต้องสามารถรักษาส่วนผสมและองค์ประกอบเมื่อผ่านการอบแห้งการเติมเฮกซะเมทริกซ์ (hexamethoxy methylamine) จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันทางเคมีระหว่าง แป้ง เส้นใย และพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ ทำให้สมบัติการทนต่อน้ำของฟิล์มดีขึ้น การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม พบว่าเมื่อฝังกลบลงในดินฟิล์มจะถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใน 30 วัน จะเกิดการย่อยสลาย (mineralization) ประมาณ 50-80% ทั้งแป้ง และเส้นใยลิกโนเซลลูโลสย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ มีข้อสังเกตคือ เมื่อมีการเติมเส้นใยเข้าไปในสูตร จะไปเพิ่มการย่อยสลายของพอลิไวนิลอัลกอฮอล์

แปงเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

Oksman และคณะ (2003) ได้ศึกษาการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยป่านโดยเติมสารไตรอะซิติกเป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติในการทนต่อแรงกระแทก ซึ่งการผสมพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยป่านทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ใช้อัตราส่วนของเส้นใยป่าน 30 wt% และ 40 wt% เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน (poly(propylene)) กับเส้นใยป่าน ซึ่งปัจจุบัน ใช้ในการทำชิ้นส่วนรถยนต์ พบว่าให้สมบัติที่ดีกว่า และสามารถใช้กระบวนการผลิตเหมือนกับพอลิโพรพิลีนกับเส้นใย ได้ศึกษาการเติมสารพลาสติกไซเซอร์พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทก

Ban และคณะ (2006) ได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ แปงด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ในรูปฟิล์ม พบว่าการเติมพอลิเมอร์ชีวภาพลงไปใน แปงช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของฟิล์มจากแป้ง ส่วนการเติมเส้นใย

เซลลูโลสลงไปในฟิล์มจากแป้ง ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่า ในการทดสอบ การทนต่อแรงดึงยืดเมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลส 22% เปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งอย่างเดียว นอกจากนี้เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลส 12.5% พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของฟิล์มลดลง 50% เปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งอย่างเดียว นอกจากนี้ การผสมเส้นใยมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำ พบว่า ความเสถียรของฟิล์มต่อน้ำมีค่าลดลง โดยทั่วไปแล้วเส้นใยเซลลูโลส ไคโตซาน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มได้เป็นอย่างดี เมื่อเติมไคโตซาน 33% ความแข็งแรงของฟิล์มเพิ่มเป็น 10 เท่า อย่างไรก็ตามไคโตซานจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของฟิล์มลดลง เจลาตินจะมีผลดีต่อค่า การต้านทานน้ำของฟิล์มจากแป้ง อนุภาคขนาดเล็กๆของเจลาตินจะลดการดูดซึมน้ำของฟิล์ม และไม่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อสมบัติด้านอื่นๆของฟิล์ม ทั้งเส้นใยเซลลูโลส และไคโตซาน แสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบต่อค่าการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้เป็นอย่างดี อัตราการซึม ผ่านของแก๊สลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตรเส้นใยทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตาม กลไกของปฏิกิริยายังไม่ทราบเป็นที่แน่ชัด และจำเป็นจะต้องมีการศึกษาต่อในอนาคต

Guan และคณะ (2007) ศึกษาการขึ้นรูปโฟม โดยใช้แป้งอะเซทิลเลทที่มีการ นำเซลลูโลสเข้าไปแทนที่ในสายโซ่ที่ตำแหน่ง 1.68 และ 2.3 โดยการอัดรีด อัตราส่วนของ เซลลูโลสที่ศึกษาคือ 10% 20% และ 30% (w/w) และเอทานอล 20% (w/w) ในเครื่องอัดรีด แบบสกรูคู่ อุณหภูมิที่ใช้คือ 150 160 และ 170 °C และใช้ความเร็วรอบของสกรูที่ 170 200 และ 230 rpm วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของโฟมที่ได้จากการอัดรีดด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Fourier transform infrared analysis (FTIR) การออกแบบให้ผิวหน้าของพอลิเมอร์ผสมให้มีความไวในการตอบสนองถูกประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของชนิดของแป้ง ปริมาณของเซลลูโลส อุณหภูมิ และความเร็วรอบของสกรูต่อค่าพลังงานกลที่ต้องการใช้ในการขึ้นรูป สัดส่วนของการขยายตัว และการทนต่อแรงกดทับของโฟม XRD แสดงให้เห็นถึงการหายไปของหมู่ฟังก์ชันของแป้ง โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส และโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม FTIR แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชัน และพันธะเคมีที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการอัดรีด อุณหภูมิการหลอมเปลี่ยนแปลงอย่างมี นัยสำคัญเมื่อมีการเข้าไปแทนที่ของสายโซ่ของแป้งอะเซทิลเลทสูงขึ้น ปริมาณเซลลูโลส อุณหภูมิ ที่ใช้ และความเร็วรอบของสกรู แสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบต่ออุณหภูมิ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปโฟม และพลังงานกลที่ต้องการอย่างมีนัยสำคัญ

di Franco และคณะ (2004) ทำการศึกษาถึงความไวในการย่อยสลายของ พอลิคาร์โพรแลคโตน (poly(carprolactone)) /แป้ง พอลิคาร์โพรแลคโตน/แป้งเสริมแรงด้วยเส้น ใยป่าน ที่สภาวะแวดล้อมต่างกัน สารประกอบที่เติมเส้นใย และสารประกอบที่ไม่เติมเส้นใย แสดงให้เห็นถึงความทนต่อสภาวะกรดต่างที่ pH 7.2 และที่อุณหภูมิ 25 °C และ 40 °C เส้นใย ยังคงเสถียรภายใต้สภาวะกรดต่าง และจะยิ่งชอบเมื่อมีน้ำโดยจะเกิดการบวมตัว และแยกสลาย

ไต้ด้วยน้ำ (ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารชีวภาพ) ที่สภาวะที่มีปริมาณเส้นใยสูงๆ สารประกอบจะยังมีความเสถียรต่อสภาวะกรดต่างซึ่งขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของการเชื่อมโยง โครงตาข่ายภายในโครงสร้างของเส้นใย เมื่อทดสอบการย่อยสลายสารประกอบในสภาวะที่มี สารละลาย ตัวกลางทางชีวภาพ (biotic aqueous) จะพบว่าเชื้อราเข้าไปทำลายโดยอยู่ในรูป ฟิล์มชีว ภาพอ่างเด่นชัด โดยเฉพาะบนผิวหน้าเส้นใย เมื่อทดสอบการย่อยสลายโดยการฝัง กลบในดินพบว่าพอลิคาร์โพรแลคโตน/แป้ง และพอลิคาร์โพรแลคโตน/แป้งที่มีการเติมเส้นใย ปาน 15% จะถูกย่อยสลายประมาณ 50% ของเนื้อสารเริ่มต้น น้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ ผสม แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของการยึดกันภายในของเส้นใยกับเส้นใย และการเกิดการ เชื่อมโยงภายในของเนื้อสารกับเส้นใยเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อสารอย่างเดียว

Lanlthong และคณะ (2006) ทำการวิจัยถึงผลของการผสมแป้งกับพอลิเมอร์ โดยการกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยพอลิ (อะคริลลาไมด์-โค-กรดอิตานิก) (poly(acrylamide – co - (itaconic acid)) อัตราส่วน 1:4-2:1 โดยน้ำหนัก สมบัติของการดูดซับ จะขึ้นกับปริมาณของกรดอิตานิก และปริมาณแป้ง งานวิจัยนี้ เสนอการพัฒนาแป้งผสมพอลิ เมอร์ที่มีการดูดซึ่มสูง สำหรับการดูดซึ่มน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพ ศึกษาถึงผลของ อุณหภูมิสารตั้งต้น ปริมาณของสาร และปริมาณการเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ การย่อยสลาย ทางชีวภาพของกราฟท์พอลิเมอร์ ตรวจสอบโดยการใชเอนไซม์ อัลฟาอะไมเลส (α -amylase) หลังจากเกิดการไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์ปริมาณของน้ำตาลที่ลดลงจะถูกตรวจวัดด้วยวิธีการใช้ กรดดิสอินโทรซาลิซิลิก (disintrosalicylic acid)

แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตอื่น ๆ

Biresaw และ Carriere (2004) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการผสมและ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลาย ได้ทางชีว ภาพ ซึ่งได้แก่ พอลิคาโพรแลคโตน (PCL) พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเอสตราไบ โออัลตรา (estrabioaltra, EBU) การผสมทำโดยการใช้เครื่องฉีด ศึกษาอัตราส่วนของ องค์ประกอบในช่วงตั้งแต่พอลิสไตรีน 100 wt% จนถึงพอลิเอสเทอร์ 100 wt% พบว่าที่ อัตราส่วนพอลิสไตรีน 25 wt% สมบัติเชิงกลจะลดลงดังนี้ PLA/PS > PCL/PS > EBU/PS

Mostafa (2005) ศึกษาการกราฟท์เมทาอะคริลาไมด์ (methacryamide) บน เส้นใยฝ้าย โดยมีหนึ่งเมอร์ของเมทาอะคริลาไมด์เข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงบนเส้นใยฝ้าย ใช้ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตและกรดไนตริกเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยารีดอกซ์ ปัจจัยหลักที่มีผล ต่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเมทาอะคริลาไมด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของโปแตสเซียมเปอร์ แมงกาเนต กรดไนตริก และเมทาอะคริลาไมด์ ช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิของการ เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งแฟคเตอร์ต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสภาวะที่มีการกราฟท์

ได้ดีที่สุด ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ให้ผลของการกราฟท์ได้สูงสุดคือ ที่สภาวะความเข้มข้นของโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.07 N ความเข้มข้นของกรดไนตริก 80 meqL^{-1} ต่อเมทอะครีลาไมด์ 1 g ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 min และอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 60°C เมื่อใช้อัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อของเหลวเป็น $1:50$ อย่างไรก็ตามค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของการกราฟท์ระหว่างพอลิอะครีลาไมด์กับเส้นใยฝ้ายที่ 18.55% ให้ค่าสูงกว่าเส้นใยฝ้ายที่ไม่กราฟท์ ในขณะเดียวกัน ถ้ากราฟท์มากกว่า 18.55% จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยฝ้ายที่กราฟท์ด้วยเมทอะครีลาไมด์ลดลง

Wu (2003) กล่าวถึงการศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิคาร์โพรแลคโตนกับแป้ง และพอลิคาร์โพรแลคโตนกราฟท์ด้วยกรดอะคริลิก (Acrylic acid) กับแป้ง พบว่า สมบัติทางกลของพอลิคาร์โพรแลคโตนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อนำไปผสมกับแป้ง สาเหตุเนื่องมาจากการเข้ากันได้ของสารสองตัวต่ำ แต่เมื่อนำแป้งไปผสมกับพอลิคาร์โพรแลคโตนกราฟท์ด้วยกรดอะคริลิก พบว่าการกระจายตัวและการผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าการใช้พอลิคาร์โพรแลคโตนอย่างเดียว โดยไปทำให้สมบัติทางกล และสมบัติการทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น ที่น่าสังเกตคือ เพิ่มค่าทนต่อแรงดึงที่จุดขาดซึ่งดีกว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิคาร์โพรแลคโตนกับแป้ง นอกจากนี้ กระบวนการของพอลิคาร์โพรแลคโตนกราฟท์ด้วยกรดอะคริลิกผสมแป้งจะง่ายกว่ากระบวนการของพอลิคาร์โพรแลคโตนผสมแป้ง เพราะว่าความหนืดที่จุดหลอมเหลวมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

ชื่อสารเคมี	ชื่อทางการค้า ชื่อย่อ	ผู้ผลิตหรือตัวแทนจำหน่าย
1.แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch)	(NST)	สยามโมดิฟายด์ ปทุมธานี
2.แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ต่ำ (Low Acetate Starch)	Kreation@SS (SS)	สยามโมดิฟายด์ ปทุมธานี
3.แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ต่ำตัวปานกลาง (Medium Acetate Starch)	Kreation@SMS FT (SMS)	สยามโมดิฟายด์ ปทุมธานี
4.แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่สูง (High Acetate Starch)	Kreation@NE (NE)	สยามโมดิฟายด์ ปทุมธานี
5.แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ออกทินิลซัคซินิก แอนไฮไดรด์ (Octenyl succinic anhydride Starch)	Kreation@OP (OP)	สยามโมดิฟายด์ ปทุมธานี
6.แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch)	(Ar)	โรงงานแป้งมันไทยท่า ชลบุรี
7.กลีเซอรอล (Glycerol)	(GLy)	บริษัทอิตัลมาร์ ประเทศไทย
8.พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) น้ำหนักโมเลกุล 27,000 จุดหลอมเหลว 200°C ความหนาแน่น 1.269 g/cm ³ ยี่ห้อ Aldrich	Monol [®] 4-98 (PVA)	ประเทศเยอรมันนี
9.เยื่อยูคาลิปตัสฟอกขาว (Eucalyptus)	(Eu)	บริษัทเยื่อกระดาษสยาม กาญจนบุรี
10.เส้นใยมะพร้าว (Coir)	(Co)	สามชัยเส้นใย สมุทรสงคราม
11.โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ยี่ห้อ Carlo Erba		ประเทศสหรัฐอเมริกา
12.โซเดียมไฮโปคลอไรท์ มีคลอรีน 17 % ยี่ห้อ Carlo Erba		ประเทศสหรัฐอเมริกา
13.กรดไนตริก ความเข้มข้น 65 % ยี่ห้อ Merck		ประเทศเยอรมันนี

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พร้อมเครื่องตัด ผลิตในประเทศจีน นำเข้าและจัดจำหน่ายโดยบริษัท เอ็นแมท จำกัด ความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 44 ต่อ 1 สกรูหมุนในทิศทางเดียวกัน มีการควบคุมอุณหภูมิที่สกรู 9 โซน



รูปที่ 3. 1 ภาพเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

2. เครื่องผสมสารชนิดเครื่องตีเค้ก ผลิตโดยบริษัท เอส บี ที จำกัด ประเทศไทย
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE SEM) ผลิตโดยบริษัท Jeol รุ่น JSM-6340 ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3. 2 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4. 푸เรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ผลิตโดยบริษัท Shimadzu รุ่น IR Prestige-21 ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.3 ภาพเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

5. เครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ผลิตโดยบริษัท Shimadzu รุ่น XRD-6000 ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.4 ภาพเครื่อง X-ray diffractometer

6. เครื่องทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงยืด ผลิตโดยบริษัท Instron รุ่น 1123 ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. ตู้อบพร้อมตั้งค่าความชื้นได้ ผลิตในประเทศไทย

8. เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ผลิตในประเทศไทย

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยมะพร้าว

1. อบเส้นใยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 105°C ปล่อยให้เย็นและชั่งน้ำหนัก 500 g นำไปต้มกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 18% ต่อน้ำหนักเยื่อ ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อเส้นใยเท่ากับ $5:1$ ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 2 h
2. ล้างเยื่อจนที่ได้จากข้อ 1 จนเป็นกลางโดยการตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส นำเยื่อไปตีด้วยเครื่องตีเยื่อ 10 min ใช้อัตราส่วนเยื่อต่อน้ำ $1:10$ เมื่อครบกำหนดบีบน้ำออกให้ได้มากที่สุด
3. วิเคราะห์หาความชื้นของเยื่อที่ได้จากข้อ 2 โดยชั่งน้ำหนักเยื่อเปียก 5.0000 g ชั่ง 3 ซ้ำ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา $15-16\text{ h}$ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักที่ได้และจดบันทึก นำเยื่อหลังบดไปหาปริมาณลิกนินที่เหลือ
4. ทำการฟอกขาว โดยชั่งเยื่อแห้งหนัก 500 g เติมลงในสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15% และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% ในน้ำที่อัตราส่วน $5:1$ ของน้ำหนักเยื่อ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 h ปล่อยให้เย็น ล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง นำไปแช่ในสารละลาย 10% โซเดียมไฮโปคลอไรท์ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ล้างน้ำให้เป็นกลางตรวจสอบด้วยกระดาษลิตมัส นำไปแช่ในกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1 M อัตราส่วน $2:1$ ถ้ายังไม่ขาวให้เริ่มใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก

3.3.2 การเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก

1. ชั่งแป้ง NST (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) เทใส่ในเครื่องผสมสาร (อัตราส่วนระหว่างแป้ง NST ต่อกลีเซอรอลที่ใช้คือ $70:30$ $75:25$ $77:23$ และ $80:20$)
2. ชั่งกลีเซอรอล (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) เทผสมกับแป้ง NST ในเครื่องผสมสาร เปิดเครื่องผสมสารโดยใช้ความเร็วรอบที่ระดับต่ำสุด ผสมให้เข้ากันนาน 5 min จากนั้นเพิ่มความเร็วยังเป็นระดับที่ 2 กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนาน 15 min และเพิ่มความเร็วยังเป็นระดับที่ 3 กวนผสมนาน 10 min เพื่อผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณทั้งหมด 3 kg

3. นำตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ตั้งอุณหภูมิของเครื่องโดยที่อุณหภูมิโซนที่ 1 ถึง 3 เท่ากับ 50°C อุณหภูมิโซนที่ 4 เท่ากับ 60°C อุณหภูมิโซนที่ 5 เท่ากับ 80°C อุณหภูมิโซนที่ 6 เท่ากับ 100°C อุณหภูมิโซนที่ 7 ถึง 9 เท่ากับ 175°C อุณหภูมิหัวรีดเท่ากับ 175°C ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 500 rpm
4. แบ่งเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านเครื่องอัดรีดออกมา ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนำไปเข้าเครื่องตัดให้เป็นเม็ด เก็บใส่ในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป
5. สำหรับตัวอย่างแบ่งมันสำปะหลังตัดแปรร (อัตราส่วนของแบ่งมันสำปะหลังตัดแปรรต่อกลีเซอรอลที่ใช้คือ 70:30 75:25 77:23 และ 80:20) มีขั้นตอนการเตรียมเหมือนกันกับแบ่งมันสำปะหลังไม่ตัดแปรรและสภาวะของการผสมเหมือนกัน ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปเข้าเครื่องตัดให้เป็นเม็ด เก็บใส่ถุงพลาสติกใส่โถดูดความชื้น เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติและทดลองต่อไป
6. เนื่องจากที่อัตราส่วนแบ่งดิบและแบ่งตัดแปรรต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 และ 75:25 หลังจากการอัดรีดพบว่าแบ่งเทอร์โมพลาสติกดูดความชื้นในอากาศได้เร็ว เมื่อนำเข้าเครื่องตัดเม็ดจะจับกันเป็นก้อน และที่อัตราส่วน 80:20 หลังจากการอัดรีดพบว่าแบ่งมีความแข็ง แตกหักง่าย และมีสีน้ำตาลเข้ม ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่อัตราส่วนแบ่งดิบและแบ่งตัดแปรรต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 77:23 ในการเตรียมแบ่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

3.3.3 การเตรียมแบ่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

3.3.3.1 กรณีที่ไม่มีการเติมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์และแบ่งท้าวายม่อม

1. ชั่งแบ่ง กลีเซอรอล และเส้นใยยูคาลิปตัส อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างแบ่งเส้นใยยูคาลิปตัส กลีเซอรอลที่ใช้คือ 77:0:23 72:5:23 67:10:23 และ 62:15:23
2. ผสมกลีเซอรอลกับเส้นใยยูคาลิปตัสในเครื่องผสมสารโดยใช้ความเร็วรอบระดับที่ 2 กวนผสมให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในเนื้อเส้นใยนาน 15-20 min เพื่อให้เยื่อแตกตัวจากนั้นเติมแบ่งลงไป ขั้นแรกคลุกส่วนผสมให้เข้ากันก่อนเปิดเครื่องผสมสารโดยใช้ความเร็วรอบระดับที่ 1 กวนผสมให้นาน 10 min เพิ่มความเร็วรอบเป็นระดับที่ 2 นาน 15-20 min เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณทั้งหมด 5 kg
3. ทำการหลอมผสมตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ใช้สภาวะการผสมเช่นเดียวกันกับการเตรียมแบ่งเทอร์โมพลาสติก

4. แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ออกมาจากเครื่องอัดรีด ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปเข้าเครื่องตัดให้เป็นเม็ด เก็บไว้ในถุงพลาสติกในโถดูดความชื้น จนกว่าจะนำไปใช้งานต่อไป

กรณีการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใยมะพร้าวเตรียมที่สภาวะเดียวกันกับ แป้งเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใยยูคาลิปตัส

3.3.3.2 กรณีที่มีการเติมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์

ซึ่งแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.3.1 ผสมกับพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ในอัตราส่วนร้อยละต่อน้ำหนักดังนี้ 95:5 90:10 และ 85:15 ผสมให้เข้ากันด้วยการเขย่าในถุงพลาสติก เเทลงในห้องผสมสารของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่องที่ความเร็วรอบของห้องผสมสารเท่ากับ 1.5-2 rpm อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแต่ละโซนมีดังนี้ อุณหภูมิโซนที่ 1 ถึง 2 เท่ากับ 50°C อุณหภูมิโซนที่ 3 ถึง 4 เท่ากับ 80°C อุณหภูมิโซนที่ 5 ถึง 6 เท่ากับ 100°C อุณหภูมิโซนที่ 7 ถึง 9 เท่ากับ 150°C อุณหภูมิหัวรีดเท่ากับ 150°C สกรูมีความเร็วรอบ 500 rpm. แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ออกมาจากเครื่องอัดรีด ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปเข้าเครื่องตัดให้เป็นเม็ด เก็บไว้ในถุงพลาสติกในโถดูดความชื้น จนกว่าจะนำไปใช้งานต่อไป

3.3.3.3 กรณีที่มีการเติมแป้งท้าวยายม่อม

ซึ่งแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.3.1 ผสมกับแป้งท้าวยายม่อมในอัตราส่วนร้อยละต่อน้ำหนักดังนี้ 90:10 80:20 และ 70:30 ผสมให้เข้ากันด้วยการเขย่าในถุงพลาสติก เเทลงในห้องผสมสารของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยตั้งสภาวะของเครื่องอัดรีดในห้องผสมสารและสกรูเหมือนกันกับการผสมที่มีการเติมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ทุกประการ ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปเข้าเครื่องตัดให้เป็นเม็ด เก็บไว้ในถุงพลาสติกในโถดูดความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้งานต่อไป

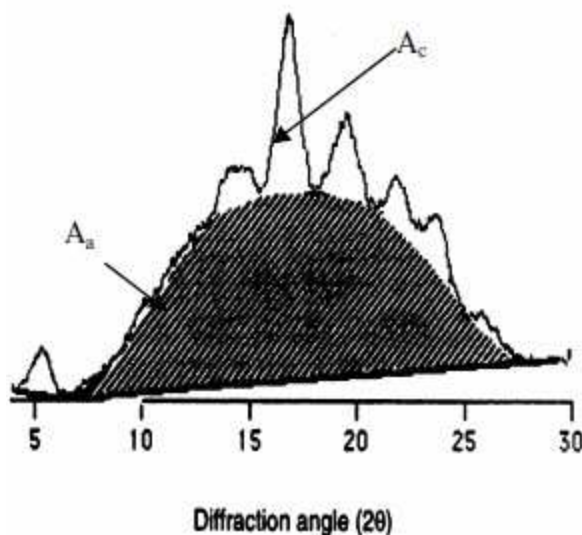
3.4 วิธีวิเคราะห์ ทดสอบ

1. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) เตรียมตัวอย่างโดยผสมผงแป้งตัวอย่างกับอะซิโตน สันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ 10 นาที ใช้หลอดหยดดูดสารแขวนลอยหยดลงบนแท่นใส่ตัวอย่าง ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C ปล่อยให้เย็น สำหรับแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ หรือแป้งท้าวยายม่อม ใช้ขึ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อ

แรงดึง โดยแช่ในไตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 min หักให้ขาดเป็นสองท่อนนำส่วนภาคตัดขวางติดบนแท่นใส่ตัวอย่างและเคลือบทอง ก่อนนำไปเข้าเครื่อง FESEM

2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (potassium bromide, KBr) เป็นเส้นฐาน (base line) จำนวนที่ใช้สแกน 45 ค่าความละเอียดในการสแกน เท่ากับ 2 cm^{-1} นำตัวอย่างบดผสมกับ KBr ให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นบางสำหรับเข้าเครื่องวิเคราะห์

3. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) โดยใช้รังสีเอ็กซ์ของ $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) ปรับแรงดันไฟฟ้าหลอดรังสีเอ็กซ์ เท่ากับ 40 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 40 mA ทำการวัดในช่วง 2θ ตั้งแต่ 5° ถึง 40° อัตราการสแกนเท่ากับ $2^\circ/\text{min}$ วิเคราะห์โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ JCPDS (joint committee on powder diffraction standards) การคำนวณปริมาณผลึกโดยพล็อตกราฟด้วยโปรแกรมออริจิน ตัดกระดาษตามรูปภาพและนำไปชั่งน้ำหนักทั้งหมด ($A_c + A_a$) จากนั้นตัดกราฟพื้นที่เหนือกราฟไปชั่งได้น้ำหนักเหนือกราฟ (A_c) คำนวณหาปริมาณผลึกจากสมการที่ 1 รูปที่ 3.5 แสดงส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.5 ภาพพื้นที่แสดงส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Nara S, Komiya T, 1983, Wang S, 2005)

$$\text{ปริมาณผลึก (\%)} = \frac{A_c \times 100}{(A_c + A_a)} \quad (1)$$

4. การทดสอบการทนต่อแรงดึง เตรียมตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูปตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 25 mm ยาว 110 mm หนา 1.2 mm ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 150°C ให้ความร้อนนาน 10 min จึงกดอัดที่แรงดัน 100 bar นาน 3 min ใช้ทั้งหมด 5 แผ่นสำหรับการทดสอบ สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 27°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% ระยะห่างระหว่างหัวจับ 50 mm ความเร็วในการดึงยึด 50.00 mm/min บันทึกค่าความเค้น จุดขาด (Stress, Stress at break) และความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B882

5. การทดสอบการดูดซึมน้ำ ตัดตัวอย่างให้มีขนาดกว้าง 25 mm ยาว 3 mm หนา 1.2 mm ทำการทดสอบ 3 ชั้นต่อตัวอย่าง โดยอบตัวอย่างให้มีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 65°C ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W_0) นำไปวางในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 27°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% นาน 24 h จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (W_1) คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ 2

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

6. การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทดสอบโดยฝ่ายวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย วิธีการทดสอบดัดแปลงจากวิธี static incubation titrimetric determination (Zibilske *et al.*, 1994) โดยแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 4 ชุด ดังนี้

- control¹ หมายถึง ปุ๋ยหมักในถังทดสอบ
- R⁺² หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับเซลลูโลส (cellulose microcrystalline)
- R⁻³ หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)
- NE⁴ หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับชิ้นตัวอย่างทดสอบสูตรต่างๆ

ผสมสารในแต่ละชุดทดสอบให้เข้ากัน บ่มในสภาวะปิดที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 37°C ระยะเวลาทำการทดสอบ 20 วัน ตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ ตลอดระยะเวลาของการทดสอบโดยแต่ละชุดทดสอบมีจำนวน 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (ร้อยละ) ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในแต่ละชุดทดสอบเทียบกับชุดควบคุม หมายถึง ให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่ได้จากชุดควบคุมเป็น 100 นำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ในแต่ละชุดมาคำนวณเทียบกับชุดควบคุม ทำให้ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในแต่ละชุดทดสอบตามตารางที่ 4.5 ช่อง 1 หรือคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (ร้อยละ) ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในแต่ละชุดทดสอบเทียบกับชุดควบคุมเชิงบวก (R⁺²) หมายถึง ให้ปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่ได้จากชุดควบคุมเชิงบวกเป็น 100 ทำให้ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในแต่ละชุดทดสอบตามตารางที่ 4.5 ช่อง 2

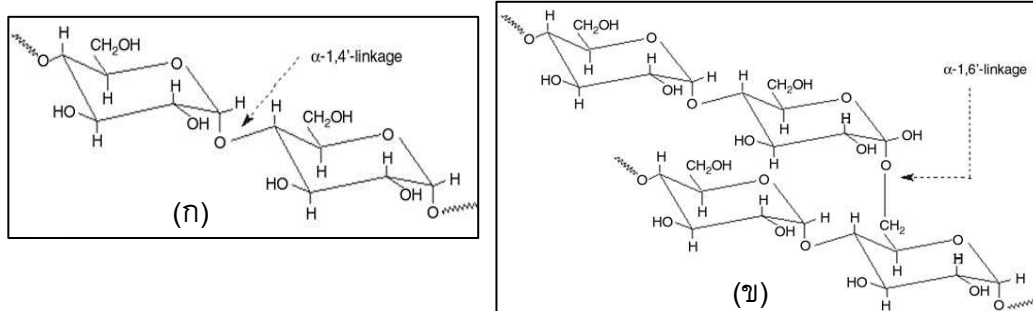
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

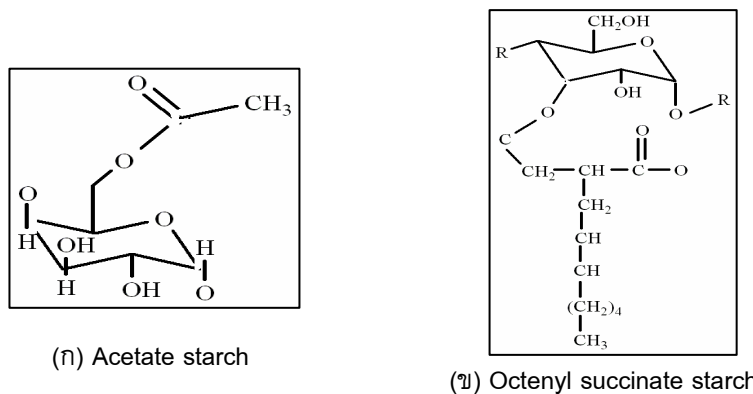
4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ

4.1.1 แป้งดิบและแป้งดัดแปร

แป้งไม่ดัดแปรหรือแป้งดิบ (NST) ประกอบไปด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่มาก (macromolecule) สองชนิด คืออะมิโลส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และอะมิโลเพกทิน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) รูปที่ 4.2 (ก) แสดงโครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตท (NE) และรูปที่ 4.2 (ข) แสดงโครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปรที่มีหมู่ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮไดรด์ (OP) แป้ง NE จะมีหมู่อะซิเตทเข้ามาต่อที่ตำแหน่ง 6 และแป้ง OP จะมีหมู่ออกทีนิลเข้ามาต่อที่ตำแหน่ง 4

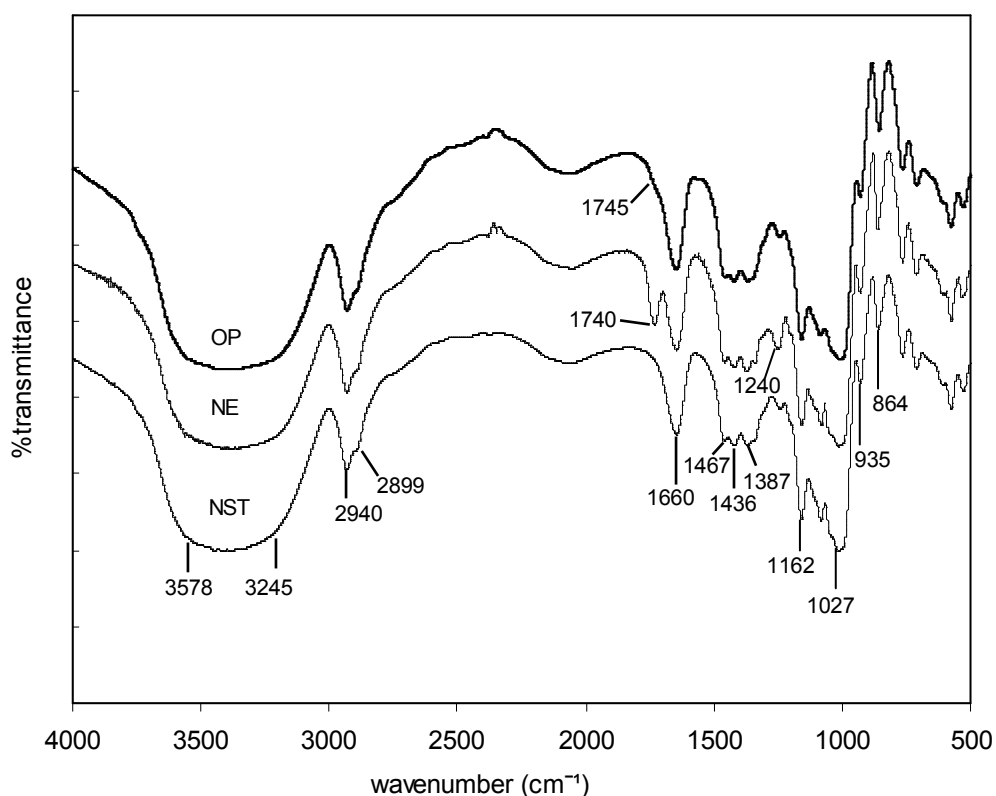


รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง NST (ก) อะมิโลส และ (ข) อะมิโลเพกทิน (Lu, 2009)



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งดัดแปร (ก) แป้ง NE และ (ข) แป้ง OP

นำแป้งทั้งสามชนิดไปตรวจวิเคราะห์ความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า FTIR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันของแป้งทั้งสามชนิดแสดงแถบความยาวคลื่นที่มีลักษณะเหมือนกันคือปรากฏพีคที่ความยาวคลื่น 3578-3245 2940 1660 1436 1162 1027 935 และ 864 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งได้สรุปแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของแป้ง NST แป้ง NE และแป้ง OP ในตารางที่ 4.1 สำหรับแป้ง NE มีแถบความยาวคลื่นที่แตกต่างจากแป้ง NST คือที่ความยาวคลื่น 1740 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O stretching และที่ 1240 cm^{-1} เป็น C-O stretching (Xu และ Hanna, 2004; Aburto *et al.*, 1997) ส่วนแป้ง OP ควรจะมีแถบความยาวคลื่นที่เด่นที่ 1745 cm^{-1} 2899 cm^{-1} และ 2940 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์คาร์บอนิล (Song, *et al.*, 2006) และควรจะมีแถบความยาวคลื่นที่ตำแหน่ง 1745 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O stretching (Xu, *et al.*, 2004) แต่เนื่องจากการเติมหมู่เติมหมู่ออกทิลซิลแซคซินิคแอนไฮไดรด์ ในปริมาณน้อยๆ จึงทำให้แถบสเปกตรัมของแป้ง OP ไม่เด่นชัด

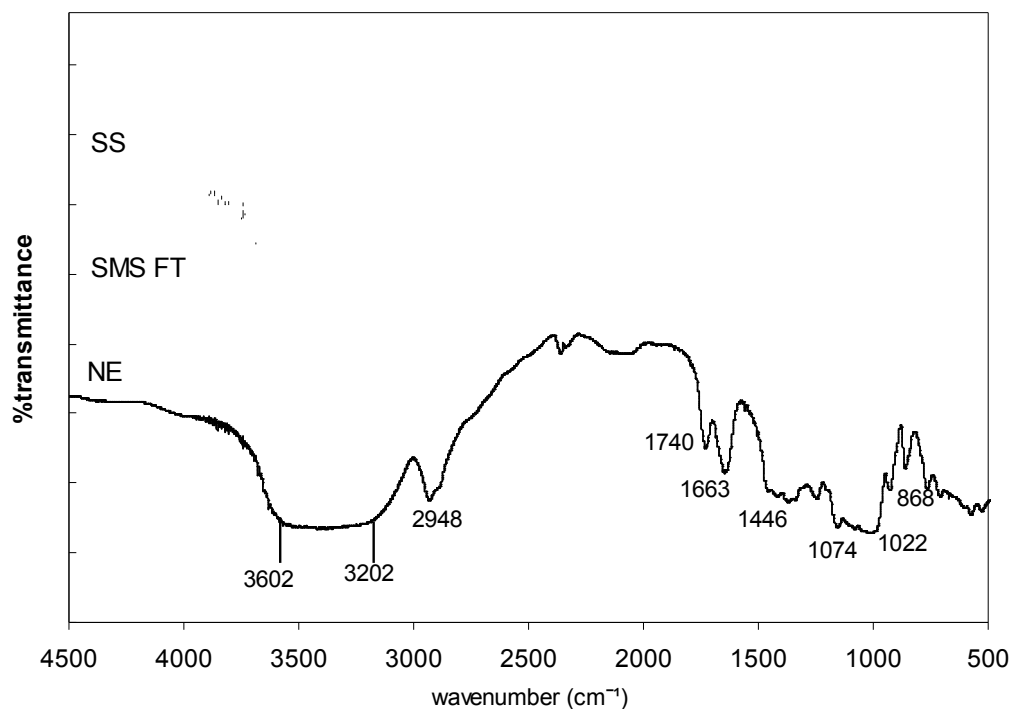


รูปที่ 4.3 FTIR สเปกตรัมของตัวอย่างแป้งสามชนิด คือ NST NE และ OP

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้ง NST NE และ OP ด้วยเครื่อง FTIR

แป้ง NST		แป้ง NE		แป้ง OP	
cm ⁻¹	Assignment	cm ⁻¹	Assignment	cm ⁻¹	Assignment
3245-3578	OH- stretching	3425-3578	OH - stretching	3425-3578	OH- stretching
2940	CH- stretching	2940	CH- stretching	2940	CH- stretching
2899	CH ₂ , CH ₃ - stretching	2899	CH ₂ , CH ₃ - stretching	2899	CH ₂ , CH ₃ - stretching
		1740	C=O stretching	1745	C=O stretching
1660	OH bending	1660	OH bending	1660	OH bending
1436	CO-CH ₂ bending	1436	CH ₂ bending	1651	RCOO ⁻ asymmetric
				1467	CH ₂ bending
1275	-CH ₂ bending	1387	-CH ₂ bending	1387	-CH ₂ bending
1162	C-O stretching	1162	C-O stretching	1162	C-O stretching
1027	-C-O-C-	1027	-C-O-C-	1027	-C-O-C-

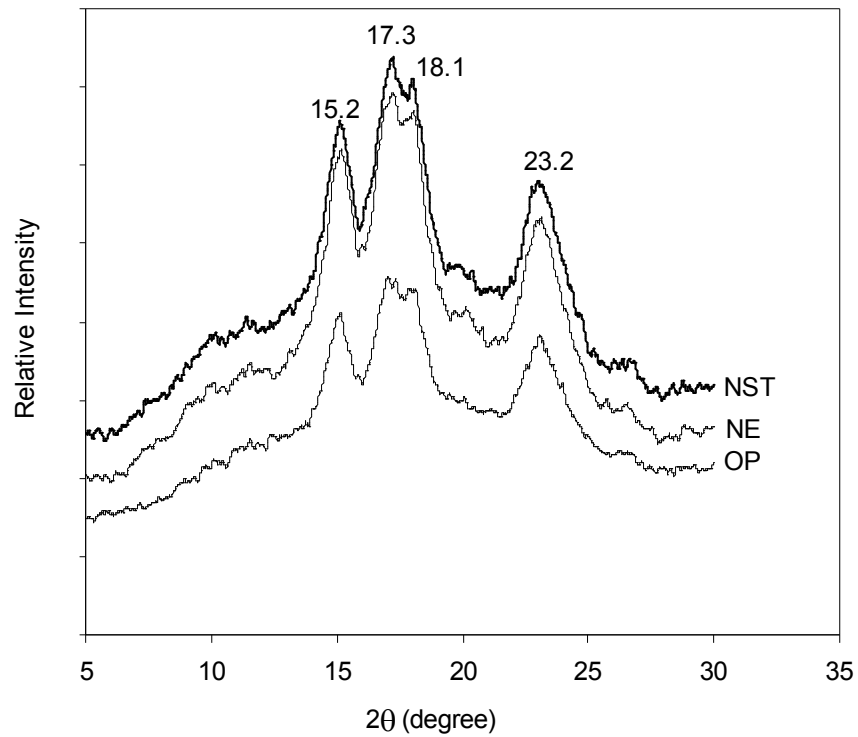
เมื่อใช้เทคนิค FTIR ทำการศึกษาแป้งดัดแปรที่มีการเติมหมู่อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ต่างกัน 3 ค่า คือแป้งที่มีการเติมหมู่อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ต่ำ (SS) แป้งที่มีการเติมหมู่อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่ปานกลาง (SMS FT) และแป้งที่มีการเติมหมู่อะซิเตทที่มีค่าการแทนที่สูง (NE) แสดงในรูปที่ 4.5 FTIR สเปกตรัมของแป้งทั้งสามชนิดส่วนใหญ่จะเกิดพีคในช่วงความยาวคลื่นเหมือนกัน เนื่องจากการเติมหมู่อะซิเตทเหมือนกัน เมื่อพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น 1740 cm⁻¹ เป็นหมู่ C=O stretching พบว่าความเข้มของความยาวคลื่นจะสูงขึ้นเมื่อค่าการแทนที่ของหมู่อะซิเตทเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มของหมู่ไฮดรอกซิลที่ความยาวคลื่น 3202-3602 cm⁻¹ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Xu, 2004



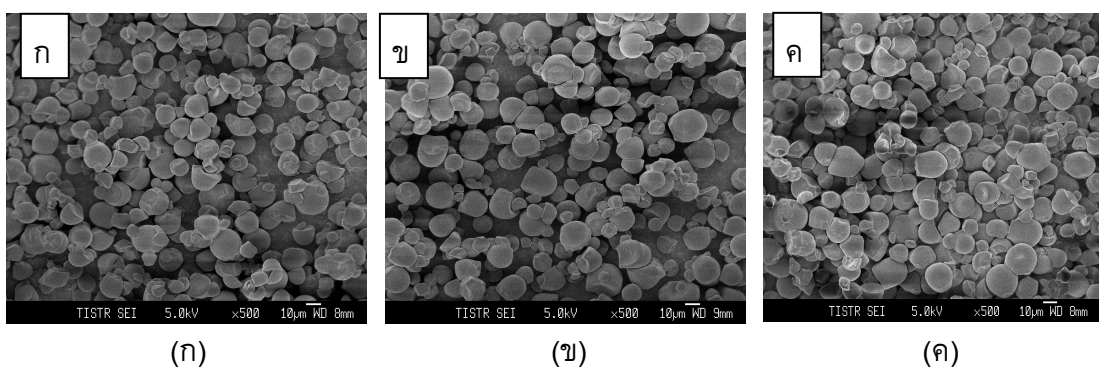
รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของแป้งที่แปรปริมาณอะซิเตทสามชนิด คือ SS SMS FT และ NE

ผลวิเคราะห์ทดสอบโครงสร้างผลึกของผงแป้งทั้งสามชนิดคือแป้ง NS NE และ OP ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าที่ 2θ มีพีคที่มีความเข้มสูงที่ 15.2° 17.3° 18.1° และ 23.2° ซึ่งแสดงว่ามีโครงสร้างสัณฐานเป็นชนิด A ที่เกิดจากการเรียงตัวของเกลียวคู่ที่มีความหนาแน่นมาก (Shi, 2006) การคำนวณหาปริมาณผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 3 หน้า 49 จากผลการคำนวณได้ปริมาณความเป็นผลึกของแป้ง NST แป้ง NE และแป้ง OP เท่ากับ 22.4 19.75 และ 22.24% ตามลำดับ ปริมาณความเป็นผลึกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน นั้นแสดงว่า การเติมหมู่อะซิเตท และหมู่ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮโดรตีในปริมาณน้อยๆ ไม่มีผลต่อโครงสร้างสัณฐานของแป้งคือไม่ได้เข้าไปทำลายความเป็นผลึกของแป้งแต่เข้าไปเกาะบนพื้นผิวหน้าของเม็ดแป้งเท่านั้น (Bhosale และ Singhal, 2006) ซึ่งยืนยันได้ด้วยภาพ ถ่าย FESEM ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ภาพ FESEM แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งทั้งสามชนิดถ่ายที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่ารูปร่างของเม็ดแป้ง NE และเม็ดแป้ง OP ไม่ได้แตกต่างไปจากเม็ดแป้ง NST แต่อย่างใด นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดแป้งทั้งสามชนิดมีลักษณะทรงกลม ทำการวัดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งด้วยโปรแกรมอิมเมจ เจ (image J) จำนวน 50 เม็ด มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 4-24 μm แป้ง NST มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 12 μm (± 4)

แป้ง NE มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $14\ \mu\text{m}$ (± 5) และแป้ง OP มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $15\ \mu\text{m}$ (± 4)



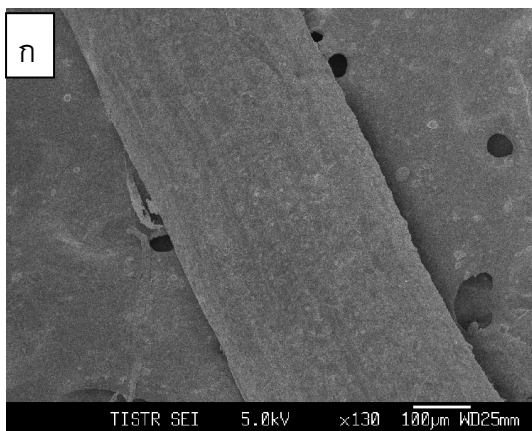
รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแป้ง NST NE และแป้ง OP จากเทคนิค XRD



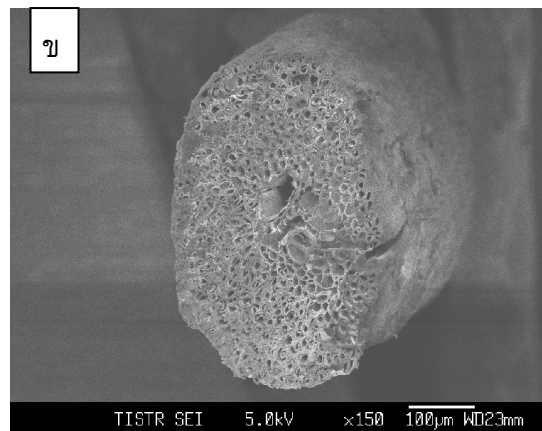
รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้ง (ก) NST (ข) NE และ (ค) OP

4.1.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยสำหรับเสริมแรง

ในการทดลองนี้ทำการแปรชนิดของเส้นใย 2 ชนิดคือ เส้นใยยูคาลิปตัสและเส้นใยมะพร้าว ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างของเส้นใยก่อนปรับสภาพพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีพื้นผิวเรียบภายในเส้นใยมีรูพรุน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 200 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 หลังจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยด่าง พบว่าเส้นใยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 - 40 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยยูคาลิปตัสฟอกขาวมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10-20 μm เมื่อสังเกตบนพื้นผิวระหว่างเส้นใยพบว่ามีเส้นใยเล็กๆเกาะเกี่ยวระหว่างเส้นใยซึ่งแตกต่างจากเส้นใยมะพร้าว

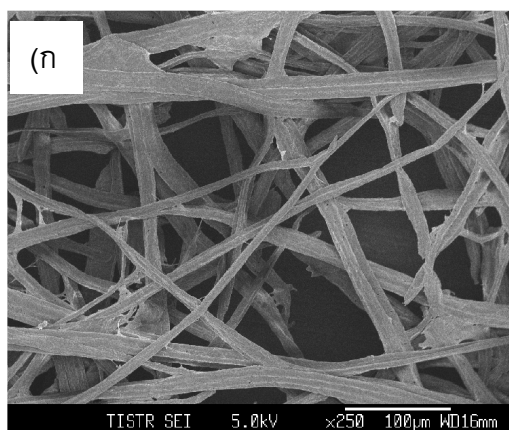


(ก)

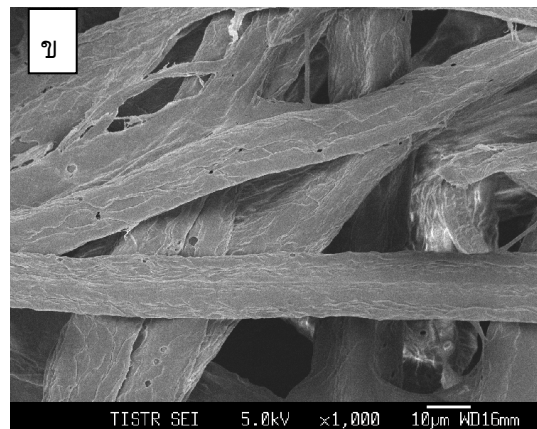


(ข)

รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (ก) พื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง

