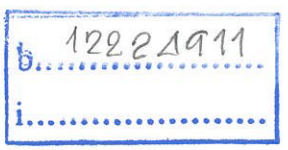
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC RICE STARCH AND GLUTINOUS RICE STARCH BLEND

นางสาวกรกมล ชมภูรัตน์

นายบุญเมศ จันสุพรม



โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC RICE STARCH AND GLUTINOUS RICE STARCH BLEND

MISS KORNKAMOL CHOMPOORAT

MR. BOONMES CHANSUPROM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN INDUSTRIAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF THE TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2008

โครงงานพิเศษ	สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว
นักศึกษา	นางสาวกรกมล ชมภูรัตน์ รหัส 48050038
	นายบุญเมศ จันสุพรม รหัส 48050063
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2551
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	

.....

(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

ปฏิบัติหน้าที่ประธานสาขาวิชา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงงานพิเศษ	สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว
นักศึกษา	นางสาวกรกมล ชมภูรัตน์ รหัส 48050038
	นายบุญเมศ จันสุพรม รหัส 48050063
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2551
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic, TPS) จากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ เพื่อทำการเตรียมให้เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ทำการผสมแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้าในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 100:0, 0:100, 75:25, 50:50, 25:75 โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอลต่างๆ ได้แก่ 25, 50, 75, 100 phr ที่อุณหภูมิ 140, 150, 160 และ 170 °C จากนั้นนำไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลาย พบว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นส่งผลให้การรับแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้น ส่วนสัณฐานวิทยาเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าแป้งทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ดี นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเหนียวปริมาณสูงมีแนวโน้มในการย่อยสลายเร็วที่สุด ส่วนอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้าปริมาณมากใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด เมื่อทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าอุณหภูมิการผสม ปริมาณกลีเซอรอล และอัตราส่วนของแป้งไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้ง

Special Project	Properties of Thermoplastic rice starch and glutinous rice starch blend		
Name	Miss.Kornkamol	Chompoorat	ID. 48050038
	Mr.Boonmes	Chansuprom	ID. 48050063
Degree	Bachelor of Science		
Program	Industrial chemistry		
Academic Year	2008		
Advisor	Asso.Prof.Dr.Jutarat	Prachayawarakorn	

Abstract

This research aimed to study on the preparation and properties of thermoplastic rice and glutinous rice starch blend plasticized by glycerol in order to produce degradable polymer. Different ratio of glutinous rice starch to rice starch, i.e. 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100, were studied. In addition, different amounts of glycerol (25, 50, 75 and 100 phr) and different mixing temperature (140, 150, 160 and 170 $^{\circ}$C) were examined. It was found that the optimum temperature, was 150 $^{\circ}$C and the amount of glycerol were either 50 or 75 phr. The blended thermoplastic starch were, then, tested mechanical, morphological, thermal and degradable property. The results showed that at high ratio of glutinous rice starch, the speciments showed high elongation at break and % strain at break. On the other hand, high ratios of rice starch caused high load, tensile strength, Young's modulus and hardness. For morphology, obtained from Scaning Electron Microscope (SEM), the results illustrated good phase compatibility. Beside, the samples with high content of glutinous rice starch were easily degraded than those of rice starch. Furthermore, onset degradation temperatures were not affected by mixing temperature, glycerol content and rice ratio.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำเกี่ยวกับโครงงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจศิลป์ และ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษโดยช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี่ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวกิรกมล ชมภูรัตน์
นายบุญเมศ จันสุพรม

สารบัญ

รายการ	หน้า
บทคัดย่อโครงงานพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงงานพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 การเปลี่ยนปลงจากการใช้ทรัพยากรปิโตรเลียมไปสู่ทรัพยากรมวลชีวภาพ	4
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้	5
2.2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	6
2.2.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง	7
2.2.2.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก	7
2.2.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	8
2.2.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์	11
2.2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	11
2.2.3.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน	11
2.2.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป	12
2.2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	12
2.2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟาเรด	13
2.2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	13
2.2.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน	14
2.3 แป้ง	14
2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง	14

สารบัญ (ต่อ)

รายการ **หน้า**

2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง.....15
2.3.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....21
2.3.4 สมบัติของแป้ง 24
2.3.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....24
2.3.4.2 การเกิดเจลาทิไนเซชัน.....25
2.3.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....26
2.3.5 แป้งข้าวเจ้า.....29
2.3.6 แป้งข้าวเหนียว.....30
2.3.7 แป้งข้าว 31
2.3.7.1 ผลิตภัณฑ์เส้นและแป้ง 33
2.3.7.2 การนำแป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ต่างๆ 34
2.4 พลาสติไซเซอร์.....35
2.4.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์.....35
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....37
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....43
3.1 สารเคมี.....43
3.2 อุปกรณ์ 44
3.3 การทดลอง.....47
3.4 การทดสอบ.....48
3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล 48
3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดูลัสและ% การดึงยืด ณ จุดขาด.....49
3.4.1.2 ความแข็งกด.....49
3.4.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา 50
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....50
3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน 50

สารบัญ (ต่อ)

รายการ **หน้า**

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....51
4.1 สมบัติเชิงกล.....51
4.1.1 การศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ด้วยเครื่องผสมระบบปิด.....51
4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของแป้งผสมและปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติเชิงกลของแป้งผสม.....55
4.2 สัณฐานวิทยา.....61
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.....61
4.2.2 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.....61
4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน.....63
4.2.4 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน...64
4.2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.65
4.2.6 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง ที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.....67
4.2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน...68
4.2.8 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง ที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน.....69
4.3 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....71
4.4 สมบัติด้านความร้อน.....75
4.4.1 ผลของอุณหภูมิที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.....75
4.4.2 ผลของกลีเซอรอลที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน.....76
4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่ปริมาณกลีเซอรอล 75.....77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....82
เอกสารอ้างอิง.....83
ภาคผนวก.....85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะไมโลเพคติน	15
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส	17
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพคติน	20
ตารางที่ 2.4	สมบัติของแป้งข้าวเจ้า	30
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า	43
ตารางที่ 3.2	องค์ประกอบของแป้งข้าวเหนียว	43
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว, แป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	47
ตารางที่ 3.4	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้	48
ตารางที่ 4.1	ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการใช้กลีเซอรอลในปริมาณต่าง ๆ	51
ตารางที่ 4.2	น้ำหนักของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของอัตราส่วนผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวต่อแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C	71
ตารางที่ 4.3	อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์ฑมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล	79

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ 6
รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 7
รูปที่ 2.3 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ 9
รูปที่ 2.4 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง 9
รูปที่ 2.5 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาทิไนซ์ 10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ 11
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส 16
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน 18
รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน 19
รูปที่ 2.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา 22
รูปที่ 2.11 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน.....23
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม 26
รูปที่ 2.13 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....28
รูปที่ 2.14 กลไกการคืนตัวของแป้ง 28
รูปที่ 2.15 แผนภูมิกรรมวิธีผลิตแป้ง 32
รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงกรรมวิธีการทำผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่น 33
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 1 45
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 2 46
รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า
ที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 140 °C-170 °C.....52
รูปที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า
ที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วนใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 140 °C-170 °C.....54
รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า
ที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วนใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 150 °C และ 160 °C.....56
รูปที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า
ที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วนใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 150 °C และ 160 °C.....58

รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 100:0:50 อุณหภูมิ 150°C (ข) 100:0:50 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 0:100:50 อุณหภูมิ 150°C (ง) 0:100:50 อุณหภูมิ 160 °C 61

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:50 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:50 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:50 อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:50 160 °C (จ) 25:75:50 อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:50 160 อุณหภูมิ °C 62

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 0:100:75 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 0:100:75 อุณหภูมิ 160 °C.....63

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:75 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:75 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:75 อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:75 อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:75 อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:75 อุณหภูมิ160 °C 64

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 100:0:50 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 100:0:50 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 0:100:50 อุณหภูมิ 150 °C (ง) 0:100:50 อุณหภูมิ160 °C 65

รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:50 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:50 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:50 อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:50 อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:50 อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:50 อุณหภูมิ160 °C.....67

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 0:100:75 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 0:100:75 อุณหภูมิ 160 °C 68

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:75 อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:75 อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:75 อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:75 อุณหภูมิ160 °C (จ) 25:75:75 อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:75 160 อุณหภูมิ °C.....69

รูปที่ 4.13 น้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ กันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว
หรือแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอลและอุณหภูมิที่ต่างเมื่อนำมาฝังดิน.....72
รูปที่ 4.14 น้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ กันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสม
แป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนปริมาณกลีเซอรอลและอุณหภูมิต่างเมื่อนำมาฝังดิน.....73
รูปที่ 4.15 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว
ที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 160 °C
(ค) TGA และ (ง) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า
ที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 160 °C 75
รูปที่ 4.16 (ก), (ค), (จ) TGA ของอัตราส่วน (75:25:50), (50:50:50), (25:75:50) ตามลำดับ
และ (ข), (ง), (ฉ) DTG ของอัตราส่วน (75:25:50), (50:50:50), (25:75:50) ตามลำดับ
โดย (1) เป็นอุณหภูมิ 150 °C และ (2) เป็นอุณหภูมิ 160 °C 76
รูปที่ 4.17 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า
ที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 160 °C 77
รูปที่ 4.18 (ก), (ค), (จ) TGA ของอัตราส่วน (75:25:75), (50:50:75), (25:75:75) ตามลำดับ
และ (ข), (ง), (ฉ) DTG ของอัตราส่วน (75:25:75), (50:50:75), (25:75:75) ตามลำดับ
โดย (1) เป็นอุณหภูมิ 150 °C และ (2) เป็นอุณหภูมิ 160 °C 78

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

ภาวะโลกร้อน (Green House Effect) กำลังทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรตระหนักอย่างมากในปัจจุบันและการคิดค้นสิ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของโลกของเรานั้นเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การนำเทอร์โมพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ จำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีที่ยุ่งยาก อีกทั้งเทอร์โมพลาสติกยังเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดขยะพอลิเมอร์ในปริมาณที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จึงมีการรณรงค์ให้เลิกใช้และหันมาใช้วัสดุที่ย่อยสลายง่าย หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากวัสดุธรรมชาติแทน แต่ด้วยคุณประโยชน์ของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา สะดวกสบายในการใช้สอย ถือหิ้ว รวมทั้งในการขนส่ง ตลอดจนมีความทนทานและสามารถทำได้หลาก หลายรูปแบบ จึงทำให้เป็นการยากที่จะใช้ผลิตภัณฑ์อื่นเข้ามาแทนที่ได้ ทั่วโลกพยายามคิดหาวิธีผลิตพลาสติกที่มีวัตถุดิบมาจากธรรมชาติ รวมทั้งประเทศไทยที่จัดให้มีโครงการนวัตกรรมวัสดุชีวภาพ (Bio-Based Materials) เพื่อนำมาทำเป็นพลาสติกชีวภาพขึ้น

ในการนำวัสดุชีวภาพมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ มาจากแนวโน้มของโลกโดยเฉพาะในต่าง ประเทศ ซึ่งมีสาเหตุมาจากพลาสติกธรรมดาที่ใช้กันอยู่ในท้องตลาดนั้นเป็นที่ทราบกันดี คือไม่สามารถย่อยสลายได้เองหรือบางชนิดที่สามารถย่อยสลายได้แต่ต้องใช้เวลาเป็นร้อยๆ ปี จึงจะย่อยสลายหมด นับว่าช้ามาก ส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องของการกำจัดขยะ หาพื้นที่ฝังกลบขยะประกอบกับประชาชนให้ความสำคัญในเรื่องของการรักษาสิ่งแวดล้อมกันมากขึ้น จึงทำให้ประเทศในแถบยุโรป สหรัฐอเมริกา ในเอเชียอย่าง ญี่ปุ่น สนใจอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพกันมากขึ้น เพราะพลาสติกชีวภาพจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการบรรเทาปัญหา ด้วยสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้กลายเป็นธาตุในดินที่ไม่เป็นพิษกับดินและสิ่งแวดล้อม

สำหรับประเทศไทยได้ดำเนินการผลักดันให้เกิดการพัฒนาเป็นโครงการระดับชาติ ในการนำเทคโนโลยีชีวภาพระดับสูงมาใช้ในการผลิตวัสดุชีวภาพที่ทำจากแป้งและน้ำตาลเป็นหลัก เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพและความเป็นไปได้ที่จะผลิต เพราะมีปริมาณวัตถุดิบที่มากเพียงพอ โดยที่มีตลาดรองรับทั้งในอุตสาหกรรมเส้นใยสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งเป็นการเตรียมความพร้อม

ให้กับอุตสาหกรรมการส่งออกต่างประเทศ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎระเบียบของกลุ่มสหภาพยุโรป หรืออียู ในการกำหนดให้นำเข้าชิ้น ส่วนยานยนต์ เฉพาะที่เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งมีการบังคับใช้ในบางประเทศแล้ว

เนื่องจากประเทศไทยมีข้าวเป็นสินค้าส่งออกเป็นอันดับ 7 ของโลก โดยในปี พ.ศ. 2549 มีผลผลิต 467 กิโลกรัมต่อไร่ และเพิ่มขึ้นเป็น 481 กิโลกรัมต่อไร่ในปี พ.ศ. 2550 [1] และมีมูลค่าของผลผลิตข้าวเจ้า นาปีและนาปรังเป็น 202,515 และ 368,309 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2549 และ 2550 ตามลำดับ นอกจากนี้ ข้าวเหนียว (Glutinous rice) เป็นที่นิยมบริโภคอย่างกว้างขวางในประเทศและเป็นอาหารหลักของประชาชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ และยังนำข้าวเหนียวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสุราพื้นเมือง รวมทั้งการผลิตแป้งข้าวเหนียวเพื่ออุตสาหกรรมอาหารและขนมขบเคี้ยว

การขยายตัวของของโรงงานผลิตอาหารที่ใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดย เฉพาะโรงงานผลิตอาหารญี่ปุ่นแช่แข็ง เช่น ขนมโมจิ เกี๊ยวซ่า เป็นต้น ซึ่งเน้นผลิตเพื่อการส่งออกไปยังตลาดญี่ปุ่น เนื่องจากแนวโน้มจำนวนผู้สูงอายุในญี่ปุ่นเพิ่มขึ้น ความต้องการอาหารที่มีความนุ่มและพร้อมรับประทานไม่ยุ่งยากในการเตรียมจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งยังมีผลต่อการพัฒนาพันธุ์ข้าวเหนียวเพื่อให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการ ตั้งแต่ต้นปี 2549 ราคาข้าวเหนียวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการส่งออกที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ปริมาณการส่งออกข้าวเหนียวและผลิตภัณฑ์ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2549 เท่ากับ 308,277 ตัน มูลค่า 4,653 ล้านบาท เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อนรวมทั้งมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 27.9 และร้อยละ 38.8 ตามลำดับ [1]

ทั้งนี้ มูลค่าการส่งออกข้าวเหนียวไปยังตลาดจีนเพิ่มขึ้นถึงเกือบ 5 เท่าตัว กล่าวคือ มูลค่าการส่งออกเท่ากับ 945.9 ล้านบาท เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อนแล้วเพิ่มขึ้นถึง 4.8 เท่าตัว เนื่องจากจีนต้องการข้าวเหนียวเพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตขนมขบเคี้ยวและเหล้าสาเก [1] ดังนั้นแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวเป็นผลิตภัณฑ์หลักอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้มาจากข้าว ทำการเตรียมได้จากการใช้ข้าวหักหรือข้าวแห้งมาผ่านการโม่ซึ่งอาจเป็นการโม่แป้ง โม่น้ำหรือวิธีผสม

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ซึ่งเป็นวัสดุที่เตรียมได้จากแป้ง สามารถไหลและขึ้นรูปได้เมื่อผ่านความร้อนสูง จึงจัดเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2] พบว่าสามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้จากแป้งข้าวเจ้า แต่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ยังมีปัญหาเรื่องสมบัติเชิงกลและการดูดซับน้ำ ดังนั้นในโครงงานพิเศษนี้จึงจะทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า โดยการนำแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งข้าวเหนียวในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ศึกษาการเตรียมการขึ้นรูปและ

ทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมนี้ ซึ่งคาดว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่มีสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันจะทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทำการเตรียมและทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้ง ข้าวเหนียว (Thermoplastic rice starch and Thermoplastic glutinous rice starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.2 ศึกษาหาปริมาณแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้

1.3.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผสมวัสดุต่างๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วรอบ ในการผสม

1.3.4 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนและสมบัติการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่มีสมบัติใกล้ เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้งานทั่วไปได้

1.4.2 ช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในยุคปัจจุบันรวมไปถึงอนาคตได้

1.4.3 ช่วยเพิ่มมูลค่าของแป้งให้มีมากขึ้น

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การเปลี่ยนแปลงจากการใช้ทรัพยากรปิโตรเลียมไปสู่ทรัพยากรมวลชีวภาพ [3]

ผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่หาได้ง่าย ราคาถูก สะดวก และทนทาน และผลิตภัณฑ์หลายประเภทถูกออกแบบสำหรับการใช้งานครั้งเดียว ดังนั้นปัจจัยที่เป็นข้อเด่นเหล่านี้ จึงเร่งให้เกิดการทิ้งเป็นขยะเป็นจำนวนมากในแต่ละปีและส่งผลกระทบด้านการกำจัด ถึงแม้ว่าจะมีการรณรงค์ทั้งการลดปริมาณการใช้พลาสติก การนำกลับมาใช้ใหม่และการเรียกกลับคืนเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ แต่ปัญหาด้านมาตร การที่ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มที่ ค่าใช้จ่ายในการจัดการนำมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างสูง ทำให้การรณรงค์ด้านการเก็บรวบรวม การทิ้ง และการนำมาใช้ใหม่ไม่บรรลุผล จึงทำให้ปริมาณขยะพลาสติกของโลกยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

หากพิจารณาด้านวัตถุดิบ อันได้แก่ ทรัพยากรน้ำมันปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่มีปริมาณจำกัดและประมาณการว่าจะหมดไปใน 90 ปีข้างหน้า ดังนั้นประมาณร้อยละ 5 ของปิโตรเลียมที่นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้น นอกจากจะมีแนวโน้มของราคาสูงขึ้นตามราคาน้ำมันแล้ว ยังอาจเกิดวิกฤตด้านการขาดแคลนวัตถุดิบด้วย

นอกจากนี้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นเรื่องมลภาวะอากาศ (เช่น สภาวะโลกร้อนจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การลดลงของโอโซน หมอกควันจากการเผาผลาญเชื้อเพลิง) ปัญหาทรัพยากรน้ำ (เช่น แหล่งน้ำมีความเป็นกรดหรือมีแร่ธาตุมากเกินไปซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ) ปัญหาทรัพยากรดินและน้ำ (เช่น การสะสมของพลาสติกที่ไม่ย่อยสลาย) จัดว่าเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ องค์รวมของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำได้ตระหนักถึง และหาแนวทางแก้ไขเพื่อให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ผลกระทบเหล่านี้จึงเป็นแรงผลักดันในการค้นหาแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและแหล่งวัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ (Renewable resources) ทั้งนี้สำหรับพลาสติกนั้น ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นทางเลือกใหม่ที่ความต้องการและเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อมเป็นแรงผลักดันที่ดีให้เกิดเทคโนโลยีและนวัตกรรม สู่การพัฒนาธุรกิจอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ดังเห็นได้จากกลุ่มประเทศยุโรป สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ฯลฯ

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ [4]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) หมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากมีสมบัติที่เปลี่ยนไป พลาสติกย่อยสลายได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively Degradable plastic)

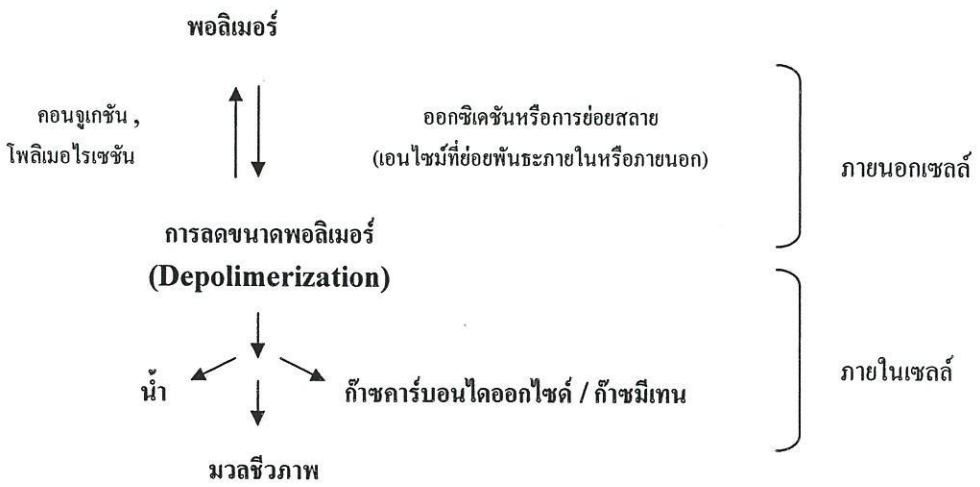
2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically Degradable plastic)

3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)

พลาสติกประเภทนี้เกิดจากการนำวัสดุจำพวกแป้ง มาผสมกับพลาสติกทั่วๆ ไปมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกแสงอัลตราไวโอเลต แป้งซึ่งเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์จะสลายตัวก่อนซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์สลายตัวออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ แต่ส่วนที่เป็นพลาสติกจะยังไม่ย่อยสลายดังนั้นพลาสติกประเภทย่อยสลายด้วยแสงนี้ยังคงไม่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด

4. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

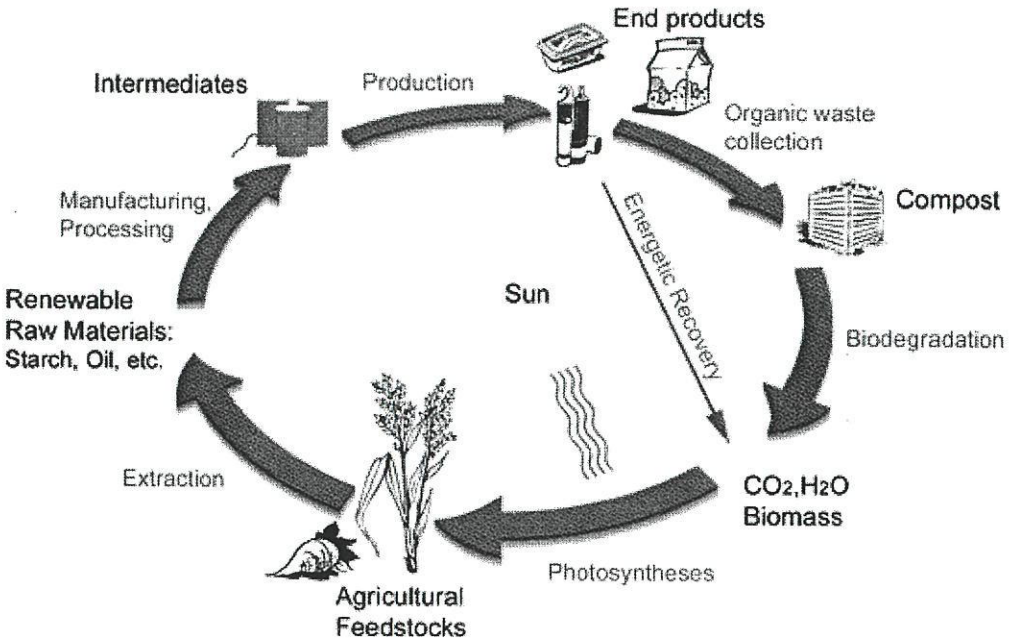
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้โดยอาศัยเอมไซม์จากสิ่งมีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม การย่อยสลายเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออกเรียกว่า ขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาเพื่อจะตัดสายโซ่พอลิเมอร์ ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่ 2 คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP ก๊าซต่าง ๆ (เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2)) น้ำ เกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ จะได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ ขั้นตอนการย่อยสลายของพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่าง ๆ ในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ [4]

2.2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [3]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นตัวแทนวัสดุประเภทใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติการใช้งานเหมือนพลาสติกทั่วๆไป แต่สิ่งที่แตกต่างกัน คือ สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือถูกหมักเป็นปุ๋ยได้ในสภาวะที่เหมาะสม การพัฒนาการของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่มจากมวลชีวภาพหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชตามธรรมชาติ ซึ่งมวลชีวภาพจำนวนที่เท่ากันนี้ถูกย่อยสลายกลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำรวมทั้งมวลชีวภาพและแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักรของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลายไปอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้องไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและไม่มีค่าใช้จ่ายสูง วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีจุดประสงค์ที่จะเลียนแบบวงจรของธรรมชาติ หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานโดยผู้บริโภคและถูกนำไปกำจัดโดยการย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัฏจักรนี้ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้เป็นการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [3]

2.2.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [4]

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มตั้งแต่การที่เริ่มใช้พอลิเมอร์ ธรรมชาติราคาถูก คือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติกและได้รักการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์อย่างต่อเนื่อง ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

2.2.2.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90 % ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า "Gelatinized" starch tuff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายความถึงการให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำภายในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกกันว่า "โฟมแป้ง" ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง โฟมแป้งแบ่งออกเป็น

1) โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกมาจากหัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟม สำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น, ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้ง ปริมาณน้ำ ชนิด และปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

2) โฟมจากแป้ง

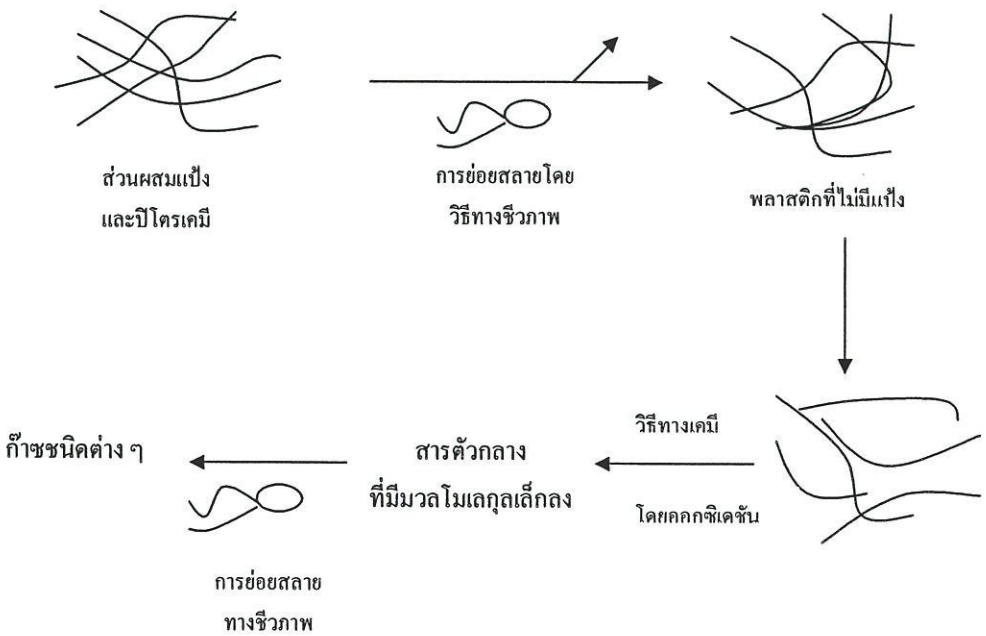
เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่น เยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เพื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

2.2.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

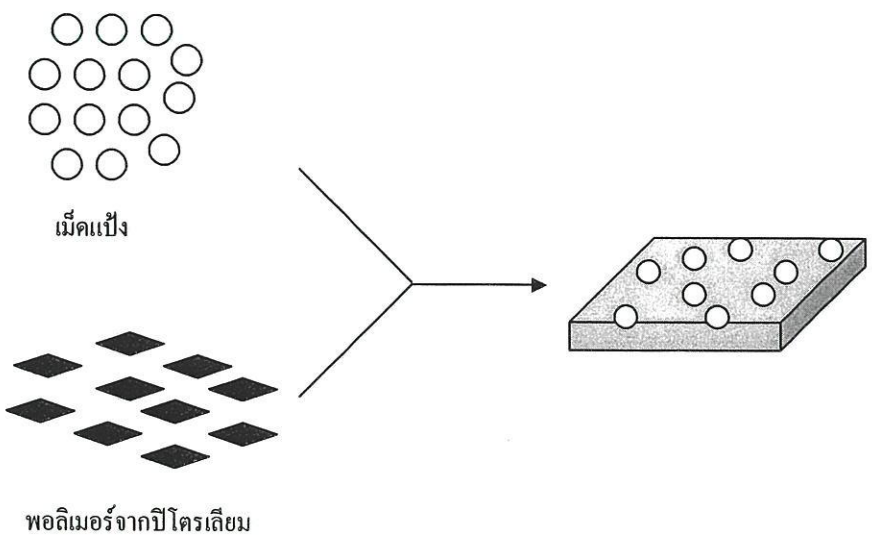
พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธุ์ของปิโตรเคมี การย่อยสลายแป้งผสม พอลิเมอร์ย่อยสลายได้แสดงดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้ สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูป เม็ดแป้งและแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของ ปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

1) ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก ปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิด 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่น ๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพดซึ่งเป็น Auto-oxidation เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อมเกิดอนุมูลอิสระชนิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีให้ได้โอลิโกเมอร์ที่เล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.3



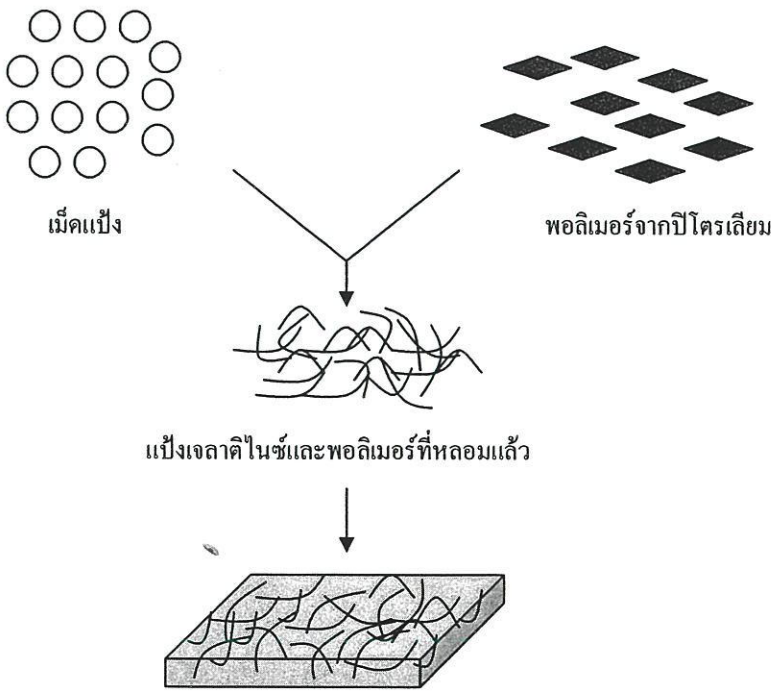
รูปที่ 2.3 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ [4]



รูปที่ 2.4 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง [4]

2) ในรูปแป้งเจลาติไนซ์

วิธีนี้เม็ดแป้งจะแตกตัวทั้งหมด ผสมรวมกับอนุพันธ์ปิโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



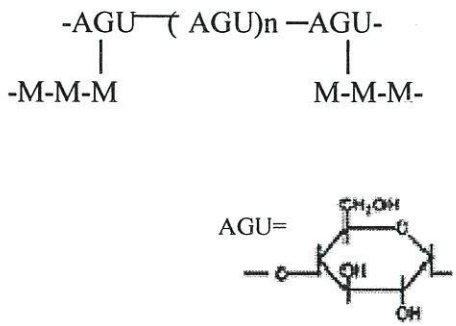
รูปที่ 2.5 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาทิไนซ์ [4]

ในประเทศไทย ได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ จากส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังและ พอลิคาโพรแลคแทม โดยแป้งมันที่ใช้อยู่ในรูปเม็ดแป้งเจลาติไนซ์ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสม ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่ใช้ เมื่อปริมาณแป้งในรูปเม็ดแป้ง และแป้งเจลาทิไนซ์ในส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าความแข็งแรงดึงของส่วนผสมทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน % การดึงยืดขึ้นกับรูปแป้งที่ใช้ ถ้าปริมาณแป้งมากกว่า 30% ในการทดลองพบว่า ในรูปเม็ดแป้งมี % การดึงยืดสูงกว่าแป้งรูปเจลาทิไนซ์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแป้ง 50% เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่า ในรูปแป้ง เจลาทิไนซ์สามารถย่อยสลายง่ายกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปเม็ดแป้ง เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆกัน พบว่าส่วนผสมที่มีแป้งเจลาทิไนซ์ 30% และพอลิคาโพรแลคแทม 70%

เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่มีสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

2.2.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคสและ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจจะใช้ในรูปเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาติไนซ์ การทำปฏิกิริยา Graft copolymerization ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) บนสายโซ่โมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีที่เป็นที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลอซีริค (Ceric salts) ปฏิกิริยาแสดงได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ [4]

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง ไอออนของมอนอเมอร์ปิโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อ ๆไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย

2.2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [4]

2.2.3.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาน้ำหนักแห้ง สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = \frac{Cd}{Ci} \times 100$$

เมื่อ Ci คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.2.3.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2.2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่างแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งทั้งไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้น

พอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือนมาตรวจปริมาณไนโตรเจน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรด อะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนีบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

2.2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟาเรด

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟาเรด (Infared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟาเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟาเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟาเรด

2.2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorometer (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มาก กว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.2.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด30×120 มิลลิเมตร หลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

2.3 แป้ง [4]

"แป้ง" ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาว์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในประเภทฟลาว์ เรียกว่า Corn flour , Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8 % เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อื่นๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch, Wheat starch เป็นต้น ซึ่งแป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน(Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ

ประเภทของแป้งสามารถแยกได้ตามสมบัติเป็น 2 ประเภท คือ

1. Starch ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องใช้แบบเปียก (Wet grinding) ซึ่งจะทำให้แยก Starch ออกมาได้

2. Flour ผลิตได้จากการโม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างไปจาก Starch

2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์หรือ SEM เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น Growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ Growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ Growth ring แสดงถึงลักษณะการเจริญ

ของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) ซึ่งส่วนนี้ ประกอบด้วยส่วน Reducing end ของโมเลกุลแป้งมีด้าน Non–reducing end ของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (Branch point) ของ อะไมโลเพคตินอยู่ในส่วนอสัณฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก

2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วย พื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่ และมีกิ่งก้านสาขามากมาย (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป) นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า "Intermediate material" แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและ อะไมโลเพคตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

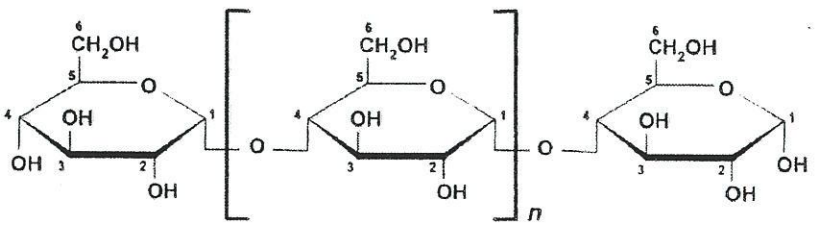
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะมิโพเพคติน [4]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	พันธะ α -1,4	พันธะ α -1,4 และพันธะ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง [4]

1. อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา – 1,4 (α -1,4) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส [5]

แป้งจากธัญพืช มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสของแป้งหลาย ๆ ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [4]

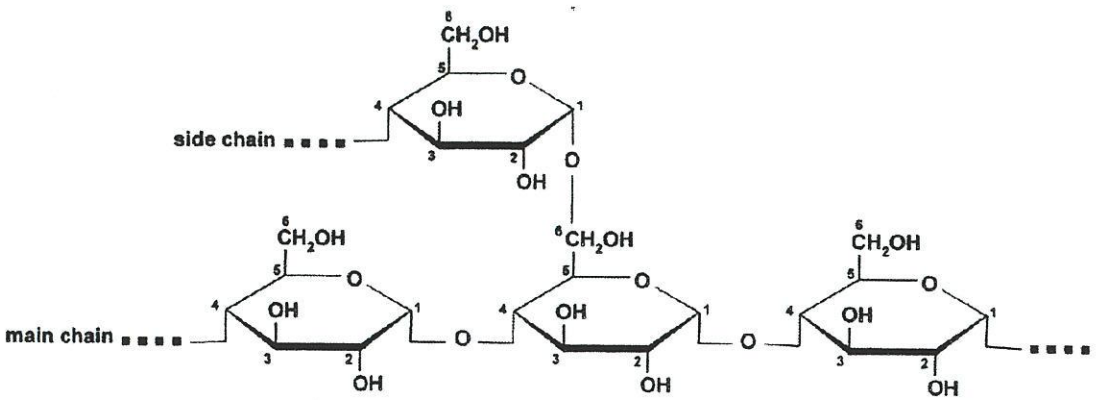
แหล่งแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (%)	β-Amylose Limit (%)	ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ย	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	18	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17					
- อินดิคา		73	1,000	4.0	250	49
- จาโปนิค		81	1,100	3.4	320	31
แป้งมัน	17	75	2,600	7.6	340	42
สำปะหลัง	21	80	4,900	9.5	240	
แป้งมันฝรั่ง						

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลาทิไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ด โครงสร้างของอะไมโลส เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลี่ยวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิด อะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจงและอาจมีบางส่วนละลายได้

2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α - 1,6 ดังรูป 2.8

108570



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [5]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคทินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

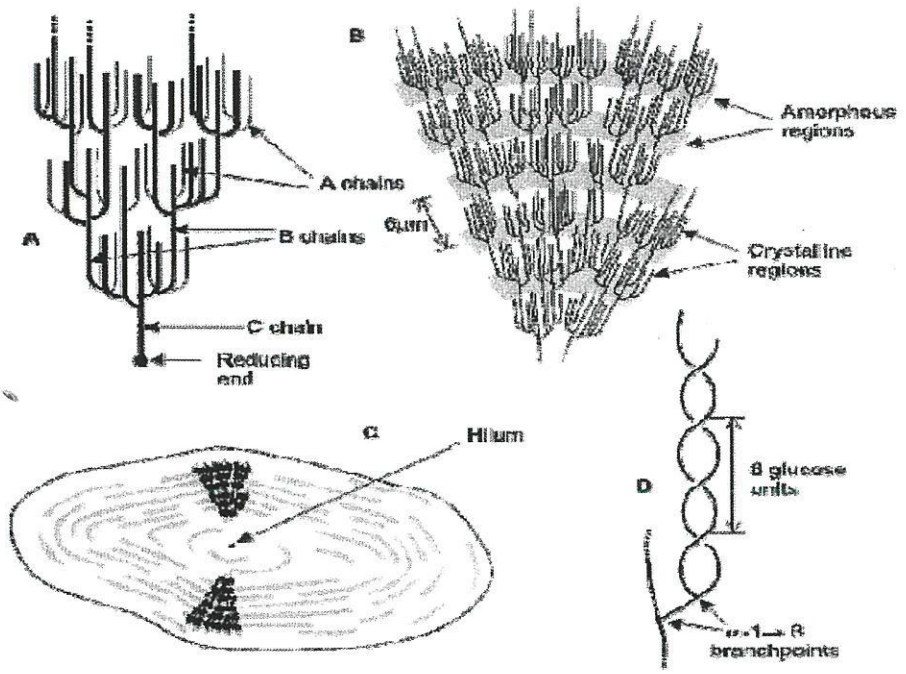
1). **สาย A (A–chain)** เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)

2). **สาย B (B-chain)** มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า สายโซ่แบบ B นี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย B1, B2, B3 และ B4 ซึ่งมีความยาวคร่อมหนึ่ง สอง สาม และสี่คลัสเตอร์ (Cluster) ตามลำดับ โครงสร้างอะไมโลเพคทินประกอบด้วยสาย A และ B ในอัตราส่วน 0.8 – 0.9 : 1

3). **สาย C (C–chain)** แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละ โมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกทินที่มี ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่เหล่านี้ จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) โดยลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว (Cluster) สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปในโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 และ 3 กลุ่ม ตามลำดับ โดยสาย A , B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) อยู่ในช่วง 6-12 , 13-24 และ24-25 ตามลำดับ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพคตินจากมันฝรั่งโดยใช้ เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง

(Debranching enzyme) และเบต้าอะมิเลส (β- amylase) แสดงโครงสร้างของ อะไมโลเพคติน ดังรูปที่ 2.9 โดยส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (Crystallite region) ที่เกิดจากสายโซ่ที่เป็นเส้นตรงสั้นๆ ของอะมิโลเพกติน จัดเรียงตัวเป็นเกลียวคู่ด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบเกิดขึ้น ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นโครงสร้าง บริเวณที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อของสายโซ่กลูโคส ซึ่งแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ของแป้ง



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน [4]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพคติน [4]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะไมโลเพคทิน (%)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย (CL)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย (DP)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	13	4,800	250	19	5
แป้งข้าวโพด	72	15	8,200	370	22	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
- อินดิคา		14	4,700	220	21	6
- จาโปนิค		13	12,800	670	19	5
- ข้าวเหนียว		12	18,500	1,000	18	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	15	9,800	410	24	8

3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคทินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพคทินแต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่าปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลส อะไมโลเพคทินและสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูกเช่น เวลาในการเพราะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างเพราะปลูก เป็นต้น

4. ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

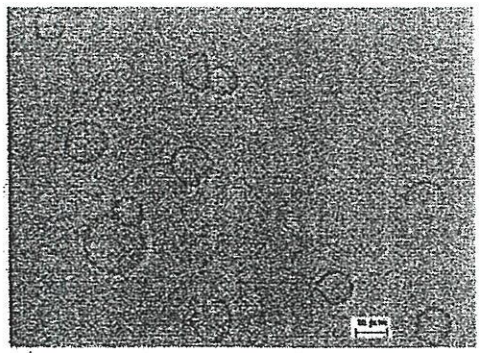
1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง(Internal component) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

4. ส่วนประกอบอื่น ที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

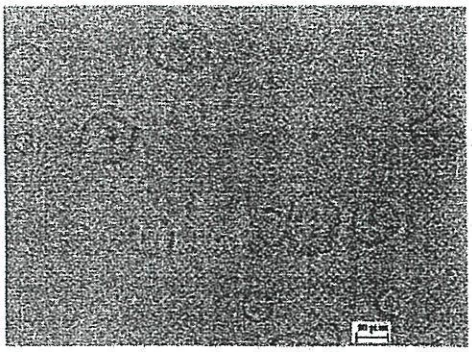
2.3.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.10) และแบบอิเล็กตรอน (SEM) รูปที่ 2.11 พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

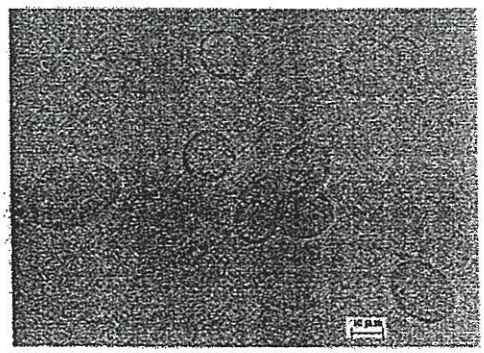
เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ยาวของ อะไมโลเพคติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่



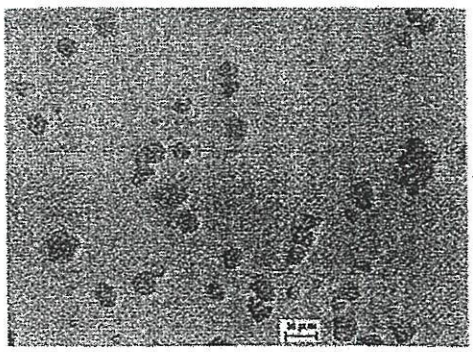
(ก) แป้งมันสำปะหลัง



(ข) แป้งข้าวโพด

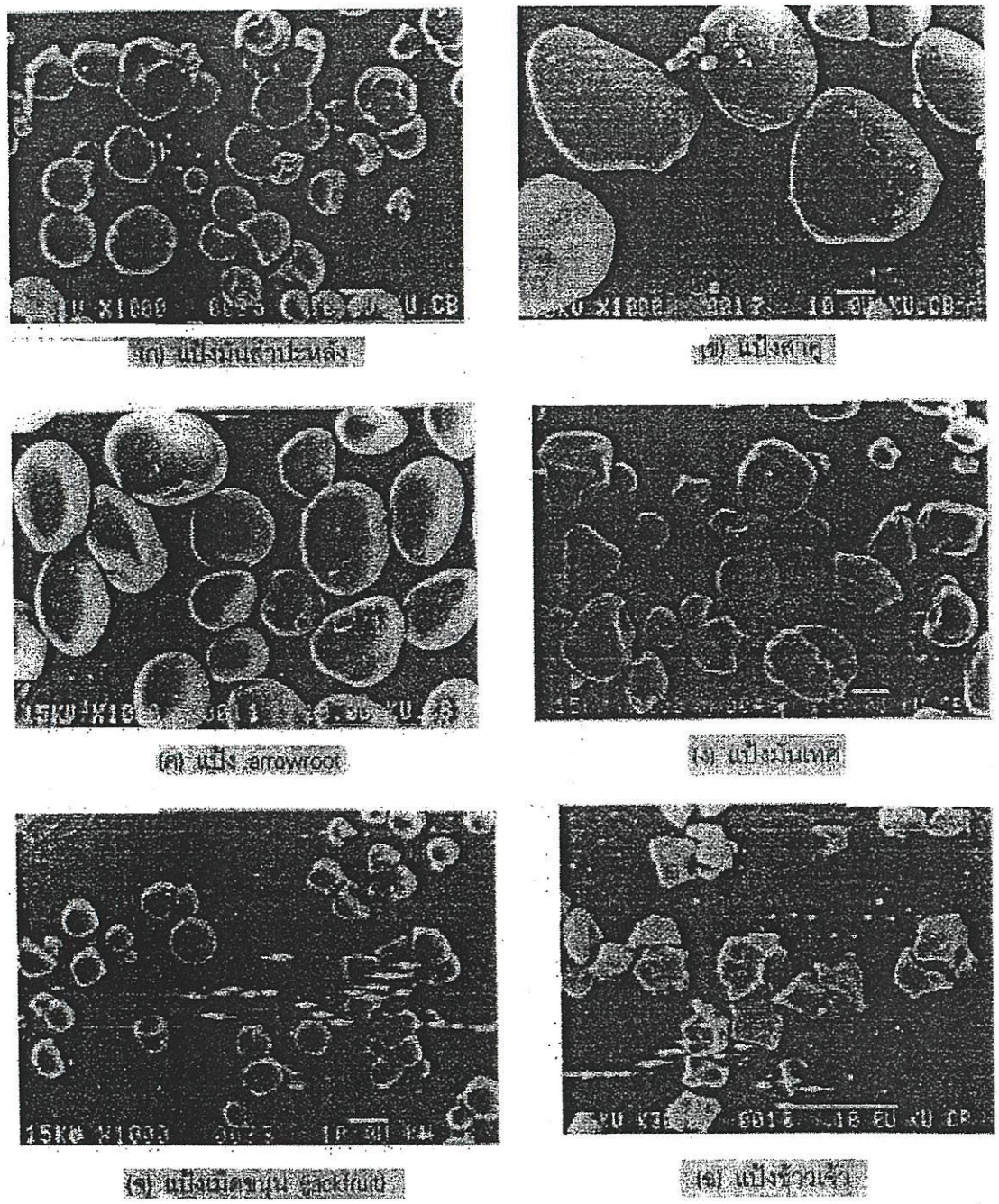


(ค) แป้งมันฝรั่ง



(ง) แป้งข้าวเจ้า

รูปที่ 2.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา ที่กำลังขยาย 40 เท่า [4]



รูปที่ 2.11 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย (ก) - (จ) 1,000 เท่าและ (ฉ) 3,000 เท่า [4]

2.3.4 สมบัติของแป้ง [4]

2.3.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไปในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 – 17%

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ น้ำในผลึก น้ำในรูป Bound water และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8-10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิล ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคส แต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5.H_2O)]$

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซล (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนพบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้งหรืออาจจะมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติ แต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

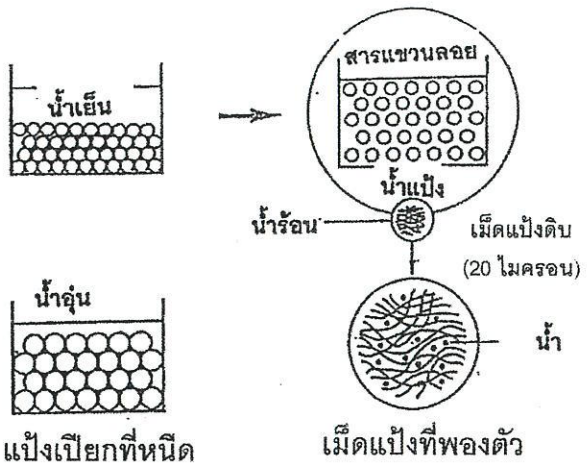
แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กัน หรือ Water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิด Birefringence จะหมดไปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้งและการดัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะเกิดการละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตร หรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

2.3.4.2 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไอโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายเม็ดแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายที่เกิดความหนืดเรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์” เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า“อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด”(Tasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Tasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยืดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ Birefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิจากสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็วร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผับกลับไม่ได้ เรียกว่า “การเกิดเจลาติไนเซชัน” เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง Birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมาซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อ ไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยาของแป้งได้ดีมากขึ้นรวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [4]

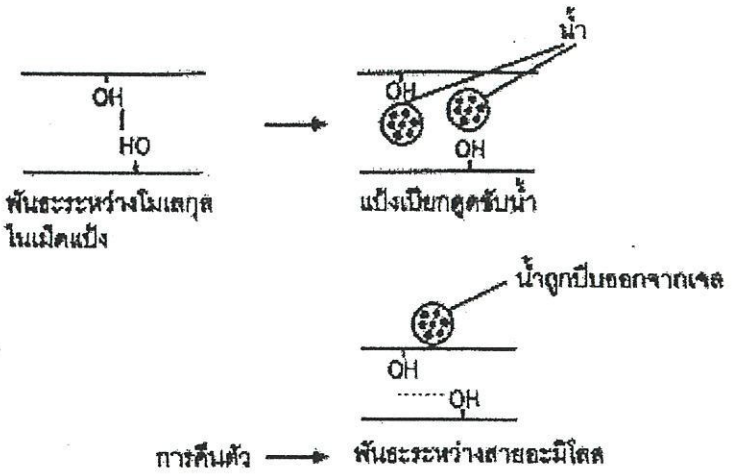
2.3.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็ก จะกระจัด กระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกมีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึกเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "รีโทรเกรเดชัน" (Retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ Setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า "Synersis" ปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น

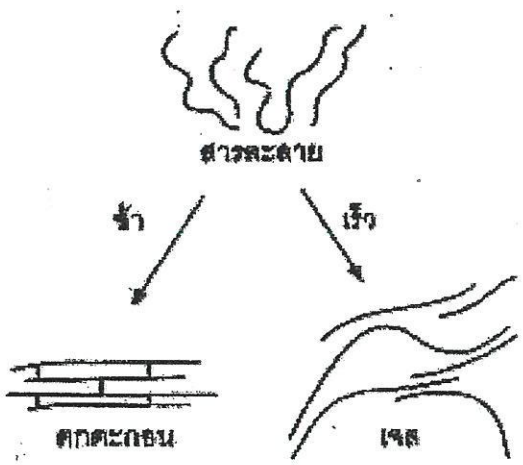
การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดชิ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำที่ถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆจะเกิดการตกตะกอนเมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้งความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด – เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมเลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือของ Monovalent anion และ Mation nitrate และ Urea

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลส สูงจะเกิดการคืนตัวมากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคืนตัวสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ Degree of polymerization ของอะไมโลสเท่ากับ 100 – 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้างโพดข้าวเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังเนื่องมาจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะไมโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็น Amylase-lipid complex



รูปที่ 2.13 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [4]



รูปที่ 2.14 กลไกการคืนตัวของแป้ง [4]

การตรวจสอบความสามารถในการเกิด Retrogradation ของแป้งแต่ละชนิด อาจประมาณได้จากค่า Setback ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (Setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer นอกจากนี้การเกิด Retrogradation ของแป้งสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter โดยนำแป้งดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการกิดเจลาติไนเซชัน (เอนทาลปี, $\Delta H_{gelatinization}$) แล้วนำแป้งที่ผ่านเจลาติไนเซชันนี้ไปบ่มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อ ให้เกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เช่น -20, 4, 25 °C เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน แล้วนำแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วไป

ตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ($\Delta H_{gelatinization}$) % รีโทรเกรเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทาลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อ เอนทาลปีของแป้งเจลาติไนเซชัน คือ

$$\% \text{ Retrogradation} = \frac{\Delta H_{Gelatinization}}{\Delta H_{Gelatinization}} \times 100$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล (Syneresis) ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติ Freeze-thaw stability ของแป้ง โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีจะมีค่า Freeze-thaw stability ต่ำ ในขณะที่แป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่ำจะมีค่า Freeze-thaw stability สูง ดังนั้นการวัด Freeze-thaw stability จึงสามารถใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้

2.3.5 แป้งข้าวเจ้า [4]

ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice , Non-waxy rice) มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีหลายพันธุ์ ข้าวที่ใช้ในการผลิตจะเป็นข้าวหักหรือข้าวที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคเป็นเมล็ดข้าวสารที่ประกอบ ด้วย แป้งชนิดธรรมดา (Starch endosperm) 90 % ซึ่งแป้งนี้มีส่วนประกอบใหญ่อยู่ 2 ส่วน ด้วยกันคือ อะไมโลเพคทิน (ซึ่งเป็น Polymer ของ D-glucose ที่ต่อกันแบบ Linear chain) ประมาณ 10-30 % จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ปริมาณอะไมโลสในข้าวเจ้าที่ทำให้สุกแล้วมีลักษณะแข็งกระด้างต่างกันไป เรียกว่า มีคุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality) ต่างกัน แป้งข้าวเจ้ามีใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็กเนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคืองและใช้เป็นสารทำให้แข็งในการซักรีด

ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถึงจะเป็นการโม่เปียก แต่โปรตีนและสิ่งแปลกปลอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นประเภทฟลาว์ (Rice flour) และนิยมใช้ข้าวที่มี อะไมโลสสูงๆ ข้าวหอมมะลิที่บริโภคไม่เหมาสมใช้ผลิตฟลาว์ เพราะมีปริมาณอะไมโลสต่ำ ส่วนการผลิตแป้งสตาร์ช (Rice starch) คือ การสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมในแป้งฟลาว์ออกจนเกือบหมด

การทำแป้งข้าวเจ้าแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. วิธีโม่เปียกหรือโม่น้ำ

   แช่ข้าวสารเจ้าในน้ำจนข้าวอ่อนตัว แล้วโม่ด้วยเครื่องโม่ไฟฟ้า ต่อจากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกเอาน้ำออก แล้วอบในเครื่องอบจนเหลือความชื้นประมาณ ร้อยละ 10 -13 จึงบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป

2. วิธีโม่แห้ง

   โม่ข้าวสารที่ผ่านการแยกเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกจนหมด ด้วยเครื่องโม่ไฟฟ้า ซึ่งมีตะแกรงละเอียดกั้นเอาไว้ แป้งที่บดละเอียดเล็กกว่ารูตะแกรงแล้วจะผ่านตะแกรงออกมาได้ แป้งที่มีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงจะถูกบดหรือโม่ซ้ำอีกจนละเอียดผ่านรูตะแกรงได้ นำแป้งที่บดจนได้ขนาดแล้วไปอบจนเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 10-13 แล้วจึงบรรจุถุงจำหน่อยต่อไป

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแป้งข้าวเจ้า [4]

สมบัติ	แป้งข้าวเจ้า
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	6-8
ปริมาณอะไมโลส (%)	18-27
ขนาดอะไมโลส (Degree of polymerization)	900-1,100
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลาทิไนซ์ (Onset temperature , T_o , °C)	60
อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดเจลาทิไนซ์ (Peak temperature , T_p , °C)	77

