

สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้า
เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC RICE STARCH
COMPOSITES REINFORCED BY DIFFERENT
TYPES OF FIBERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-014-048

สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้า
เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC RICE STARCH
COMPOSITES REINFORCED BY DIFFERENT
TYPES OF FIBERS



T117087

วัลลดา หวานเสนาะ

WALLADA HWANSANOET

วท
๖๔๔๖
๑๖๖๓

สาขา...
เลขทะเบียน... 117087
วันเดือนปี... 23 ส.ย. 2554

b. 12332677
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-014-048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PROPERTIES OF THERMOPLASTIC RICE STARCH
COMPOSITES REINFORCED BY DIFFERENT
TYPES OF FIBERS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOG
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-SC-M-014-048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด
(Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by different types of fibers)

นักศึกษา นางสาววัลลดา หวานเสนาะ

รหัสประจำตัว 51067914


ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
ผศ.ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2553 เวลา 9.00 – 12.00 น.
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัตน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 23 เดือน ๑๐ พ.ศ. ๕๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด
นักศึกษา	นางสาววัลลดา หวานเสนาะ
รหัสประจำตัว	51067914
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยการใช้แป้งข้าวเจ้ามาเป็นส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมกลีเซอรอลกับแป้งเป็น 1:1 และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยไนลอน ทำการเตรียมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียส และ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่า ผลการใช้เส้นใยชนิดต่าง ๆ เสริมองค์ประกอบร่วมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในปริมาณต่าง ๆ (5-15% ของน้ำหนักแป้ง) และความยาวต่าง ๆ (2-10 มิลลิเมตร) ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใย 10% ของน้ำหนักแป้ง ความยาว 2 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนการดูดซับความชื้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง และเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์แป้งได้ นอกจากนี้พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ และจากการศึกษานี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย

Thesis Title	Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by different types of fibers
Student	Ms. Wallada Hwansanoet
Student ID.	51067914
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jutarat Prachayawarakorn

ABSTRACT

This research aimed to study on modification of thermoplastic starch (TPS) prepared from rice starch using glycerol as a plasticizer at the ratio of starch : glycerol; 1:1. Properties of the TPS were improved by reinforcing the TPS with cotton fibers, palmyra palm fibers, silk fibers, polyester fibers and nylon fibers. Starch and glycerol were mixed using a high-speed mixer, then compounded using an internal mixer at temperature of 170 °C and the rotor speed of 40 rpm. The specimens were shaped with compression molding. The effect of fiber contents (5-15 %wt) and lengths (2-10 mm) on the properties of the TPS was examined. It was found that the mechanical properties of TPS increased with increasing fiber contents. The incorporation of the fibers at 10% wt fibers and 2 mm length into the TPS matrix resulted in the best mechanical properties. Besides, water absorption of the TPS samples was clearly reduced by the addition of the fibers. For morphology, obtained from Scanning Electron Microscope (SEM), the results illustrated that the fibers were well distributed and compatible with the TPS matrix. In addition, thermal stability and biodegradability were improved by using the fibers. From this study, the best overall properties was obtained from the TPS reinforced by cotton fiber.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาาร์ชคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด (Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by different types of fibers) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และได้รับความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ผู้จัดทำ จากบุคคลากรและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่กรุณาได้รับเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ และ ผศ.ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และ คุณสุคนธ์ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาววัลลดา หวานเสนาะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XI
สัญลักษณ์และคำย่อ	XVII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้	5
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	5
2.1.2 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ	7
2.2 คอมโพสิต	12
2.2.1 เมทริกซ์	13
2.2.2 ส่วนเสริมแรง	16
2.3 แป้ง	18
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	18
2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง	18
2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง	19
2.3.4 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	22
2.3.5 สมบัติของแป้ง	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 แป้งข้าวเจ้า	25
2.4 เส้นใย	27
2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใย	27
2.4.2 ประเภทของเส้นใย	27
2.4.3 สัณฐานวิทยาของเส้นใย	28
2.4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย	29
2.4.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย	29
2.5 เส้นใยเซลลูโลส	30
2.5.1 เส้นใยฝ้าย	31
2.5.2 เส้นใยตาล	34
2.6 เส้นใยโปรตีน	35
2.6.1 เส้นใยไหม	36
2.7 เส้นใยสังเคราะห์	39
2.7.1 เส้นใยพอลิเอสเตอร์	39
2.7.2 เส้นใยไนลอน	41
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	49
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	49
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	51
3.3 วิธีการทดลอง	53
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า	53
3.3.2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า	53
3.3.3 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ	53
3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่ได้	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
4.1 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย	60
4.1.1 การวัดสี	60
4.1.2 การดูดซับความร้อน	61
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	64
4.1.4 XRD	65
4.1.5 สัมฐานวิทยา	67
4.1.6 สมบัติเชิงกล	72
4.1.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	74
4.1.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	76
4.2 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล	78
4.2.1 การวัดสี	78
4.2.2 การดูดซับความร้อน	79
4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	81
4.2.4 XRD	82
4.2.5 สัมฐานวิทยา	84
4.2.6 สมบัติเชิงกล	86
4.2.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	89
4.2.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	90
4.3 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหม	93
4.3.1 การวัดสี	93
4.3.2 การดูดซับความร้อน	94
4.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 XRD	97
4.3.5 สัมฐานวิทยา	99
4.3.6 สมบัติเชิงกล	102
4.3.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	104
4.3.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	106
4.4 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าเปรียบเทียบกับ เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	108
4.4.1 การวัดสี	108
4.4.2 การดูดซับความชื้น	109
4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	111
4.4.4 XRD	113
4.4.5 สัมฐานวิทยา	114
4.4.6 สมบัติเชิงกล	117
4.4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	119
4.4.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	122
4.5 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุง สมบัติด้วยเส้นใยไพลอน	124
4.5.1 การวัดสี	124
4.5.2 การดูดซับความชื้น	125
4.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	127
4.5.4 XRD	128
4.5.5 สัมฐานวิทยา	130
4.5.6 สมบัติเชิงกล	132
4.5.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	134
4.5.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	137
4.6 ผลของชนิดเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ	139
4.6.1 การวัดสี	139
4.6.2 การดูดซับความชื้น	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR	141
4.6.4 XRD	142
4.6.5 สัณฐานวิทยา	143
4.6.6 สมบัติเชิงกล	145
4.6.7 สมบัติพลวัตเชิงกล	147
4.6.8 สมบัติทางความร้อน	150
4.6.9 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	152
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	153
5.1 สรุปผลการวิจัย	153
5.2 ข้อเสนอแนะ	154
เอกสารอ้างอิง	155
ภาคผนวก	161
ประวัติผู้เขียน	181