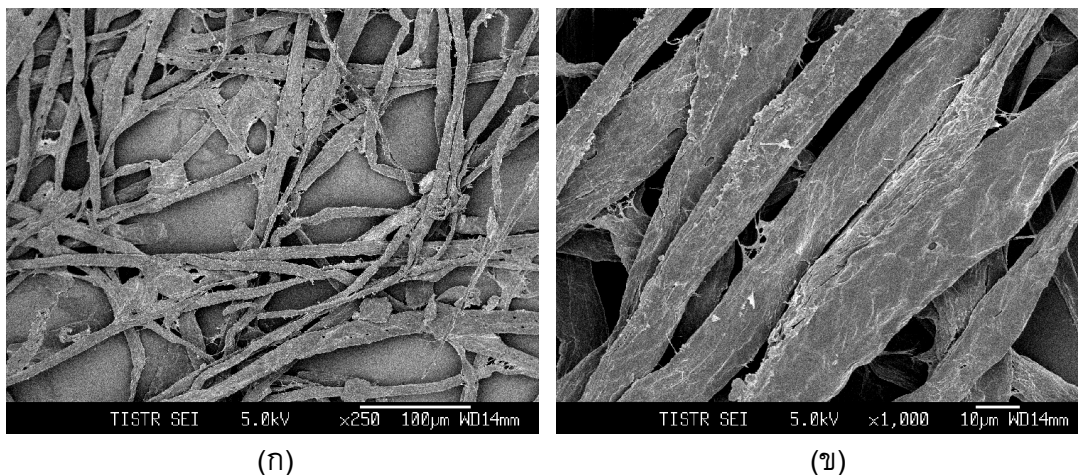


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ลักษณะรูปร่างเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพแล้ว (ก) ถ่ายที่กำลังขยาย 250 เท่า และ (ข) ถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.9 ลักษณะรูปร่างเส้นใยยูคาลิปตัสที่ปรับสภาพและฟอกขาว (ก) ถ่ายที่กำลังขยาย 250 เท่า และ (ข) ถ่ายที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

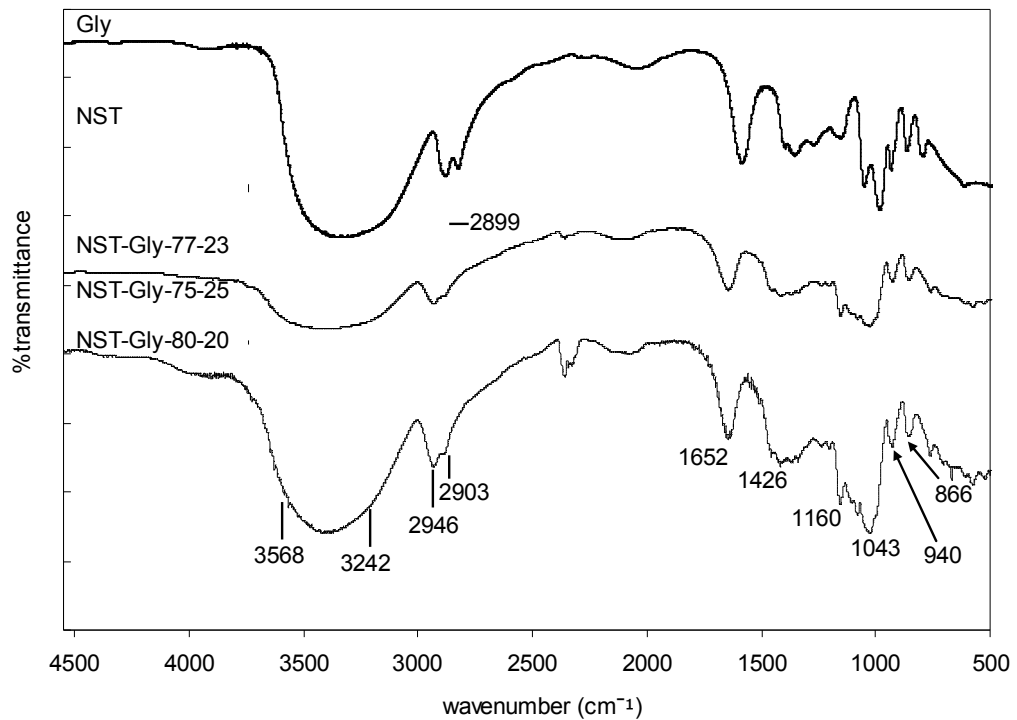
4.2 ผลการวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติก

4.2.1 ผลวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค FTIR

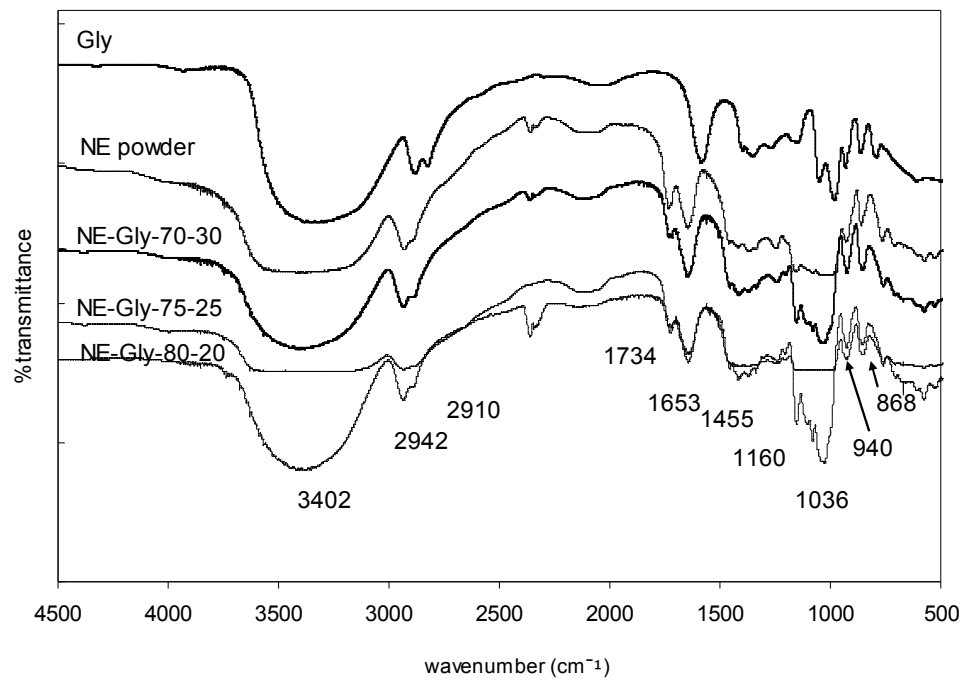
เทคนิค FTIR ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งในโมเลกุลช่วงสั้น (short-range molecule) โดยหมู่ OH ของกลีเซอรอลจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดเป็นแป้งเทอร์โมพลาสติก และใช้เทคนิค FTIR ในการพิสูจน์ถึงอิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอลต่อโครงสร้างทางเคมีของแป้งเทอร์โมพลาสติก ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ด้วยเทคนิค FTIR ของแป้ง NST แป้ง NE และแป้ง OP แสดงในรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปจะแสดง FTIR สเปกตรัมของกลีเซอรอล แป้งบริสุทธิ์ และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มีการแปรปริมาณกลีเซอรอล เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแถบความยาวคลื่นเมื่อมีการแปรปริมาณกลีเซอรอล โดยแป้งทั้งสามชนิดให้แถบความยาวคลื่นไม่แตกต่างกัน พิจารณาที่ความเข้มของพีคที่แถบความยาวคลื่นที่ $3242-3568\text{ cm}^{-1}$ ของแป้งบริสุทธิ์เป็นหมู่ OH stretching ความกว้างของแถบความยาวคลื่นนี้จะแคบกว่าแถบความยาวคลื่นของแป้งเทอร์โมพลาสติกเกิดจากแถบความยาวคลื่นของแป้งเทอร์โมพลาสติกมีแนวโน้มลดลง และความกว้างของพีคจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลมารวมตัวกันหนาแน่นส่งผลให้เกิดปฏิกริยาระหว่างหมู่ไฮโดรเจนมากขึ้น

พิจารณาที่ความยาวคลื่นที่ 2899 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching พบว่าความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นในแป้งเทอร์โมพลาสติกและเคลื่อนไปที่ความยาวคลื่น 2903 cm^{-1} เกิด

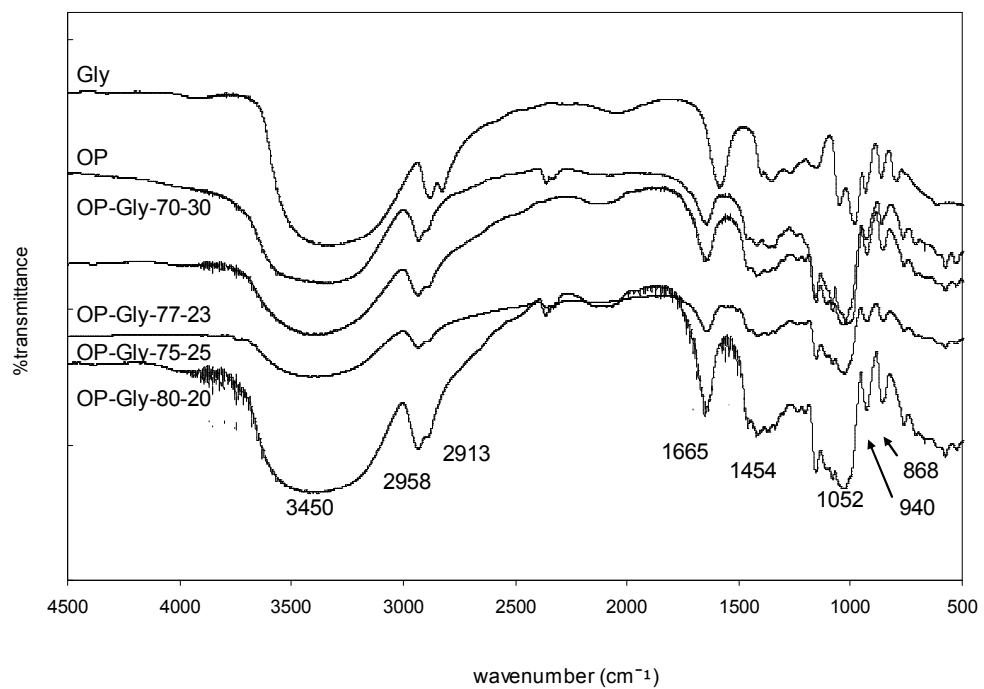
จากความแตกต่างของการยืดหด (stretching) ของหมู่ C-H ในโมเลกุลของแป้งและโมเลกุลของกลีเซอรอล ในขณะที่ความยาวคลื่นที่ 940 cm^{-1} มีความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความยาวคลื่นนี้มีความสัมพันธ์กับพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิล ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ซึ่งมีความไวต่อน้ำ (Soest, *et al.*, 1996, Rui *et al.*, 2006)



รูปที่ 4.10 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST กลีเซอรอล และแป้ง NST เทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน NST:กลีเซอรอล เท่ากับ 77:23 75:25 และ 80:20



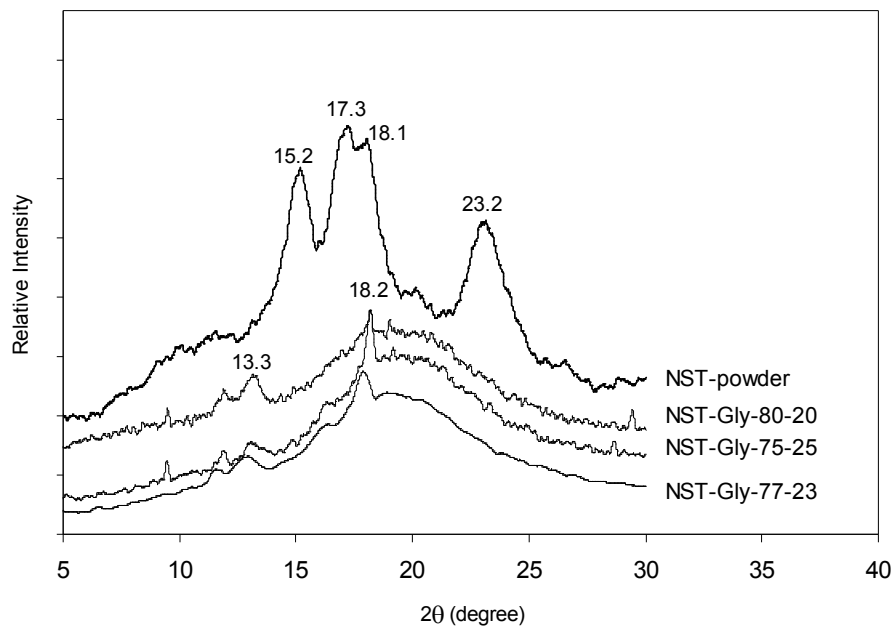
รูปที่ 4.11 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NE Gly และแป้ง NE เทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน NE:Gly เท่ากับ 70:30 75:25 และ 80:20



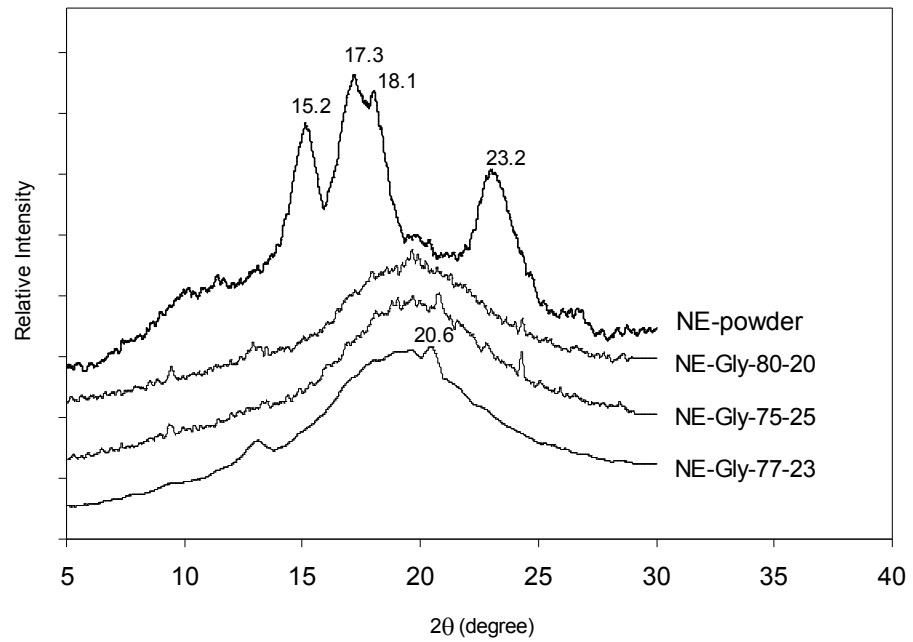
รูปที่ 4.12 FTIR สเปกตรัมของแป้ง OP Gly และแป้ง OP เทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน OP:Gly เท่ากับ 70:30 77:23 75:25 และ 80:20

4.2.2 ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค XRD

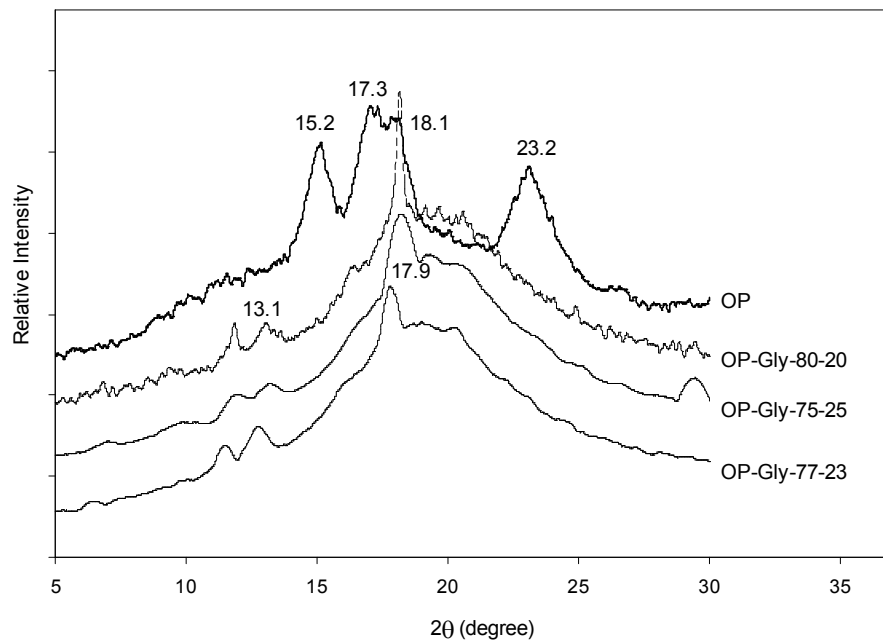
ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 4.13-4.15 พบว่ากระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของแป้งที่ผสมกลีเซอรอลได้ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งบริสุทธิ์ก่อนเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยความเข้มของพีคลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น การเติมกลีเซอรอลจะเข้าไปทำให้การยึดเกาะกันภายในสายโซ่โมเลกุลของแป้งและการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของแป้งลดลง เนื่องจากความแรงของพันธะไฮโดรเจนภายในหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถูกทำลายโดยโมเลกุลของกลีเซอรอล ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งลดลงเมื่อผสมกับกลีเซอรอล (Viviana, *et al.*, 2005; Rui, *et al.*, 2006) โดยเฉพาะแป้ง NE โครงสร้างผลึกถูกทำลายได้มากที่สุด ส่วนแป้ง NST และแป้ง OP จะมีบางส่วนที่เปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากชนิด A เป็นชนิด V_n ดังปรากฏพีค 2θ มีพีคที่มีความเข้มสูงที่ 12.6° และ 19.4° เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นในแป้ง NST และแป้ง OP ตามลำดับ ซึ่งการเกิดผลึกชนิด V_n เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนและการบีบอัดทำให้กลีเซอรอลเข้าไปละลายผลึกอะมิโลสชนิดเกลียวเดี่ยวของแป้งเกิดเป็นผลึก V_n (Soest, *et al.*, 1996, Jean-Marie, *et al.*, 2008) การคำนวณหาปริมาณผลึกตามสมการที่ 1 ในบทที่ 3 หน้า 49 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าความเป็นผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งบริสุทธิ์



รูปที่ 4.13 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง NSTบริสุทธิ์ และแป้ง NSTเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน NST:Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77:23



รูปที่ 4.14 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง NE บริสุทธิ์ และแป้ง NE เทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน NE:Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77:23



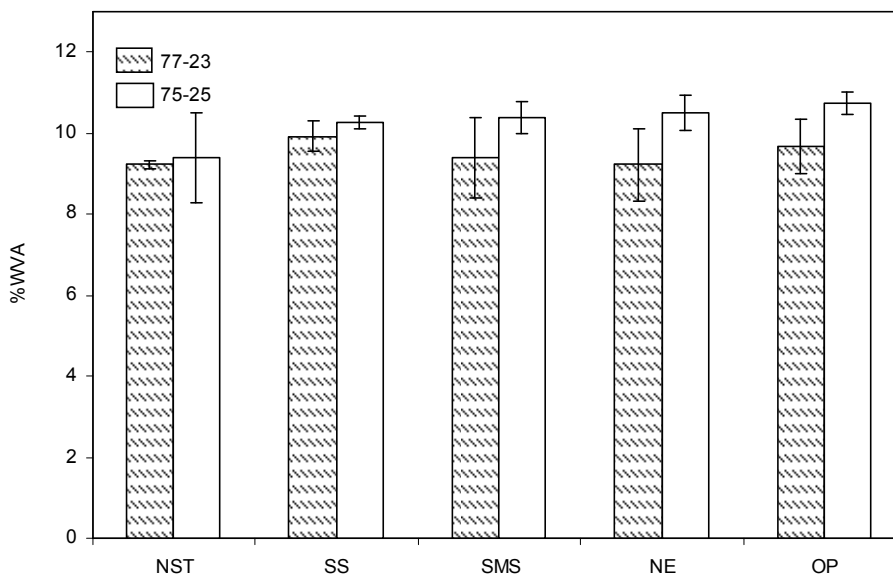
รูปที่ 4.15 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้ง OP บริสุทธิ์ และแป้ง OP เทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วน OP:Gly เท่ากับ 80:20 75:25 และ 77:23

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
NST	22.40
NST-Gly-80-20	-
NST-Gly -75-25	2.12
NST-Gly -77-23	-
NE	19.75
NE- Gly -80-20	-
NE- Gly -75-25	-
NE- Gly -77-23	-
OP	22.24
OP- Gly -80-20	3.60
OP- Gly -75-25	3.40
OP- Gly -77-23	2.63

4.2.3 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก

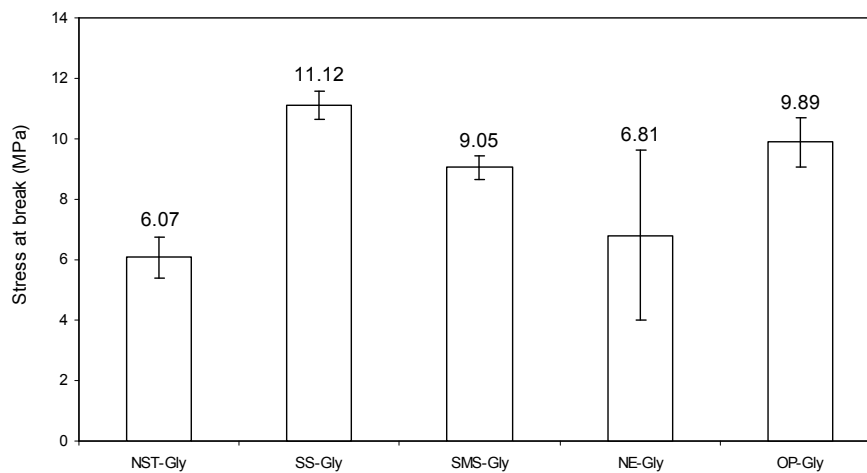
ค่าการดูดซึมน้ำคำนวณตามสมการที่ 2 ในบทที่ 3 หน้า 50 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้ง NST SS SMS FT NE และ OP แสดงในรูปที่ 4.16 ที่อัตราส่วนผสมของแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 75:25 ค่าการดูดซึมน้ำของแป้ง NST SS SMS NE และ OP มีค่าเท่ากับ 9.41 10.27 10.37 10.5 และ 10.74% ตามลำดับ และที่อัตราส่วนผสมของแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 77:23 NST SS SMS NE และ OP มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 9.22 9.92 9.39 9.22 และ 9.67% ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลลดลงจากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 23 ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่ามีความหนาแน่นที่ลดต่ำลงโดยเฉพาะกับแป้ง SMS FT NE และ OP แสดงว่าปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมลงไปมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากกลีเซอรอลมีสมบัติในการดูดความชื้น (hygroscopic) และทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮดรอกซีที่อาจส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปในแป้งเทอร์โมพลาสติกได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาชนิดของแป้งพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของแป้งดิบและแป้งดัดแปรมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุเนื่องมาจากแป้งดัดแปรที่นำมาทดลองเป็นการดัดแปรที่พื้นผิว ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่แตกต่างจากแป้งดิบ



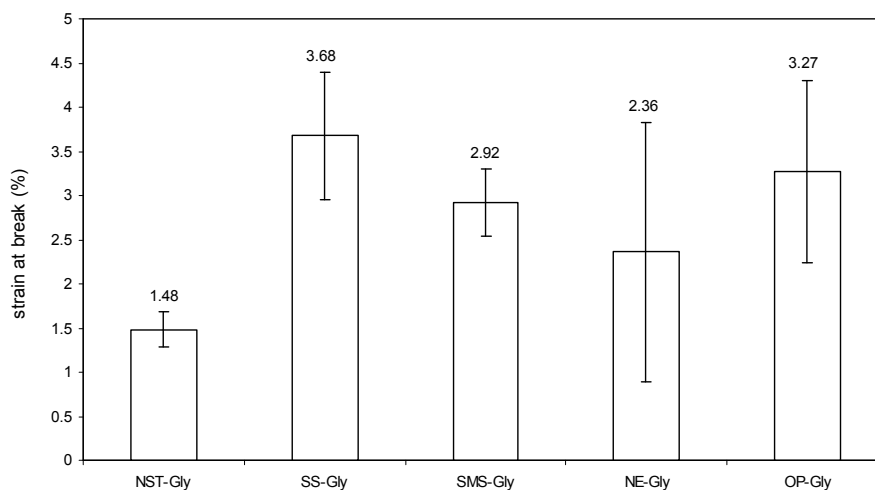
รูปที่ 4.16 ผลการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่แปรชนิดของแป้ง ที่อัตราส่วน 75:25 และ 77:23