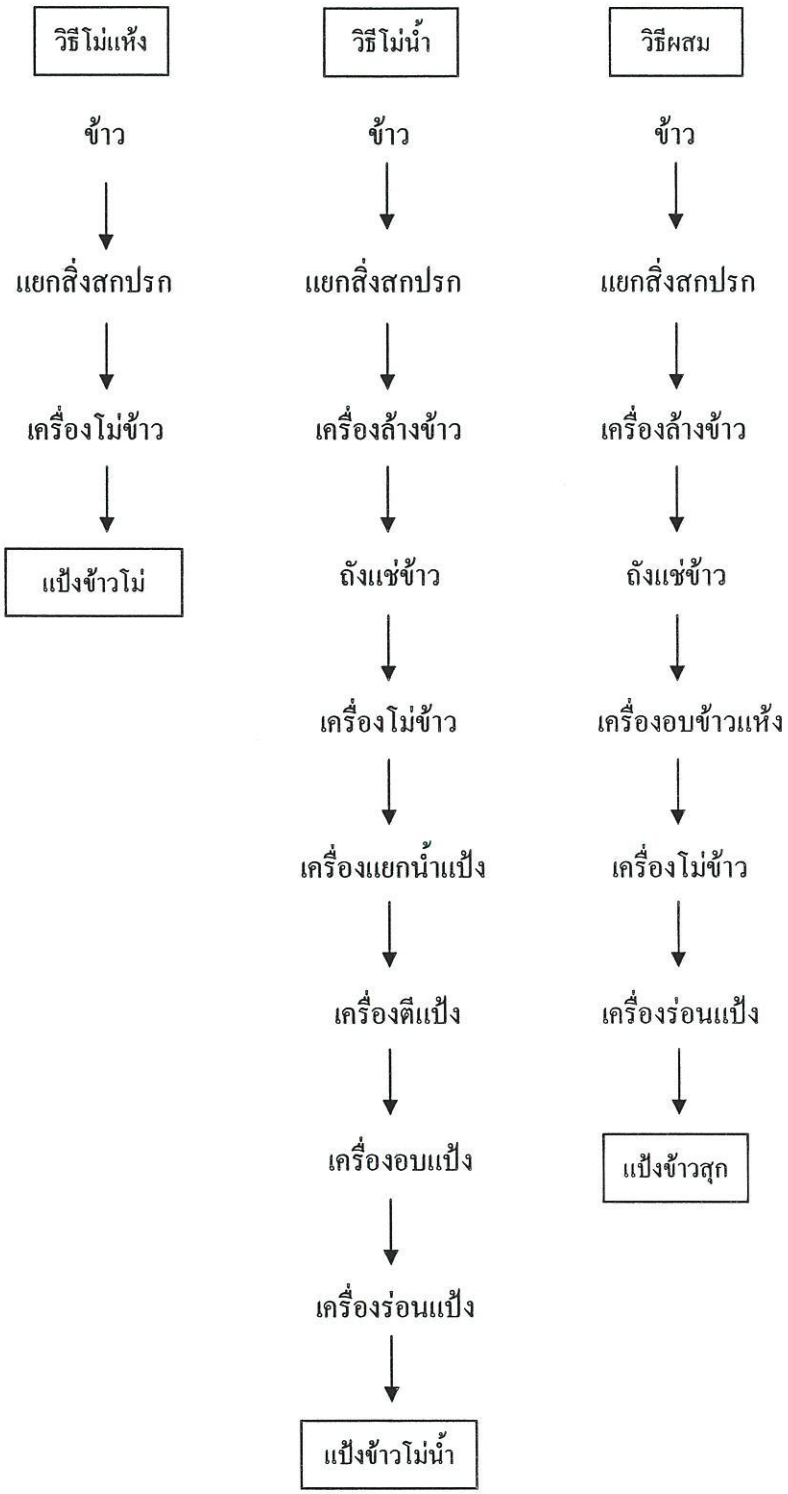
2.3.6 แป้งข้าวเหนียว [6]

ข้าวเหนียว (Glutinous rice หรือ Waxy rice หรือ Sweet rice) เป็นอาหารหลักของคนไทยในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีพื้นที่ปลูกข้าวเหนียวประมาณ 18 ล้านไร่ ได้ผลผลิตข้าวเปลือก ข้าวเปลือกเหนียวประมาณ 5.5 ล้านตัน พันธุ์ที่ปลูกข้าวเหนียวเมล็ดยาว และข้าวเหนียวเมล็ดสั้น หรือ กข.6 แป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสต่ำ 0.8 – 1.3 % อยู่ตรงกลางของเม็ดแป้ง มีอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งให้สีแดงหรือสีน้ำตาลเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ข้าวเหนียวมีปริมาณน้ำตาลอิสระสูงโดย เฉพาะมอลโตโอลิโกแซกคาไรด์ (มอลโตเดกส์ตริน) จึงทำให้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Sweet rice ปกติผู้บริโภคควรจะนำมาแช่น้ำก่อนนึ่งเพื่อบริโภค ข้าวเหนียวที่สุก

แล้วมีอัตราการเสียสภาพ (Rate of retrogradation) ช้า เมื่อเทียบกับข้าวเจ้าสุก แป้งข้าวเหนียวมีความสามารถทนต่อสภาพการแช่แข็งและการละลายหลังการแช่แข็งได้ดี เหมาะในการเป็นตัวประสานในผลิตภัณฑ์น้ำเกรวี่ ซอสปรุงรส และใส่ขนมต่างๆ ข้าวเหนียวสามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์ได้มากมายหลายชนิด เช่น ขนมไทยต่างๆ ขนม ขบเคี้ยวแบบไทย ผลิตภัณฑ์หมักดอง เป็นต้น ข้าวตอกเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวเหนียวชนิดหนึ่งซึ่งมีกรรมวิธีการแปรรูปที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์อื่นๆ กล่าวคือ ข้าวตอกได้จากการพองตัวที่เกิดจากการอบเปลือกข้าวเหนียวแล้วนำไปแปรรูปเป็นขนมขบเคี้ยว เช่น ข้าวกระยาสารทหรือคุกกี้ หากได้มีการพัฒนากระบวนการและวิธีการให้สามารถผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรมจะทำให้ข้าวมีมูลค่าเพิ่มขึ้น

2.3.7 แป้งข้าว [7]

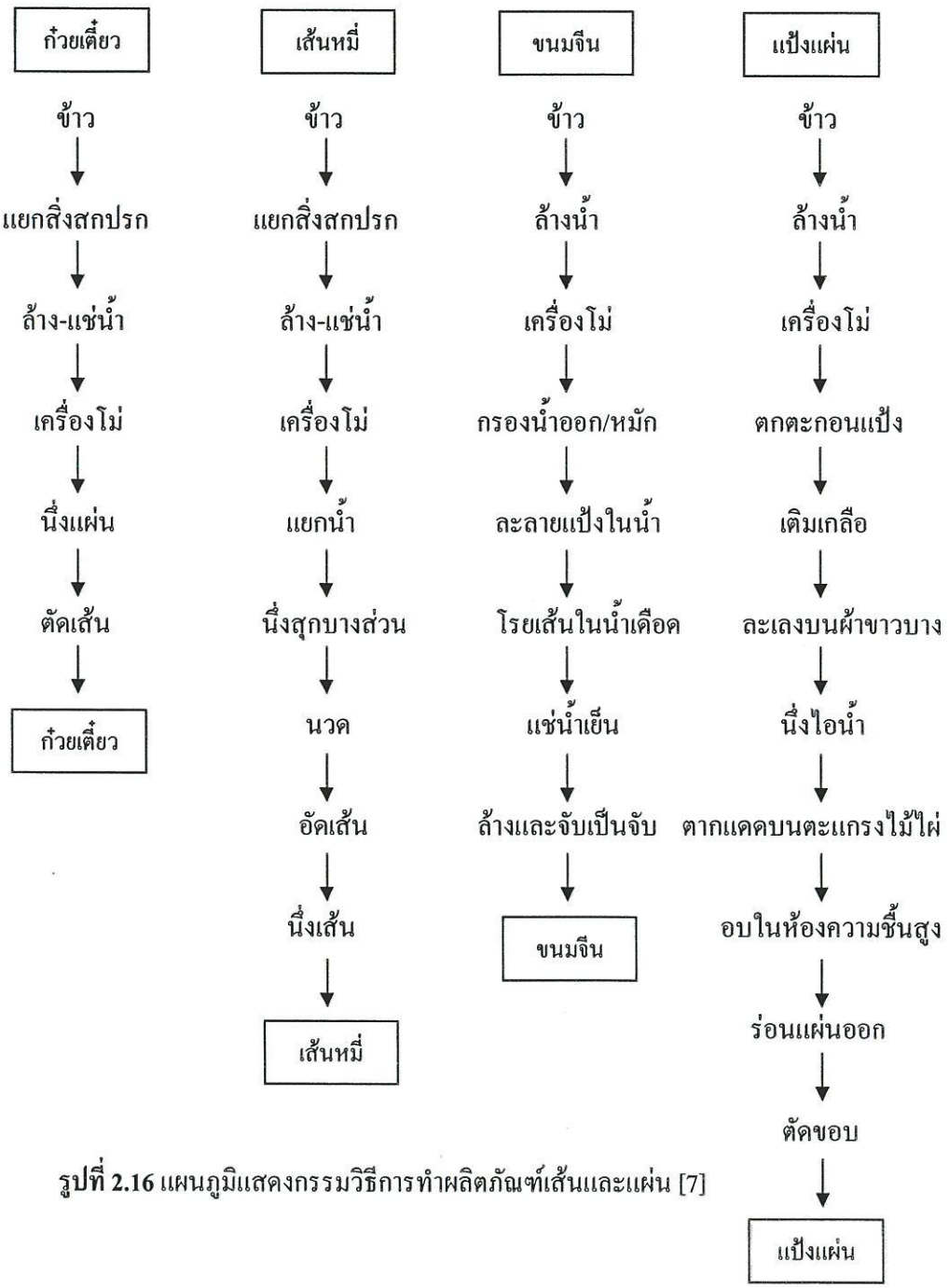
มีทั้งชนิดแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ ข้าวหักหรือปลายข้าวกรรมวิธีการผลิตมี 3 วิธี วิธีโม่แห้ง วิธีโม่น้ำและวิธีผสม ซึ่งมีขบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.15 แป้งที่ได้จากการโม่แห้งจะมีคุณภาพต่ำเพราะเม็ดแป้งค่อนข้างหยาบและมีสิ่งเจือปนสูง อายุการเก็บรักษาสั้น เพราะเกิดกลิ่นหืนและและถูกทำลายจากแมลงได้ง่าย สำหรับวิธีการโม่น้ำเป็นวิธีการผลิตแป้งข้าวในปัจจุบัน แป้งมีคุณภาพที่มีความละเอียดและสิ่งเจือปนน้อย เทคโนโลยีการผลิตแป้งโดยวิธีการโม่น้ำได้รับการพัฒนามาช้านาน ซึ่งพันธุ์ข้าวไทยดั้งเดิมส่วนใหญ่มีอะไมโลสสูง ดังนั้น การผลิตแป้งในปัจจุบันยังคงมุ่งเน้นแป้งข้าวเจ้าชนิดอะไมโลสสูง การผลิตแป้งข้าววิธีการผสมเป็นการโม่แป้งจากข้าวที่แช่น้ำและอบแห้งด้วยความร้อนก่อนโม่เป็นแป้ง แป้งชนิดนี้เป็นแป้งคุณภาพสูงและนำไปใช้ทำขนมเฉพาะอย่าง เช่น ขนมโก๋จากแป้งข้าวเหนียว ดังแผนภูมิขบวนการผลิตดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภูมิแสดงกรรมวิธีผลิตแป้ง [7]

2.3.7.1 ผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่น

ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ ได้แก่ ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ และขนมจีน ปัจจุบันมีการใช้ข้าวสำหรับแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล่านี้เพื่อบริโภคภายในและส่งออก ประมาณ 300,000 ตันต่อปี ข้าวที่เหมาะสมเป็นข้าวที่มี อะไมโลสไม่ต่ำกว่า 27% และควรเป็นข้าวเก่า 3-4 เดือน นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบประภทเดียวกัน เช่น แป้งแผ่นหรือใบเมี่ยง เทคโนโลยีในการผลิตอาหารเหล่านี้มีหลักการใกล้เคียงกัน แต่มีความละเอียดอ่อนบางส่วนแตกต่างกันไป แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงกรรมวิธีการทำผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่น [7]

2.3.7.2การนำแป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

1) ขนมปัง

แป้งข้าวเจ้าผสมแป้งข้าวเหนียวในอัตราส่วน 1:1 สามารถทดแทนแป้งสาลีได้ 10-30% ในผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนด์วิชโดยเติมสารปรับปรุงคุณภาพ คือ โปรตีนกลูเตน 12%, Disilled monoglyceride (MGL) 0.3%, Diacetly tartrate ester of monoglyceride (DATEM) 0.3%, Sodium steary lactylate (SSL)0.3%, เอนไซม์ แอลฟาอะไมเลส 0.005%

Rice Product (ผลิตภัณฑ์จากข้าวล้วน)

การผลิตขนมปังแป้งข้าวล้วนควรใช้แป้งชนิดอะไมโลสต่ำที่ได้จากการโม่แห้งให้มีความละเอียด 120-140 เมช และปรับปรุงคุณภาพของแป้งโดยเติม Hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) 2.5-3.0% และควรผลิตเฉพาะขนมปังก้อนเล็ก

2) ผลิตภัณฑ์เส้น

แป้งข้าวชนิดอะไมโลสสูงและปานกลางสามารถทดแทนแป้งสาลีในการผลิตมะหมี่และมี่สั๋ว ได้ 35-40% โดยเติมแป้งมันสัมปะหลังดัดแปรชนิด High crosslinked หรือ Low crosslinked 5-10% หรือแป้งพรีเจลลาติไนซ์จาก extrusion 10% เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแป้ง

3) ผลิตภัณฑ์ปาท่องโก๋

แป้งข้าวสามารถทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ปาท่องโก๋ได้ 40% ทั้งนี้ระยะเวลาการหมักให้แป้งขึ้นฟูไม่ควรเกิน 4 ชั่วโมง

4) ขนมคุกกี้

แป้งข้าวอะไมโลสปานกลางและสูงชนิดโม่น้ำสามารถผลิตขนมคุกกี้ได้ ทั้งควรเติมแป้งพรีเจลลาติไนซ์ชนิดโม่จากข้าวสุกอบแป้ง 20% เพื่อยืดอายุความกรอบของขนมให้นานขึ้น

5) ขนมเค้ก

แป้งข้าวที่เหมาะสมสำหรับทำเค้กแทนแป้งสาลี 100% ควรเป็นแป้งอะไมโลสต่ำที่ได้จากการ โม่แป้ง ทั้งนี้ควรเติม SP ซึ่งเป็น Emulsifier เพื่อช่วยการฟื้นฟูแป้งชนิดโม่น้ำสามารถทดแทนแป้งสาลีได้ 80%

แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) [4]

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคทินมีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิการหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือ ถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 265 °C) แป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) หมายถึง วัตถุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็น เทอร์โมพลาสติกได้ โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและ อะไมโลเพคตินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch, TPS)

2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) [8]

พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

2.4.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticzation and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้ โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์โดยพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูด ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ระหว่าง พลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า "พลาสติไซเซชันภายนอก" (External plasticization) และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า "พลาสติไซเซอร์ภายนอก" (External plasticizer) ซึ่งพลาสติไซเซอร์ ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติไซเซชันภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อย หรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง – 50 °C ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer) และ พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) โดยพลาสติไซเซอร์แท้จริง สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆได้และไม่เยิ้มออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของ พลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ และคณะ [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็น พลาสติไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 โดยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดลอง พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 มีค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด ส่วนสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า เส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มในการ ย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

นรศิษฎ์ จันทรกูล [9] เตรียมพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้ง ข้าวเหนียวดัดแปรและไม่ดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยแป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวเหนียวกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 35% โดยใช้โซเดียม ไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรคือ 50°C และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 30 นาที แล้วนำแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปร ไปผสมกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดแบบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 5 นาที โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งข้าวเหนียวเป็น 0 5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 80 90 และ 100% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50% แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ สำหรับที่ปริมาณแป้ง 0-50% เมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติด้านความทนการดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกลดลง ในขณะที่การดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณแป้งเท่ากัน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวไม่ดัดแปรมีสมบัติเชิงกลดีกว่า แต่มีการ

ดูดซึมความชื้นและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

วรวิทย์ โพชนิกร [11] พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene , HDPE) จากขวดน้ำดื่มมาทำการผสมกับสารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้ปริมาณแป้ง 10% 20% และ30% โดยการหลอมและนำไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ ผลการทดลองพบว่า ชนิดและปริมาณของแป้งมีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงดึง กล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมากขึ้นทำให้ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และเมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า หลังการฝังกลบพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่าง ๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และการเติมแป้งสาลีทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อม ตามลำดับ

กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ [13] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) จากแป้ง มันสำปะหลัง, แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ (15%, 20%, 25% และ30% โดยน้ำหนัก) และมีการเติมผงแกลบ 3% โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของ TPS ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดฉีดพบว่า TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล 15% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงมาที่สุด และการเติมผงแกลบขนาด 0.038 - 0.150 มิลลิเมตร ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก ทำให้ TPS มีความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทกสูงขึ้น

สุคนธ์ชื่น ศรีงาม [14] ทดลองเปรียบเทียบการย่อยสตาร์ชของแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสชนิดทนความร้อน (Termamyl, NovoIndustri) ที่สภาวะความเข้มข้นของสตาร์ช 35 % เอนไซม์ 0.1 % และอุณหภูมิในการย่อย 75, 80, 85, 90 °C เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 75 °C แป้งมันสำปะหลังให้สตาร์ชเหลวสูงสุดและแป้งข้าวเจ้าให้สตาร์ชเหลวต่ำสุดที่อุณหภูมิสูงขึ้น แป้งทั้ง 4 ชนิดให้สตาร์ชเหลวสูงขึ้นแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวให้สตาร์ชเหลวสูงสุด 90 % แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังให้สตาร์ชเหลวสูงสุด 98 % ที่อุณหภูมิการย่อย 75 °C แป้งข้าวเหนียวถูกย่อยได้ดีที่สุดได้สารรีดิวซ์สูงกว่าแป้งอื่นๆ รองลงมา คือ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า เมื่อ

อุณหภูมิสูงขึ้นการย่อยเกิดได้มากขึ้น ผลการย่อยที่ 85 และ 90 °C ใกล้เคียงกัน และแป้งมันสำปะหลังให้สารรีดิวซ์สูงกว่าแป้งข้าวเหนียวที่เวลาการย่อย 120 นาที ค่า Dextrose equivalent (DE) จากการย่อยแป้งทั้ง 4 ชนิดอยู่ในช่วง 19-49 ขึ้นกับชนิดของแป้งอุณหภูมิและเวลาในการย่อย ลักษณะการย่อยของเอนไซม์ต่อสตาร์ชทั้ง 4 ชนิดแตกต่างกัน เอนไซม์ย่อยสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียวเป็นโมเลกุลขนาด DP1-DP7 ได้เร็วกว่าสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ช มัน สำปะหลัง ทำให้ได้ปริมาณแซ็กคาไรด์โมเลกุลเล็กแตกต่างกัน แซ็กคาไรด์ที่มีมากสุดในทุกตัวอย่าง คือ DP2 และ DP3 มีในปริมาณปานกลางคือ DP4, DP5 และ DP6 และมีในปริมาณน้อยคือ DP1 และ DP7 ยกเว้นจากสตาร์ชข้าวเหนียวมี DP1 ปานกลาง

X.Ma และคณะ [15] การศึกษาสมบัติของเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติบนสารประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยมีแป้งเป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกผสมรวมกับ Glycerol, Urea, Formamide เป็นพลาสติกไซเซอร์และเส้นใยผ้าสักหลาดเป็นเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติ โดยใช้ปริมาณเส้นใยแตกต่างกันออกไป ของผสมถูกเตรียมจากแป้งข้าวโพด ปริมาณเส้นใยผ้าสักหลาด 5%, 10%, 15%, 20% จะได้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ : แป้ง = 30:100 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิคการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบสมบัติเชิงกล การดูดซับน้ำ และเสถียรภาพทางความร้อน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณเส้นใย 15-20% เห็นส่วนของเม็ดแป้งได้ชัดเจนกว่าและจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ค่า Tensile Strength, Young's modulus สูงขึ้นแต่ Elongation และ Energy break ต่ำลง และมีการดูดซับน้ำได้จำกัด นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปริมาณมากมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า

A.L. ROz และคณะ [16] ได้ศึกษาผลของ Glycerol, Sorbital , Glycols และ monohydroxyl alcohol และปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและการดูดซับน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ทำจากแป้งข้าวโพด โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปเหลวโดยทำการผสมแป้งเข้ากับ พลาสติไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ด้วยเครื่องผสมที่มีลูกกลิ้งหมุนด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นทำให้เป็นแผ่นหนา 1 และ 2 มิลลิเมตร นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา ความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และการดูดซับน้ำ จากการศึกษาพบว่า ชนิดและปริมาณพลาสติไซเซอร์ไม่มีผลกระทบมากนักต่อความเป็นผลึกของชิ้นงานได้ แต่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานใน 2 ทิศทาง

ที่ตรงข้ามกัน คือ ชิ้นงานที่ได้มีความอ่อนนิ่มเนื่องจาก มีการหล่อลื่นในส่วนที่เป็นอสัณฐาน และชิ้นงานมีความแข็งในส่วนที่ไม่มีการหล่อลื่น

X.Ma และคณะ [17] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ของ Pea starch ที่ไม่มีการใส่สารตัวเติมและที่ใส่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และไฮโดรคริเตอไลน์เซลลูโลส (MC) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์แล้วทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีดและกระบวนการกดอัด นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า Pea starch มีการยึดเกาะกับ CMC และ MCได้ดี แต่ถ้าปริมาณของ CMC และ MC มีมากเกินไปทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนกลมของ CMC และ MC ใน TPS TPS/MC และ TPS/CMC ทำให้ค่ามอดุลัสสะสม (Storange modulus) อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) สูงขึ้นเมื่อมีการเปรียบเทียบกับ TPS ที่ไม่มีสารตัวเติม นอกจากนี้ยังพบว่า TPS/MC มีอุณหภูมิ การสลายตัว (T_d) ที่ 323°C ซึ่งมากกว่า TPS/MC ที่มี T_d อยู่ที่ 298°C ทำให้ TPS/MC มีเสถียรภาพทาง ความร้อนที่สูงกว่า แต่มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง ถ้าเพิ่มปริมาณ CMC หรือ MC พบว่าการ ซึมผ่านของน้ำมีค่าน้อยที่สุดที่ 9% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ 3.41, 2.55 ($\times 10^{-9} gm^{-1}s^{-1}Pa^{-1}$) ตามลำดับ

H.G. Xiong และคณะ [18] ฟิล์มผสมของแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแต่ไม่นิยมใช้แพร่หลายเพราะมีความต้านทานน้ำต่ำและมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี งานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงสมบัติฟิล์มผสมของแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการเติมนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งทำให้แป้งข้าวโพดสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ฟิล์มที่ได้จึงมีสมบัติเชิงกลและมีความต้านทานน้ำดีขึ้น ในการทดลองนี้เตรียมฟิล์มขึ้นโดยวิธีเคลือบบนแผ่นกระจก โดยทำการเตรียมฟิล์มขึ้น 2 แบบ แบบแรกผสมแป้งกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (SP film) แบบที่สองผสมแป้ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (NSP film) จากนั้นวิเคราะห์ทางโครงสร้างของฟิล์มและนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการย่อยสลาย จากการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง SP film และ NSP film เห็นได้ว่า NSP film มีความเป็นผลึกลดลง แต่ความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดและเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของ NSP film มีค่าเพิ่มขึ้นและ NSP film มีการดูดซับน้ำลดลง แสดงให้เห็นว่าการเติมนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ลงไปทำให้ความต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกล

ของฟิล์มผสมของแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดีขึ้น ซึ่งทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

A.A.S. Curvelo และคณะ [19] ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ทำจากแป้งข้าวโพด โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยฟอกขาวจากเยื่อของต้น ยูคาลิปตัส เตรียมวัสดุประกอบโดยทำการผสมแป้งข้าวโพด กลีเซอรอล และเส้นใยเซลลูโลสชนิดสั้น (16% โดยน้ำหนัก) จากเยื่อฟอกขาว ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปร้อนให้เป็นแผ่นหนา 2-3 มิลลิเมตร นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และการดูดซับน้ำ พบว่า วัสดุประกอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น 100% และมีค่ามอดุลัสสูงขึ้นกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเสริมแรง การทดสอบทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเส้นใยและเมทริกซ์ของแป้งมีการยึดเกาะกันที่ดี

M. Thuwall และคณะ [20] ได้ศึกษากระบวนการอัดรีดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันฝรั่งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบอยู่มาก โดยทำการผสมแป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มาก (Native- high amylase potato starch) กับแป้งมันฝรั่งธรรมดาในอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 100:45 และ 100:30 ด้วยเครื่องอัดรีด โดยมีการควบคุมปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เมื่อทำการผสมแล้วนำมาอัดรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ (Barbender) ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้นของชิ้นงาน ความหนืดคาพิลลารีของพอลิเมอร์หลอมเหลว สมบัติเชิงกล และความเป็นผลึกของชิ้นงาน พบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งธรรมดาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจาก 27% ไปจนถึง 30% โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มากมีค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลงกับค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งธรรมดา ที่มีปริมาณน้ำอยู่ 28% ปกติแล้วแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มาก ทำการอัดรีดได้ยากกว่าแป้งธรรมดา ปัญหาหลักในการอัดรีดแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มาก คือ ความไม่เสถียรของการไหล เมื่อหลอมไม่มากพอแป้งมักติดอยู่ภายในหัวดาย ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มปริมาณน้ำและเพิ่มแรงกดอัดและพิ่มความเร็วรอบของสกรู อย่างไรก็ตาม พบว่าเพียงอัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 100:45 เท่านั้นที่ให้ผลการอัดรีดที่สามารถยอมรับได้ ชิ้นงานแผ่นที่ได้จากการอัดรีดแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มาก มีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้

ชิ้นงานขาดเท่ากับ 5 MPa ที่อุณหภูมิห้องและมีความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในขณะที่แป้งธรรมดามีค่า 3 MPa และแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่มากมีค่าการดึงยืด ณ จุดขาดที่มากกว่า

R. Shi และคณะ [21] ได้ศึกษาถึงการยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำจากแป้งข้าวโพดที่มีน้ำอยู่ 12% โดยน้ำหนัก โดยการหลอมของผสมเข้ากับกลีเซอรอลในปริมาณแตกต่างกันที่ 30, 40, 50, และ60% โดยน้ำหนักภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 50±5% เมื่อทำการทดสอบในระยะเวลา 3 เดือน จากผลการทดสอบ XRD พบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นช่วยทำให้โครงสร้างแบบเกลียวเดียว (Single helix structure) เกิดได้มากขึ้นด้วย แต่จำกัดการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (Double helix structure) และผลการทดสอบทางความร้อน DMTA พบว่า อุณหภูมิที่ตั้งค่าเหนือสภาวะทรานซิชัน (Onset temperature of upper transition) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลไม่มากนัก และสมบัติเชิงกลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก ผลจากการวัด FTIR ยังสามารถแสดงถึงความเร็วของการเคลื่อนที่ของพีค Hydroxyl group stretching ที่เกิดได้ช้าลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นและยังพบว่ามีการแยก วัฏภาคมากขึ้นเรื่อยๆ ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้ยังมีการดูดซับของน้ำ ที่พบว่ามีปริมาณน้ำมากขึ้นพร้อมๆ กับปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในปริมาณมากช่วยยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งข้าวเจ้าตราใบหยก ชนิดโม่น้ำดีพิเศษ จากบริษัท บางกอกอินเตอร์ฟูด จำกัด องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า แสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า

รายละเอียด	ผลการวิเคราะห์
ความชื้น	11.50-13.00%
ความแห้ง	86.90-88.05%
ไขมัน	0.25%
เถ้า	0.23%
โปรตีน	6.50-7.00%
ขนาด	ไม่เกิน 160 ไมครอน
ความเป็นกรด - ด่าง	6.0-7.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. แป้งข้าวเหนียวตราใบหยก ชนิดโม่น้ำดีพิเศษ จากบริษัท บางกอกอินเตอร์ฟูด จำกัด องค์ประกอบของแป้งข้าวเหนียวแสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของแป้งข้าวเหนียว

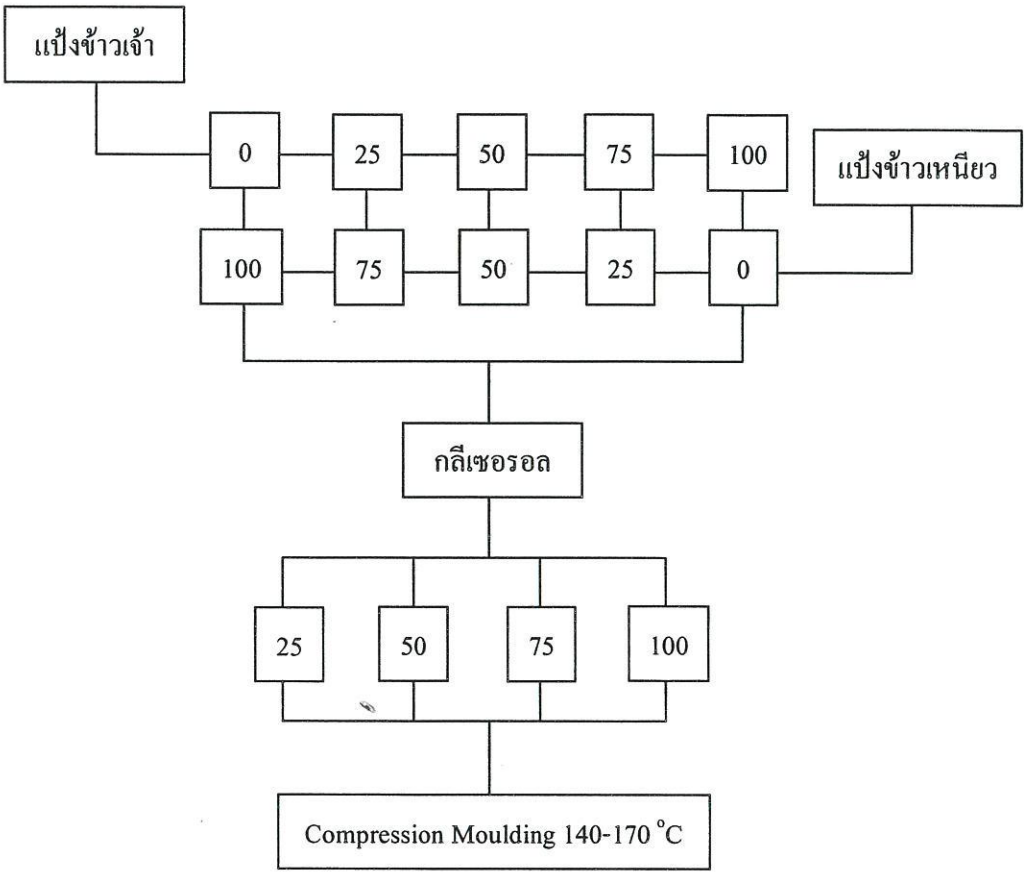
รายละเอียด	ผลการวิเคราะห์
ความชื้น	11.00 - 13.00%
ความแห้ง	86 - 87%
ไขมัน	0.20%
เถ้า	0.20%
โปรตีน	6.50-7.00%
คาร์โบไฮเดรต	77.65 – 80%
ขนาด	ไม่เกิน 158 ไมครอน
ความเป็นกรด - ด่าง	6.0-7.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

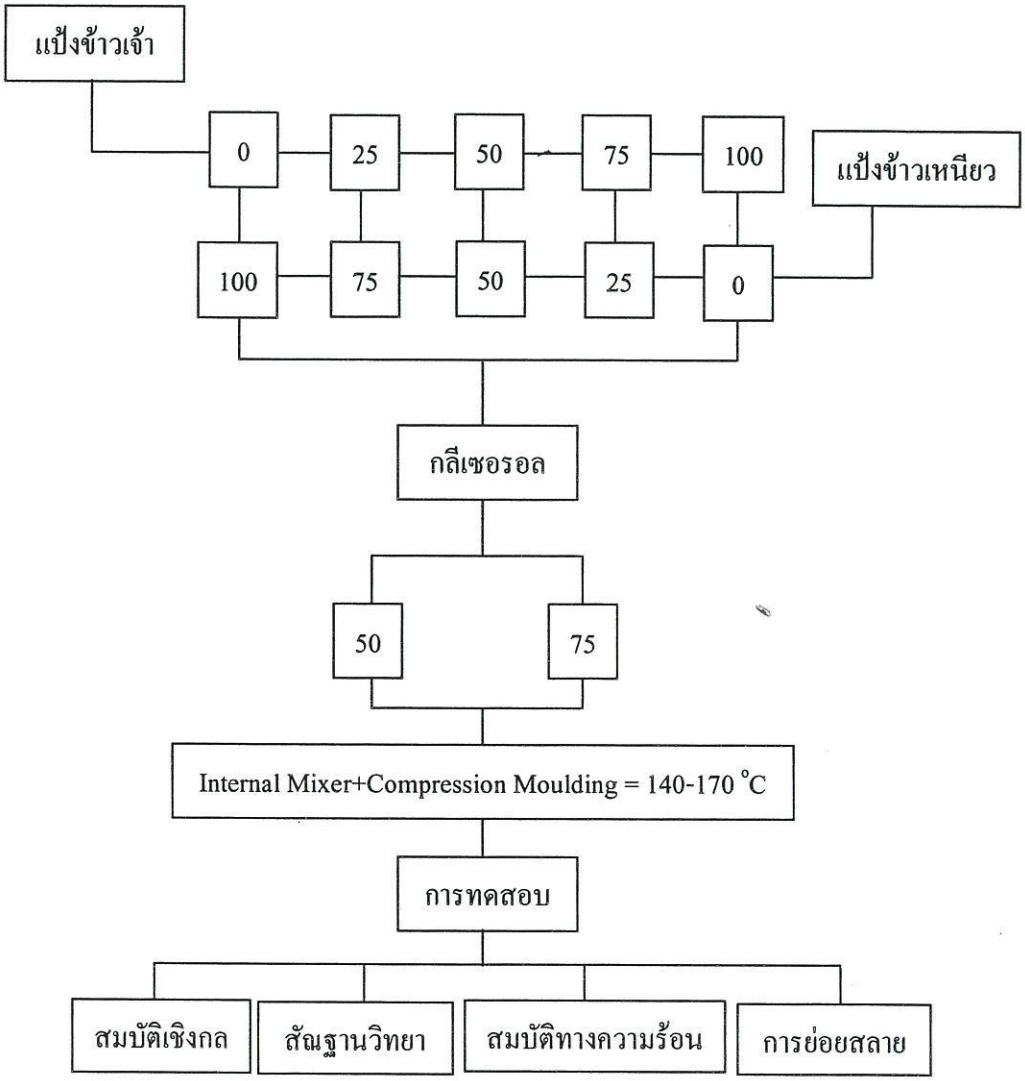
3. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system
4. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding)
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
4. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore A)
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
6. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
7. เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์
8. แผ่นใส PVC



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 1



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 2

3.3 การทดลอง

แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่1 การหาสภาวะที่เหมาะสม ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว

3.3.1.1 ทำการชั่งน้ำหนักแป้งและกลีเซอรอลตามอัตราส่วนต่างๆ ที่กำหนดลงในภาชนะ

3.3.1.2 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะปิด ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง

3.3.1.3 นำของผสมที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม

3.3.1.3.1 นำของผสมที่ได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170°C ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพที่ได้

3.3.1.3.2 นำของผสมที่ได้มาทำการอัดขึ้นรูปที่เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170°C สังเกตลักษณะทางกายภาพที่ได้

3.3.1.4 ทำการเลือกช่วงอุณหภูมิที่ได้ เพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว, แป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้งข้าวเจ้า (phr)	แป้งข้าวเหนียว (phr)	กลีเซอรอล (%wt)
100	0	25, 50, 75, 100
75	25	25, 50, 75, 100
50	50	25, 50, 75, 100
25	75	25, 50, 75, 100
0	100	25, 50, 75, 100

ตอนที่ 2 ทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว

3.3.2.1 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากสูตรข้างต้นไปผ่านการผสมในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170°C ที่ความเร็วรอบ 40รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.2.2 ทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป(Compression molding) โดยใช้ แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร

3.3.2.2.1 ทำความสะอาดแม่พิมพ์ ใช้แผ่นใส PVC รองแม่พิมพ์เพื่อป้องกันชิ้นงานติดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

3.3.2.2.2 ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงในแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูป ทำการขึ้นรูชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกับการผสมในเครื่องผสมระบบปิดคือที่อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170°C เป็นเวลา 5 นาทีและหล่อเย็นอีก 5 นาที และใช้ความดันในช่วง 1300 psi

3.3.2.3 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์เพื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's Modulus)	ASTM D 638	MPa
%การดึงยืด ณ จุดขาด (% elongation at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 638	Shore A

3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและ% การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 5 ชิ้นงานในของแต่ละสูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23°C และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm./min

Gauge length : 25 mm.

Load cell : 100 N

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสและ% การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงดึง (Tensile strengh) = F/A

มอดูลัส (Young's modulus) = $(F/A)/[(L-L_o)/L_o]$

%การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) = $(L-L_o)/L_o \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังจากทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)

L_o คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm.)

3.4.1.2 ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ด้วย Durometer ชนิด Shore A โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย $^1/_4$ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอหาค่าความแข็งกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกดอยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือความแข็งของวัสดุที่แข็งมาก ไม่ยุบตัว เช่น กระจก

3.4.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำไปเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยการศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) และ%การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% weight loss at onset degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermalgravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 °C และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 °C ต่อนาที

3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30×100 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-20% การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างอาจจะกระจายไปกับดินทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติสตาร์ชที่ลดลงเมื่อเวลาต่างๆ ภายในระยะเวลา 28 วัน

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ โดยทำการศึกษาอุณหภูมิและปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องผสมระบบปิด โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

4.1 สมบัติเชิงกล

4.1.1 การศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอล ที่มีต่อการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องผสมระบบปิด

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 140 150 160 และ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการใช้กลีเซอรอลในปริมาณต่าง ๆ

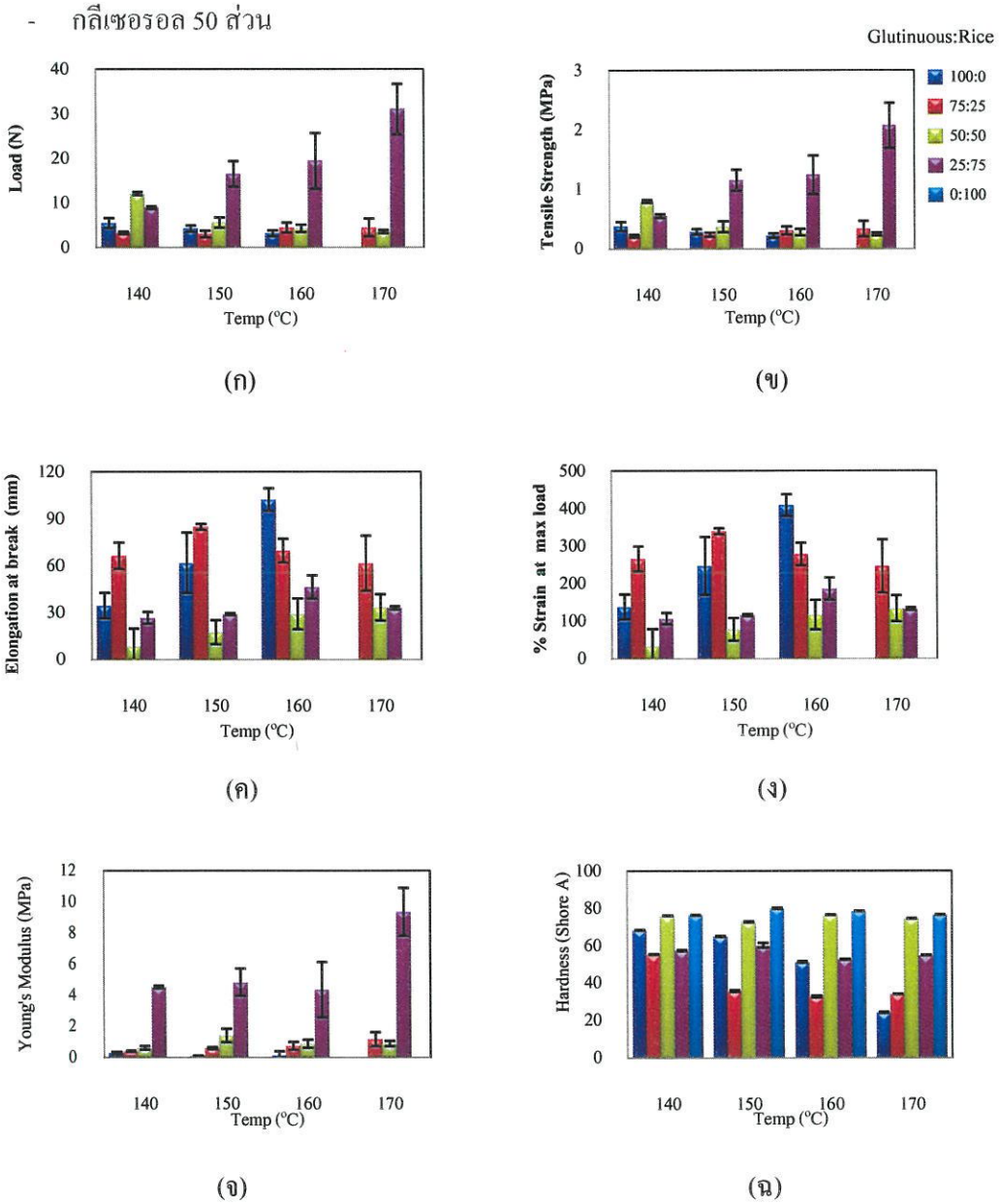
ปริมาณกลีเซอรอล (phr)	ลักษณะของชิ้นงาน
25	ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งเปราะ การผสมระหว่างแป้งทั้งสองชนิดไม่ดี
50	ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างมีแข็ง การผสมระหว่างแป้งทั้งสองชนิดค่อนข้างดี สามารถขึ้นรูปได้
75	ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างนิ่มเล็กน้อย แป้งทั้งสองชนิดผสมกันได้ดี สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้
100	ชิ้นงานที่ได้มีความนิ่มมาก ไม่สามารถขึ้นรูปได้เลย

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ปริมาณกลีเซอรอลที่ 50 และ 75 เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ได้ไม่เปราะเกินไปและไม่เหนียวจนเกินไป จึงเหมาะสมที่จะนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ การรับแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งกด ให้ผลการทดลองดังนี้

- กลีเซอรอล 50 ส่วน



(ก) (ข)

(ค) (ง)

(จ) (ฉ)

** สูตร 0:100:50 ทุกอุณหภูมิไม่สามารถตัดชิ้นงานได้

รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 140-170 °C

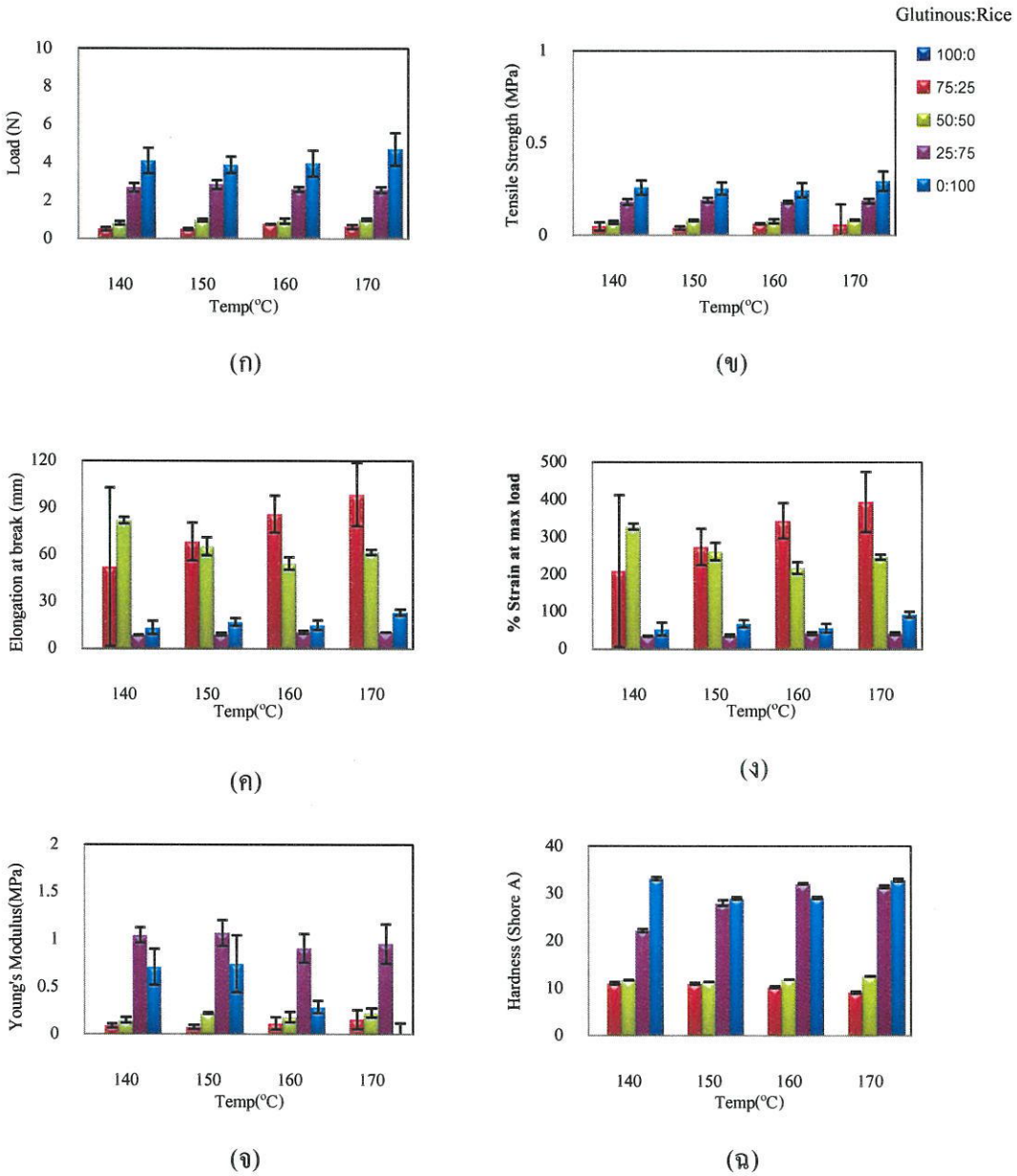
จากรูปที่ 4.1 (ก)-(ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การรับแรง ความแข็งแรงดึง การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งกด ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล ทำการผสมโดยผ่านเครื่องผสมระบบปิดความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแป้งข้าวเหนียวให้การรับแรงและค่าความแข็งแรงดึงลดลง และเมื่ออัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวลดลง ที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว: แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล ได้แก่ 75:25:50 50:50:50 และ 25:75:50 พบว่า การรับแรงและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลส สูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งร่วนถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงก็ยังคงความแข็งได้ดีกว่าแป้งข้าวเหนียวที่มีความเหนียวนุ่ม ดังนั้นเมื่อมีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นส่งผลให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงสูงขึ้นไปด้วย

การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิผสมเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากขึ้น ที่อัตราส่วน 100:0:50 50:50:50 และ 25:75:50 ที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณแป้งข้าวเหนียวส่งผลต่อสมบัติ เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีสมบัติที่เหนียว หนืด ที่อุณหภูมิผสมสูงปริมาณแป้งข้าวเหนียวมาก ๆ ทำให้รับแรงดึงได้น้อยเกิดการเสียสภาพได้ง่ายแต่ทำให้สมบัติของการดึงยืดดีขึ้นเพราะมีความเหนียวมากขึ้น

มอดุลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวลดลงที่อุณหภูมิผสมสูงขึ้น ทำให้มีความแข็งขึ้นเนื่องจากปริมาณแป้งข้าวเจ้าที่มากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความแข็งขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้นด้วย

ค่าความแข็งกดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นที่อุณหภูมิผสมสูงขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิผสมสูงขึ้นแป้งข้าวเหนียวมีความอ่อนตัวได้ดี ทำให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีความเหนียวยืดหยุ่น จึงทำให้ค่าความแข็งกดมีค่าลดลง

- กลีเซอรอล 75 ส่วน



** สูตร 100:0:75 ทุกอุณหภูมิไม่สามารถตัดชิ้นงานได้

รูปที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 140-170 °C

จากรูปที่ 4.2 (ก)-(ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งกด ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่ปริมาณ 75 ส่วน ทำการผสมโดยผ่านเครื่องผสมระบบปิดความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิผสมสูงขึ้นแป้งข้าวเหนียวทำให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงลดลง เมื่ออัตราส่วนที่แป้งข้าวเหนียวลดน้อยลง คือ 75:25:75 50:50:75 และ 25:75:75 พบว่าการรับแรงและความแข็งแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิผสมเพิ่มขึ้น

การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดอัตราส่วน 75:25:75 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วน 50:50:75 และ 25:75:75 มีค่าลดลง เนื่องจากอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเหนียวมากทำให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น เพราะแป้งข้าวเหนียวมันสมบัติที่เหนียวนุ่ม เมื่ออุณหภูมิผสมสูง จึงทำให้ดึงยืดได้มากกว่าอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้ามาก

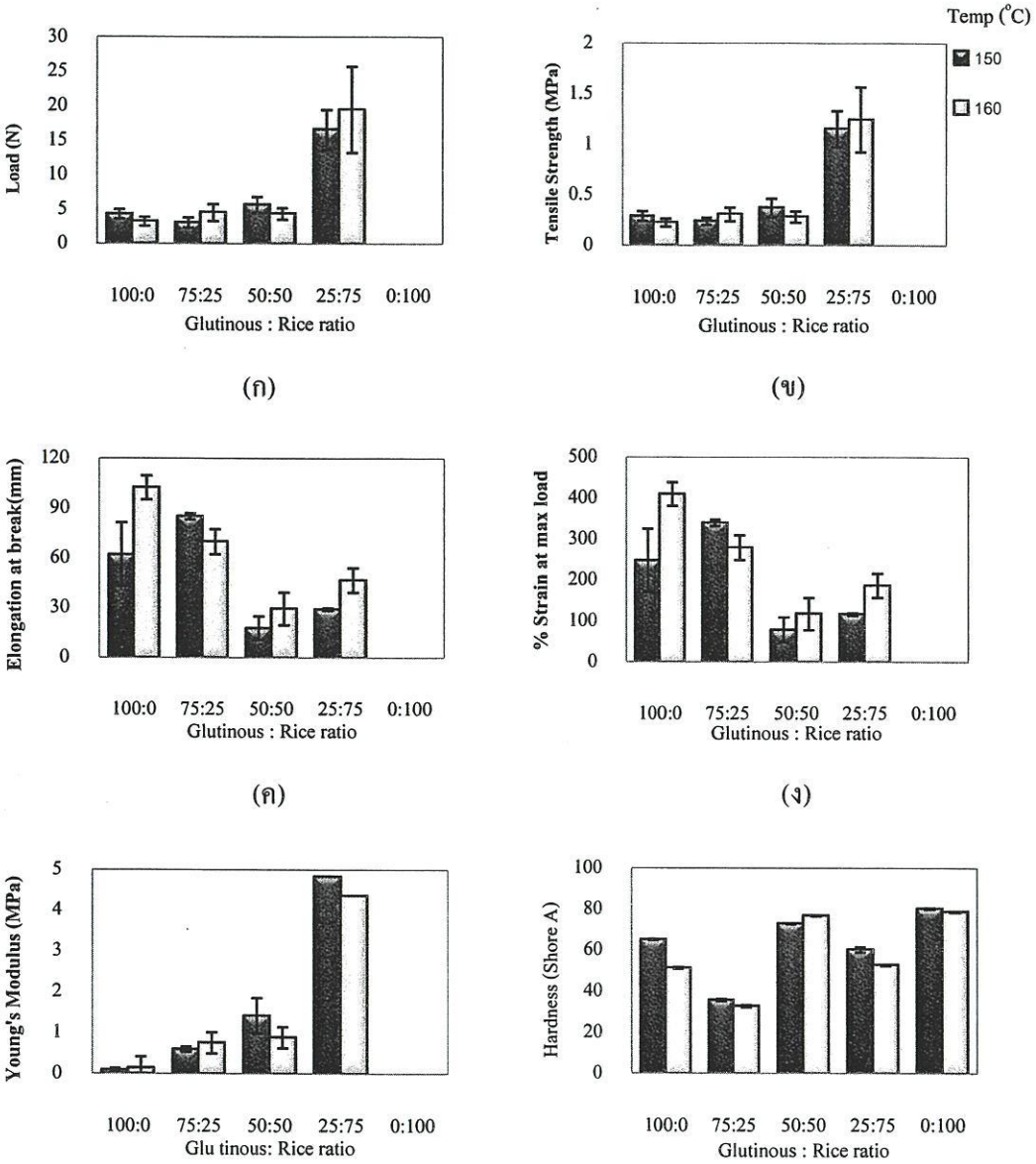
มอดุลัสที่อุณหภูมิผสมสูงขึ้น อัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นมีค่ามอดุลัสสูงขึ้น และที่อุณหภูมิผสมสูงขึ้นอัตราส่วน 0:100:75 มอดุลัสมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณแป้งข้าวเจ้าที่มากขึ้นช่วยทำให้ชิ้นงานมีความแข็งขึ้นเพราะแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติที่แข็งร่วน

ค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งข้าวเหนียวลดลง เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนที่นิ่มเมื่อส่วนที่นิ่มมีปริมาณน้อยลงชิ้นงานจึงมีความแข็งมากขึ้น ทำให้มีค่าความแข็งกดสูงขึ้น

4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของแป้งผสมและปริมาณกลีเซอรอล ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ แป้งผสม

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

- กลีเซอรอล 50 ส่วน



** สูตร 0:100:50 ทุกอุณหภูมิ ตัดงานไม่ได้ กรอบ แตก

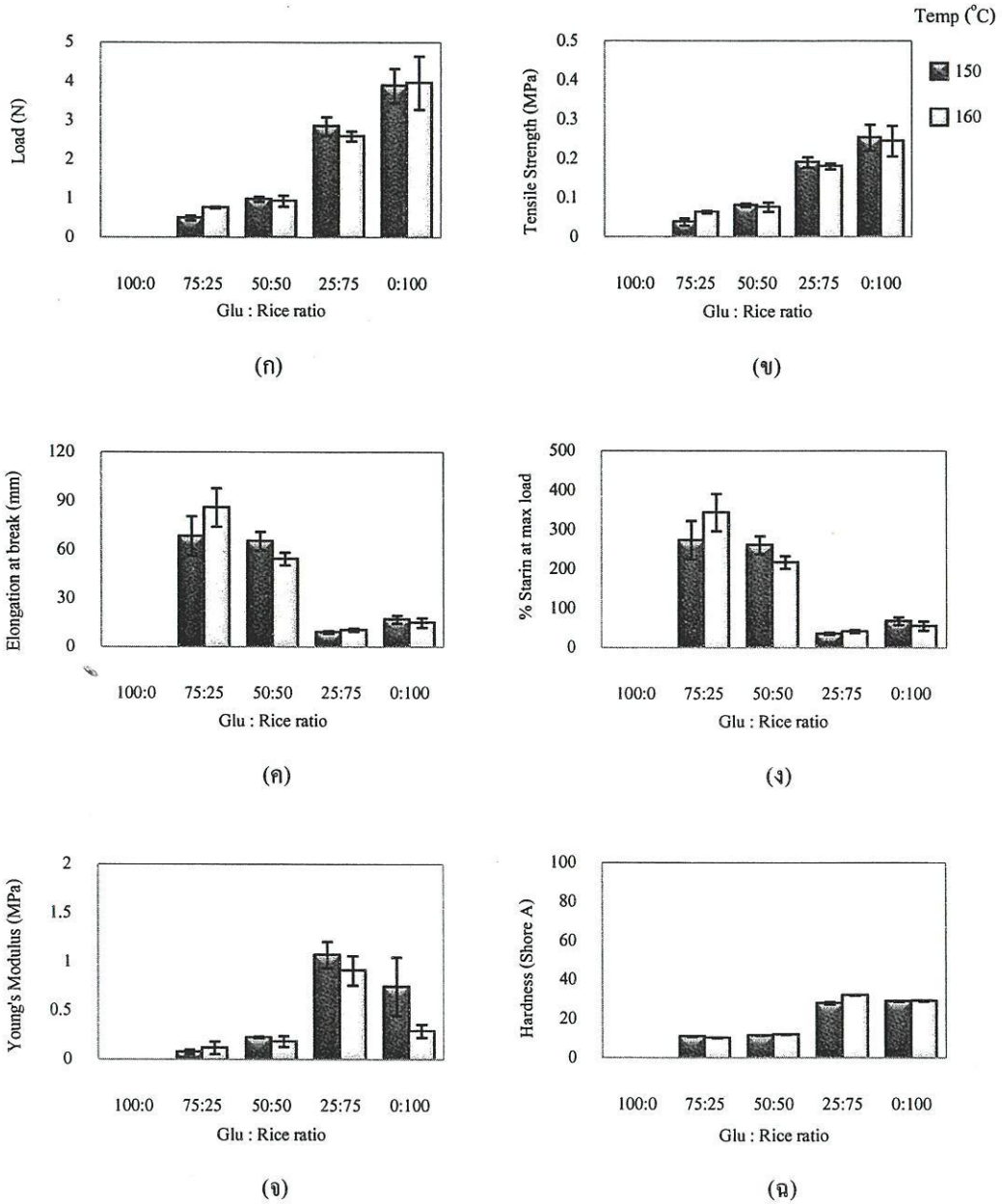
รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 150 °C และ 160 °C