4.2.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติก

ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงด้วยของแป้งเทอร์โมพลาสติก 5 ชนิดคือ NST-Gly SS-Gly SMS-Gly NE-Gly และ OP-Gly ที่อัตราส่วนแป้ง:กลีเซอรอล เท่ากับ 77:23 แสดงในรูปที่ 4.17 แสดงค่าความเค้น ณ จุดขาด เรียงจากค่าที่สูงไปหาค่าที่ต่ำคือ 11.12 9.89 9.05 6.81 และ 6.07 เป็นค่าความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง SS-Gly OP-Gly NE-Gly SMS-Gly และ NST-Gly ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าแป้งดัดแปรมีค่า ความเค้น ณ จุดขาด สูงกว่าแป้งดิบ รูปที่ 4.18 แสดงค่าความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Gly SS-Gly SMS-Gly NE-Gly และ OP-Gly มีค่าเท่ากับ 1.48 3.68 2.92 2.36 และ 3.27 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรมีค่าสูงกว่าแป้งดิบสาเหตุอาจเนื่องมาจากภายในโครงสร้างของแป้งดัดแปรมีความเป็นพลาสติกที่เกิดจากการเติมหมู่เอสเทอร์เข้าไป (Thiebaud, 1996)



รูปที่ 4.17 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 77:23



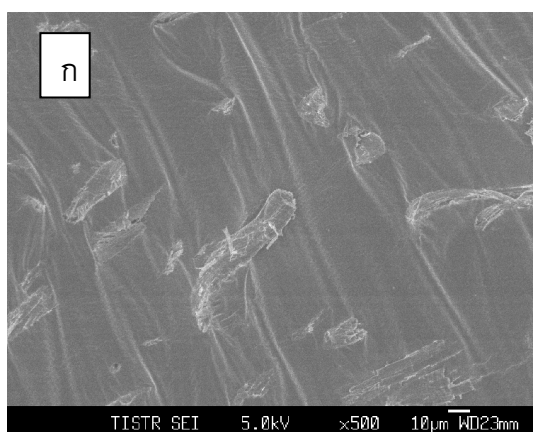
รูปที่ 4.18 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอล เท่ากับ 77:23

4.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

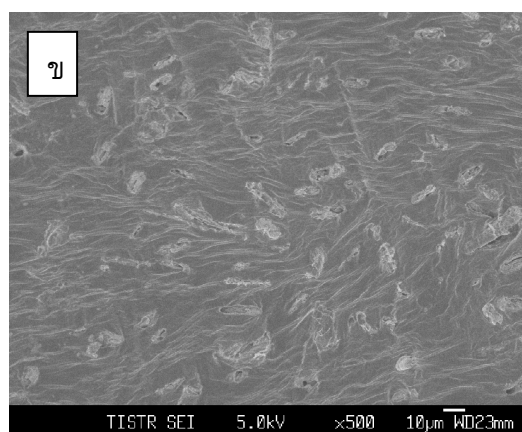
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM

ทำการตรวจสอบการกระจายตัวของเส้นใยและความเข้ากันได้ระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติก และเส้นใยคาไลปัสที่แปรปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และเส้นใย

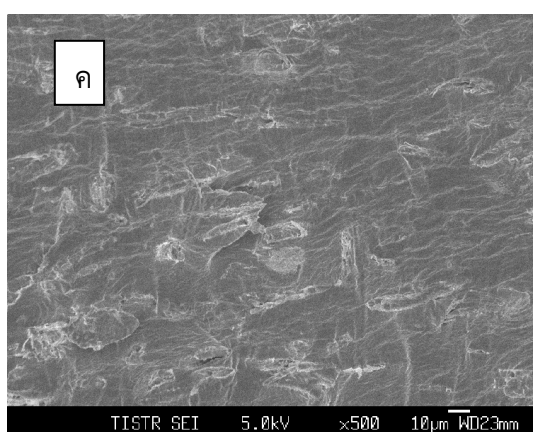
ยูคาลิปตัสที่อัตราส่วนร้อยละ 72:23:5 67:23:10 และ 62:23:15 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ตามลำดับ แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเตรียมโดยใช้พื้นฐานที่ยึดส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลเป็น 77:23 โดยเส้นใยที่เติมลงไปปริมาณ ร้อยละ 5-15 (โดยน้ำหนัก) นำไปแทนที่ในส่วนของแป้ง ภาพจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวค่อนข้างดี และมีบางแห่งที่เส้นใยจับตัวกันเป็นก้อนเมื่อปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าแป้งและเส้นใยสามารถจับยึดกันได้ดี โดยพบว่าพื้นผิวของเส้นใยถูกหุ้มด้วยแป้ง พิจารณาจากภาพจะพบว่า มีเส้นใยโผล่ออกมาจากผิวของแป้งเทอร์โมพลาสติกเนื่องจากแรงดึง และไม่พบว่าเส้นใยหลุดออกจากพื้น ผิวของแป้งเนื่องจากไม่มีรูบนพื้นผิวของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เป็นเนื้อแมทริกซ์ (matrix)



(ก) 72:23:5



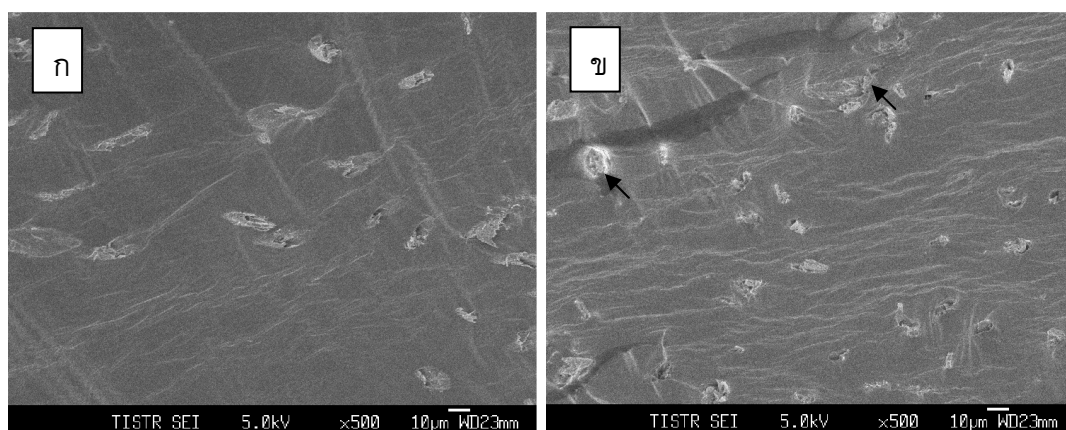
(ข) 67:23:10



(ค) 62:23:15

รูปที่ 4.19 ภาพ FESEM แสดงภาพตัดขวางของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (NST) เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสปริมาณต่างๆ (ก) ร้อยละ 5 (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 15

รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่าย FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติก NST เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพทั้งที่ไม่ฟอกขาว และฟอกขาว ที่มีปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนร้อยละ 72:23:5 พบว่าเส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาวจะมีการกระจายตัวดีกว่าเส้นใยมะพร้าวฟอกขาวเนื่องจากไม่พบการจับตัวเป็นก้อนในเส้นใยที่ยังไม่ฟอกขาว ส่วนเส้นใยมะพร้าวฟอกขาวมีการจับตัวเป็นก้อน

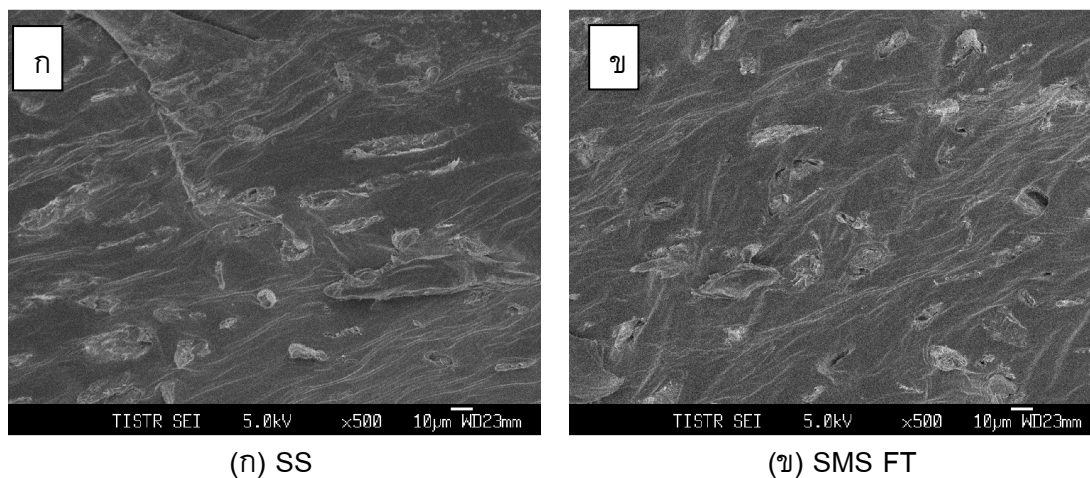


(ก) เส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาว

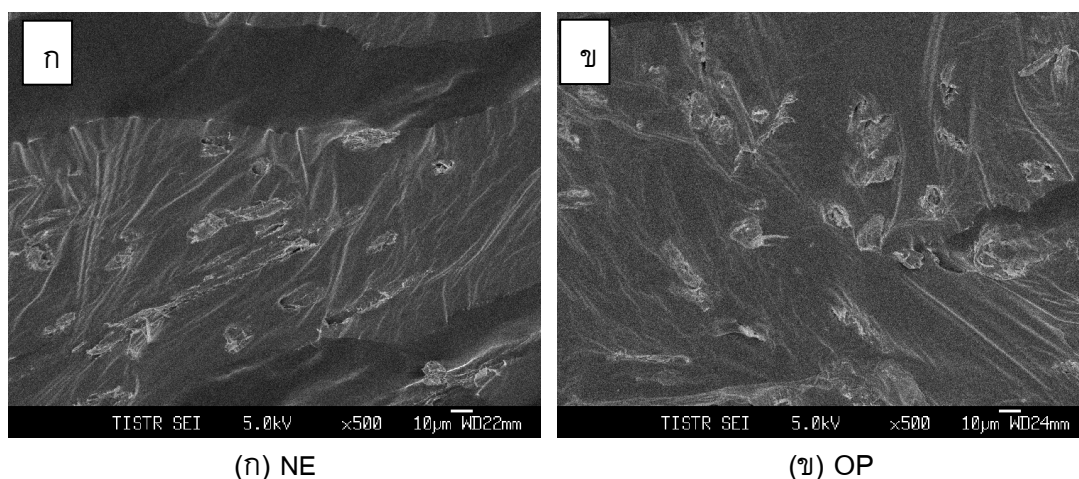
(ข) เส้นใยมะพร้าวฟอกขาว

รูปที่ 4.20 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต (NST) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ร้อยละ 5: (ก) เส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาว และ (ข) เส้นใยมะพร้าวฟอกขาว

รูปที่ 4.21-4.22 แสดงภาพถ่าย FESEM ของแป้งตัดแปร SS SMS NE และ OP เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีอัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอรอลต่อเส้นใยร้อยละ 67:23:10 จากภาพถ่ายพบว่าเส้นใยยูคาลิปตัสมีการกระจายในเนื้อแมทริกซ์ค่อนข้างดี นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยและแป้งตัดแปรมีความเข้ากันได้ดี สังเกตจากรอบ ๆ เส้นใยไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยและเนื้อแป้ง



รูปที่ 4.21 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง: 10 (ก) แป้ง SS และ (ข) แป้ง SMS FT

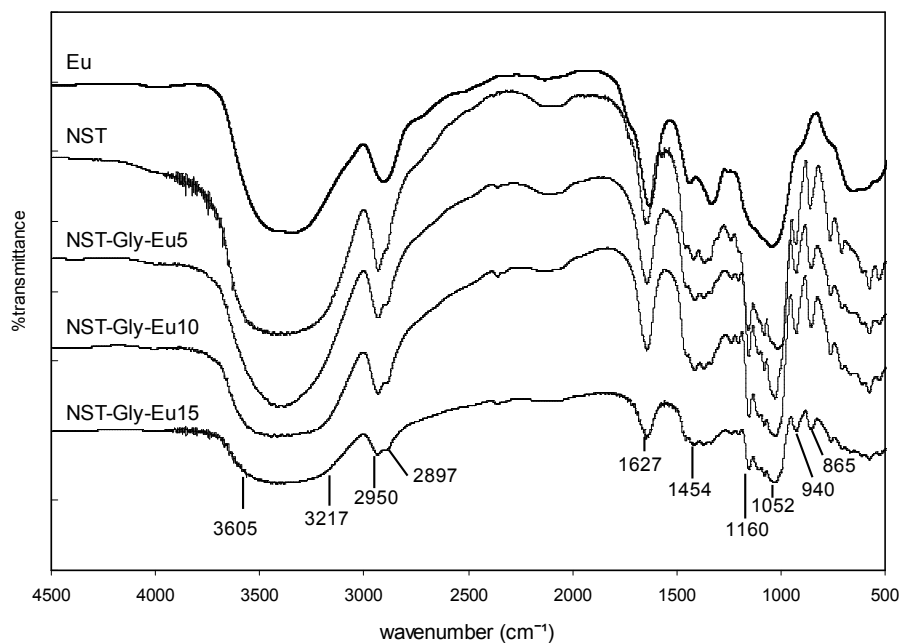


รูปที่ 4.22 ภาพ FESEM แสดงภาคตัดขวางของแป้งตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง: 10 (ก) แป้ง NE และ (ข) แป้ง OP

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยเทคนิค FTIR แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าหมู่ฟังก์ชันของแป้งและเส้นใยคาร์บอนไม่แตกต่างกัน เนื่องจากพีดของแป้งและเส้นใยมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน โดยพีดหลักที่พบคือที่ความยาวคลื่น 3430 cm^{-1} 2950 cm^{-1} 1627 cm^{-1} 1454 cm^{-1} 1350 cm^{-1} และ 1052 cm^{-1} อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงทั้งความยาวคลื่นและความเข้มของพีด เมื่ออยู่ในรูปของการคอมโพสิต Corradini, 2007 ได้รายงานว่าการที่แป้งและเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่แตกต่างกันจะส่งผลให้

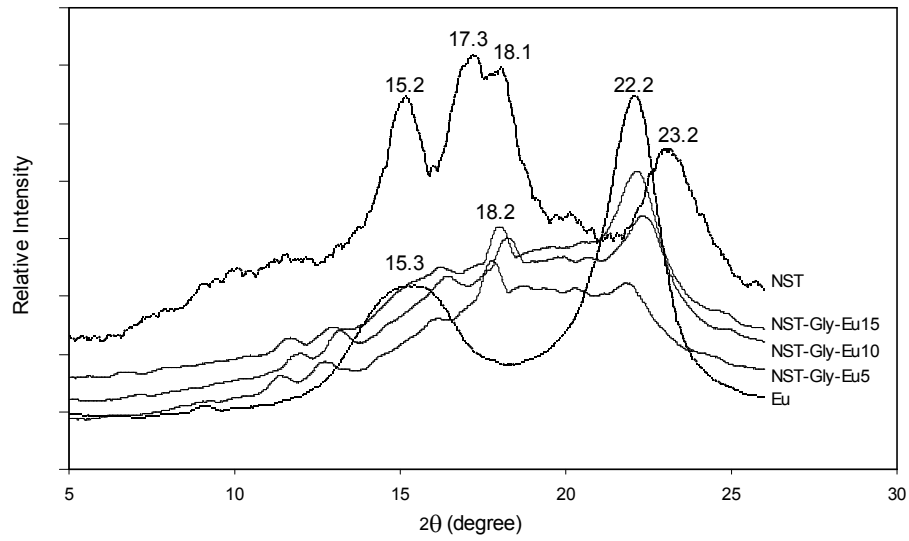
แป้งและเส้นใยสามารถผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี ซึ่งภาพ SEM สามารถยืนยันการเข้ากันได้ดีของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วย



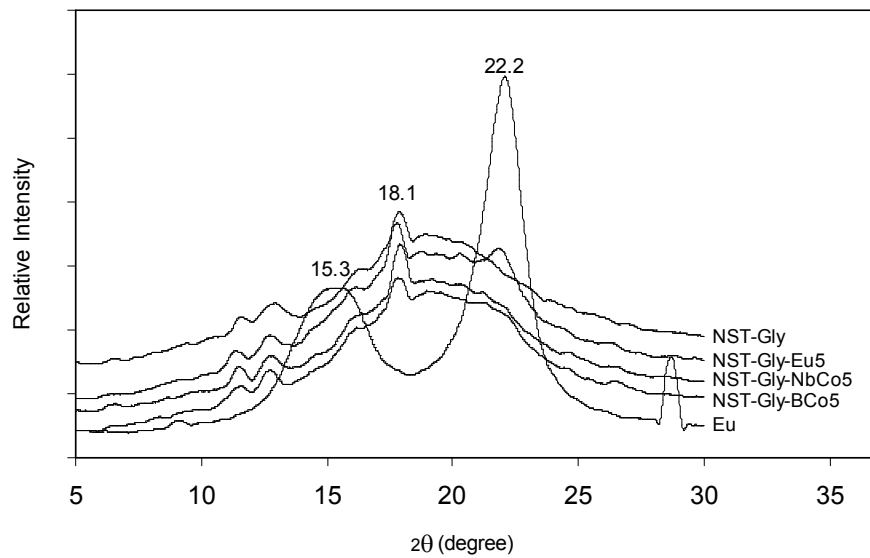
รูปที่ 4.23 FTIR สเปกตรัมของเส้นใยยูคาลิปตัส แป้งเทอร์โมพลาสติก NST และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

4.3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค XRD

ผลวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยยูคาลิปตัส แป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 4.24 เส้นใยมีพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15.3° และ 22.2° แสดงลักษณะโครงสร้างที่มีผลึก ส่วนแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนของแป้ง:กลีเซอรอล:เส้นใย เท่ากับ 72:23:5 67:23:10 และ 62:23:15 พบว่า 2θ มีพีคที่ 18.2° และ 22.1° ซึ่งเลื่อนไปจากเดิม โดยความเข้มของพีคเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และโครงสร้างความเป็นผลึกก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Ma, 2005 ในรูปที่ 4.25 เปรียบเทียบแบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกันในปริมาณร้อยละ 5 พบว่าเส้นใยมะพร้าวทั้งที่ไม่ฟอกขาว (NbCo) และฟอกขาว (BCo) แสดงผลสอดคล้องกับแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนของแป้ง:กลีเซอรอล:เส้นใย เท่ากับ 72:23:5

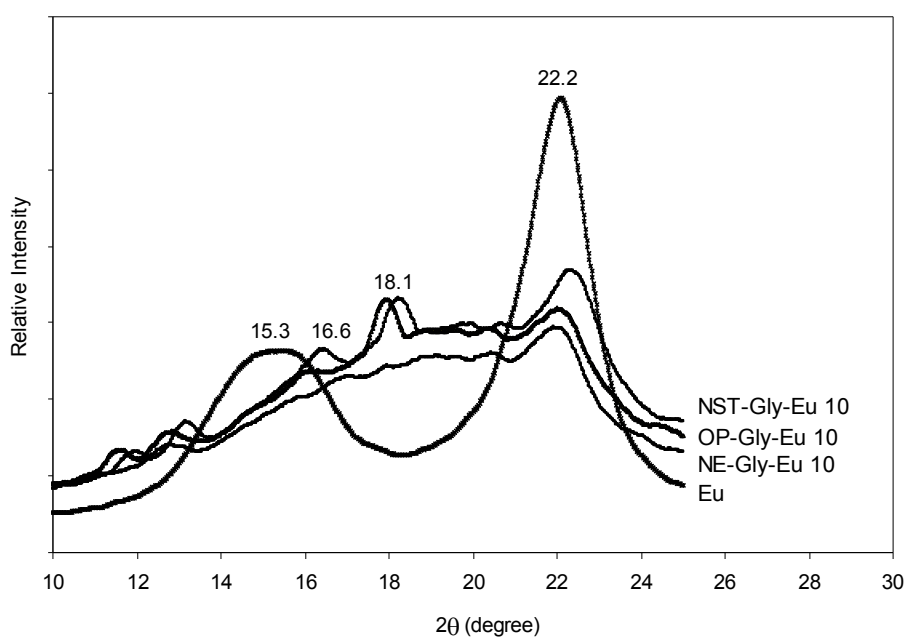


รูปที่ 4.24 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 และเส้นใยยูคาลิปตัส



รูปที่ 4.25 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยยูคาลิปตัส ที่อัตราส่วนเส้นใย 5% และเส้นใยยูคาลิปตัส

ผลวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานด้วยเทคนิค XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด NST NE OP และเส้นใยยูคาลิปตัส ที่อัตราส่วนของแป้ง: กลิเซอรอล:เส้นใย เท่ากับ 67:23:10 แสดงในรูปที่ 4.26 เส้นใยมีพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 15.3° และ 22.2° แสดงลักษณะโครงสร้างที่มีผลึก ส่วนแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST NE และ OP เสริมแรงด้วยเส้นใย พบว่า 2θ มีพีคที่ 18.1° และ 22.3° ซึ่งเลื่อนไปจากเดิมโดยที่ 22.3° แสดงโครงสร้างผลึกของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Dae-Hyun, 2002.



รูปที่ 4.26 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเส้นใยยูคาลิปตัส แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด NST แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัส ชนิด NE และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสชนิด OP ที่อัตราส่วนเส้นใย 10%

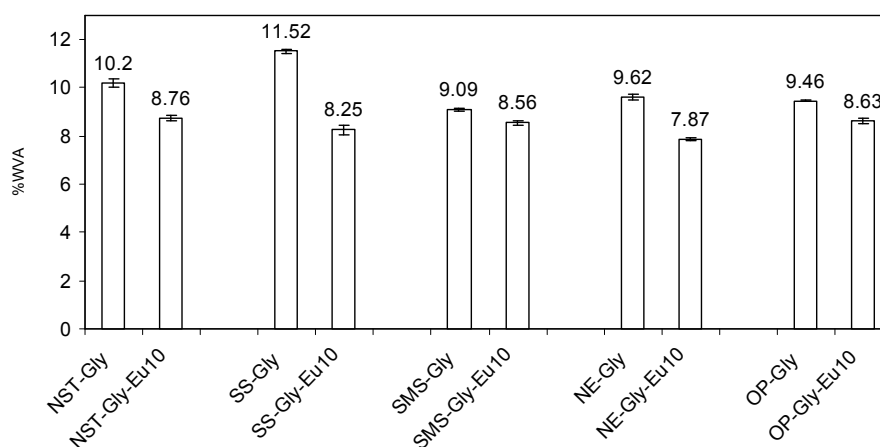
4.3.4 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัส (Eu) และเส้นใยมะพร้าว (Co) เส้นใยยูคาลิปตัสใช้ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 สำหรับเส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาว (NbCo) และเส้นใยมะพร้าวฟอกขาว (BCo) ใช้ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 แสดงตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซึมน้ำของ NST-Gly NST-Gly-Eu5 NST-Gly-Eu10 NST-Gly-Eu15 NST-Gly-NbCo5 และNST-Gly-BCo5 มีค่าเท่ากับ 10.2 8.58 8.76 8.85 8.69 และ 8.78 % ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเมื่อมีการ

เสริมแรงด้วยเส้นใย ทั้งจากเส้นใยยูคาลิปตัสและเส้นใยมะพร้าวไม่ฟอกขาวและเส้นใยมะพร้าวฟอกขาว รูปที่ 4.27 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของ NST-Gly NST-Gly-Eu SS-Gly-Eu SMS-Gly-Eu NE-Gly-Eu และOP-Gly-Eu มีค่าเท่ากับ 10.2 8.76 11.52 8.25 9.09 8.56 9.62 7.87 9.46 และ 8.63% ตามลำดับ จากค่าการดูดซึมน้ำที่ได้เมื่อมีการแปรชนิดของแป้งตัดแปรพบว่าแป้ง NE-Gly-Eu10 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เมื่อเติมเส้นใยลงไปจึงไปช่วยทำให้ความชอบน้ำลดลงแต่ลดลงไม่มากนักเนื่องจากเส้นใยโดยธรรมชาติแล้วมีความชอบน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งทุกสูตรมีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่มีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Prachayawarakorn, 2010

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสในปริมาณต่างกัน และเส้นใยมะพร้าว

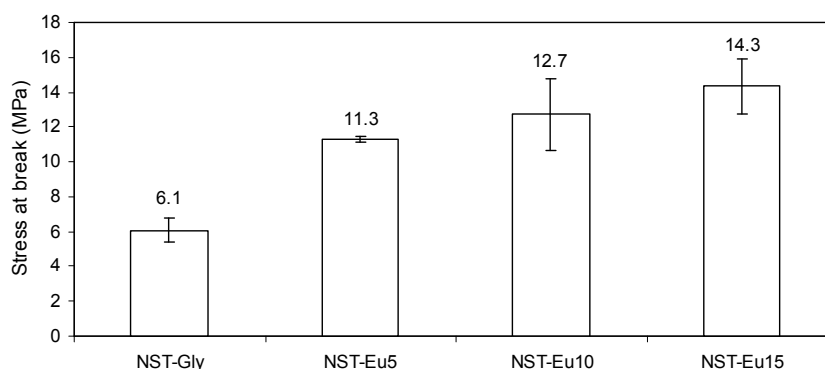
ชื่อตัวอย่าง	ผลการดูดซึมน้ำ (%)
NST-Gly (77:23)	10.2 (± 0.17)
NST-Gly-Eu5 (72:23:5)	8.58 (± 0.08)
NST-Gly-Eu10 (67:23:10)	8.76 (± 0.12)
NST-Gly-Eu15 (62:23:15)	8.85 (± 0.16)
NST-Gly-NbCo5 (72:23:5)	8.69 (± 0.04)
NST-Gly-BCo5 (72:23:5)	8.78 (± 0.07)