จากรูปที่ 4.3 (ก)-(ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืดเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งกด ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ ทำการผสมโดยผ่านเครื่องผสมระบบปิดความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 150 °C แป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 มีการรับแรงและความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ที่อัตราส่วน 25:75:50 มีการรับแรงและความแข็งแรงดึงสูงที่สุด เมื่ออุณหภูมิ 160 °C แนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงที่อัตราส่วน 100:0:50 75:25:50 50:50:50 และ 25:75:50 มีแนวโน้มสูงขึ้น เห็นได้ว่า เมื่อปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นการรับแรงและความแข็งแรงดึงก็สูงขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งปริมาณอะไมโลสสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว ปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าจะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งร่วนถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิ 150–160 °C สามารถคงความแข็งได้ดีกว่าแป้งข้าวเหนียวที่มีความเหนียวนุ่ม ดังนั้น เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากกว่าขึ้นส่งผลให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงสูงขึ้นไปด้วย

การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่อุณหภูมิ 150 °C อัตราส่วน 75:25:50 มีค่าสูงสุดและเมื่ออุณหภูมิ 160 °C ทั้งค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ที่อัตราส่วน 100:0:50 มีค่าสูงสุด เนื่องจากอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเหนียวสูงส่งผลให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมากกว่าอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้าสูงเพราะว่าสมบัติของแป้งข้าวเหนียวนั้น คือมีความเหนียวนุ่มที่อุณหภูมิผสมสูง จึงทำให้อัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากกว่าแป้งข้าวเจ้ามีค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงกว่า มอดุลัสที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C ที่อัตราส่วน 25:75:50 มีค่ามอดุลัสมากสุด อัตราส่วน 100:0:50 มีค่ามอดุลัสต่ำสุด อัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้ามากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันหรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนที่แป้งข้าวเหนียวลดลงทำให้มีค่ามอดุลัสสูงขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน

ค่าความแข็งกดที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C อัตราส่วน 0:100:50 มีค่าสูงที่สุดและอัตราส่วน 75:25:50 มีค่าต่ำที่สุด อัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้าปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดสูงขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดลดลงด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่มีลักษณะแข็งร่วน มีความคงทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิผสมสูงดีกว่าแป้งข้าวเหนียวจึงคงสมบัตินี้ได้ ทำให้ค่าความแข็งและความแข็งกดของอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้าสูงกว่ามีค่ามากกว่า

- กลีเซอรอล 75 ส่วน



** สูตร 100:0:75 ทุกอุณหภูมิ ตัดงานไม่ได้ เหนียว

รูปที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ 150 °C และ 160 °C

จากรูปที่ 4.4 (ก)-(ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การรับแรง ความแข็งแรงดึง การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งกด ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ ทำการผสมโดยผ่านเครื่องผสมระบบปิดความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C แป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและ กลีเซอรอลที่อัตราส่วน 0:100:75 มีการรับแรงและความแข็งแรงดึงสูงที่สุด อัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวลดลงส่งผลให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงมีค่ามากขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้าลดลงส่งผลให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงลดลงด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่มีลักษณะแข็งร่วนถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C สามารถคงความแข็งได้ดีกว่าแป้งข้าวเหนียวที่มีความเหนียวนุ่ม ดังนั้น เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นส่งผลให้การรับแรงและความแข็งแรงดึงสูงขึ้นไปด้วย

การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C อัตราส่วน 75:25:75 มีค่าสูงสุด อัตราส่วนที่ปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมากขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าสมบัติของแป้งข้าวเหนียวนั้น คือ มีความเหนียวนุ่ม การใช้งานที่อุณหภูมิสูงจึงทำแป้งข้าวเหนียวส่งผลให้ชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้นไปอีก ดึงยืดได้มาก อัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากกว่าแป้งข้าวเจ้าจึงมีค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงกว่า

มอดุลัสที่อุณหภูมิ 150°C และ 160°C ที่อัตราส่วน 25:75:75 มีค่ามอดุลัสมากที่สุด อัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้ามากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่แป้งข้าวเหนียวมากขึ้นทำให้มีค่า มอดุลัสลดลง

ค่าความแข็งกดที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C อัตราส่วน 0:100:50 มีค่าสูงที่สุดและอัตราส่วน 75:25:50 มีค่าต่ำที่สุด อัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเจ้าปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดสูงขึ้น ในทางกลับกันอัตราส่วนที่มีแป้งข้าวเหนียวมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดลดลง ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าแป้งข้าวเจ้าเป็นแป้งที่มีลักษณะแข็งร่วน มีความคงทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิผสมสูงดีกว่าแป้งข้าวเหนียว จึงยังคงสมบัตินี้ได้ ทำให้ค่าความแข็งและความแข็งกดของอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้าสูงกว่ามีค่ามากกว่า

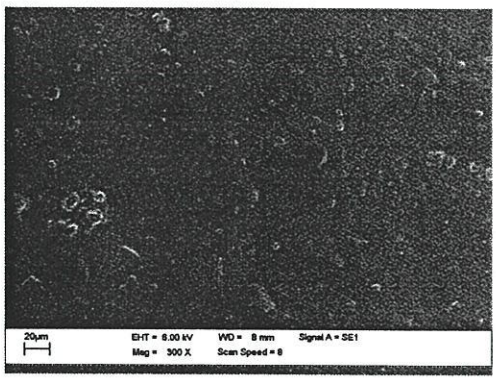
จากสมบัติเชิงกลข้างต้นนั้น แสดงให้เห็นว่าแป้งผสมในอัตราส่วน 25:75:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C ให้สมบัติโดยรวมที่สูงสุด เนื่องจากแป้งผสมนั้นมีปริมาณของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวที่ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เป็นแป้งผสมที่ค่อนข้างมีความแข็งและความแข็งแรงดึงที่ดี

รับแรงได้มาก สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงไม่เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะจะนำไปใช้งาน

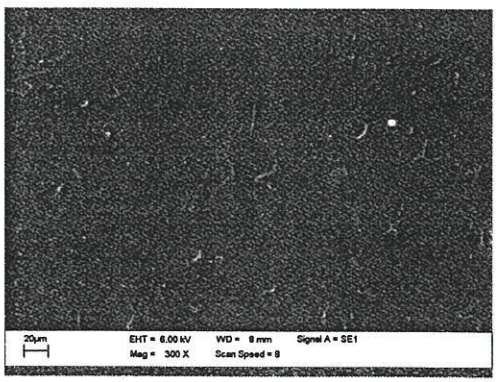
4.2 สัณฐานวิทยา

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว

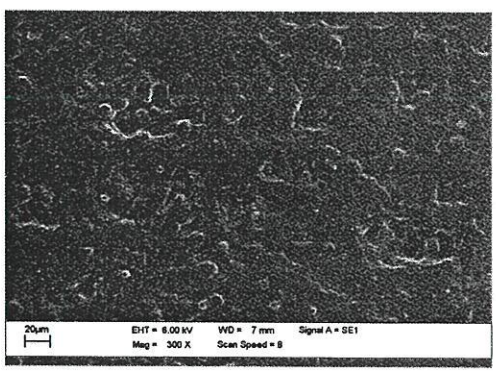


(ก)

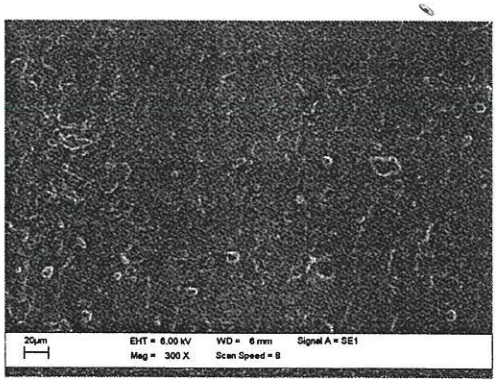


(ข)

- แป้งข้าวเจ้า



(ค)



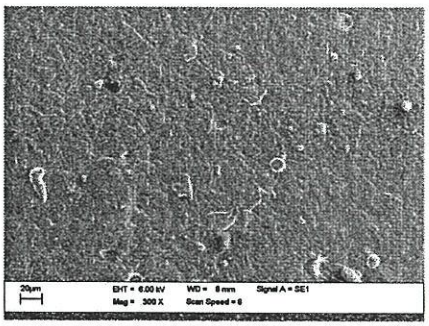
(ง)

รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 100:0:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 100:0:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 0:100:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 0:100:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C

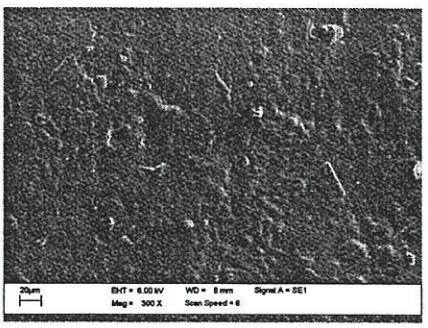
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว(100:0:50) และแป้งข้าวเจ้า (0:100:50) ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าทั้งแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า บริเวณพื้นผิวมีเม็ดแป้งกระจายอยู่ได้ทั่วไปแต่แป้งข้าวเจ้าค่อนข้างมีความขรุขระมากกว่า เมื่ออุณหภูมิ 160 °C พบว่าทั้งแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีเม็ดแป้งที่พบในตอนแรกลดน้อยลงและพื้นผิวมีความเรียบเนียนมากขึ้น

4.2.2 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:50)

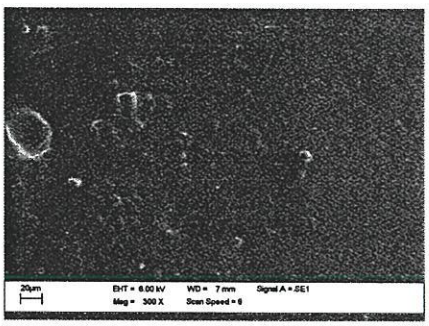


(ก)

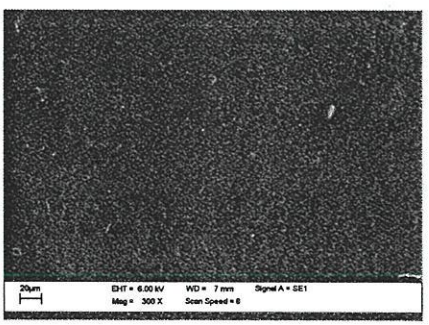


(ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:50)

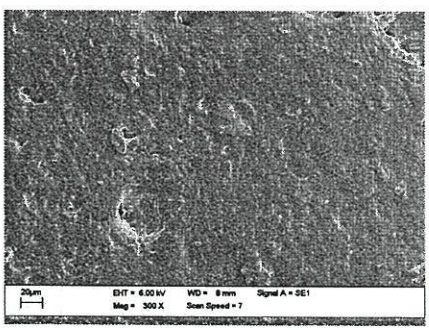


(ค)

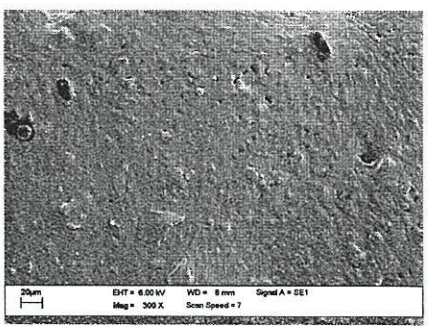


(ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:50)



(จ)



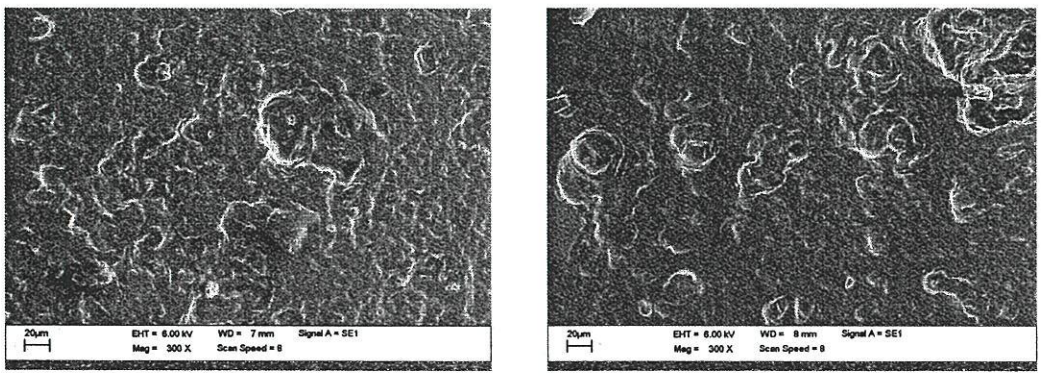
(ฉ)

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 50:50:50 และ 25:75:50 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่า ทั้ง 3 อัตราส่วน พื้นผิวพบเม็ดแป้งกระจายอยู่ทั่วไปและพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ แต่เมื่ออุณหภูมิ 160 °C ทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกได้ลดน้อยลงและพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลง

4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเจ้า



(ก) (ข)

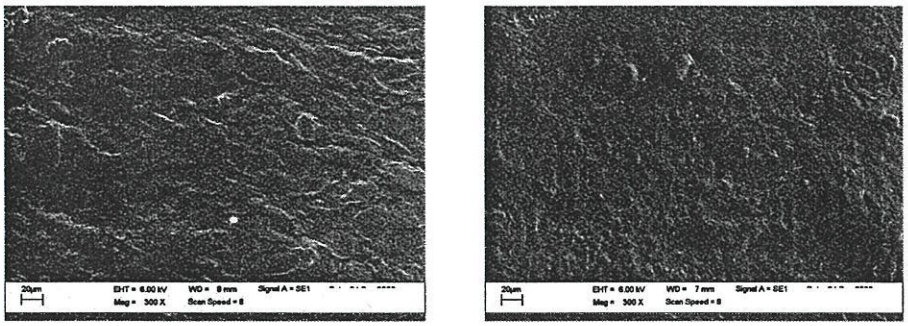
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 0:100:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 0:100:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C

** แป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 100:0:75 ไม่สามารถขึ้นรูปได้

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วน 0:100:75 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่า บริเวณพื้นผิวพบเม็ดแป้งกระจายอยู่และค่อนข้างมีความขรุขระ เมื่ออุณหภูมิ 160 °C พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกลดน้อยลงและพื้นผิวมีความเรียบเนียนมากขึ้น

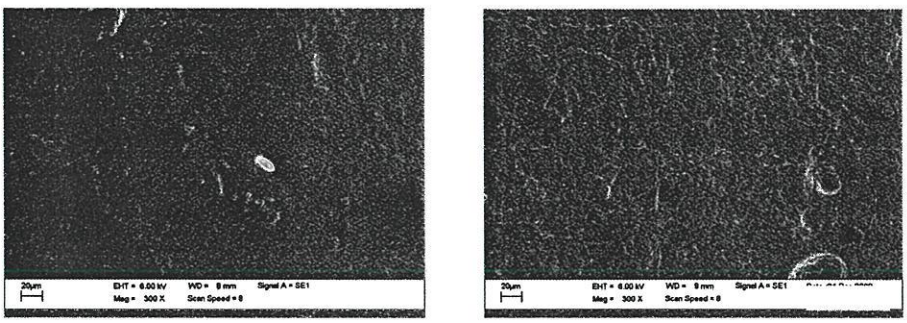
4.2.4 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณพื้นผิวที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:75)



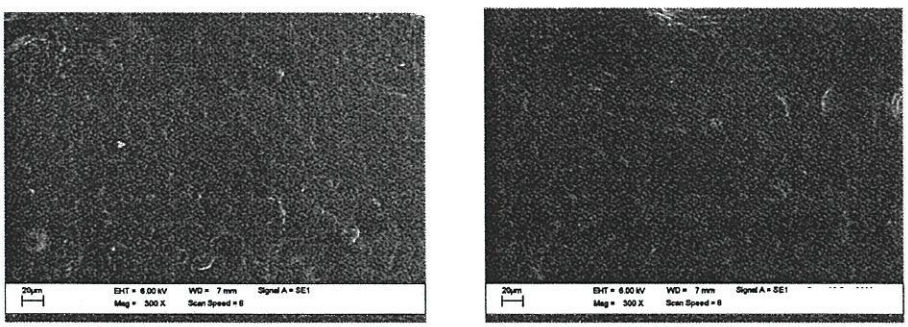
(ก) (ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:75)



(ค) (ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:75)



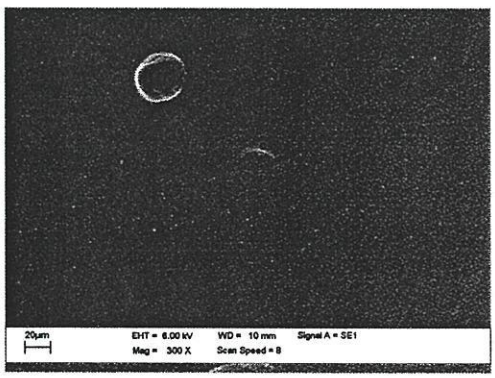
(จ) (ฉ)

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C

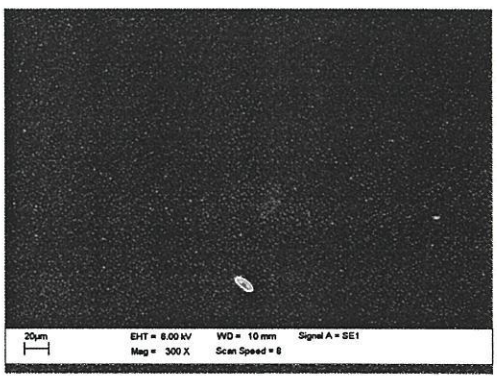
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 50:50:75 และ 25:75:75 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่า ทั้ง 3 อัตราส่วน พื้นผิวพบเม็ดแป้งกระจายอยู่ทั่วไปและพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ แต่เมื่ออุณหภูมิ 160 °C ทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกได้ลดน้อยลงและพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลง

4.2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว

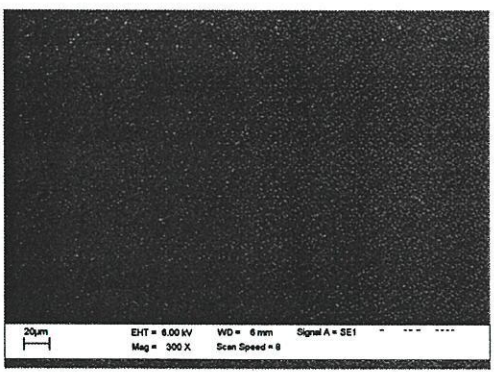


(ก)

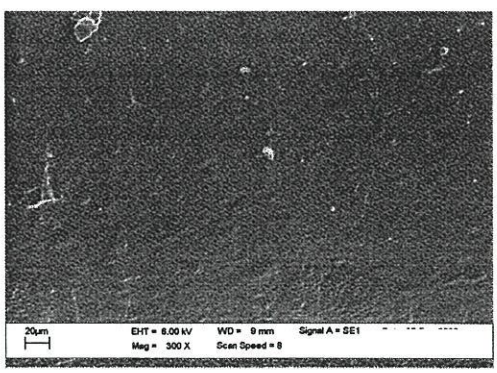


(ข)

- แป้งข้าวเจ้า



(ค)



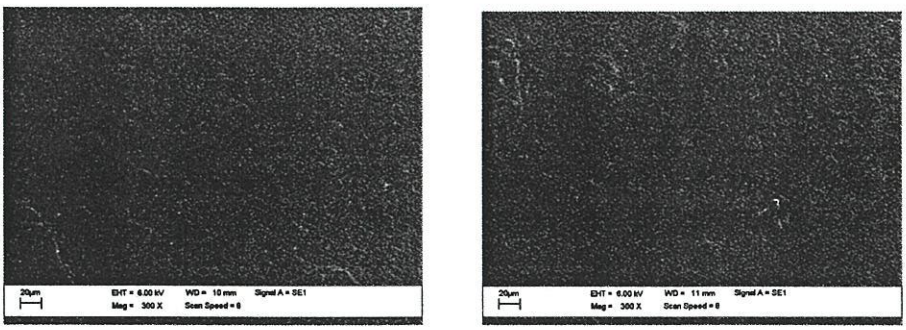
(ง)

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 100:0:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 100:0:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 0:100:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 0:100:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเหนียว(100:0:50) และแป้งข้าวเจ้า (0:100:50) ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C พบว่าบริเวณภาคตัดขวางมีการกระจายตัวของเม็ดแป้งอย่างสม่ำเสมอ แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าผสมกับกลีเซอรอลได้เป็นอย่างดี พื้นผิวค่อนข้างมีความเรียบเนียน

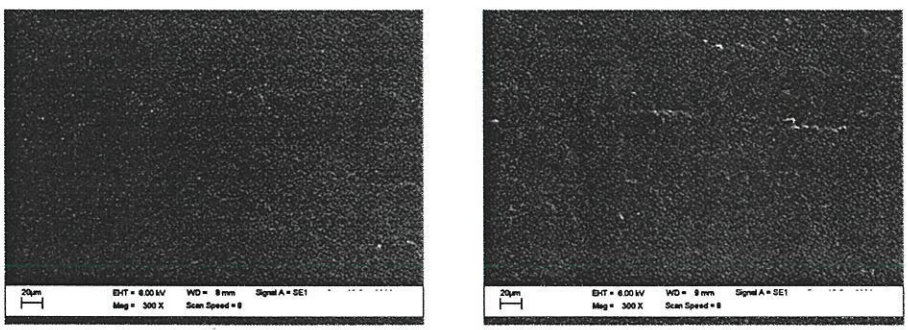
4.2.6 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:50)



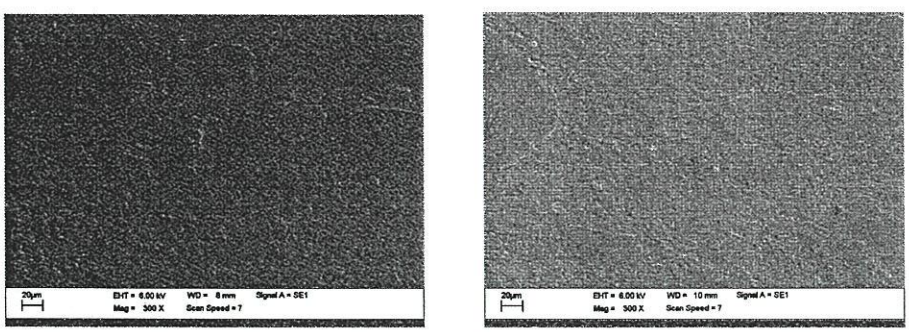
(ก) (ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:50)



(ค) (ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:50)



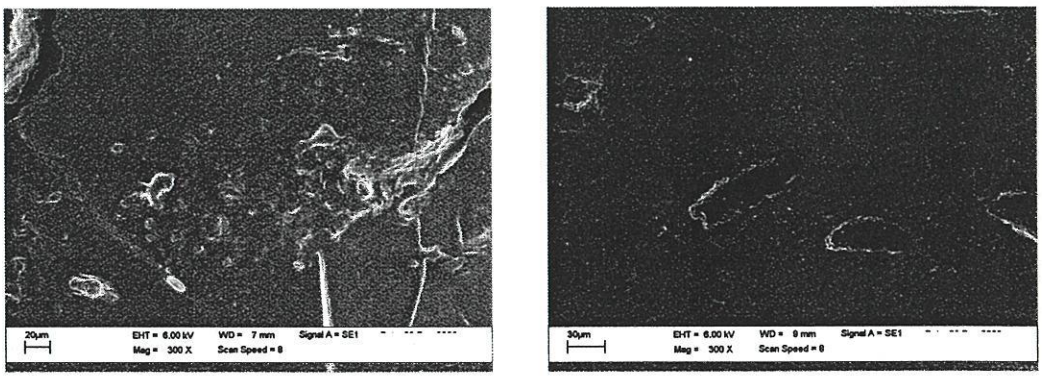
(จ) (ฉ)

รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้า ที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:50 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:50 ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 50:50:50 และ 25:75:50 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่า ทั้ง 3 อัตราส่วน พบเม็ดแป้งกระจายอยู่ทั่วไปและพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ แต่เมื่ออุณหภูมิ 160 °C ทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกได้ลดน้อยลงและมีความขรุขระน้อยลงเช่นกัน

4.2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเจ้า



(ก) (ข)

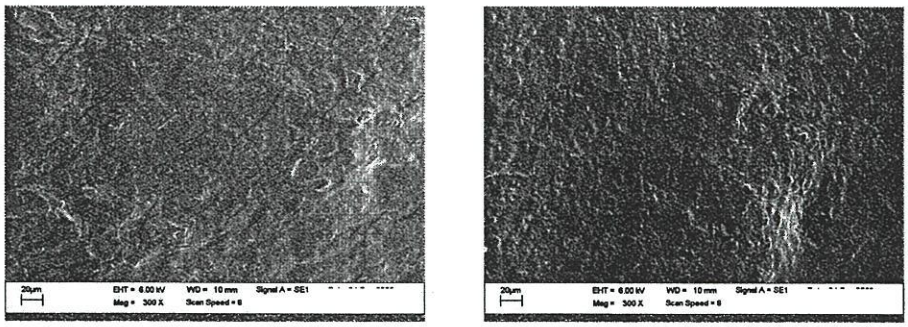
รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 0:100:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 0:100:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C

** แป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 100:0:75 ไม่สามารถขึ้นรูปได้

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วน 0:100:75 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าบริเวณพื้นผิวพบเม็ดแป้งกระจายอยู่และค่อนข้างมีความขรุขระ เมื่ออุณหภูมิ 160 °C พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกลดน้อยลงและความขรุขระลดน้อยลงเช่นกัน

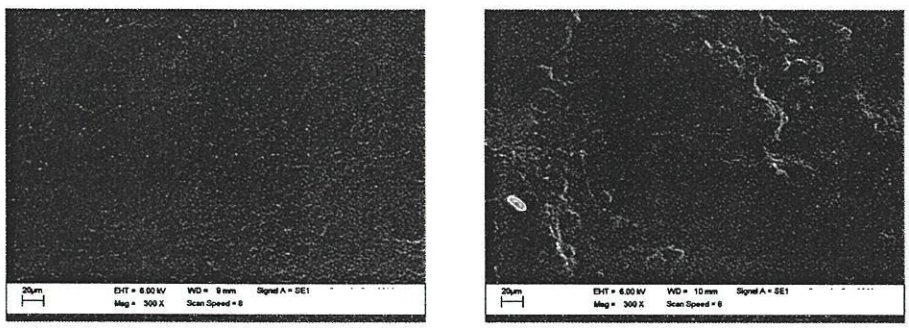
4.2.8 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อสัณฐาณวิทยาบริเวณภาคตัดขวางที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:75)



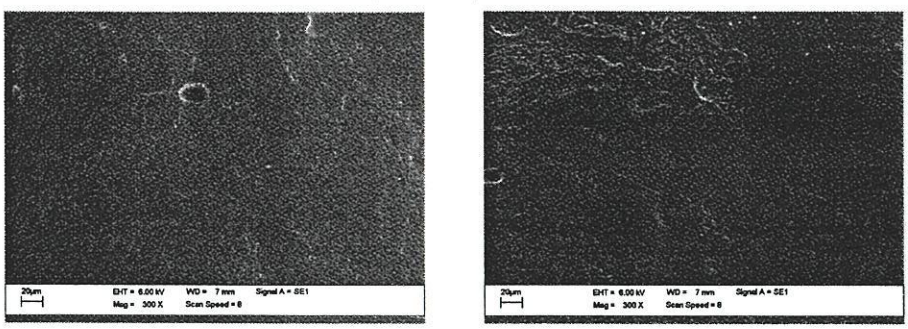
(ก) (ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:75)



(ค) (ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:75)



(จ) (ฉ)

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (ก) 75:25:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ข) 75:25:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) 50:50:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ง) 50:50:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C (จ) 25:75:75 ที่อุณหภูมิ 150 °C (ฉ) 25:75:75 ที่อุณหภูมิ 160 °C

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 50:50:75 และ 25:75:75 ที่กำลังขยาย 300 เท่า เมื่อทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่า บริเวณภาคตัดขวางของทั้ง 3 อัตราส่วนมีเม็ดแป้งกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีความขรุขระค่อนข้างมาก แต่เมื่ออุณหภูมิ 160 °C ทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่า เม็ดแป้งที่พบในตอนแรกได้ลดน้อยลงและพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลง

4.3 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

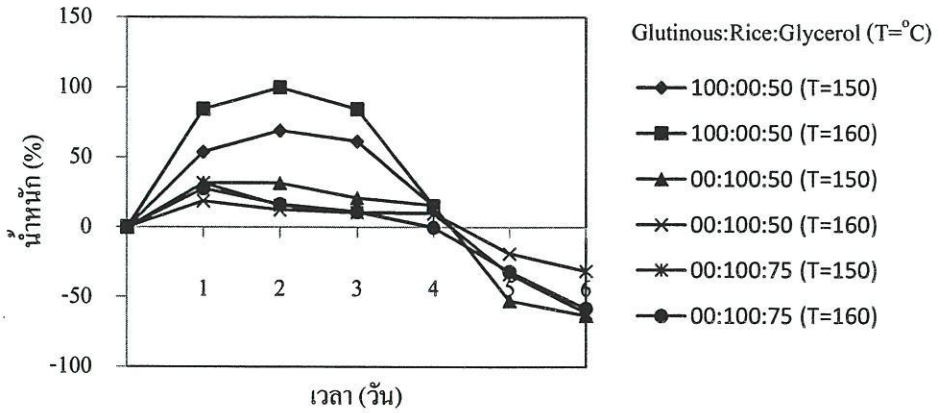
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ได้นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีอัตราส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล มาทำการทดสอบโดยฝังดินที่ pH=7 และควบคุมความชื้นของดินที่ 10-20% เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของอัตราส่วนผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวต่อแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C

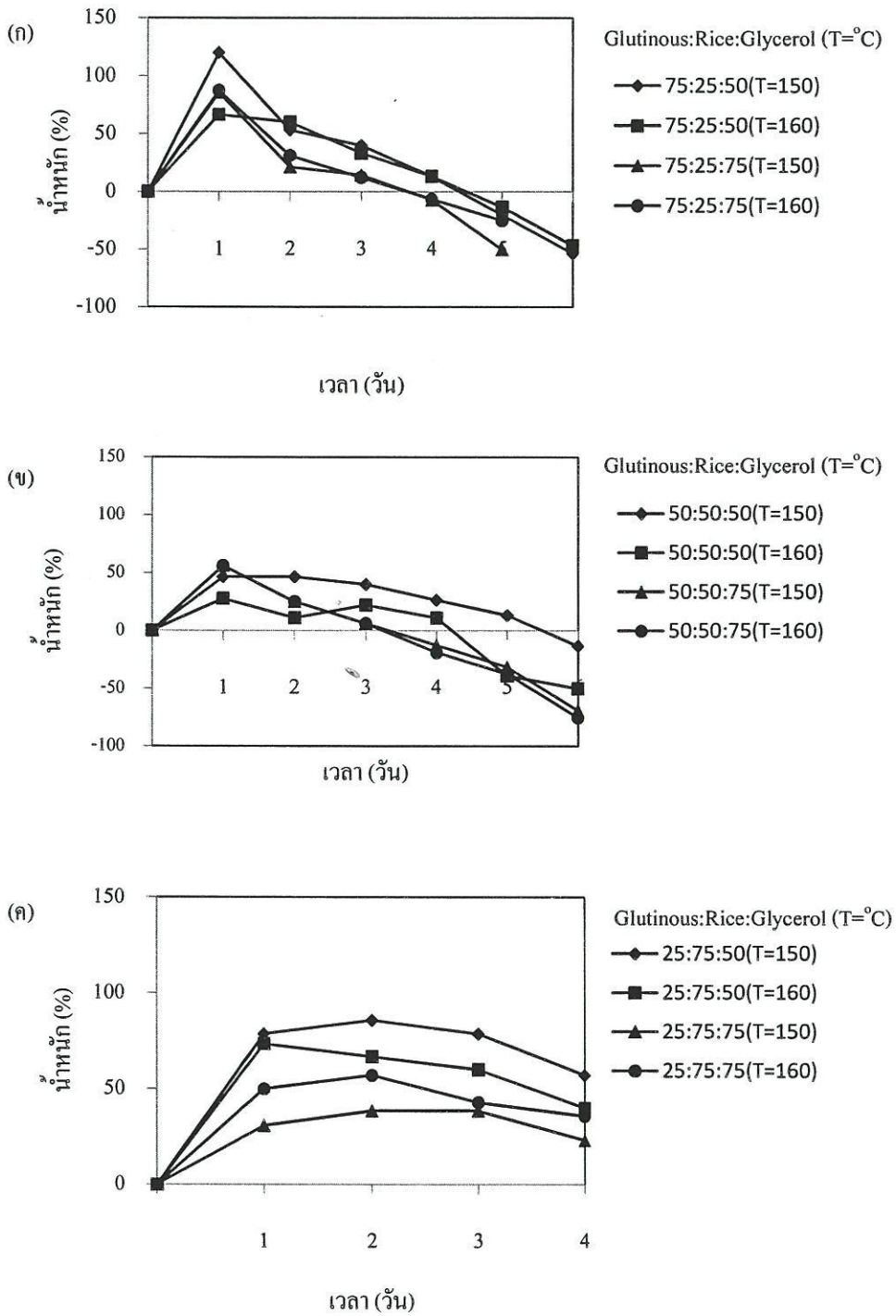
อัตราส่วน แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล	น้ำหนัก (%)						
	วันเริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่5	วันที่6
100:0:50 (T=150 °C)	0	53.85	69.23	61.54	15.35	สลาย	สลาย
100:0:50 (T=160 °C)	0	84.62	100.00	84.62	15.38	สลาย	สลาย
0:100:50 (T=150 °C)	0	31.58	31.58	21.05	15.79	-52.63	-63.16
0:100:50 (T=160 °C)	0	18.75	12.50	10.62	10.00	-18.75	-31.25
0:100:75 (T=150 °C)	0	31.58	15.79	11.11	10.00	-33.33	-61.11
0:100:75 (T=160 °C)	0	27.78	16.67	10.53	0.00	-31.58	-57.89
75:25:50 (T=150 °C)	0	120.00	53.33	40.00	13.33	-20.00	-53.33
75:25:50 (T=160 °C)	0	66.67	60.00	33.33	13.33	-13.33	-46.67
75:25:75 (T=150 °C)	0	85.71	21.43	14.29	-7.14	-50.00	สลาย
75:25:75 (T=160 °C)	0	87.50	31.25	12.50	-6.25	-25.00	สลาย
50:50:50 (T=150 °C)	0	46.67	46.67	40.00	26.67	13.33	-13.33
50:50:50 (T=160 °C)	0	27.78	11.11	22.22	11.11	-38.89	-50.00
50:50:75 (T=150 °C)	0	56.25	25.00	6.25	-12.50	-31.25	-68.75
50:50:75 (T=160 °C)	0	56.25	25.00	6.25	-18.75	-37.50	-75.00
25:75:50 (T=150 °C)	0	78.57	85.71	78.57	57.14	สลาย	สลาย
25:75:50 (T=160 °C)	0	73.33	66.67	60.00	40.00	สลาย	สลาย
25:75:75 (T=150 °C)	0	30.77	38.46	38.46	23.08	สลาย	สลาย
25:75:75 (T=160 °C)	0	50.00	57.14	42.86	35.71	สลาย	สลาย

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานในแต่ละอัตราส่วนนั้นเกิดการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน สังเกตได้จากน้ำหนักที่ลดลง แต่ช่วง 1-3 วันเห็นได้ว่าน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าชิ้นงานมีการดูดน้ำเข้าไปค่อนข้างมากเนื่องจากชิ้นงานมีองค์ประกอบ คือ แป้งและกลีเซอรอล ซึ่งแป้งมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีและชิ้นงานในวันที่ 3 มีราขึ้นบริเวณรอบชิ้นงาน

- ผลของอัตราส่วน ปริมาณกลีเซอรอลและอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำหนัก ณ เวลา (วัน) ต่างๆ



รูปที่ 4.13 น้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ กันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวหรือแป้งข้าวเจ้าที่ปริมาณกลีเซอรอลและอุณหภูมิที่ต่างกันเมื่อนำมาฝังดิน



รูปที่ 4.14 น้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ กันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าที่อัตราส่วนปริมาณ กลีเซอรอลและอุณหภูมิต่างกันเมื่อนำมาฝังดิน

จากผลการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทดสอบโดยการฝังดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่ออัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากกว่าปริมาณแป้งข้าวเจ้า มีการดูดซับความชื้นในดินได้ดีกว่าในอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้ามากกว่า ทำให้ชิ้นงานมีความนิ่มเละ และย่อยสลายได้เร็วกว่าในอัตราส่วนที่มีปริมาณของแป้งข้าวเจ้ามากกว่า

อัตราส่วนที่มีปริมาณกลีเซอรอลมาก ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะนิ่มมากกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณกลีเซอรอลน้อยกว่า ที่อัตราส่วนของปริมาณแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้เมื่อนำไปทำการทดสอบการย่อยสลายแล้ว ส่งผลให้อัตราส่วนที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากนั้นความชื้นที่มีในดินส่งผลให้ชิ้นงานมีความนิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานย่อยสลายได้เร็วกว่าชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของปริมาณกลีเซอรอลที่น้อยกว่า

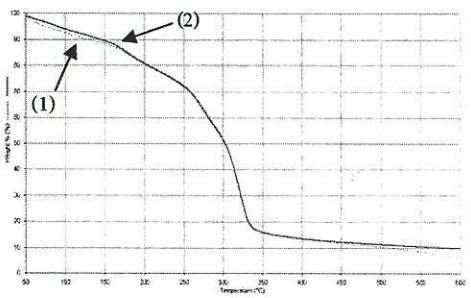
อุณหภูมิในการขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่อัตราส่วนต่างๆ

4.4 สมบัติด้านความร้อน

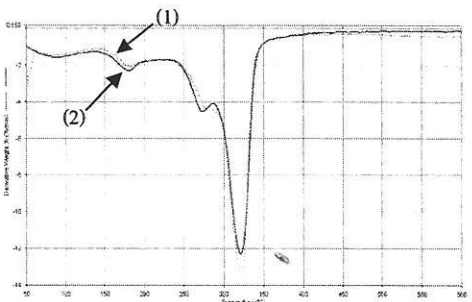
สมบัติด้านความร้อนที่ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation Temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) และใช้สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ให้ผลการทดลองดังนี้

4.4.1 ผลของอุณหภูมิที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว

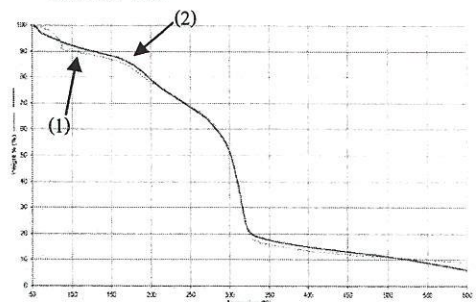


(ก)

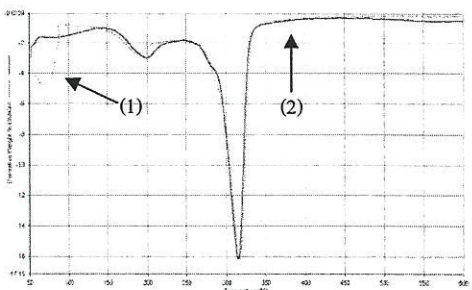


(ข)

- แป้งข้าวเจ้า



(ค)

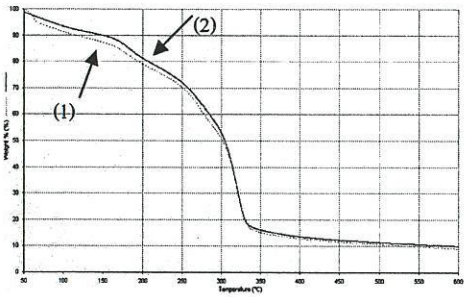


(ง)

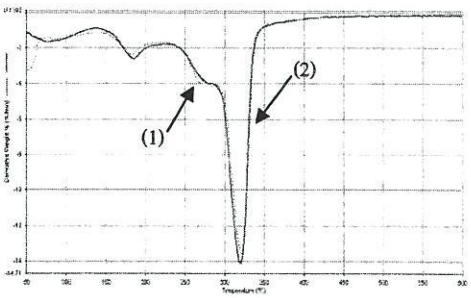
รูปที่ 4.15 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 160 °C (ค) TGA และ (ง) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 160 °C

4.4.2 ผลของกลีเซอรอลที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:50)

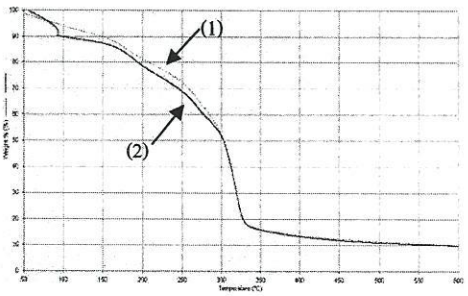


(ก)

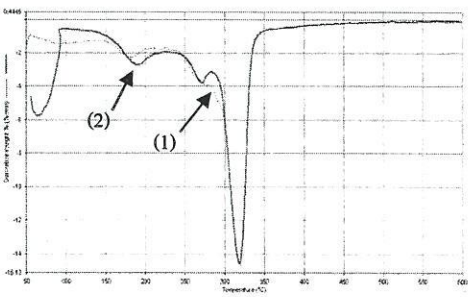


(ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:50)

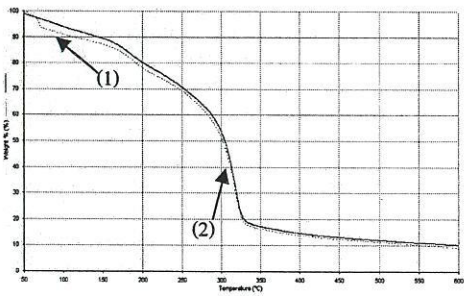


(ค)

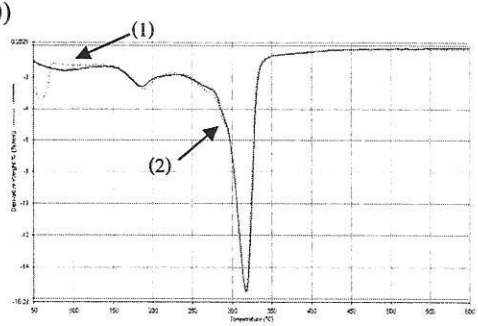


(ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:50)



(จ)

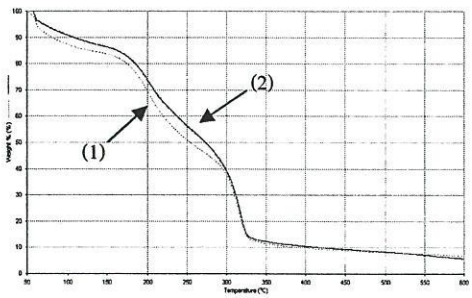


(ฉ)

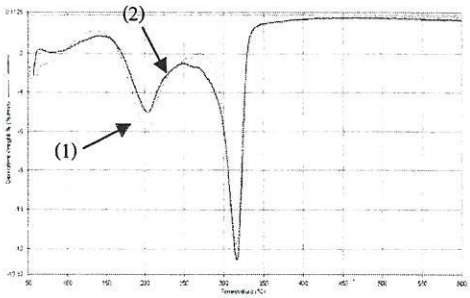
รูปที่ 4.16 (ก), (ค), (จ) TGA ของอัตราส่วน (75:25:50), (50:50:50), (25:75:50) ตามลำดับ และ (ข), (ง), (ฉ) DTG ของอัตราส่วน (75:25:50), (50:50:50), (25:75:50) ตามลำดับ โดย (1) เป็นอุณหภูมิ 150 °C และ(2) เป็นอุณหภูมิ 160 °C

4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเจ้า



(ก)



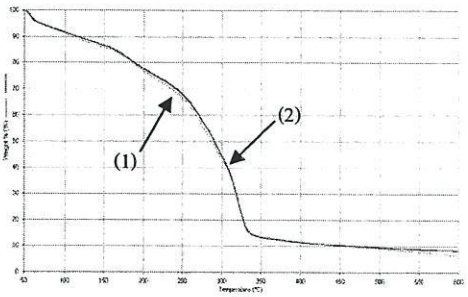
(ข)

** แป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 100:0:75 ไม่สามารถขึ้นรูปได้

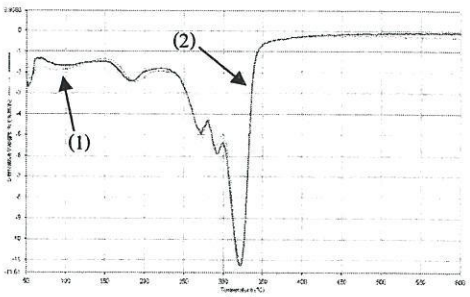
รูปที่ 4.17 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิ 160 °C

4.4.4 ผลของกลีเซอรอลที่ปริมาณกลีเซอรอล 75 ส่วน

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (75:25:75)

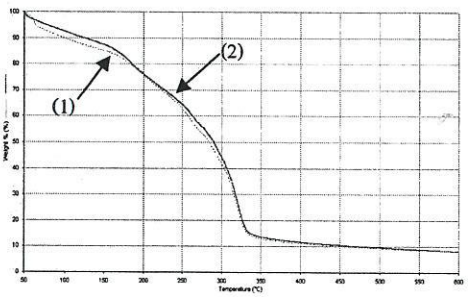


(ก)

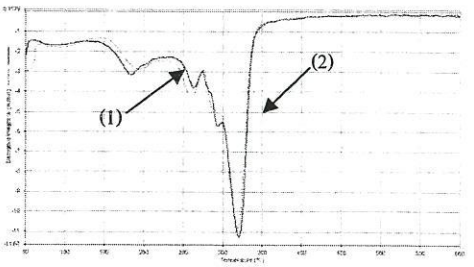


(ข)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (50:50:75)

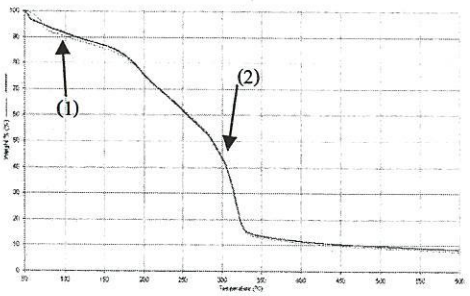


(ค)

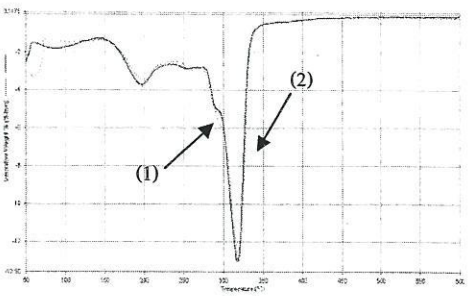


(ง)

- แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล (25:75:75)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.18 (ก), (ค), (จ) TGA ของอัตราส่วน (75:25:75), (50:50:75), (25:75:75) ตามลำดับ และ (ข), (ง), (ฉ) DTG ของอัตราส่วน (75:25:75), (50:50:75), (25:75:75) ตามลำดับ โดย (1) เป็นอุณหภูมิ 150 °C และ (2) เป็นอุณหภูมิ 160 °C

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล

อัตราส่วนของ แป้งข้าวเหนียว : แป้งข้าวเจ้า : กลีเซอรอล	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)		% การลดลงของน้ำหนัก
	ช่วงที่ 1 กลีเซอรอล	ช่วงที่ 2 แป้ง	
100:0:50 (T=150 °C)	163.34	296.55	35.58
100:0:50 (T=160 °C)	165.46	292.98	35.98
0:100:50 (T=150 °C)	166.90	299.87	40.83
0:100:50 (T=160 °C)	177.16	298.59	40.93
0:100:75 (T=150 °C)	177.13	303.65	60.76
0:100:75 (T=160 °C)	180.18	303.07	57.69
75:25:50 (T=150 °C)	165.69	297.02	36.57
75:25:50 (T=160 °C)	166.28	297.92	35.18
75:25:75 (T=150 °C)	166.84	291.74	42.20
75:25:75 (T=160 °C)	164.15	293.62	39.88
50:50:50 (T=150 °C)	161.89	292.56	34.13
50:50:50 (T=160 °C)	166.18	306.64	49.13
50:50:75 (T=150 °C)	167.79	301.57	55.07
50:50:75 (T=160 °C)	165.67	297.27	46.82
25:75:50 (T=150 °C)	167.83	296.27	39.21
25:75:50 (T=160 °C)	165.64	297.97	38.34
25:75:75 (T=150 °C)	174.59	299.34	48.86
25:75:75 (T=160 °C)	172.33	303.08	52.59

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 170 °C และ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลและแป้งตามลำดับ [19, 25] และจากตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิ อัตราส่วนของแป้งและปริมาณกลีเซอรอลไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอย่างชัดเจน นอกจากนี้ % การลดลงของน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวแสดงในตารางที่ 4.3

พบว่าอุณหภูมิและอัตราส่วนของแป้งไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว แต่พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น % การลดลงของน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 150 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 25:75:50 ได้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

2. จากการศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าที่ปริมาณกลีเซอรอล 50 ส่วน ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหลังทำการขึ้นรูปไม่มีความนิ่มเกินไป สามารถขึ้นรูปได้ดี

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวน้อยแป้งข้าวเจ้ามากทำให้การรับแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและความแข็งกดสูงขึ้น อัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวมากแป้งข้าวเจ้าน้อยจะทำให้ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น ที่ปริมาณกลีเซอรอลมาก ทำให้การรับแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและความแข็งกดลดลง แต่ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น และที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ปริมาณแป้งข้าวเหนียวลดลงการรับแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและความแข็งกดสูงขึ้น แต่ค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น

4. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมีความสามารถในการเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น เม็ดแป้งที่พบเห็นได้ทั่วไปมีจำนวนลดลง อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวเหนียว : แป้งข้าวเจ้า และปริมาณกลีเซอรอลไม่มีผลต่อสัณฐานวิทยา

5. จากการศึกษาสมบัติด้านการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในอัตราส่วนที่มีปริมาณของแป้งข้าวเหนียวและปริมาณกลีเซอรอลมาก เกิดการย่อยสลายได้เร็วมากกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณของแป้งข้าวเจ้ามากและปริมาณกลีซอรอลน้อย อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

6. จากการศึกษาสมบัติทางด้านอุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 170 °C และ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลและแป้งตามลำดับ แต่อัตราส่วนของแป้งและปริมาณกลีเซรอลไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้ % การลดลงของน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว พบว่าอุณหภูมิและอัตราส่วนของแป้งไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น % การลดลงของน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเติมส่วนเสริมแรง เช่น เส้นใยธรรมชาติ ที่สามารถเพิ่มความเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เพื่อนำมาทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้ดีขึ้น

2. ศึกษาชนิดของพลาสติไซเซอร์ โดยเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ต่างชนิดกัน เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล ซอร์บิทอล เป็นต้น

3. ศึกษาผลของสารตัวเติมที่ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น เช่น สารกันเชื้อรา สารกันบูด

เอกสารอ้างอิง

[1] http://www.thannews.th.com/detailnews.php?id=T012245n&issue=2344

[2] นางสาวบุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์,นางสาวประภาวดี เกตุสุดาและนางสาววีรยา ธรรมมิกะ **"การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ"** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550

[3] http://eoropean-bioplastics.org

[4] กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

[5] http://www.jic.ac.uk/STAFF/cliff-hedley/Starch.html

[6] http://www.european-bioplastics.org

[7] http://library.uru.ac.th/webdb/images/charpa_rice_product.html

[8] อรอุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[9] นรศิษฎ์ จันทรกูล **"การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ"**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[10] สวนิต อิชยาวณิชย์, มณฑิรา นพรัตน์ และ พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์ **"คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม"** วราสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด, 2547.

[11] วรวิทย์ โพชนิกร, **"ผลของแป้งชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ"**, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวทิยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

[12] ดวงพร อุดมสินและเติมศักดิ์ ส่งวัฒนา **"การศึกษาความหนืดและการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียวและแป้งอเนกประสงค์"**, ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[13] กาญจนา อุทัยฉาย, โกสิน หาชะวี, นเรนทร์ อาศัยพานิชย์, นัฐพร สุรพัฒน์, วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อำนาจ สิทธัตตระกูล **"การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของ**

เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง",31 st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18 – 20 October 2005

[14] สุคนธ์ชื่น ศรีงาม "**การเปรียบเทียบผลการย่อยสตาร์ช 4 ชนิดด้วยเอนไซม์**" ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร, 2537.

[15] X.Ma, J. Yua and J.F. Kennedy, "**Studies on the properties of natural fibers-reinforcedthermoplastic starch composites**", Carbohydrate Polymers, 62 (2005) 19–24.

[16] A.L. ROz, A.J.F. Carvalho, A. Ganding and A.A.S. Curvelo, " **The effect of plasticizer on thermoplastic starch compositions obtain by melt processing**", Carbohydrate polymers , 63 (2006) 417-424.