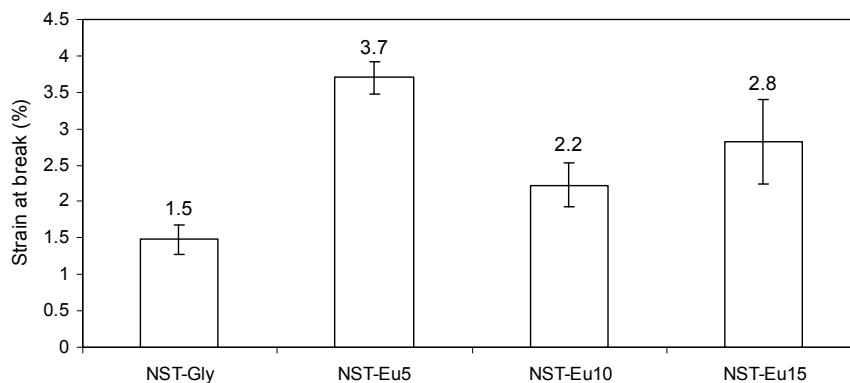
รูปที่ 4. 27 อิทธิพลชนิดแป้งต่อค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิทผสมเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 10

4.3.5 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงในรูปแบบที่ 4.28 แสดงค่าความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใย โดยมีการแปรปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 5 10 และ 15 มีค่าดังต่อไปนี้ 11.3 12.7 และ 14.3 MPa ตามลำดับพบว่าค่าความเค้น ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าเส้นใยที่เติมช่วยทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีการเติมเส้นใย โดยแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มีการเติมเส้นใยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักมีค่าความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 14 ส่วนแป้งที่ไม่ได้เติมเส้นใยมีค่าความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 6 ในรูปที่ 4.29 แสดงค่าความเครียด ณ จุดขาด (%) ของแป้งเทอร์โมพลาสติก NST เสริมแรงด้วย เส้นใยยูคาลิปตัส โดยมีการแปรปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 5 10 และ 15 ดังนี้ 3.7 2.2 และ 2.8 ตามลำดับ จากผลของความเครียด ณ จุดขาด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นแต่ไม่แปรผันตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น คือที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 5 ให้ค่าความเครียด ณ จุดขาด สูงที่สุดคือ 3.5 รองลงมาคือที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 15 เท่ากับ 2.8 ส่วนที่เติมปริมาณเส้นใยร้อยละ 10 เท่ากับ 2.0 จากผลที่ได้ อาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการกระจุกตัวที่จุดใดจุดหนึ่งมากจึงทำให้ค่าที่ได้ไม่แปรผันตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับภาพจาก SEM ที่แสดงในรูปที่ 4.20 นอกจากนี้แล้วเส้นใยยังมีข้อจำกัดในเรื่องการยึดตัว

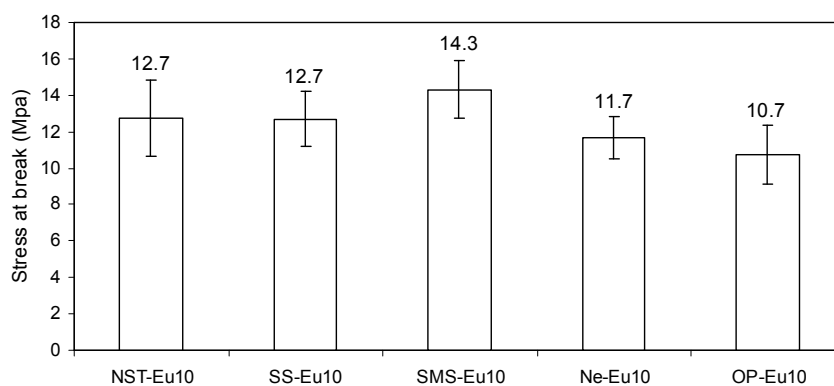


รูปที่ 4.28 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 5 10 และ 15

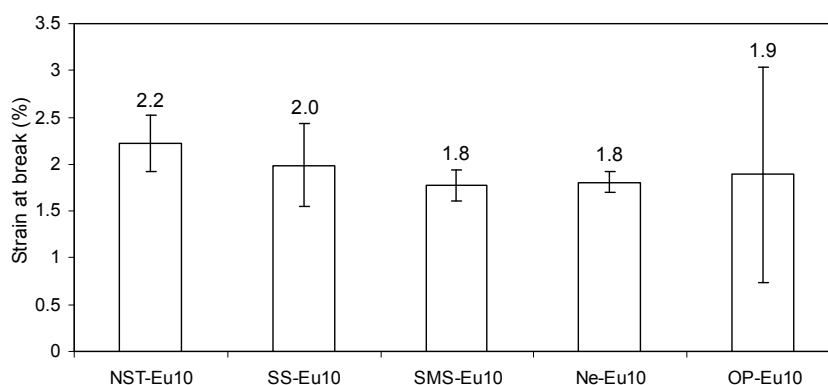


รูปที่ 4.29 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยยูคาลิปตัสร้อยละ 5 10 และ 15

ในรูปที่ 4.30-4.31 ทำการแปรชนิดของแป้งมันสำปะหลังคือแป้ง SS แป้ง SMS แป้ง NE และแป้ง OP ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยร้อยละ 10 ให้ค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-10 SS-Eu-10 SMS-Eu-10 NE-Eu-10 และ OP-Eu-10 เท่ากับ 12.7 12.7 14.3 11.7 และ 10.7 ตามลำดับ พบว่าแป้ง SMS มีค่า ความเค้น ณ จุดขาด สูงกว่าแป้งดัดแปรตัวอื่น รวมทั้งแป้ง NST คือมีค่าเท่ากับ 14.3 MPa รองลงมาคือแป้ง SS มีค่าเท่ากับ 12.7 MPa ซึ่งมีค่าเท่ากับกับแป้ง NST ส่วนแป้ง NE มีค่า 11.7 MPa และแป้ง OP มีค่าเท่ากับ 10.7 MPa ส่วนผลการทดสอบค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งมันสำปะหลังที่มีการเสริม แรงด้วย เส้นใยที่ร้อยละ 10 ของ NST-Eu-10 SS-Eu-10 SMS-Eu-10 NE-Eu-10 และ OP-Eu-10 มีค่า เท่ากับ 2.2 2.0 1.8 1.8 และ 1.9 % ตามลำดับ พบว่าค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST มีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังดัดแปรคือ 2.2 รองลงมาคือแป้ง SS มีค่าเท่ากับ 2 ส่วน แป้ง OP มีค่า ความเครียด ณ จุดขาด เท่ากับ 1.9 และแป้ง NE และแป้ง SMS มีค่าใกล้เคียง กันคือ 1.8 ซึ่งทั้งค่า ความเค้น ณ จุดขาด และค่าความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรทุก ชนิดมีค่าต่ำกว่าแป้งดิบ เนื่องจากขณะทำการผสมสารด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ขณะเทสาร ลงในช่องใส่สารต้องป้อนสารไปด้วยจึงทำให้การป้อนสารไม่สม่ำเสมอ สารผสมที่ออกมาบาง ช่วงเกิดเป็นฟอง อากาศภายในเนื้อสารทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของสารผสมที่ได้ ต่ำลงไป



รูปที่ 4.30 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีการแปรชนิดของแป่งตัดแปร



รูปที่ 4.31 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีการแปรชนิดของแป่งตัดแปร

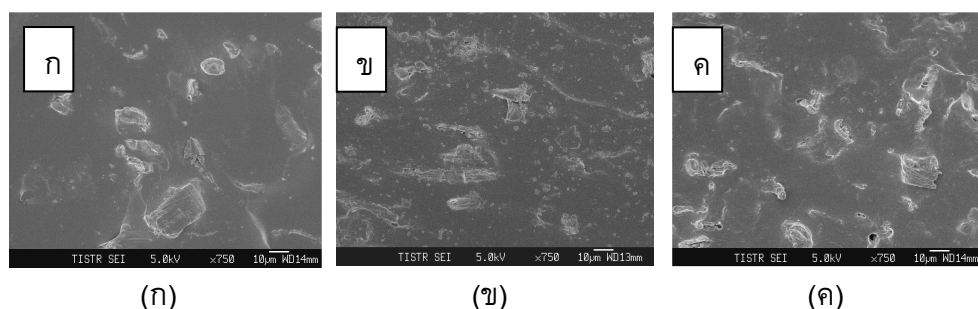
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงกลของแป่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป่งทำยายม่อม

การทดลองนี้เป็นการปรับปรุงแป่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตด้วยการผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) หรือแป่งทำยายม่อม (Ar) โดยทำการเปรียบเทียบกับแป่งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีการผสมพอลิเมอร์สองชนิดนี้

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM

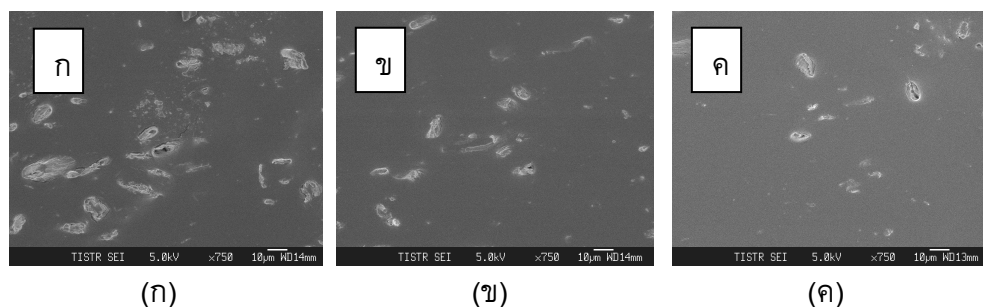
ผลการตรวจสอบแป่งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA แสดงในรูปที่ 4.32 โดยอัตราส่วนแป่ง NST:กลีเซอรอล:เส้นใย

เท่ากับ 67:23:10 เนื้อแมทริกซ์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต และ PVA ที่มีปริมาณ PVA ร้อยละ 5-15 มีพื้นผิวเรียบ ไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใยยูคาลิปตัสและเนื้อสารผสม ไม่พบรอยต่อของเฟส (interface) บ่งชี้ว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกและ PVA เข้ากันได้ดี (compatible) เนื่องจากเส้นใยยูคาลิปตัสมีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเนื้อแมทริกซ์ดีมาก ไม่เห็นรอยต่อระหว่างเส้นใยและเนื้อแมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่ามีความเข้ากันได้ดีสอดคล้องกับรายงานของ Curvelo, 2000



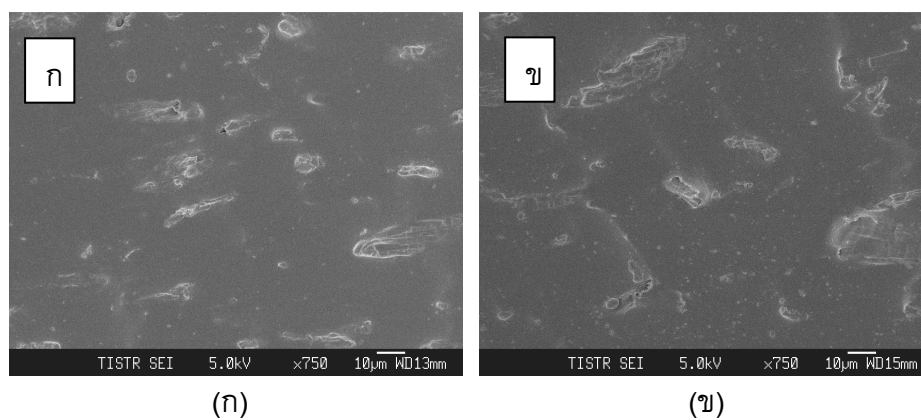
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ: (ก) ร้อยละ 5 (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 15

เนื่องจากแป้งทำวยายม่อมมีความเหนียว ความใส จึงต้องการศึกษาผลของการเติมแป้งทำวยายม่อมลงในแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST แสดงลักษณะเช่นเดียวกับที่อธิบายในรูป 4.32 นั่นคือ ไม่พบรอยต่อของเฟสระหว่างแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งทำวยายม่อมดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยที่แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตในชุดนี้มีอัตราส่วนของแป้ง กลีเซอรอล และเส้นใยยูคาลิปตัส เช่นเดียวกับกับตัวอย่างในรูปที่ 4.32 แต่ปริมาณแป้งทำวยายม่อมสูงกว่าปริมาณ PVA คือ มีการเติมแป้งทำวยายม่อมร้อยละ 10-30 นอกจากนี้เส้นใยยูคาลิปตัสมีการกระจายตัวดี มีการเกาะติดดีกับเนื้อแมทริกซ์ แสดงถึงความเข้ากันได้ดีระหว่างเส้นใยและแมทริกซ์ แต่บางบริเวณมีการเกาะกันเป็นกลุ่มของเส้นใย

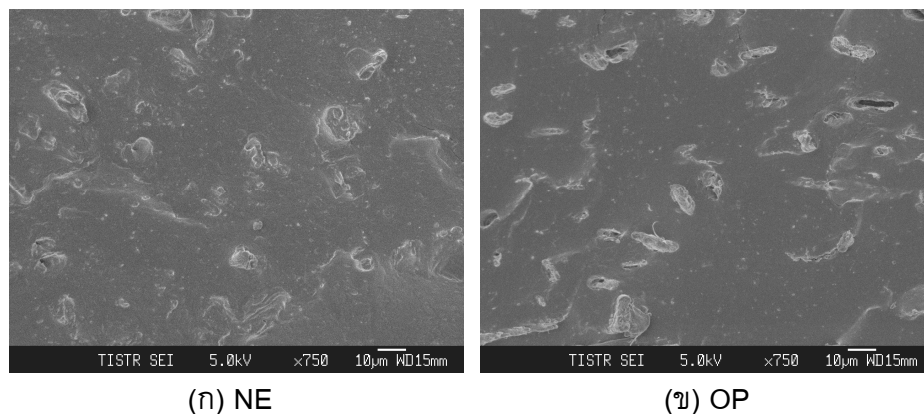


รูปที่ 4.33 ภาพ FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใย
ยูคาลิปตัสคอมโพสิตผสมแป้ง Ar ที่อัตราส่วน (ก) ร้อยละ 10 (ข) ร้อยละ 20 และ
(ค) ร้อยละ 30

ในรูปที่ 4.34–4.35 แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเทอร์โม
พลาสติกคอมโพสิต PVA ที่อัตราส่วน PVA ร้อยละ 10 จากภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวที่
เรียบ เส้นใยมีการกระจายแต่บางบริเวณมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อนยกเว้นแป้งดัดแปร NE ที่
พื้นผิวมีลักษณะขรุขระแต่ไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใย และเนื้อสารผสมแสดงว่าสารผสมมี
ความเข้ากันได้

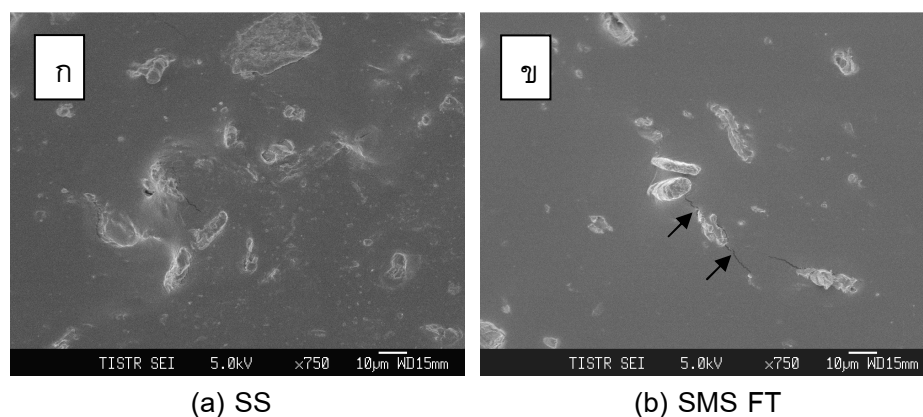


รูปที่ 4.34 ภาพถ่าย FESEM ของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วย
เส้นใยยูคาลิปตัสผสม PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (ก) แป้งเทอร์โมพลาสติก
คอมโพสิตชนิด SS (ข) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SMS FT

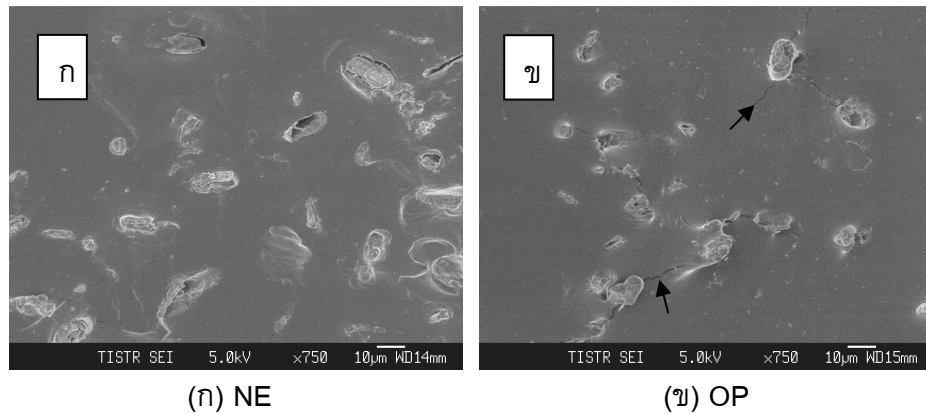


รูปที่ 4.35 ภาพถ่าย FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยคาลิปตัสมผสม PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (ก) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NE (ข) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด OP

รูปที่ 4.36-4.37 แสดงภาพ FESEM ของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยคาลิปตัสมผสมแป้ง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ เส้นใยมีการกระจายแต่บางบริเวณมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน และมีรอยแตกภายในเนื้อสารผสมโดยเฉพาะในเนื้อของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SMS FT และแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด OP



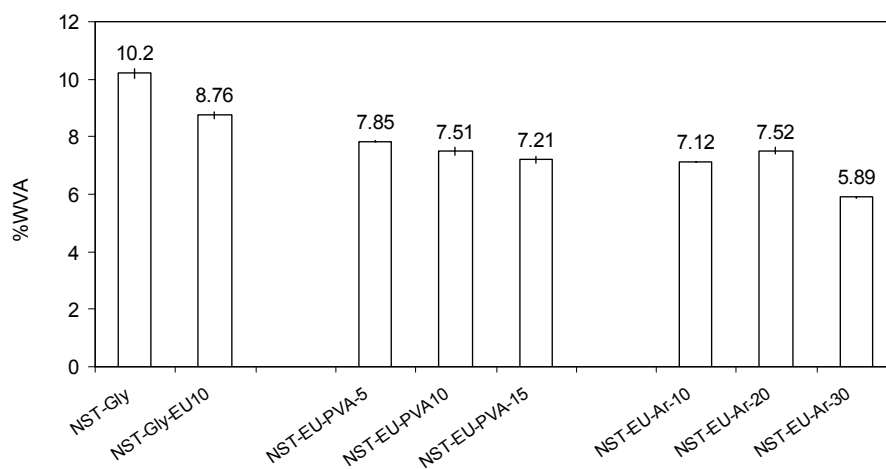
รูปที่ 4.36 ภาพถ่าย FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยคาลิปตัสมผสมแป้ง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 (ก) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SS (ข) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด SMS FT



รูปที่ 4.37 ภาพถ่าย FESEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทเสริมแรงเส้นใยยูคาลิปตัสผสมแป้ง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 (ก) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทชนิด NE (ข) แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทชนิด OP

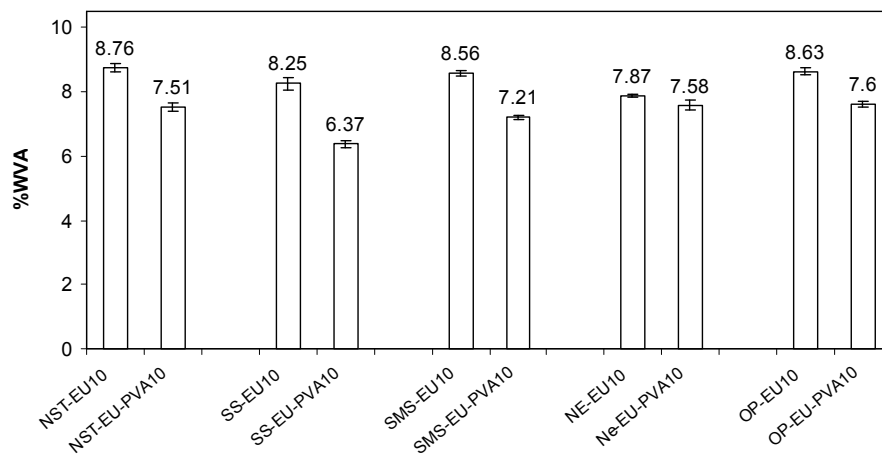
4.4.2 ผลทดสอบการดูดซึ้มน้ำ

ผลทดสอบการดูดซึ้มน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทที่เติม PVA และแป้ง Ar แสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าค่าการดูดซึ้มน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัสที่อัตราส่วน 67:23:10 ที่แปรปริมาณ PVA ร้อยละ 5 10 และ 15 มีค่าการดูดซึ้มน้ำเท่ากับ 7.85 7.51 และ 7.21% ตามลำดับ และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วน 67:23:10 ที่แปรปริมาณแป้ง Ar ร้อยละ 10 20 และ 30 มีค่าการดูดซึ้มน้ำเท่ากับ 7.12 7.52 และ 5.89% ตามลำดับ ค่าการดูดซึ้มน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทที่ผสม PVA หรือแป้ง Ar มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ PVA หรือแป้ง Ar เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PVA หรือแป้ง Ar พบว่าแป้ง Ar มีค่าการดูดซึ้มน้ำต่ำกว่า PVA เนื่องจาก PVA มีสมบัติชอบน้ำจึงไม่ช่วยลดค่าการดูดซึ้มน้ำ

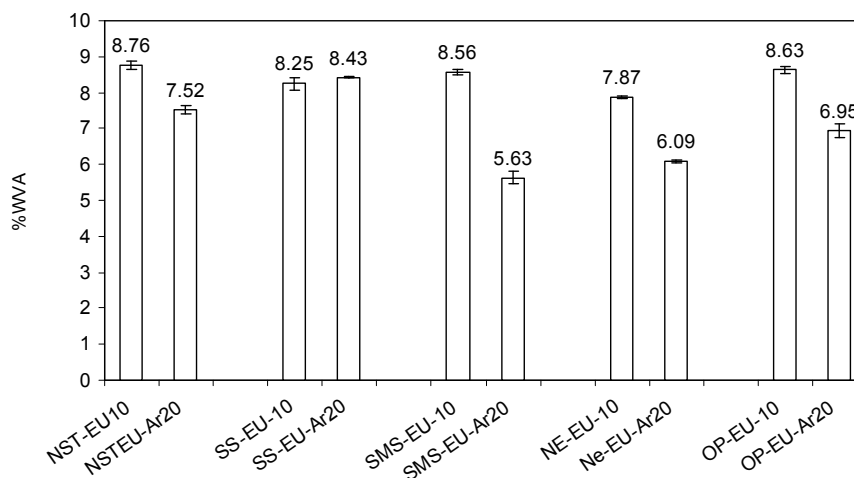


รูปที่ 4.38 ค่าการดูดซึ้มน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีทที่ผสม PVA หรือแป้ง Ar