[17] X.Ma., J. Yua and P.R. Chang, "**Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch / microcrystalline cellulose composits**" Carbohydrate Polymer 72 (2008) 369-357

[18] H.G. Xiong, S.W. Tang, H.L. Tang and P. Zou, "**The structure and properties of a starch-based biodegradable film**", Carbohydrate Polymer 71 (2008) 263-268

[19] A.A.S. Curvelo, A.J.F. de Carvalho and J.A.M. Agnelli, "**Thermoplastic starch cellulose fibers composite: preliminary**", Carbohydrate Polymers, 45 (2001) 183-188

[20] M. Thuwall, A. Boldizar and M. Rigdahi, "**Extrusion processing of high amylase potato starch materials**", Carbohydrate Polymers, 65 (2006) 441-446

[21] R. Shi, Q. Liu, T. Ding, Y. Han, L. Zhang, D. Chan and W. Tian, "**Ageing of soft Thermoplastic Starch with High Glycerol Content**", Journal of Applied Polymer Science, 103 (2007) 574-586

[22] http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter1.html

[23] http://www.oae.go.th/statistic

[24] http://fscimage.fishersci.com/msds/10440.htm

[25] M.F. Huang, J.G Yu and X.F. Ma. "**Studies on the properties of Montmorillomte-reinforced thermoplastic starch composite**". Polymer, 45(2004) 7017-7023.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล

อัตราส่วน แป้งข้าวเหนียว:แป้งข้าวเจ้า:กลีเซอรอล	ลักษณะชิ้นงาน
100:0:50	ชิ้นงานมีลักษณะเหนียว นิ่ม
100:0:75	ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้เนื่องจากชิ้นงานมีความเหนียวมาก
0:100:50	ไม่สามารถตัดชิ้นงานได้เนื่องจากชิ้นงานกรอบและแตก
0:100:75	ชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างแข็ง
75:25:50	ชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างเหนียว
75:25:75	ชิ้นงานมีลักษณะเหนียว นิ่ม
50:50:50	ชิ้นงานมีลักษณะไม่เหนียวหรือแข็งเกินไป
50:50:75	ชิ้นงานมีลักษณะไม่เหนียวหรือแข็งเกินไป
25:75:50	ชิ้นงานมีลักษณะดี
25:75:75	ชิ้นงานมีลักษณะค่อนข้างดี

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล

การรับแรง

อัตราส่วน	Load (N)
100:0:50 (T=150 °C)	4.27±0.69
100:0:50 (T=160 °C)	3.20±0.65
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	3.89±0.44
0:100:75 (T=160 °C)	3.96±0.68
75:25:50 (T=150 °C)	3.04±0.72
75:25:50 (T=160 °C)	4.50±1.22
75:25:75 (T=150 °C)	0.50±0.06
75:25:75 (T=160 °C)	0.77±0.02
50:50:50 (T=150 °C)	5.64±1.16
50:50:50 (T=160 °C)	4.33±0.82
50:50:75 (T=150 °C	0.98±0.06
50:50:75 (T=160 °C)	0.94±0.14
25:75:50 (T=150 °C)	16.56±2.88
25:75:50 (T=160 °C)	19.47±6.24
25:75:75 (T=150 °C)	2.86±0.23
25:75:75 (T=160 °C)	2.60±0.13

ความแข็งแรงดึง

อัตราส่วน	Tensile Strength (MPa)
100:0:50 (T=150 °C)	0.29±0.05
100:0:50 (T=160 °C)	0.22±0.04
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	0.25±0.03
0:100:75 (T=160 °C)	0.25±0.04
75:25:50 (T=150 °C)	0.23±0.04
75:25:50 (T=160 °C)	0.31±0.07
75:25:75 (T=150 °C)	0.04±0.02
75:25:75 (T=160 °C)	0.06±0.01
50:50:50 (T=150 °C)	0.37±0.09
50:50:50 (T=160 °C)	0.28±0.06
50:50:75 (T=150 °C	0.08±0.004
50:50:75 (T=160 °C)	0.07±0.01
25:75:50 (T=150 °C)	1.16±0.18
25:75:50 (T=160 °C)	1.25±0.32
25:75:75 (T=150 °C)	0.19±0.01
25:75:75 (T=160 °C)	9.18±0.01

การดึงยืด

อัตราส่วน	Elongation at break (mm)
100:0:50 (T=150 °C)	61.93±19.36
100:0:50 (T=160 °C)	102.33±7.16
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	16.97±2.49
0:100:75 (T=160 °C)	14.99±2.97
75:25:50 (T=150 °C)	85.03±1.94
75:25:50 (T=160 °C)	69.81±7.59
75:25:75 (T=150 °C)	68.43±12.23
75:25:75 (T=160 °C)	86.03±11.83
50:50:50 (T=150 °C)	17.55±7.62
50:50:50 (T=160 °C)	29.30±9.87
50:50:75 (T=150 °C	65.38±5.78
50:50:75 (T=160 °C)	54.42±3.95
25:75:50 (T=150 °C)	29.07±0.78
25:75:50 (T=160 °C)	46.57±7.42
25:75:75 (T=150 °C)	9.08±0.83
25:75:75 (T=160 °C)	10.40±0.96

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

อัตราส่วน	% Strain at max load
100:0:50 (T=150 °C)	247.74±77.45
100:0:50 (T=160 °C)	409.30±28.62
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	67.88±9.73
0:100:75 (T=160 °C)	55.82±11.88
75:25:50 (T=150 °C)	340.10±7.73
75:25:50 (T=160 °C)	279.22±30.34
75:25:75 (T=150 °C)	273.72±48.91
75:25:75 (T=160 °C)	344.10±47.29
50:50:50 (T=150 °C)	78.19±30.47
50:50:50 (T=160 °C)	117.17±39.48
50:50:75 (T=150 °C	261.50±23.12
50:50:75 (T=160 °C)	217.70±15.78
25:75:50 (T=150 °C)	116.30±3.12
25:75:50 (T=160 °C)	186.50±29.69
25:75:75 (T=150 °C)	36.34±3.35
25:75:75 (T=160 °C)	41.60±3.87

มอดุลัส

อัตราส่วน	Young's Modulus (MPa)
100:0:50 (T=150 °C)	0.09±0.04
100:0:50 (T=160 °C)	0.14±0.27
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	0.74±0.30
0:100:75 (T=160 °C)	0.29±0.06
75:25:50 (T=150 °C)	0.59±0.06
75:25:50 (T=160 °C)	0.75±0.26
75:25:75 (T=150 °C)	0.08±0.02
75:25:75 (T=160 °C)	0.12±0.06
50:50:50 (T=150 °C)	1.42±0.43
50:50:50 (T=160 °C)	0.88±0.26
50:50:75 (T=150 °C	0.22±0.009
50:50:75 (T=160 °C)	0.18±0.05
25:75:50 (T=150 °C)	4.83±0.88
25:75:50 (T=160 °C)	4.35±1.79
25:75:75 (T=150 °C)	1.07±0.14
25:75:75 (T=160 °C)	0.91±0.15

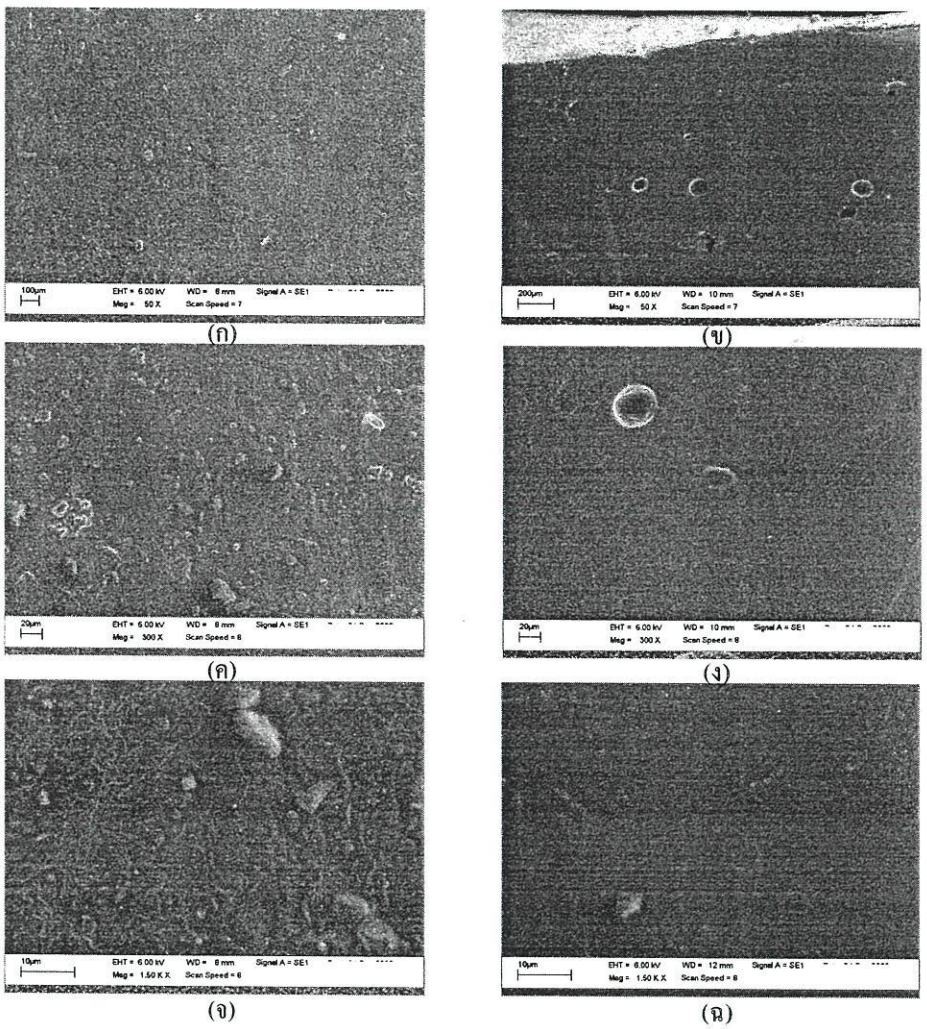
ความแข็งกด

อัตราส่วน	Hardness (Shore A)
100:0:50 (T=150 °C)	65.04±0.29
100:0:50 (T=160 °C)	51.24±0.41
100:0:75 (T=150 °C)	-
100:0:75 (T=160 °C)	-
0:100:50 (T=150 °C)	-
0:100:50 (T=160 °C)	-
0:100:75 (T=150 °C)	29±0.25
0:100:75 (T=160 °C)	29.12±0.22
75:25:50 (T=150 °C)	35.68±0.55
75:25:50 (T=160 °C)	32.74±0.55
75:25:75 (T=150 °C)	11±0.2
75:25:75 (T=160 °C)	10.30±0.21
50:50:50 (T=150 °C)	72.84±0.24
50:50:50 (T=160 °C)	76.62±0.22
50:50:75 (T=150 °C)	11.40±0.01
50:50:75 (T=160 °C)	11.91±0.02
25:75:50 (T=150 °C)	60.20±1.30
25:75:50 (T=160 °C)	52.66±0.32
25:75:75 (T=150 °C)	28±0.61
25:75:75 (T=160 °C)	32.10±0.19

ภาคผนวก ค

รูปแสดงสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล

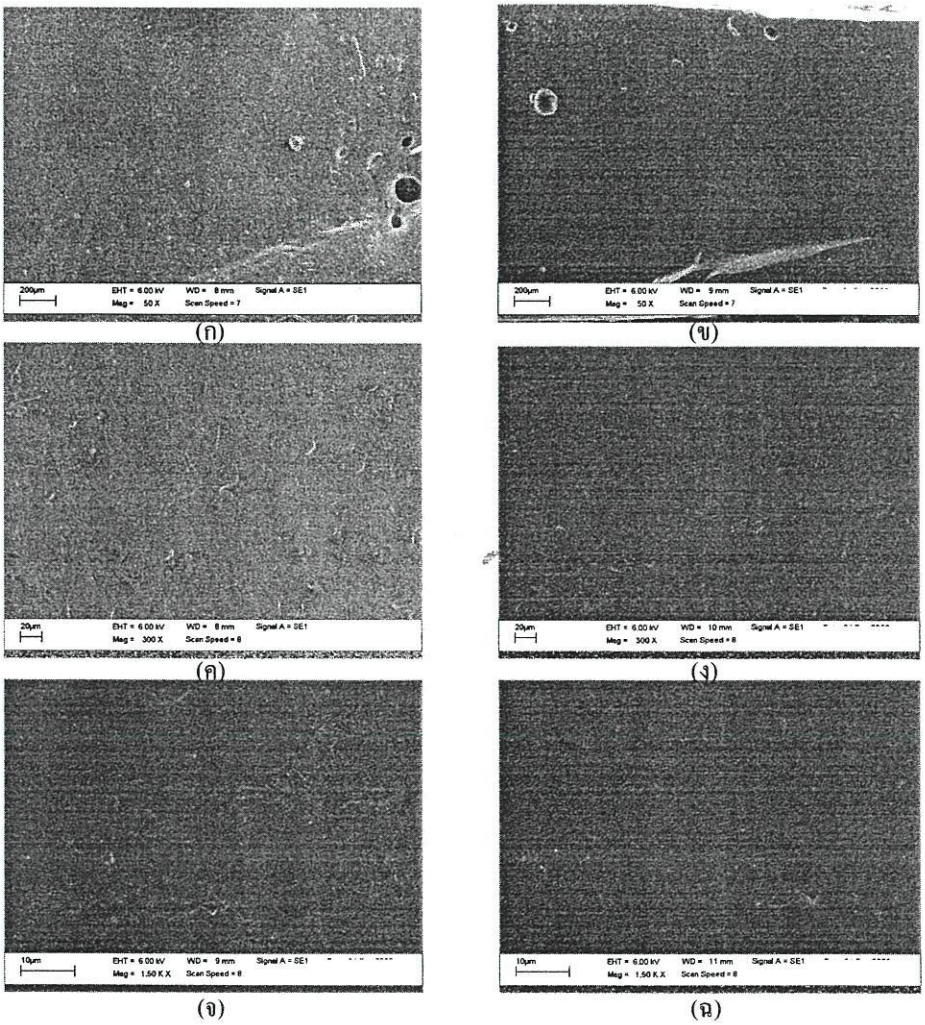
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ)

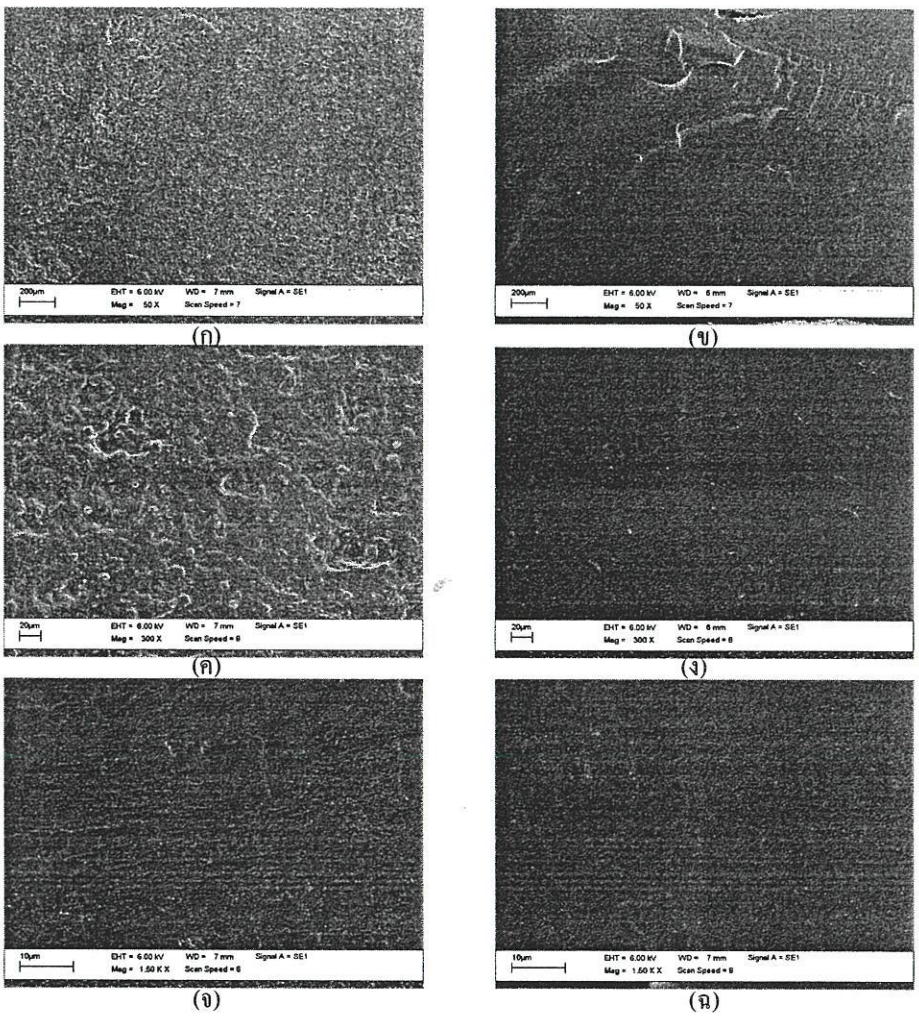
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:0:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



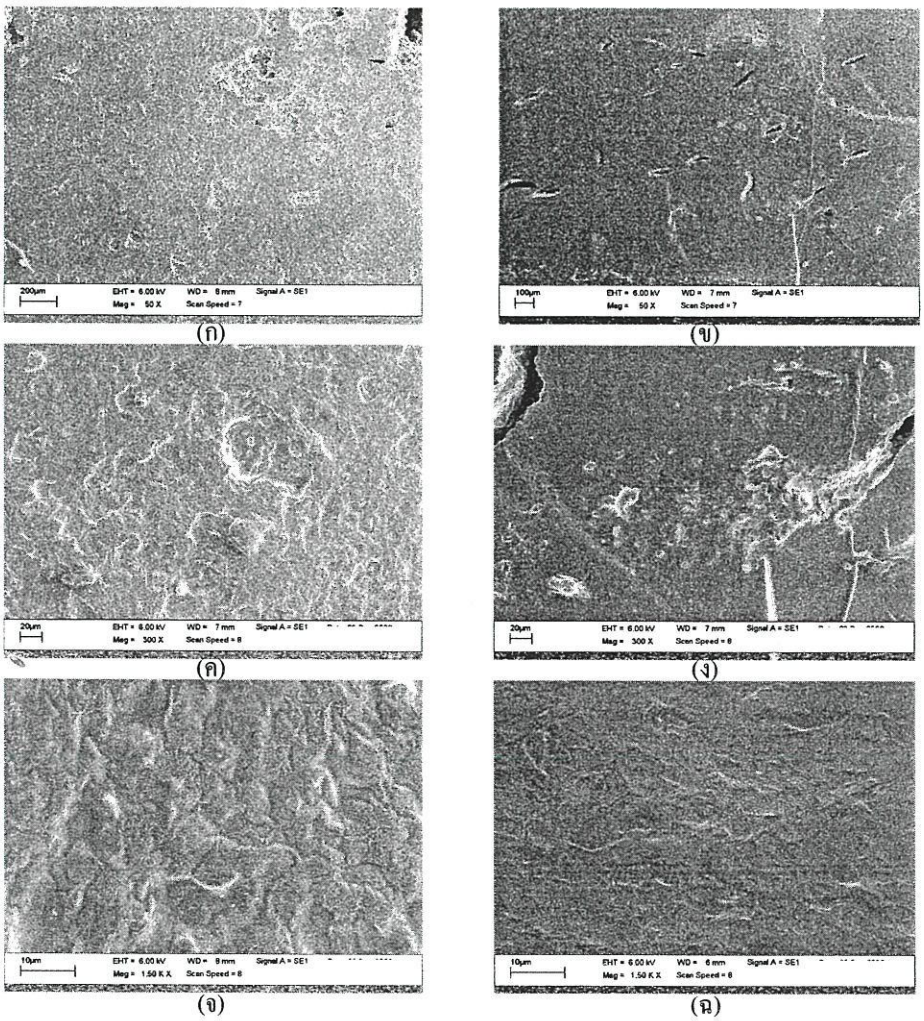
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:0:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C



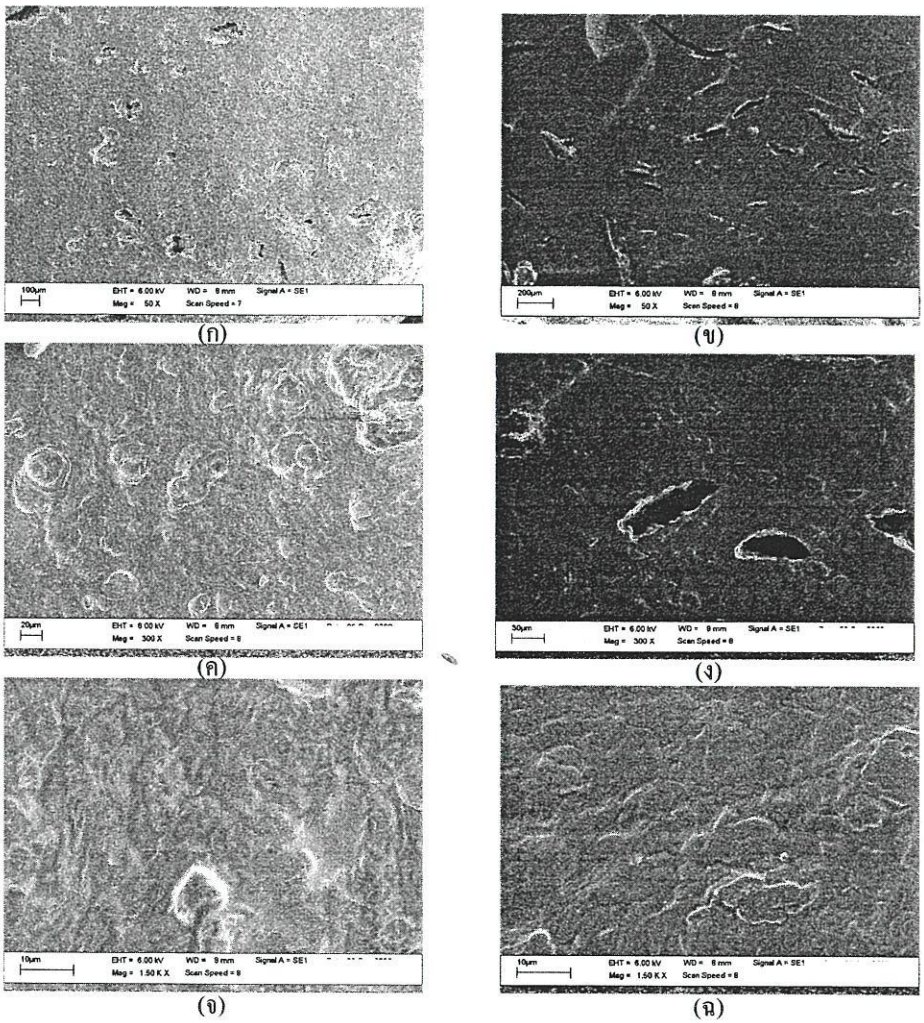
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 0:100:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C



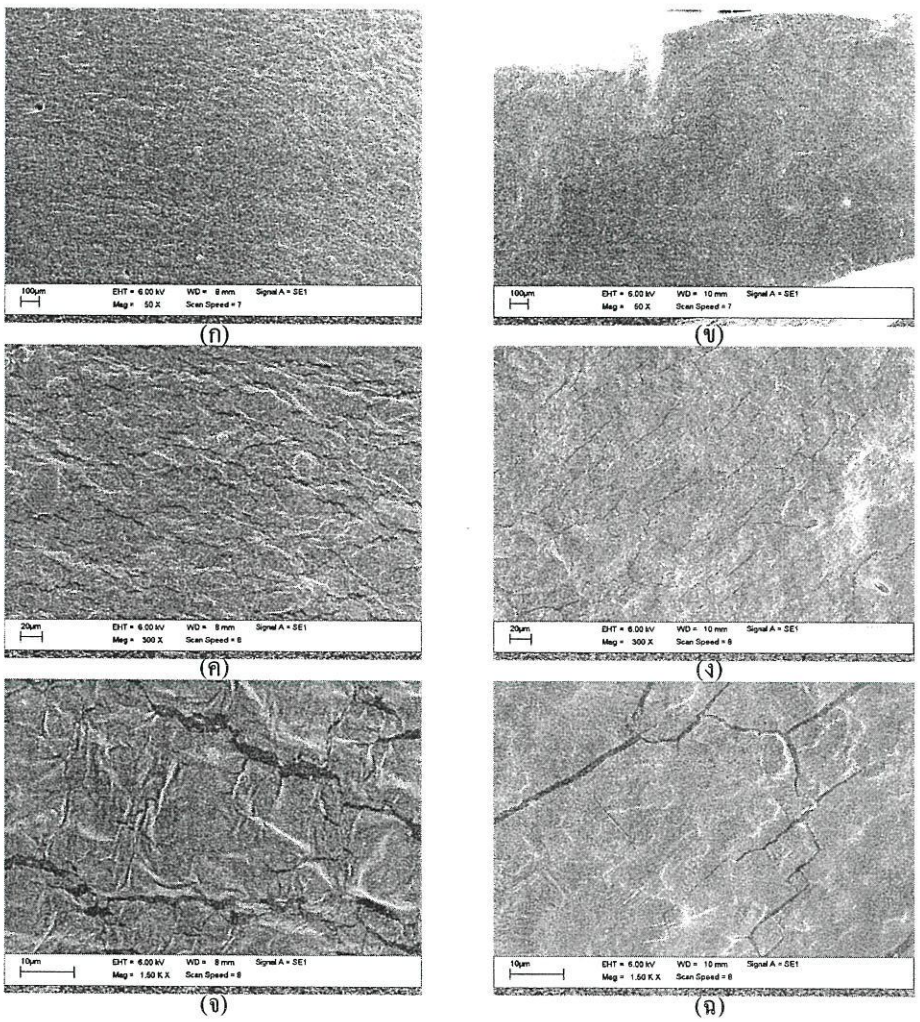
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 0:100:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 100:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C



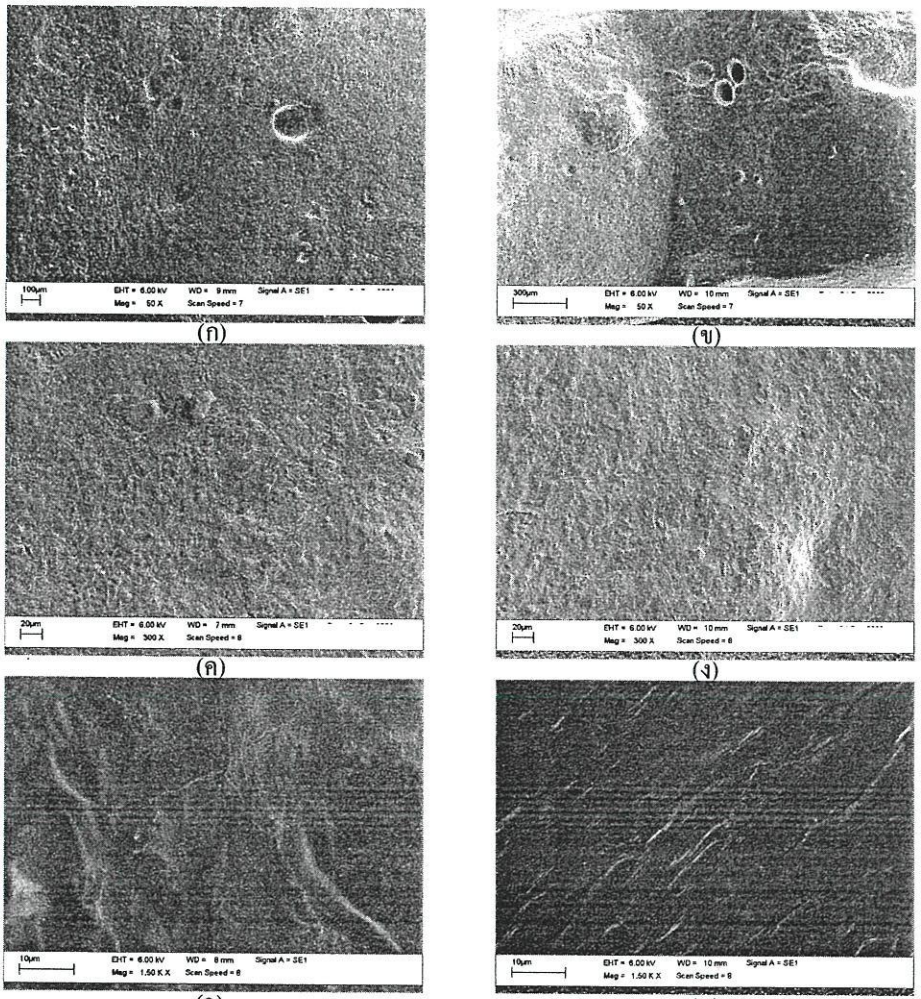
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 0:100:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



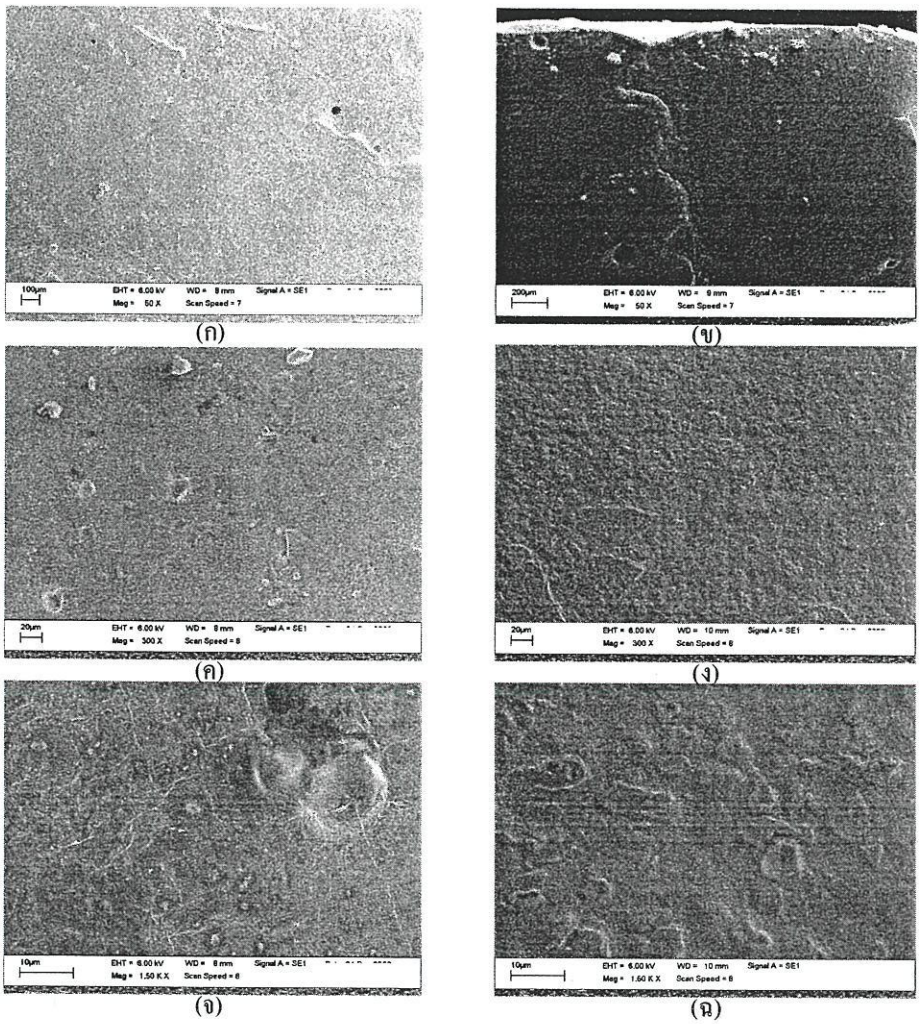
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