รูปที่ 4.39 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งดัดแปร SS SMS FT NE และ OP เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วน 67:23:10 คอมโพลีเมอร์ PVA ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่าการดูดซึมน้ำของแป้ง NST-Gly-Eu-PVA10 แป้ง SS- Gly -Eu-PVA10 แป้ง SMS FT-Gly-Eu-PVA10 แป้ง NE-Gly-Eu-PVA10 และ แป้ง OP-Gly-Eu-PVA10 เท่ากับ 7.51 6.37 7.21 7.58 และ 7.6% พบว่าแป้งดัดแปรทุกชนิดมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อมีการคอมโพลีเมอร์ PVA เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปรที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย รูปที่ 4.40 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของแป้งดัดแปร SS SMS FT NE และ OP เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วน 67:23:10 คอมโพลีเมอร์ แป้ง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่าการดูดซึมน้ำของแป้ง NST- Gly -Eu-Ar20 แป้ง SS-Gly-Eu-Ar20 แป้ง SMS FT-Gly -Eu- Ar20 แป้ง NE-Gly-Eu-Ar20 และ แป้ง OP-Gly-Eu- Ar20 เท่ากับ 7.52 8.43 5.63 6.09 และ 6.95% ตามลำดับ จากค่าการดูดซึมน้ำของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีเมอร์ แป้ง Ar มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง Ar โดยแป้งดัดแปรที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือแป้งดัดแปร SMS FT



รูปที่ 4.39 ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพลีเมอร์ผสม PVA

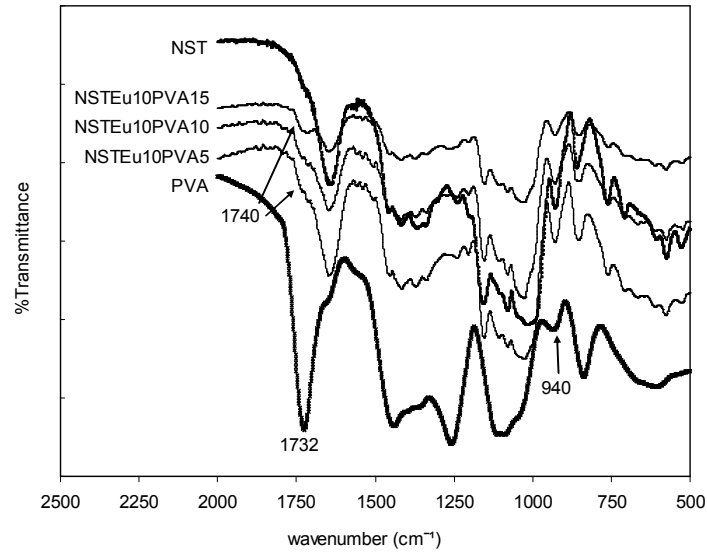


รูปที่ 4.40 ค่าการดูดซึมไอน้ำของแป้งตัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมแป้ง Ar

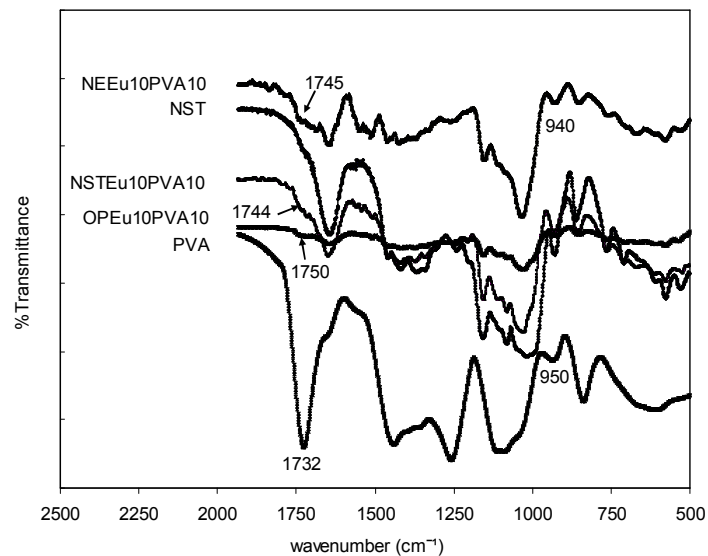
4.4.3 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA และแป้ง Ar ด้วยเทคนิค FTIR

รูปที่ 4.41 แสดงผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต PVA หรือแป้ง Ar ด้วยเทคนิค FTIR ของแป้งดิบเสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วน 67:23:10 โดยแปรปริมาณ PVA ร้อยละ 5 10 และ 15 จาก FTIR สเปกตรัมของ PVA มีพีคที่เด่นคือที่ความยาวคลื่น 1732 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่แสดงหมู่ C-OH ของ PVA และ FTIR สเปกตรัมของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต PVA พบพีคที่เคลื่อนไปที่ความยาวคลื่น 1740 cm^{-1} และความเข้มของพีคจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NE และ OP ผสม PVA แสดงในรูปที่ 4.42 ให้แถบสเปกตรัมเหมือนกับในแป้ง NST แสดงว่าแป้งและ PVA มีการผสมกัน แต่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างแป้งและ PVA การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอัตราส่วนแป้ง NST:Gly:Eu ที่มีอัตราส่วน 67:23:10 โดยแปรปริมาณ Ar ร้อยละ 10 20 และ 30 แสดงในรูปที่ 4.42 พบว่าหมู่ฟังก์ชันของแป้ง Ar เหมือนกับโครงสร้างของแป้งดิบ เนื่องจากแป้ง Ar เป็นแป้งที่ได้จากหัวของต้นข้าวยายม่อมที่มาจากธรรมชาติเหมือนกับแป้งดิบที่ได้มาจากหัวของมันสำปะหลัง จึงทำให้สเปกตรัมที่ได้จาก FTIR มีแถบความยาวคลื่นเหมือนกัน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบการเลื่อนของพีคและความเข้มของพีคไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสม PVA หรือแป้ง Ar เป็นไปได้ว่าไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งและ PVA หรือแป้ง Ar แต่ที่ความยาวคลื่น $940-950\text{ cm}^{-1}$ ที่ไวต่อความชื้นมีความเข้มพีคลดลง ในสเปกตรัมของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA หรือแป้ง Ar ที่สอดคล้องกับการทดสอบการทนต่อ

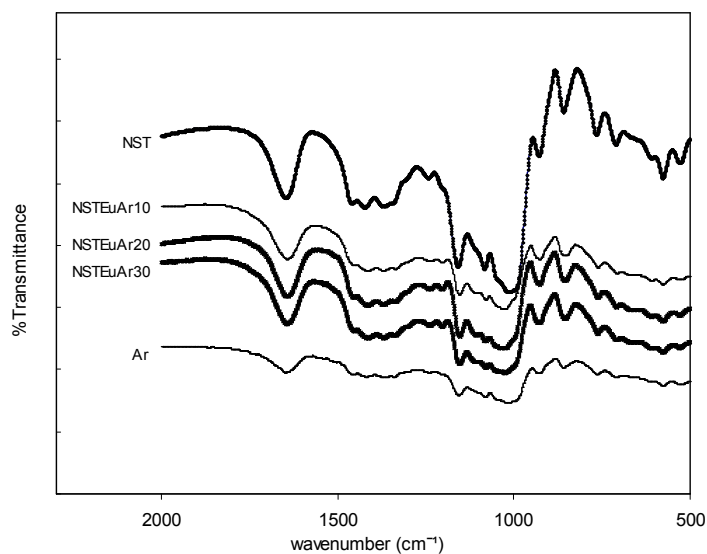
ความชื้นที่มีค่าลดลงเมื่อผสม PVA หรือแป้ง Ar ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Dae-Hyun, 2002



รูปที่ 4.41 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST บริสุทธิ์ PVA และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสม PVA



รูปที่ 4.42 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST บริสุทธิ์ PVA แป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST NE และ OP คอมโพสิตผสม PVA

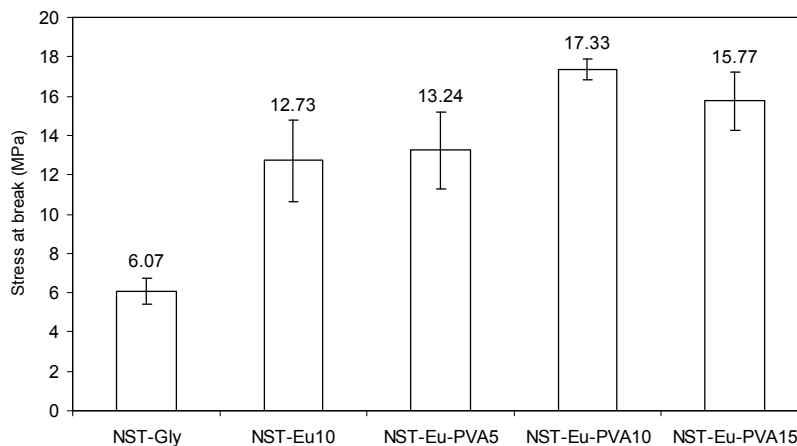


รูปที่ 4.43 FTIR สเปกตรัมของแป้ง NST บริสุทธิ์ แป้ง Ar และแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสมแป้ง Ar

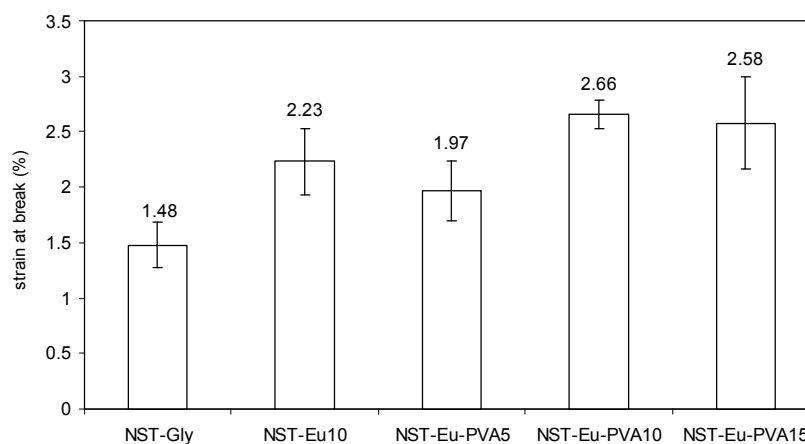
4.4.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึง

รูปที่ 4.44-4.45 แสดงค่าความเค้น ณ จุดขาด และความเครียด ณ จุดขาด ตามลำดับ ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA โดยแปรปริมาณ PVA ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 พบว่าที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-PVA-5 แป้ง NST-Eu-PVA-10 และแป้ง NST-Eu-PVA-15 มีความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 6.07 12.73 13.24 17.33 และ 15.77 MPa ตามลำดับ พบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตชนิด NST ที่เติม PVA ให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVA ที่เพิ่มมากขึ้น ยกเว้นที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 15 ที่ให้ค่าความเค้น ณ จุดขาด ลดลง เนื่องจากที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 15 ขณะที่อัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ขณะที่สารผสมออกจากเครื่องเนื้อสารผสมที่ออกมาไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้เส้นที่มีเนื้อเป็นเกร็ดๆไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าการผสมเป็นเนื้อเดียวกันของสารผสมเกิดเฉพาะที่ผิวหน้า ไม่ได้เกิดการผสมกันภายในเนื้อสารผสมด้วยหรือมีการแยกเฟสกัน ค่าความเค้น ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งเทอร์โมพลาสติก NST สำหรับผลทดสอบค่าความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-PVA-5 แป้ง NST-Eu-PVA-10 และ แป้ง NST-Eu-PVA-15 มีค่าความเครียด ณ จุดขาด เท่ากับ 1.48 2.23 1.97 2.66 และ 2.58% ตามลำดับ ค่าความเครียด ณ จุดขาด ที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเค้น ณ จุดขาด คือที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10 สูงที่สุดคือ 2.7 % รองลงมาคือที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 15 เท่ากับ 2.6 % และที่ปริมาณ PVA

ร้อยละ 5 เท่ากับ 2 % จากค่าความเค้น ณ จุดขาด และค่าความเครียด ณ จุดขาด แสดงให้เห็นว่าปริมาณ PVA ที่ เหมาะสมคือที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10



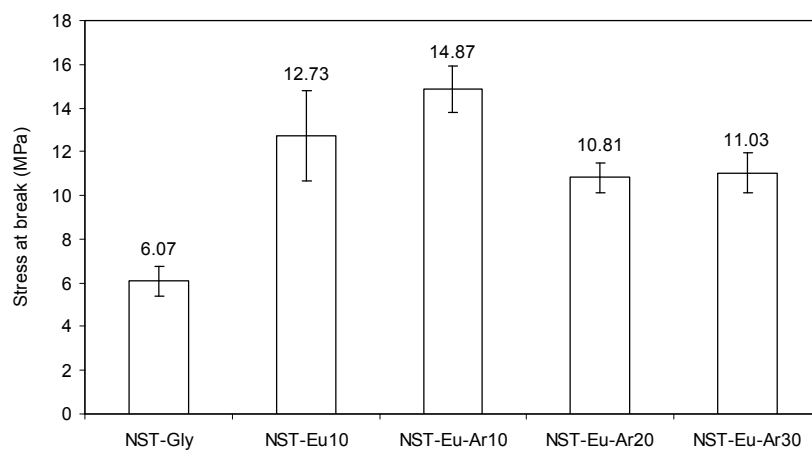
รูปที่ 4.44 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสม PVA ที่แปรค่า PVA ร้อยละ 5 10 และ 15



รูปที่ 4.45 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสม PVA ที่แปรค่า PVA ร้อยละ 5 10 และ 15

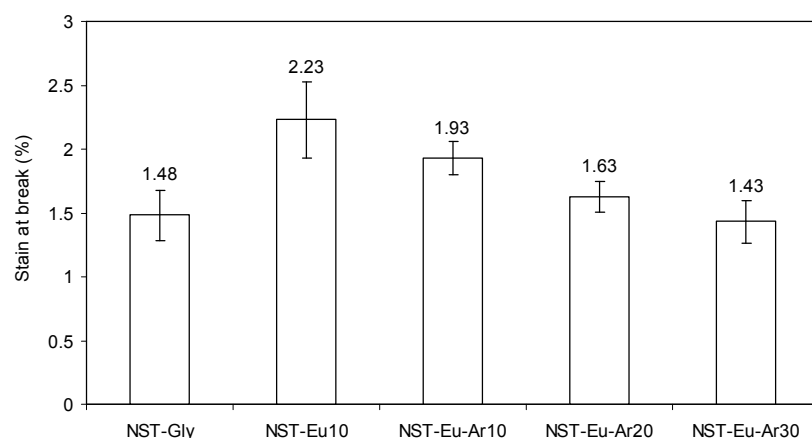
สำหรับผลทดสอบการทนต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม แป้งท้าวยายม่อมที่อัตราส่วนของ NST :Gly :Fiber คือ 67:23:10 โดยแปรปริมาณแป้ง Ar ที่ ร้อยละ 10 20 และ 30 ดังรูปที่ 4.46 แสดงค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-Ar-10 แป้ง NST-Eu- Ar-20 และแป้ง NST-Eu- Ar-30 มีค่า ความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 6.07 12.73 14.87 10.81 และ 11.03 MPa ตามลำดับ จากค่า ความเค้น ณ จุดขาด ที่ได้พบว่า ค่าความเค้น ณ จุดขาด ไม่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณแป้ง Ar ที่มากขึ้น เนื่องจากแป้ง Ar และ

แป้ง NST เป็นแป้งที่มาจากรากพืชเหมือนกันจึงไม่ช่วยเสริมทางด้านความแข็งแรงของสารผสมและที่ปริมาณแป้ง Ar ร้อยละ 10 จะให้ค่า ความเค้น ณ จุดขาด สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการเพิ่มปริมาณแป้ง Ar เป็นร้อยละ 20 และ ร้อยละ 30



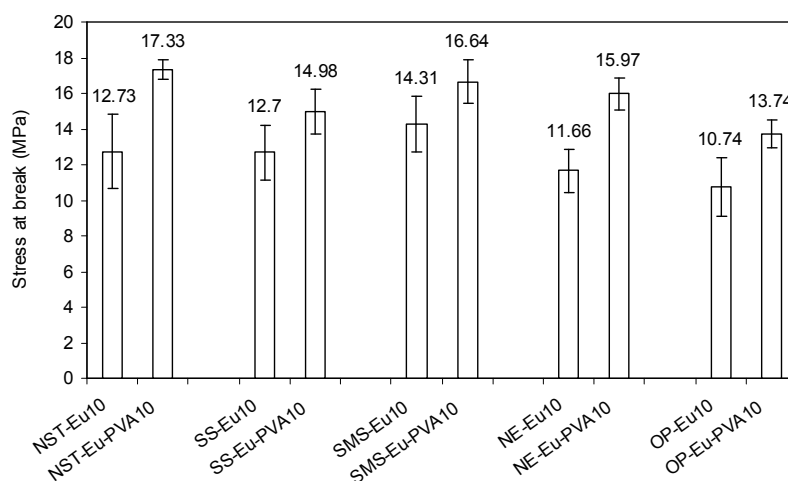
รูปที่ 4.46 ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST คอมโพสิตผสมแป้ง Ar ที่แปรค่า Ar ร้อยละ 10 20 และ 30

รูปที่ 4.47 แสดงค่าความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-Ar-10 แป้ง NST-Eu-Ar-20 และแป้ง NST-Eu-Ar-30 มีค่า ความเครียด ณ จุดขาด เท่ากับ 1.48 2.23 1.93 1.63 และ 1.43% ตามลำดับ จากค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตแป้ง Ar พบว่าค่า ความเครียด ณ จุดขาด ไม่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณแป้ง Ar ที่มากขึ้นซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่า ความเค้น ณ จุดขาด



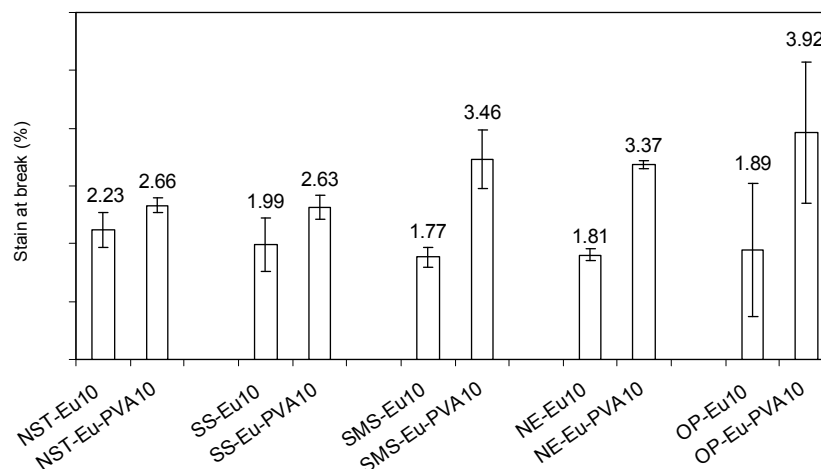
รูปที่ 4.47 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิด NST ผสมแป้ง Ar ที่แปรค่า Ar ร้อยละ 10 20 และ 30

ในรูปที่ 4.48 แสดงค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งตัดแปรเสริมแรงด้วย เส้นใยที่อัตราส่วนของแป้งตัดแปร:Gly:เส้นใย เท่ากับ 67:23:10 คอมโพสิตผสม PVA ที่ อัตราส่วนร้อยละ 10 ของแป้งตัดแปร SS-Eu-PVA10 SMS-Eu-PVA10 NE-Eu-PVA10 และ OP-Eu-PVA10 มีค่า ความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 14.98 16.64 15.97 และ 13.74 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-PVA10 มีค่าเท่ากับ 17.33 พบว่า ค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดิบและแป้งตัดแปรพบว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง ตัดแปรมีค่าต่ำกว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดิบ แสดงว่าแป้งดิบสามารถผสมเป็นเนื้อ เดียวกันกับ PVA ได้ดีกว่าแป้งตัดแปรแต่เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งตัดแปรเสริมแรงเส้นใย พบว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการผสม PVA



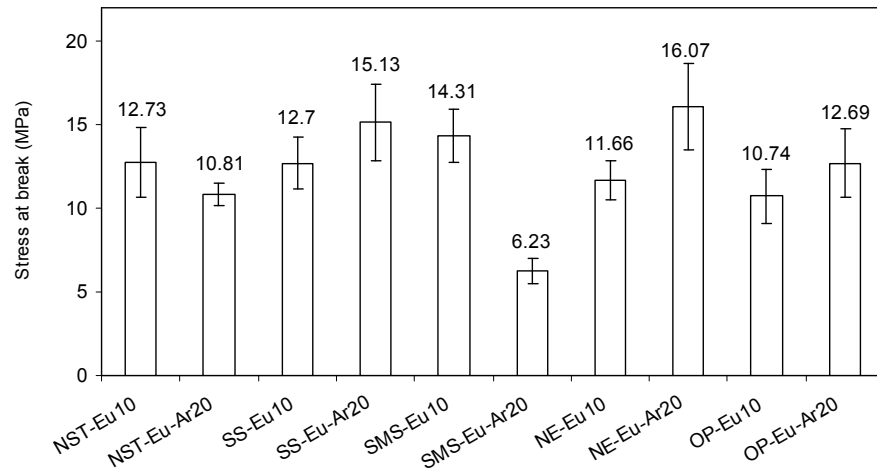
รูปที่ 4.48 ความเค้น ณ จุดขาด แป้งเทอร์โมพลาสติกผสม PVA ที่ปริมาณ PVA ร้อยละ 10

ในรูปที่ 4.49 แสดงค่า ความเครียด ณ จุดขาด (%) ของแป้งตัดแปรเสริมแรง ด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนของแป้งตัดแปร : Gly : เส้นใย เท่ากับ 67:23:10 คอมโพสิต PVA ที่ อัตราส่วนร้อยละ 10 ของแป้งตัดแปร SS-Eu-PVA10 SMS-Eu-PVA10 NE-Eu-PVA10 และ OP-Eu-PVA10 ให้ค่า ความเครียด ณ จุดขาดเท่ากับ 2.63 3.46 3.37 และ 3.92% ตามลำดับ ส่วนค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-PVA10 เท่ากับ 2.66% พบว่าค่าความ เครียด ณ จุดขาด ของแป้งตัดแปรและแป้งดิบ มีค่ามากกว่าค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของ แป้งดิบ และพบว่กับแป้งตัดแปรเสริมแรงด้วยเส้นใยให้ค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง ตัดแปรเสริมแรงเส้นใยผสม PVA ให้ค่าสูงขึ้นแสดงว่า PVA เข้าไปช่วยในเรื่องการยึดของสาร ผสม



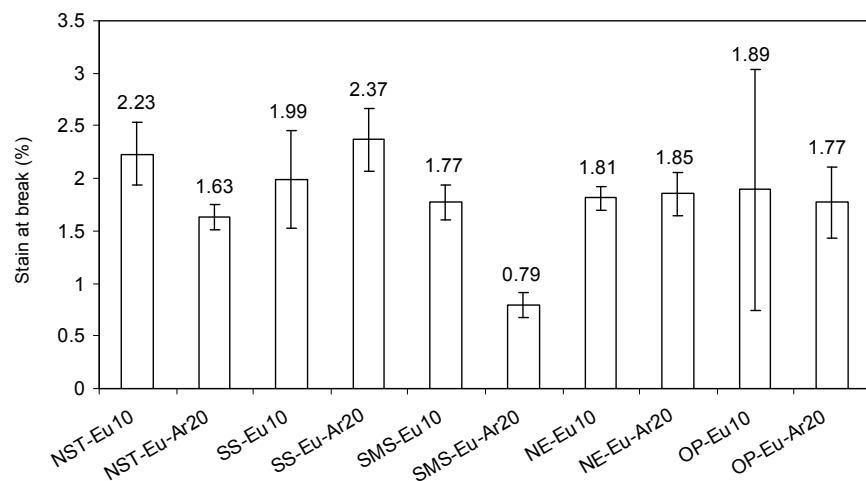
รูปที่ 4.49 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA ที่ ปริมาณ PVA ร้อยละ 10

ในรูปที่ 4.50 แสดงค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรเสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปร : Gly : เส้นใย เท่ากับ 67:23:10 คอมโพสิต Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ของแป้งดัดแปร SS-Eu-Ar20 SMS-Eu-Ar20 NE-Eu-Ar20 และ OP-Eu-Ar20 มีค่าความเค้น ณ จุดขาด เท่ากับ 15.13 6.23 16.07 และ 12.69 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-PVA10 มีค่าเท่ากับ 12.73 พบว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปร มีค่ามากกว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดิบ ยกเว้นแป้ง SMS-Eu-Ar20 ที่มีค่าต่ำกว่าแป้งดิบสาเหตุเนื่องมาจากมีรอยแตกภายในเนื้อสารผสมที่แสดงในรูป SEM รูปที่ 37 จึงทำให้ค่าที่ได้้น้อยที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบกับค่า ความเค้น ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรเสริมแรงเส้นใยพบว่าแป้งดัดแปรเสริมแรงเส้นใยคอมโพสิตแป้ง Ar ให้ค่า ความเค้น ณ จุดขาด มากกว่าแป้งดัดแปรเสริมแรงเส้นใย



รูปที่ 4.50 ความเค้น ณ จุดขาด แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตแป้ง Ar ที่แปรค่าแป้ง Ar ร้อยละ 10 20 และ 30

ในรูปที่ 4.51 แสดงผลการทดสอบค่า ความเครียด ณ จุดขาดของแป้งดัดแปร เสริมแรงด้วยเส้นใยที่อัตราส่วนของแป้งดัดแปร: ก्लीเซอรอล:เส้นใยยูคาลิปตัส เท่ากับ 67:23:10 ผสมแป้ง Ar ที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ของแป้งดัดแปร SS-Eu-Ar20 SMS-Eu-Ar2, NE-Eu-Ar20 และOP-Eu-Ar20 ให้ค่า ความเครียด ณ จุดขาด เท่ากับ 2.37 0.79 1.85 และ 1.77% ตามลำดับ ส่วนค่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้ง NST-Eu-Ar20 เท่ากับ 1.63 % พบว่า ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งดัดแปรและแป้งดิบมีค่าไม่ต่างกันเนื่องจากแป้ง Ar ที่เติมลงไปมีสมบัติคล้ายกับแป้งมันสำปะหลังจึงทำให้ค่า ความเครียด ณ จุดขาด มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.51 ความเครียด ณ จุดขาด ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมแป้ง Ar ที่แปร ปริมาณแป้ง Ar ร้อยละ 20

4.4.5 ผลการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ทำการทดสอบโดยฝ่ายวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สถาบันวิจัย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย วิธีการทดสอบดัดแปลงจากวิธี Static-
Incubation Titrimetric Determination (Zibiliske *et al.*, 1994) โดยแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 4
ชุด ดังนี้

- control¹ หมายถึง ปุ๋ยหมักในถังทดสอบ
- R⁺² หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับเซลลูโลส (cellulose microcrystalline)
- R⁻³ หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)
- NE⁴ หมายถึง ปุ๋ยหมักผสมกับชิ้นตัวอย่างทดสอบสูตรต่างๆ

ผสมสารในแต่ละชุดทดสอบให้เข้ากัน บ่มในสภาวะปิดที่มีการควบคุมอุณหภูมิ
ที่ 37°C ระยะเวลาทำการทดสอบ 20 วัน ตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจาก
กิจกรรมของจุลินทรีย์ ตลอดระยะเวลาของการทดสอบโดยแต่ละชุดทดสอบมีจำนวน 3 ซ้ำ
คำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (ร้อยละ) ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ใน
แต่ละชุดทดสอบเทียบกับชุดควบคุม หมายถึง ให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่ได้
จากชุดควบคุมเป็น 100 นำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ในแต่ละชุดคำนวณเทียบกับ
ชุดควบคุม ทำให้ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในแต่ละชุดทดสอบดังตารางที่
4.5 ช่อง 1 หรือคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (ร้อยละ) ที่เกิดจากกิจกรรม
ของจุลินทรีย์ในแต่ละชุดทดสอบเทียบกับชุดควบคุมเชิงบวก (R⁺²) หมายถึง ให้ปริมาณก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่ได้จากชุดควบคุมเชิงบวกเป็น 100 ทำให้ได้ปริมาณก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในแต่ละชุดทดสอบตามตารางที่ 4.5 ช่อง 2

ผลการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพ
สิตผสม PVA เปรียบเทียบกับพลาสติกทางการค้าคือ PE พบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพ
สิตผสม PVA มีการย่อยสลายได้ดีกว่า PE โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชุดทดสอบ
ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA มีมากกว่าของ PE หนึ่งเท่าตัวเมื่อคำนวณ
เปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดควบคุมเชิงบวก ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และมีปริมาณก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับชุดควบคุมเชิงบวกที่มีการผสมปุ๋ยหมักกับเซลลูโลส

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสม PVA

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม (ร้อยละ)	
	เทียบกับชุดควบคุม (Control)	เทียบกับชุดควบคุมเชิงบวก (R+)
Control ¹	100.00	45.03
R ⁺²	222.05	100.00
R ⁻³	102.03	45.94
NST ⁴	224.13	100.93
NE ⁴	229.94	95.35
OP ⁴	234.09	97.07
NST-Eu-PVA-10-10 ⁴	231.38	95.95
NST-Eu-Ar-10-10 ⁴	260.41	107.98
NE-Eu-PVA-10-10 ⁴	238.09	98.73
OP-Eu-PVA-10-10 ⁴	257.64	106.84

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ

5.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งดิบและแป้งดัดแปร

จากการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งดิบ แป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตท และแป้งดัดแปรด้วยออกทินิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ พบแถบความยาวคลื่นที่แตกต่างไปจากแถบความยาวคลื่นของแป้งดิบที่แถบความยาวคลื่น 1740 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching และที่แถบความยาวคลื่น 1169 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ของแป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตท สำหรับแป้งดัดแปรด้วยออกทินิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ แสดงแถบความยาวคลื่นที่ 2946 cm^{-1} 2899 cm^{-1} และ 1656 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดิบและแป้งดัดแปร

ผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดิบ แป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตท และแป้งดัดแปรที่มีหมู่ออกทินิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ แป้งทั้งสามชนิดแสดงโครงสร้างสัณฐานชนิด A แป้ง NST แป้ง NE และแป้ง OP มีปริมาณผลึก 22.4 19.75 และ 22.24% ตามลำดับ

5.2 ผลการตรวจวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติก

5.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติก

โดยปกติที่แถบความยาวคลื่น $3245\text{-}3578\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชัน OH stretching มีความเข้มของพีคสูง แต่หลังจากผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยสกรูคู่โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ความเข้มพีคที่แถบความยาวคลื่น $3245\text{-}3578\text{ cm}^{-1}$ ลดลงแสดงว่าโครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย และที่แถบความยาวคลื่น 1660 cm^{-1} จะเคลื่อนไปใกล้ความยาวคลื่น 1652 cm^{-1} แสดงว่าเกิดการเชื่อมต่อนพันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งและกลีเซอรอล ซึ่งแป้งทั้งสามชนิดให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

5.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก

แป้งเทอร์โมพลาสติกชนิดแป้งNST SS SMS FT NE และOP ให้ค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันเมื่อปริมาณกลีเซอรอลลดลงจากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 23 แต่พบว่ามีความโน้มถ่วงลดลงแสดงว่าปริมาณกลีเซอรอล มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติก

5.2.3 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยึดของแป้งเทอร์โมพลาสติก

ผลทดสอบการทนต่อแรงดึงยึดของแป้งเทอร์โมพลาสติกชนิดแป้ง NST NE และOP พบว่าค่า ความเค้น ณ จุดขาด (MPa) และค่า ความเครียด ณ จุดขาด (%) ของแป้งดัดแปรทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าแป้ง NST

5.3 ผลการวิเคราะห์แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

5.3.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

เมื่อผสมแป้งเทอร์โมพลาสติกกับเส้นใยโดยการแปรปริมาณเส้นใยร้อยละ 5 10 และ15 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นพื้นผิวเรียบมีการกระจายตัวของเส้นใย และบางบริเวณเส้นใยจับตัวเป็นก้อนในเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติก ซึ่งปริมาณเส้นใยในเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติกมีความหนาแน่นของเส้นใยมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

5.3.2 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัสและเส้นใยมะพร้าวให้แถบสัญญาณในโครงสร้างของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเหมือนกัน

5.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยมะพร้าวที่แปรปริมาณเส้นใยร้อยละ 5 10 และ15 พบว่าโครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลายแต่ที่ 20 แสดงพีคที่ 17° 16° และ22° มีความเข้มของพีคสูงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น

5.3.4 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

แป้งเทอร์โมพลาสติกมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลลดต่ำลง แต่แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยที่มีการแปรปริมาณเส้นใยร้อยละ 5 10 และ15 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตเส้นใยมีค่าลดลง แต่ไม่ลดลงตามปริมาณ

เส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมโดยธรรมชาติของเส้นใยที่มีความชอบน้ำหรือเนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลที่ซึมเข้าไปในเนื้อสารผสม ดังนั้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจึงไม่ช่วยให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนั้นยังขึ้นกับการกระจายตัวของเส้นใย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งดิบ แป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตท และแป้งดัดแปรหมู่ออกซิเจนลิกซัลซัลฟอนิกแอนไฮไดรด์ พบว่าแป้งดัดแปรที่มีหมู่อะซิเตทให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด

5.3.5 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยึดของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิต

โดยธรรมชาติของแป้งมีข้อด้อยคือ แข็งเปราะ แตกหักง่าย เมื่อนำมาผสมด้วยเส้นใยที่แปรปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 5 10 และ 15 ค่าความเค้น ณ จุดขาด (MPa) สูงขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเค้น ณ จุดขาด (%) ไม่แปรผันตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีข้อจำกัดในเรื่องการยึดตัว

5.4 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป้งท้าวยายม่อม

5.4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM

ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงพื้นผิวของเนื้อสารผสมเรียบการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยกับสารผสมสามารถยึดกันได้ดี เนื่องจากไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใย และเนื้อสารผสม แต่การกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากพบว่าบางบริเวณเส้นใยมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

5.4.2 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใยคอมโพสิตแป้งท้าวยายม่อมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณแป้งท้าวยายม่อมมีเพิ่มขึ้น

5.4.3 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป้งท้าวยายม่อม

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ชนิด NST NE และ OP พบพีคที่เคลื่อนไปที่ความยาวคลื่น 1740 cm^{-1} และความเข้มของพีคจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น แสดงว่าแป้งและ PVA มีการผสมกัน แต่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างแป้งและ PVA

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมแป้ง Ar แสดงแถบสเปกตรัมเหมือนกับของแป้งดิบ และแป้ง Ar บริสุทธิ์ เนื่องจากแป้ง Ar เป็นแป้งที่ได้จากหัวของต้นท้าวยายม่อมที่มาจากธรรมชาติเหมือนกับแป้งดิบที่ได้มาจากหัวของมันสำปะหลัง จึงทำให้สเปกตรัมที่ได้จาก FTIR มีแถบความยาวคลื่นเหมือนกันแป้ง Ar เป็นไปได้ว่าไม่มีการเกิดปฏิกิริยาภายในโมเลกุลระหว่างแป้งและแป้ง Ar

5.4.4 ผลทดสอบการทนต่อแรงดึง

แป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ มีค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิไวนิลอัลกอฮอล์มีปริมาณร้อยละ 5 และ 10 แต่ที่ปริมาณร้อยละ 15 ค่าการทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง แสดงว่า ปริมาณการเติมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ และแป้งท้าวยายม่อม มีค่าจำกัด

5.4.5 ผลทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ผลทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ได้ดีกว่า พอลิเอทิลีนเมื่อคำนวณปริมาณก๊าซเปรียบคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับชุดควบคุม และชุดควบคุมเชิงบวกพบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากกว่าพอลิเอทิลีนหนึ่งเท่า แสดงว่าจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแป้งเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตผสมพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน

บรรณานุกรม

กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสาร
มอก. ที่ 1073-2535. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ,
2535.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 4.;
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, **2550.**

การคั่วตัวของแป้ง. [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/
BCT611/Chap2.html](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2.html). (วันที่สืบค้น 22 มีนาคม 2555)

การพองตัวของแป้ง. <http://www.opta-food.com/access/starch2.html>. (วันที่สืบค้น 23
มีนาคม 2555)

การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน. [http://www.engin.umich.edu/.../potato/
starch3.htm](http://www.engin.umich.edu/.../potato/starch3.htm). (วันที่สืบค้น 23 มีนาคม 2555)

กระบวนการอัดรีด. [http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/plastic/chapter
1-2.pdf](http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/plastic/chapter1-2.pdf). (วันที่สืบค้น 20 มีนาคม 2555)

ขวัญชนก นิธิโชติเดชากร. การพัฒนาฟิล์มละลายน้ำได้จากสตาร์ชมันสำปะหลัง หรือสตาร์ช
มันสำปะหลังดัดแปรผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อบรรจุสารเคมี. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรม
เกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, **2550.**

ความเป็นมาของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [http://www.nia.or.th
/bioplastics/downloadbioplast_roadmap.pdf](http://www.nia.or.th/bioplastics/downloadbioplast_roadmap.pdf). (วันที่สืบค้น 23 เมษายน 2554)

โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. [http:// en. Wikipedia.org/wiki/Polyvinyl
_alcohol](http://en.Wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol). (วันที่สืบค้น 23 มีนาคม 2555)

ปริมาณและมูลค่าส่งออกแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์. http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php. (วันที่สืบค้น 12 พฤษภาคม 2555)

ณัฐรุพล ไชแสงศรี. การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากโคโตแซนร่วมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติสำหรับทดแทนโฟม. สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, **2552**.

ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์ (แบบศึกษาด้วยตัวเอง), พิมพ์ครั้งที่ 2.; บริษัทประชาชน จำกัด. กรุงเทพฯ, **2530**, 2-6.

สมบัติพอลิไวนิลอัลกอฮอล์. http://www.nppointasia.com/siamrecycle/plastic_selection.htm. (วันที่สืบค้น 23 มีนาคม 2555)

วรรณภา ชูเมฆา. การเตรียมและสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, **2552**.

สมบัติของแป้ง. เข้าถึงได้จาก <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2.html>. (วันที่สืบค้น 22 มีนาคม 2555)

อังศุมา บุญไชยสุริยา. การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, **2554**.

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

- Aiyeleye, F.B.; Akingbala, J.O.; Oguntimein, G.b.; Chemical factors affecting acetylation of cassava starch. *Starch/Starke*. **1993**, *45*, 12, 443-445.
- Ave'rous L. Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch: A Review, *J. Macromol. Sci. Part C Polym. Rev.* **2004**, *44*, 3, 231–274.
- Bhosale, R.; Singhal, R. Effect of octenyl succinylation on physicochemical and functional properties of waxy and amaranth starches. *J. Carbohydr. polym.* **2006**, *68*, 447-456.
- Chen, N.; Li, L.; Wang, Q. New technology for thermal processing of poly(vinyl alcohol). *Plast. Rubber Compos. Macromol Eng.* **2007**, *36*, 283–290.
- Collison, R. Swelling and Gelation of Starch. *In Radley, Starch and Its Derivatives.*(Ed. J.A.) Chapman and Hall Ltd, London, **1968**, 168-193.
- Corradinia, E.; de Carvalhob, A. J. F.; da Silva Curveloc, A. A.; Agnellia, J.A.M.; Mattosod, L. H. C. Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch/Zein Blends. *Mater. Res.* **2007**, *10*, 227-231.
- Kim, D.H.; Na, S.K.; Park, J.S. Preparation and Characterization of Modified Starch-Based Plastic Film Reinforced with Short Pulp Fiber. I. Structural Properties. *J. Appl. Polym.Sci.* **2002**, *88*, 2100-2107.
- Galliard, T.; Bowler, P. Morphology and composition of starch. *Starch: Properties and Potential.* John Wiley and Sons, New York, **1987**.
- Goering, K.J.; Fritts, D.H.; Allen, K.G. A Comparison of Loss of Birefringence with the Percent Gelatinization and Viscosity on Potato Wheat Rice Corn Cow Cackle and Several Barley Starches. *Cereal Chem.* **1974**, *51*, 764-771.
- Jenkins, P.J.; Donald, A.M. The influence of amylase on starch granule

structure. *Int. J. Biol. Macromol.* **1995**, *17*, 312-321.

Khalil, M.I.; Hashem, A.; Hebeish, A. Preparation and characterization of starch acetate. *Starch/starke.* **1995**, *10*, 304-398.

Lu, D. R.; Xiao, C. M.; Xu, S. J. Starch-based completely biodegradable polymer materials. *eXPRESS Polym. Lett.* **2009**, *3*, 366–375.

Ma, X.; Yu, J.; Kennedy, J. F. Studies on the properties of natural fiber-reinforced thermoplastic starch composite. *Carbohydr. Polym.* **2005**, *62*, 19-24.

Modi, T.W. Poly(vinyl alcohol). *In Handbook of Water-Soluble Gums and Resins.* McGraw-Hill Book Company, New York. **1980**.

Morrison, W.R.; Laignelet, B. An Improved Colorimetric Procedure for Determining Apparent and Total Amylose in Cereal and Other Starches. *J. Cereal Sci.* **1983**, *1*, 9-20.

Oates, C.G. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends in Food Sci. Technol.* **1997**, *8*, 375-382.

Robin, J.P.; Mercier, C.; Charbonniere, R.; Guilbot, J.A. Lintnerized starch, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. *Cereal Chem.* **1974**, *51*, 389-406.

Rosa, M. F.; Chiou, B-S. ; Medeiros, E.S.; Wood, D. F.; Mattoso, L.H. C.; Orts, W.J.; Imam, S.H. Biodegradable Composites Based on Starch/EVOH/ Glycerol Blends and Coconut Fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* **2008**, *111*, 612–618.

Sajilata, M.G.; Singhal, R.S.; Kulkarni, P. R. Resistant Starch—A Review.

Comprehensive reviews in food science and food safety. **2006**, 5, 1-17.

Sanders, J.P.M. Chemical modification of starch. In Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology (II). Asian Institute of Technology, 22-26 January and 19-23 February **1996**. Bangkok, Thailand.

Shi, R.; Liu, Q.; Ding, T.; Han, Y.; Zhang, L.; Chen, D.; Tian, W. Ageing of Soft Thermoplastic Starch with High Glycerol Content. *J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, 103, 574-586.

Solarek, D.B. Cationic starches. In *Modified Starches: Properties and Use*. Ed.; O.B. Wurzburg, CRC Press Inc., Florida. **1984**, 113-124.

Song, X.; He, G.; Ruan, H.; Q. Chen. Preparation and Properties of Octenyl Succinic Anhydride Modified Early *Indica* Rice Starch. *Starch/Starke*. **2006**, 58, 109–117.

Soest, J.J.G.; Tournois, H.; Wit, D.; Vliegthart, J.F.G. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydr. Res.* **1987**, 279, 162-165.

Soest, J. J. G.; Benes, K.; de Wit D.; Vliegthart, J. F. G. The influence of starch molecular mass on the properties of extruded thermoplastic starch. *J. Polym.* **1996**, 37, 3543-3552.

Wang, J.; Su, L. ; Wang, S. Physicochemical properties of octenyl succinic anhydride-modified potato starch with different degrees of substitution. *J. Sci. Food Agric.* **2009**, 90, 424–429.

Wojtowicz, A. Biodegradability and Compostability of Biopolymers.

In: Thermoplastic Starch. Janssen, L. P.B.M., and Moscicki, L., Ed.; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, **2009**, 55-76.

Xu, Y.; Hanna, M. A. Preparation and properties of biodegradable foams from starch acetate and poly(tetramethylene adipate-co-terephthalate). *Carbohydr. Polym.* **2004**, *3459*, 521-529.

Xu, Y.; Miladinov, V.; Hanna M.A. Synthesis and Characterization of Starch Acetates with High Substitution. *Cereal Chem.* **2004**, *81*, 735-740.

Zhanga, W.; Yanga, X.; Li, C.; Liang, M.; Lu, C.; Deng, Y. Mechanochemical activation of cellulose and its thermoplastic polyvinyl alcohol ecomposites with enhanced physicochemical properties. *Carbohydr. Polym.* **2011**, *83*, 257–263.

ภาคผนวก

เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ศึกษาผลของแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Characterization of the Cassava Starch to from Biodegradable Polymers

พันธ์จูนี สมวงษ์ษา^{1*}, รศ.ดร.วารารณั ตันรัตนกุล¹, ผศ.ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์², ดร.ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต³
Phanthinee Somwongsa¹, Varaporn Tanrattanakul¹, Taemsak Srikirin², Chutima Eamchotchavalit⁴

¹หน่วยวิจัยพลาสติกชีวภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา 90110

²ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขต กรุงเทพมหานคร 10400

³สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ปทุมธานี 12120

¹ Bioplastic Research Unit, Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science,

Prince of Songkla University, Hatyai, Songkla, 90112

² Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University Bangkok 10400

³ Thailand Institute of Scientific and Technological Research Pattumthani 12120

*Corresponding author: punthinee.s@tistr.mail.go.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของการใช้แป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการใช้แป้งมันสำปะหลัง 3 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลังดิบ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่เอซิติลและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ออกทิลซิลชันิก แอนดีไฮโดรด์ ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรินที่อัตราส่วน 77: 23 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์. ผงแป้งและแป้งคอมปาวด์ถูกวิเคราะห์ ทดสอบ ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี ฟิสิกส์ และสมบัติเชิงกลด้วยเทคนิค SEM, XRD, FTIR และการทนต่อแรงดึงขาด ผลของ SEM แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของแป้งกับกลีเซอริน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของผลึกแป้งทั้งสามชนิดถูกทำลายหลังจากการผสมกับกลีเซอริน ยิ่งไปกว่านั้น การวิเคราะห์ ทดสอบด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มและรูปร่างของพีคเนื่องจากแป้งทำปฏิกิริยากับกลีเซอริน ผลของการทดสอบการทนต่อแรงดึงขาด พบว่าแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ออกทิลซิลชันิก แอนดีไฮโดรด์ให้ค่า stress peak load และ extension at break สูงที่สุดคือ 11.0 MPa และ 3.5% ตามลำดับ

คำสำคัญ: พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แป้งมันสำปะหลัง กระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่

Abstract

This research was studied about the effects of various starches on the physical and mechanical properties for biodegradable polymers. Three different types of starches were used including native cassava starch, acetate cassava starch and octenyl succinic anhydride cassava starch. The twin screw extruder was used to mix the starch and glycerin served as plasticizer. The mix ratio of starch/glycerin at 77:23 (%wt) was studied. The morphological, physical, chemical and mechanical properties of cassava starch and starch/glycerine compound were investigated by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Fourier transform Infrared (FTIR) spectroscopy and tensile testing. SEM showed the homogenous starch/glycerine compound. XRD results indicated that less crystallinity of all three starches obtained after mixing with glycerine. Moreover, the change in intensity and shape of the peaks by FTIR were found due to the reaction of glycerine and starch. By using octenyl succinic anhydride cassava starch, the highest stress peak load and extension at break were obtained at 11 MPa and 3.5%, respectively.