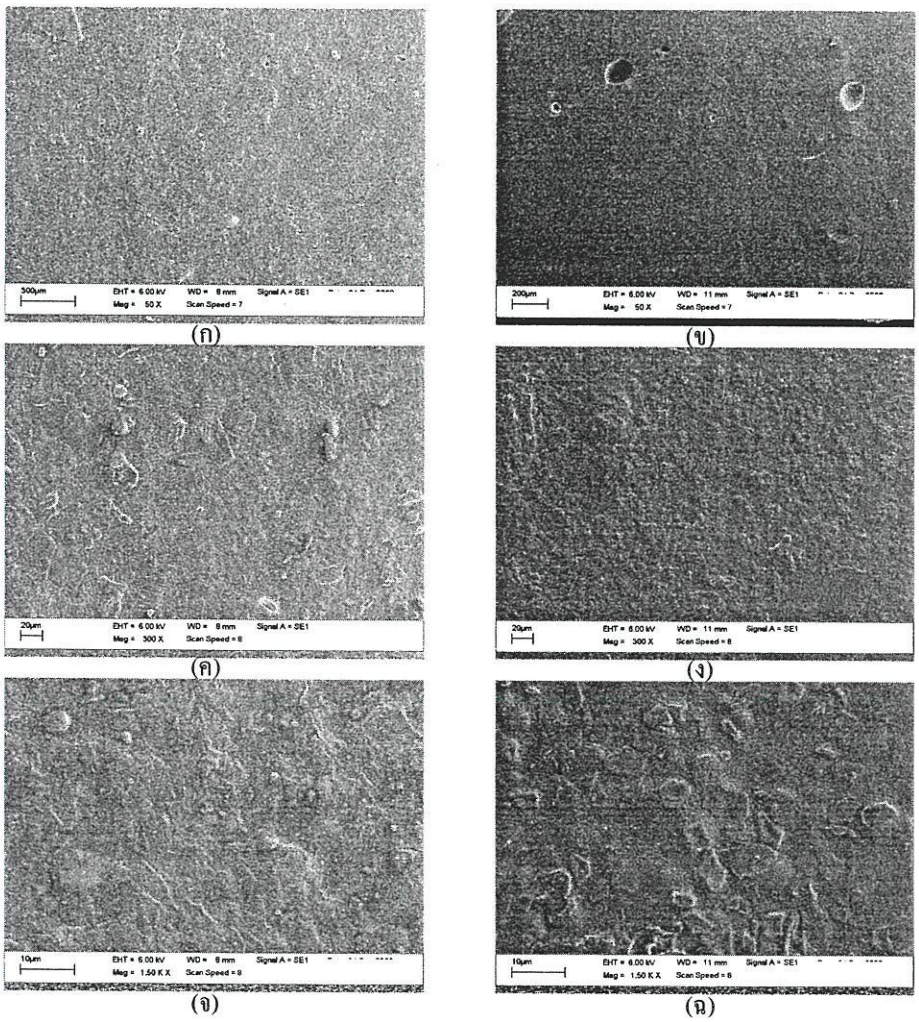
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



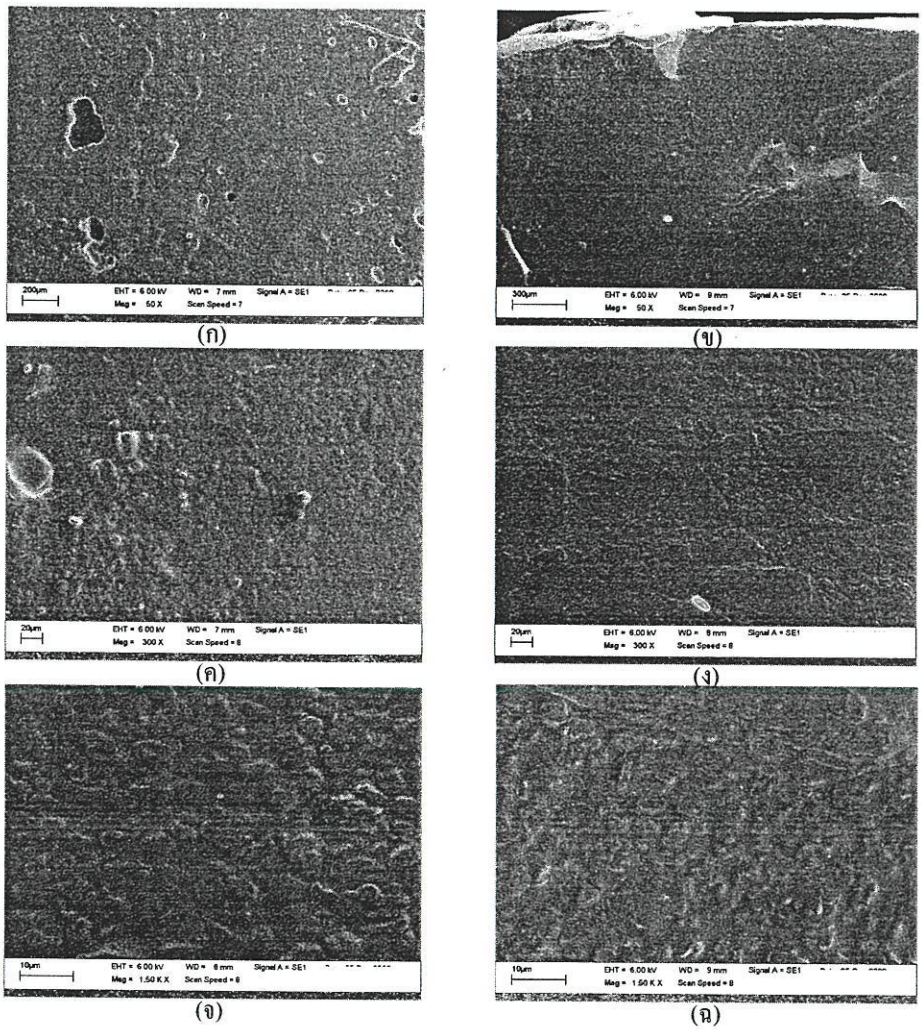
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



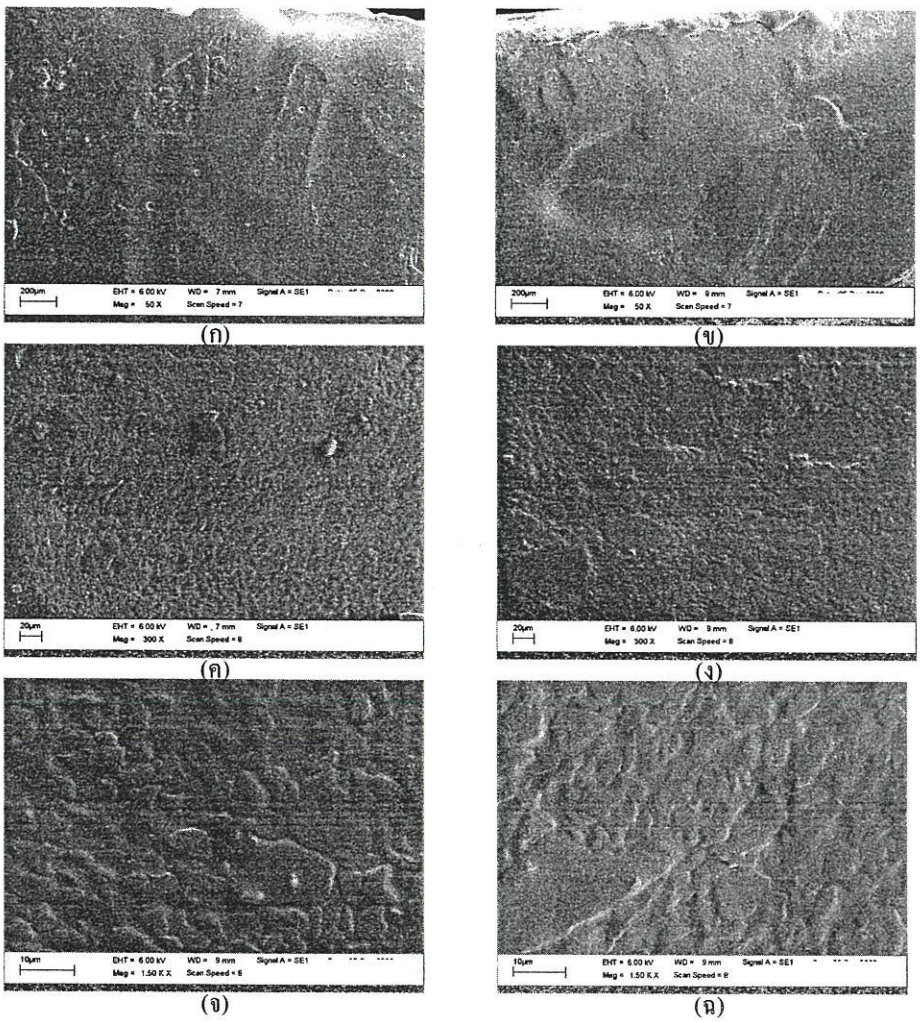
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 75:25:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

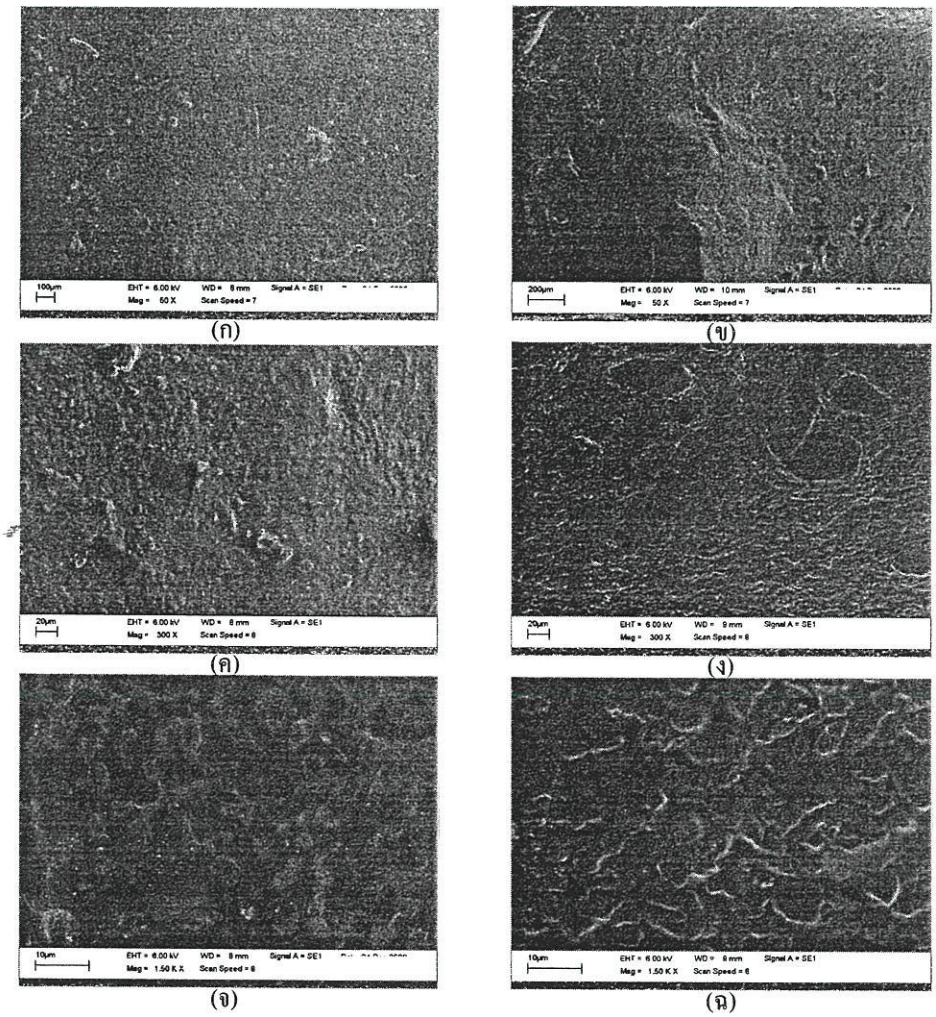
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ)

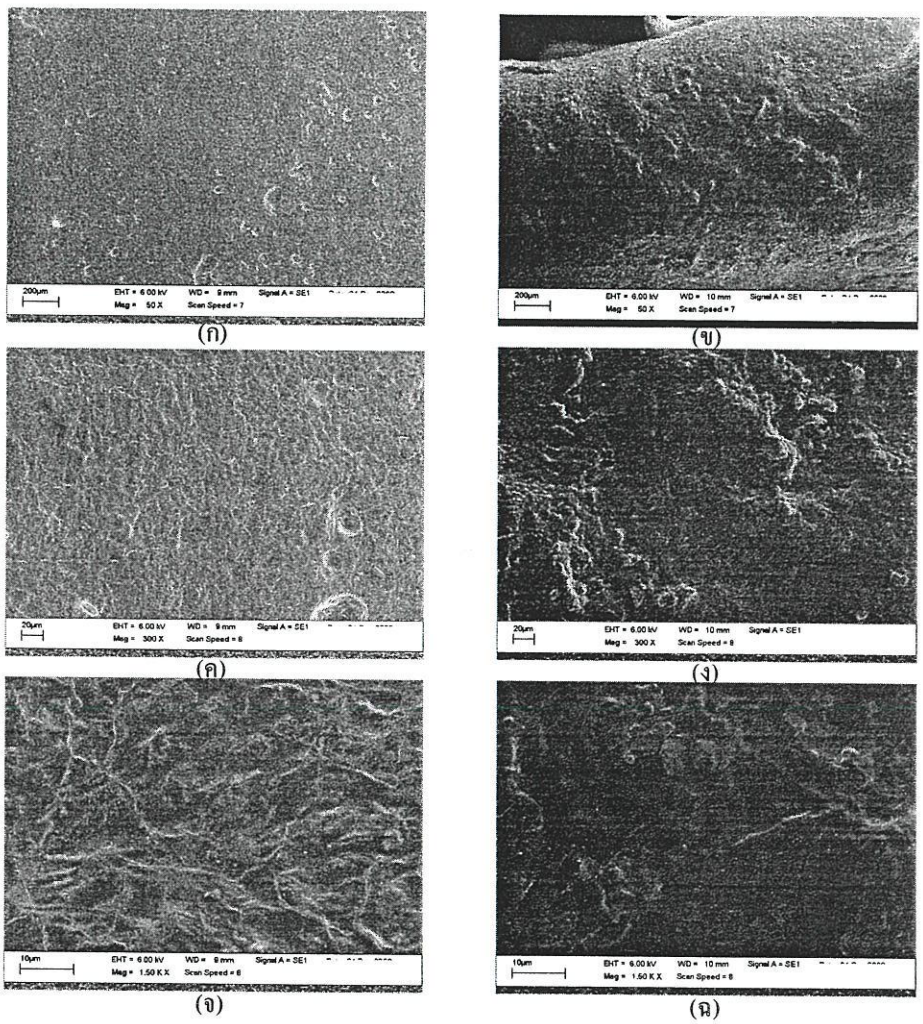
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



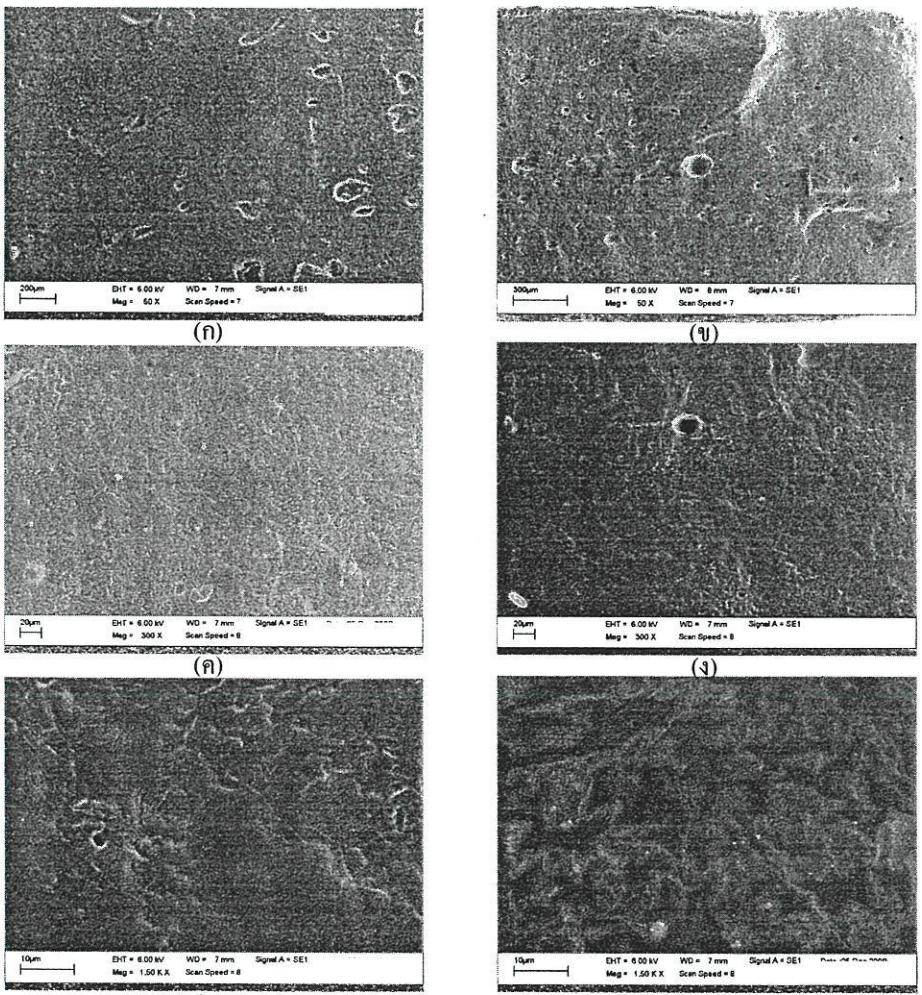
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 50:50:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

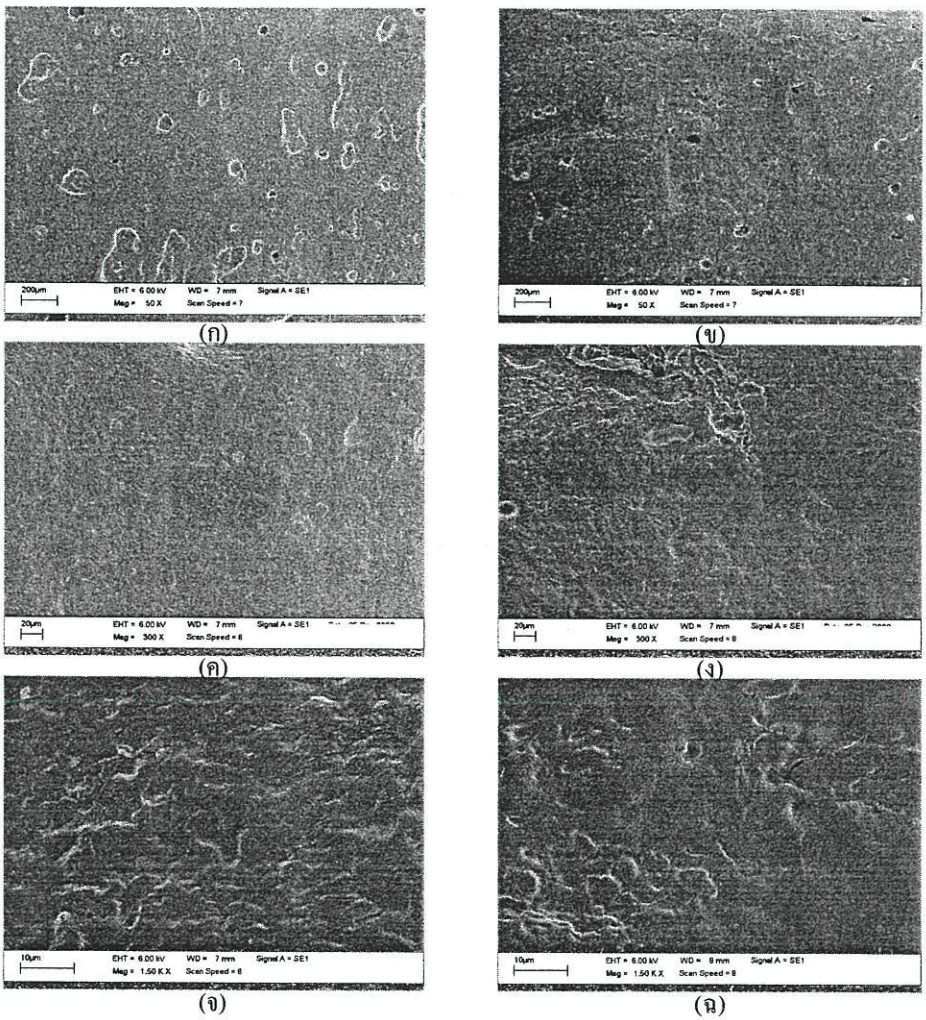
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ)

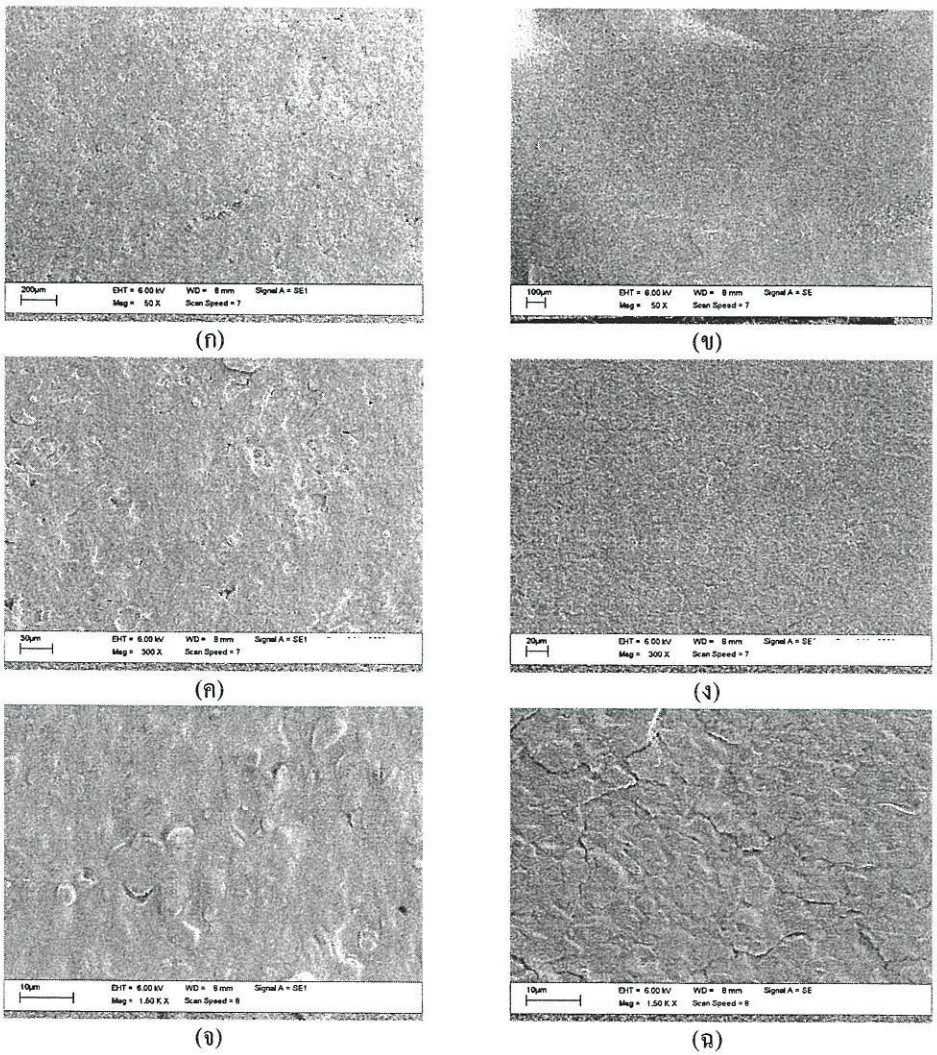
รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:75 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



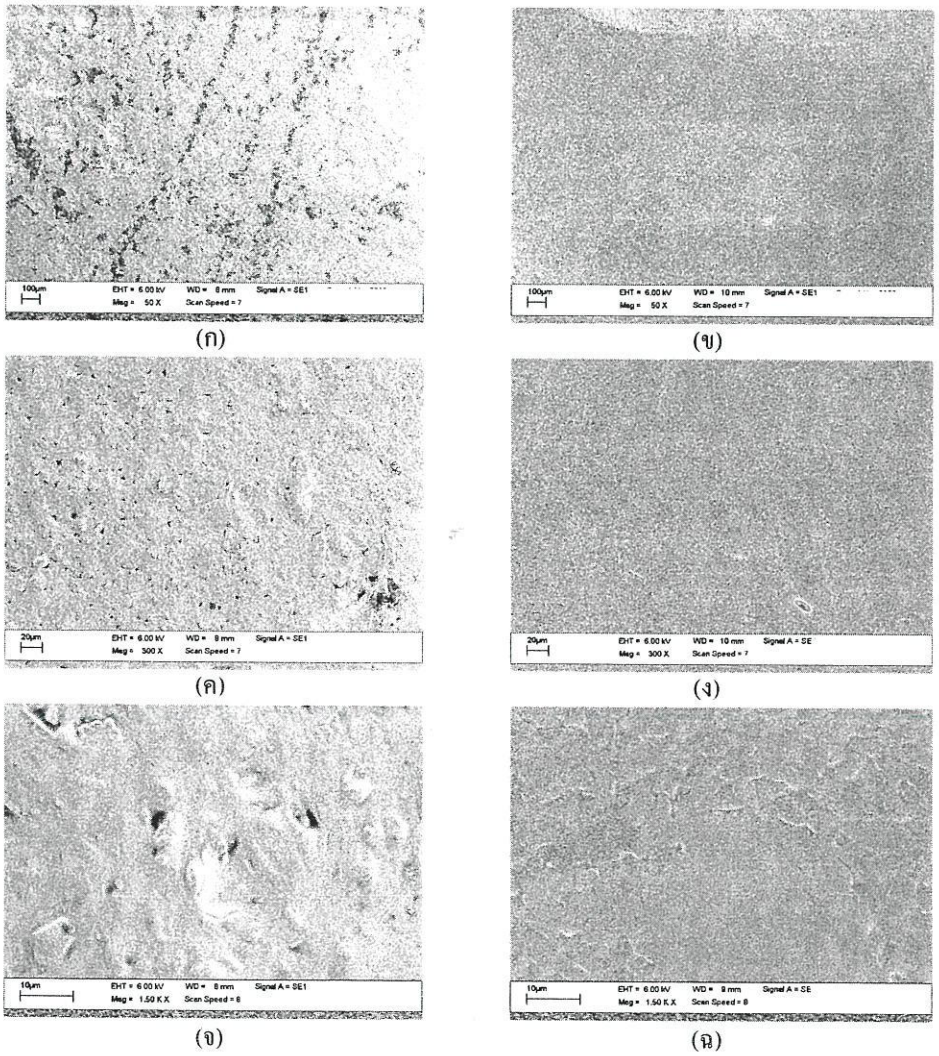
(ก) (ข)

(ค) (ง)

(จ) (ฉ)

รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ)

รูป (ก), (ค) และ (จ) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวและ รูป (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงให้เห็นลักษณะภาคตัดขวางของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 25:75:50 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ที่กำลังขยาย 50, 300 และ 1500 เท่าตามลำดับ

ภาคผนวก ง

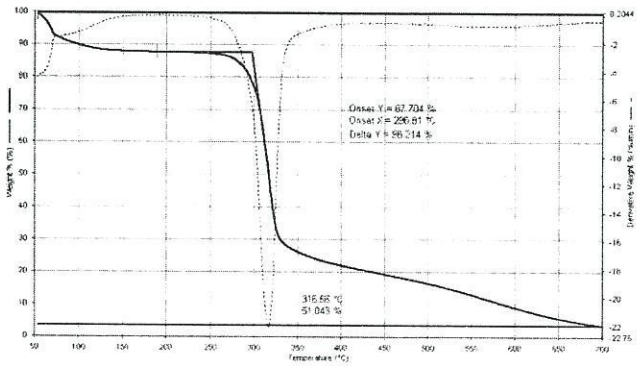
เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน

$$\%\text{ความชื้นในดิน} = \frac{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ (g)}}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ (g)}} \times 100$$

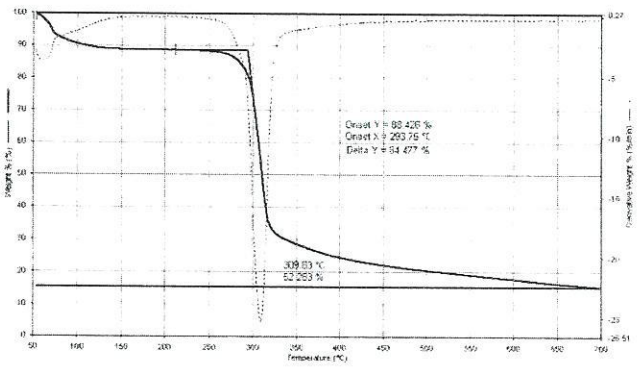
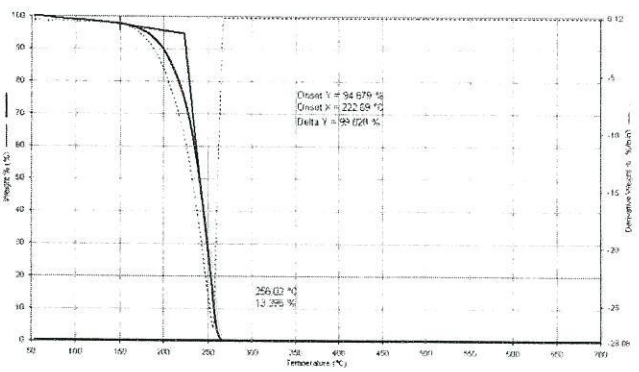
ภาคผนวก จ

สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

แป้งข้าวเหนียว



แป้งข้าวเจ้า



กลีเซอรอล