Keywords: Biodegradable, Cassava Starch, Twin Screw Extruder

คำนำ

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาภาวะโลกร้อน ทำให้อุตสาหกรรมต่างๆให้ความสนใจต่อสภาวะที่เกิดขึ้น จึงมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมรวมทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก นอกจากภาวะโลกร้อนแล้วช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมพลาสติกยังพบกับภาวะต้นทุนที่สูงขึ้นเนื่องจากราคาน้ำมันปรับตัวสูงขึ้น และปัญหาการกำจัดขยะ จึงทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกต้องมองหาวัตถุดิบทดแทนน้ำมันปิโตรเคมี ซึ่งวัตถุดิบใหม่จะต้องมีราคาถูก หาทดแทนได้ง่าย ดังนั้น แป้งจากพืชเช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง จึงได้รับความสนใจในการนำมาผลิตพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้เองจากธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Fengwei et al., 2006; Isabelle and Lan., 2009)

ประเทศไทยมีการปลูกมันสำปะหลังมากเป็นอันดับสองรองจากข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซออร์ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรินด้วยกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นการเพิ่มมูลค่ากับแป้งมันสำปะหลังที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศอีกทางหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch, NST) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่อะซิเตต (Kreation@NE)TM และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยหมู่ออกทิลซิลิโคนแอนด์ไฮโดรด์ (Kreation@OP)TM (บริษัทสยามโมดิฟายด์ จำกัด) ใช้กลีเซอรินเกรดการค้าเป็นพลาสติกไซเซออร์ (บริษัทอิติลมาร์ ประเทศไทย จำกัด) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พร้อมเครื่องตัดเม็ดพอลิเมอร์ (บริษัทเอ็นแมท จำกัด) และเครื่องผสมสาร (บริษัท เอส บี ที จำกัด) เครื่องขึ้นรูปแบบอัดร้อน (บริษัท ชัยเจริญการช่าง)

การเตรียมแป้งคอมปาวด์

การเตรียมแป้งคอมปาวด์เริ่มจากชั่งน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอริน อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรินแสดงในตารางที่ 1 หลังจากนั้นนำไปผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมสาร โดยใช้เวลา 30 นาที นำไปเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้สภาวะเครื่องอัดรีดสำหรับ ดังนี้ อุณหภูมิกระบอกที่ 1-3, 50 °C, อุณหภูมิกระบอกที่ 4, 60 °C, อุณหภูมิกระบอกที่ 5, 80 °C, อุณหภูมิกระบอกที่ 6, 100 °C, อุณหภูมิกระบอกที่ 7-9, 160-175 °C และอุณหภูมิหัวรีด 160-175 °C เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดออกมาเป็นเส้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและนำไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด เก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติก

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนของแป้งกับกลีเซอริน ปริมาณโดยน้ำหนัก

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณแป้ง	ปริมาณกลีเซอริน
NST 1	70	30
NST 2	75	25
NST 3	77	23
NE 1	70	30
NE 2	75	25
NE 3	77	23
OP 1	70	30
OP2	75	25
OP3	77	23

วิธีวิเคราะห์/ ทดสอบ

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FESEM นำผงแป้งตัวอย่างผสมกับอะซิโตนนำไปสับด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ 10 นาที ใช้หลอดหยดดูดสารแขวนลอยหยดลงบนแท่นใส่ตัวอย่าง ปล่อยให้แห้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ สำหรับแป้งคอมพาวด์นำส่วนที่เหลือจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงใช้คัตเตอร์กรีดนำจากนั้นหักให้เป็นสองท่อน นำส่วนภาคตัดขวางติดบนแท่นใส่ตัวอย่าง นำตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้งหมดไปเคลือบทองเพื่อให้นำไฟฟ้า นำตัวอย่างไปเข้าเครื่อง FESEM เพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)

เครื่อง FTIR รุ่น IR Prestige-21 ยี่ห้อ shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ใช้โพแทสเซียมโบรไมด์เป็นเบสไลน์ จำนวนครั้งที่ใช้สแกน 45 ค่าความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 2 เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์จากนั้นอัดเป็นเม็ดนำเข้าเครื่องเพื่อวิเคราะห์

วิเคราะห์โครงสร้างของแป้งและแป้งคอมพาวด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

ผลิตโดยบริษัท Shimadzu รุ่น XRD-6000 ประเทศญี่ปุ่น วิเคราะห์โดยใช้รังสีเอกซ์ของ Cu K α ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) ปรับแรงดันไฟฟ้าหลอดรังสีเอกซ์เท่ากับ 40 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 40 mA ทำการวัดในช่วง 2θ ตั้งแต่ 5° ถึง 40° อัตราการสแกนเท่ากับ 2 องศาต่อนาที วิเคราะห์โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงยึดด้วยเครื่อง Instron

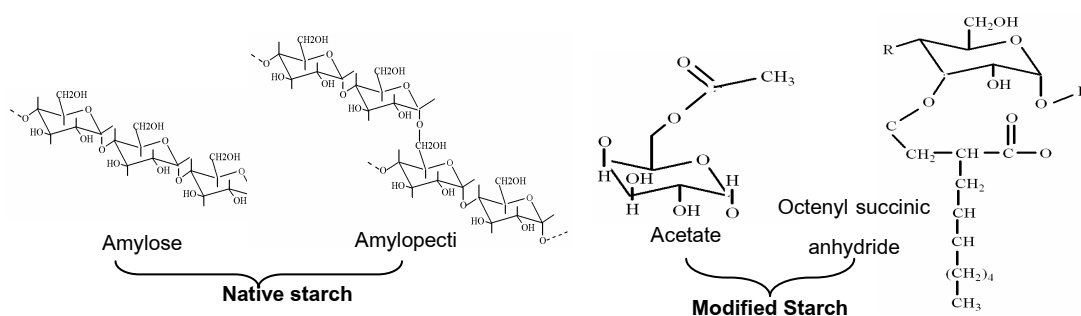
ผลิตโดยบริษัท Instron รุ่น 1123 ประเทศอเมริกา การเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดขึ้นรูปตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนให้มีขนาดกว้าง 25 mm ยาว 110 mm หนา 1.2 mm ใช้ทั้งหมด 5 แผ่นสำหรับการทดสอบ สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 27 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% การตั้งค่าเครื่อง Instron ระยะห่างระหว่างหัวจับ 50 mm ความเร็วในการดึงยึด 50.00 mm/min บันทึกค่าความเค้น (Stress, Peak load) และความเครียด (Strain, extension at break) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B882

ผลการทดลอง

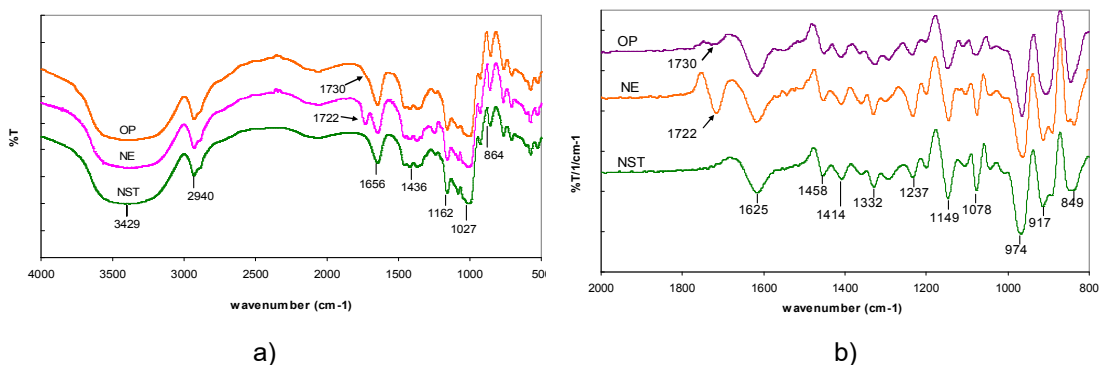
ผลการอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อัตราส่วนตามตารางที่ 1 พบว่าที่อัตราส่วนแบ่งต่อกลีเซอรินเท่ากับ 77 ต่อ 23 เมื่ออัดรีดออกมาเป็นเส้นแล้วนำไปเข้าเครื่องตัดเม็ด จะได้เม็ดแป้งคอมปาวด์ที่ไม่เหนียวติดกัน จึงนำเม็ดแป้งคอมปาวด์ที่อัตราส่วนนี้ไปทำการวิเคราะห์/ ทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพต่อไป

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังและแป้งคอมปาวด์ด้วยเทคนิค FTIR

โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดิบ (NST) มี 2 แบบคือ อะไมโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่งก้านสาขา และอะไมโลเพคติน มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงมีการต่อกันเป็นกิ่งก้านสาขา ส่วนแป้งดัดแปรด้วยหมู่อะซิเตรท (NE) จะมีหมู่อะซิเตรทเข้ามาต่อที่ตำแหน่ง 6 และแป้งดัดแปรด้วยหมู่ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮโดรเจน (OP) จะมีหมู่ออกทีนิล เข้าต่อที่ตำแหน่ง 4 (รูปที่ 1) แสดงให้เห็นโครงสร้างทางเคมีของแป้งทั้งสามชนิดและความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันที่เติมเข้าไปในแป้ง NST ซึ่งความแตกต่างนี้ยืนยันด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR (รูปที่ 2)

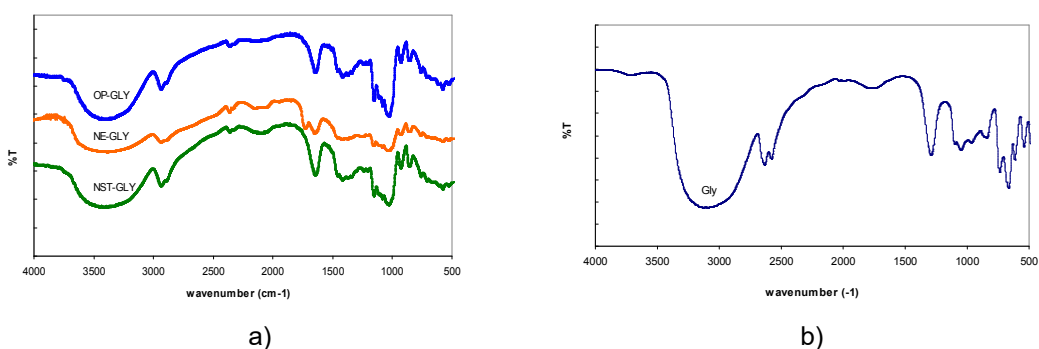


รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร



รูปที่ 2 FTIR สเปกตรัมของตัวอย่างแป้งสามชนิด คือ NST, NE และ OP

จากกราฟ FTIR ได้สรุปแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของแป้งดิบ, แป้งดัดแปรด้วยอะซิเตรท และแป้งดัดแปรด้วยหมู่ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮโดรด์พบพีคที่เหมือนกันคือที่ความยาวคลื่น 3400 cm^{-1} เป็นหมู่ OH-stretching, 2945 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching, 1656 cm^{-1} เป็นหมู่ OH bending, 1170 cm^{-1} เป็นหมู่ C-O stretching และที่ความยาวคลื่น 1049 cm^{-1} เป็นหมู่ C-O-C สำหรับแป้งดัดแปรด้วยหมู่อะซิเตรท จะมีพีคที่แตกต่างจากแป้งดิบคือที่ความยาวคลื่น 1722 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O stretching และที่ 1240 cm^{-1} เป็น C-O stretching (Viviana P et al., 2006) ส่วนแป้งดัดแปรด้วยหมู่ ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮโดรด์ (OP) จะมีพีคที่เด่นคือที่ 1668 cm^{-1} , 2899 cm^{-1} และ 2946 cm^{-1} เป็น หมู่ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ คาร์บอนิล (Xiaoyan et al., 2006) ที่ความยาวคลื่น 1730 cm^{-1} เป็นหมู่ C=O stretching และที่ความยาวคลื่น 1240 cm^{-1} เป็น C-O stretching เหมือนในแป้งดัดแปร ด้วยหมู่อะซิเตรท โดยใช้โปรแกรม Derivative (รูปที่ 2, b) ช่วยในการแยกพีคที่มีการซ้อนทับกันเพื่อให้ เห็นความแตกต่างระหว่างแป้งดิบและแป้งดัดแปรด้วยหมู่ออกทีนิลซัคซินิคแอนด์ไฮโดรด์



รูปที่ 3 FTIR สเปกตรัมของแป้งผสมกลีเซอริน a) NST-Gly, NE-Gly และ OP-Gly b) Gly

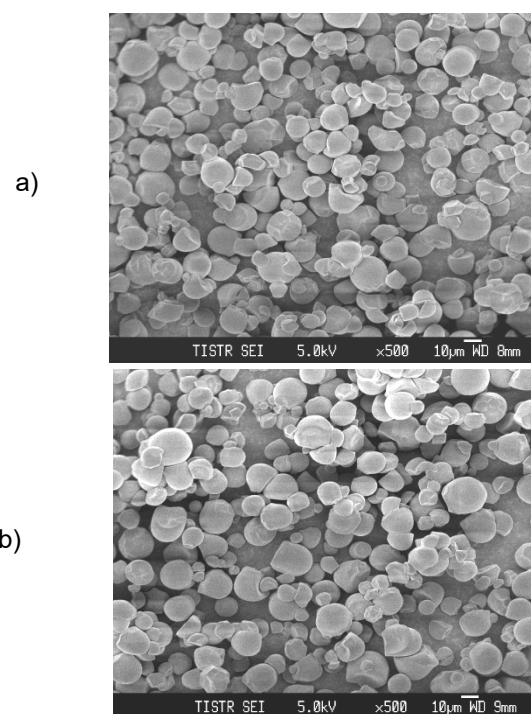
จาก FTIR สเปกตรัมของแป้งคอมปาวด์ทั้งสามชนิด (รูปที่ 3) แสดงให้เห็นถึงกลีเซอรินเข้าไป ผสมในเนื้อของแป้งทั้งสามชนิดพิจารณาจากความเข้มของพีคที่ความยาวคลื่น 3200 cm^{-1} เป็นหมู่ OH stretching มีความเข้มของพีคลดลงและที่ความยาวคลื่น 2907 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H stretching พบว่ารูปร่างของพีคเปลี่ยนแปลงจากพีคเดี่ยวเป็นพีคคู่เนื่องจากความแตกต่างของการ stretching บน โมเลกุลของแป้งและโมเลกุลของกลีเซอริน นอกจากนี้ที่ความยาวคลื่น 1200 cm^{-1} มีความเข้มของพีค

เพิ่มขึ้นนั้นแสดงว่าสภาวะแวดล้อมระดับไมโครรอบ ๆ หมู่ O-C มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมกลีเซอรินและเกิดการเชื่อมต่อพันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งและกลีเซอริน และที่ความยาวคลื่น 940 cm^{-1} มีความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมกับกลีเซอรินซึ่งที่ความยาวคลื่นนี้มีความสัมพันธ์กับพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิล ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ซึ่งมีความไวต่อน้ำ (Rui et al., 2007)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแป้งและแป้งคอมปาวด์

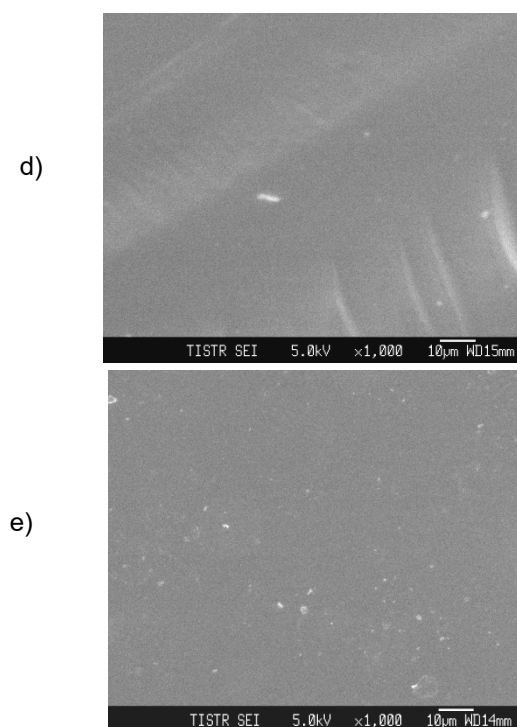
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแป้งทั้งสามชนิดก่อนผสมกับกลีเซอริน รูปที่ 4 (คอลัมน์ 1) พบว่าแป้งทั้งสามชนิด มีลักษณะทรงกลม มีขนาดอนุภาค $5\text{-}20\ \mu\text{m}$ โดยแป้งดิบมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ส่วนแป้งดัดแปรด้วยหมู่อะซิเตรทและแป้งดัดแปรด้วยหมู่ออกทีนิลซัคซินิค แอนไฮไดรด์ มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันคือ $5\text{-}35\ \mu\text{m}$ ซึ่งขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการดัดแปรทำเฉพาะที่พื้นผิวภายนอกของแป้งไม่ได้เข้าไปดัดแปรภายในโครงสร้างภายในทำให้ลักษณะผิวเรียบเหมือนแป้งดิบ (Dongjai and Sanguansri, 2006) เมื่อทำการผสมแป้งกับกลีเซอรินด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 4 (คอลัมน์ 2) ซึ่งเป็นภาพภาคตัดขวางของแป้งคอมปาวด์ที่นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นสำหรับทดสอบการทนต่อแรงดึงขาด พบว่าโครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลายและแสดงให้เห็นว่าแป้งทั้งสามชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับกลีเซอรินเพราะไม่พบโครงสร้างผลึกในเนื้อแป้งคอมปาวด์

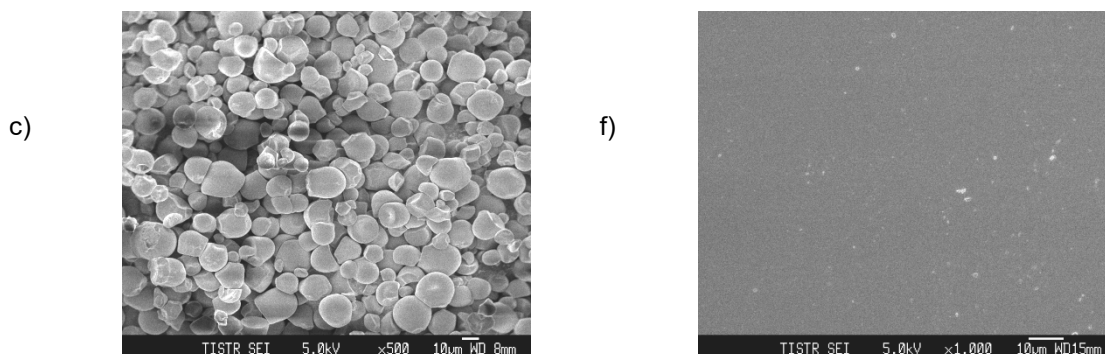
ผงแป้งมันสำปะหลัง (1)



แป้งคอมปาวด์

ภาพพื้นที่ภาคตัดขวาง (2)

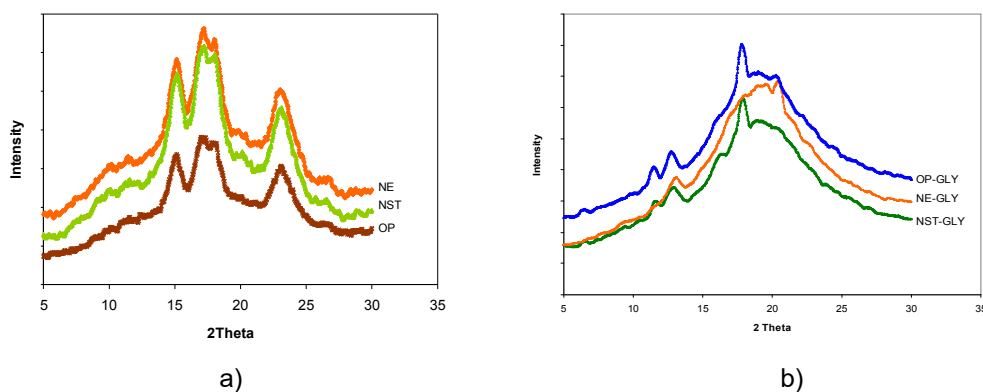




รูปที่ 4 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของเมมเบรนสำปะหลัง a) NST b) NE c) OP และแป้งคอมปาวด์ d) NST-Gly e) NE-Gly f) OP-Gly

ผลการตรวจสอบโครงสร้างของแป้งและแป้งคอมปาวด์ด้วยเทคนิค XRD

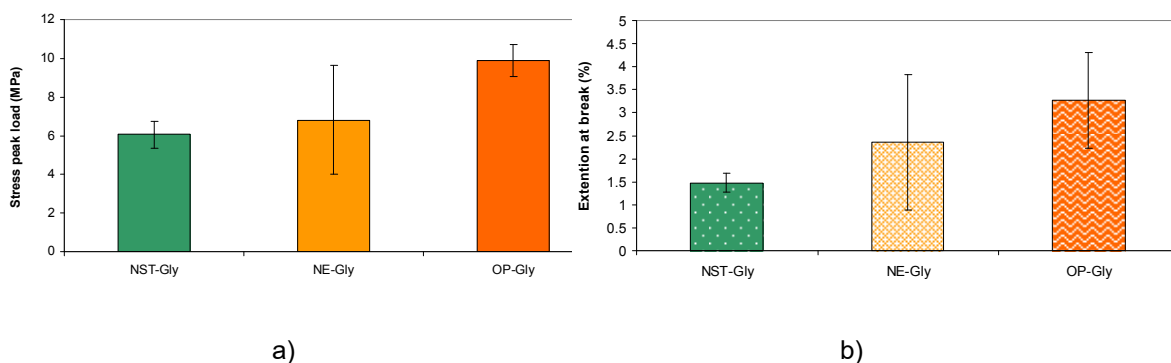
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของเมมเบรนทั้งสามชนิดด้วยเทคนิค XRD พบว่ามี 2θ เท่ากับ 15° 17° 18° และที่ 23° (รูปที่ 5) แสดงว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นสัณฐาน ส่วนสเปกตรัมของเมมเบรนแสดงลักษณะที่เป็นผลึกชนิด A (Norman and Leping, 1998) การเติมหมู่อะซิเตรท และหมู่ ออกทิลซิลซิคอนิคแอนด์ไฮโดรด์ ไม่มีผลต่อความเป็นผลึกของแป้ง (Xiaoyan et al., 2006; Yixiang et al., 2004) เนื่องจากไม่ได้เข้าไปทำให้โครงสร้างของผลึกแป้งถูกทำลาย แต่เข้าไปเกาะบนพื้นผิวหน้าของเม็ดแป้งเท่านั้น ซึ่งยืนยันได้ด้วยภาพถ่าย FESEM (รูปที่ 4) เมื่อนำแป้งผสมกลีเซอรินไปผ่านกระบวนการอัดรีดพบว่าโครงสร้างของผลึกแป้งทั้งสามชนิดถูกทำลายได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งก่อนเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ การเติมกลีเซอรินจะเข้าไปทำให้การยึดเกาะกันระหว่างสายโซ่ของแป้งกับแป้ง (intra and intermolecular) ลดลง เนื่องจากความแรงของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและโมเลกุลของกลีเซอรินทำให้โครงสร้างของผลึกแป้งลดลงเมื่อถูกผสมกับกลีเซอริน โดยเฉพาะแป้ง NE โครงสร้างของผลึกถูกทำลายได้สมบูรณ์มากที่สุด ส่วนแป้ง NST และแป้ง OP จะมีบางส่วนที่เปลี่ยนโครงสร้างของผลึกเป็นชนิด V_n ที่ 2θ มีพีคที่ 12.6° และ 19.4° เกิดขึ้นเนื่องจากผลึกอะไมโลสของแป้งชนิดเกลียวเดี่ยวมีกลีเซอรินละลายอยู่ข้างในเกิดขึ้นขณะที่มีการอัดรีด (Jeroen et al., 1996)



รูปที่ 5 XRD pattern ของ a) เมมเบรนสำปะหลัง และ b) แป้งคอมปาวด์

ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดของแป้งคอมปาวด์

ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดด้วยเครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึงยืดของแป้งดิบ และแป้งตัดแปรที่ผสมกับกลีเซอริน อัตราส่วนแป้งต่อกลีเซอริน 77 ต่อ 23 พบว่าแป้งตัดแปรด้วยออกซินิลอะซิติก แอซิด มีค่า Stress peak load (MPa) และค่า Extension at break (%) สูงคือ 11 MPa และ 3.5 % รองลงมาคือ แป้งตัดแปร NE ส่วนแป้งดิบมีค่า Stress peak load (MPa) และค่า Extension at break (%) ต่ำที่สุดคือ 7 MPa และ 2 % (รูปที่ 5)



รูปที่ 6 กราฟแสดง (a) ค่า Stress peak load และ (b) ค่า Extension at break ของแป้งคอมปาวด์ทั้งสามชนิด

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้พบว่ากระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์สามารถผสมแป้งมันสำปะหลังทั้งสามชนิดกับกลีเซอรินเป็นเนื้อเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังทั้งสามชนิด พบว่าโครงสร้างของผลึกแป้งถูกทำลายและสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับกลีเซอริน เมื่อทดสอบการทนต่อแรงดึงขาด พบว่าแป้งตัดแปร OP จะให้ค่า Stress peak load และค่า Extension at break สูงที่สุดคือ 11 MPa และ 3.5% แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การนำแป้งมันสำปะหลังดิบหรือแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะต้องมีการวิจัยต่อเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแป้งคอมปาวด์ให้ดีขึ้นเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหิดลที่อนุญาตให้ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และโครงการภาคีบัณฑิต สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในงานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

- Doungjai, T. and C. Sanguansri. 2006. Thermal and pasting properties of native and acid-treated starches derivatized by 1-octenyl succinic anhydride. **Carbohydrate Polymers**. 66: 258-265.
- Fengwei, X., Y. Long, L. Hongshen and C. Ling. 2006. Starch Modification Using Reactive Extrusion. **Starch/Stärke**. 58: 131–139.
- Isabelle, V. and T. Lan. 2009. Review Biodegradable Polymers. **Journal Material**. 2: 307-344.
- Norman, W.H.C. and T. Leping. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydrate Polymers**. 36: 277–284.
- Rui, S., L. Quanyong, D. Tao, H. Yanming, Z. Liqun, C. Dafu and T. Wei. 2006. Ageing of Soft Thermoplastic Starch with High Glycerol Content. **Journal of Applied Polymer Science**. 103: 574-586.
- Jeroen, J.G. van S., T. Hubertus, W. Dick de and V. F.G. Johannes. 1995. Short-rang structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. **Carbohydrate research**. 279: 201-204.
- Viviana, P.C., C. María, Z. Tolosa and V. Analía. 2006. Relationship Between Structure and Properties of Modified potato Starch Biodegradable Films. **Journal of Applied Polymer Science**. 101(6): 4313-4319.
- Xiaoyan, S., H. Guoqing, R. Hui and C. Qihe. 2006. Preparation and Properties of Octenyl Succinic Anhydride Modified Early *Indica* Rice Starch. **Starch/Stärke**. 58: 109-117.
- Yixiang, X., M. Vesselin and H. Milford A. 2004. Synthesis and Characterization of Starch Acetates with High Substitution. **Cereal Chemistry**. 81(6): 735-740.