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพ	7
2.2 ประเภทพลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบ	9
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่ผลิตเพื่อการค้า	10
2.4 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	19
2.5 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	21
2.6 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	22
2.7 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก	25
2.8 สมบัติของเป็งข้าวเจ้า	26
2.9 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย	34
2.10 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยตาล	35
3.1 องค์ประกอบของเป็งข้าวเจ้า	49
3.2 องค์ประกอบของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยตาล	50
3.3 สมบัติของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ BHT.1500-144 P100L	50
3.4 สมบัติของเส้นใยไนลอน รุ่น 70-24 I/L	51
3.5 ความยาวและขนาดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ	54
3.6 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ	55
3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้	55
4.1 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากเป็งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้าย	60
4.2 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย	74
4.3 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากเป็งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยตาล	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล	89
4.5 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าและ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยไหม	93
4.6 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม	104
4.7 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าและ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์	108
4.8 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์	121
4.9 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าและ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยในลอน	124
4.10 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน	136
4.11 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเตอร์และเส้นใยในลอน	139
4.12 ผลของชนิดเส้นใยต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ	149
4.13 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างของสารตัวเติม (ก) อนุภาค (ข) เส้นใยสั้น และ (ค) แผ่น	13
2.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	14
2.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต	15
2.4 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก	15
2.5 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์	16
2.6 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	17
2.7 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle)	19
2.8 โครงสร้างของอะไมโลส	20
2.9 โครงสร้างอะไมโลเพกติน	21
2.10 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	24
2.11 กลไกการคืนตัวของแป้ง	24
2.12 แผนภาพกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า	26
2.13 ลักษณะส่วนที่เป็นระเบียบ (ที่จัดเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย) ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ และส่วนที่เป็นช่องว่าง	30
2.14 โครงสร้างทางเคมีของ โมเลกุลเซลลูโลส	30
2.15 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึก และอสัณฐานของเซลลูโลส	31
2.16 การแยกเส้นใยฝ้ายออกจากดอกฝ้าย	32
2.17 โครงสร้างซ้ำของ poly (1,4- β -D-anhydroglucopyranose)	32
2.18 สัมฐานวิทยาของเส้นใยฝ้าย	33
2.19 ต้นตาล โคนดและผลตาล โคนด	34
2.20 โครงสร้างของเซลลูโลสที่อยู่ภายในผนังเซลล์	35
2.21 องค์ประกอบพื้นฐานของกรโคอะมิโน	36
2.22 วงจรชีวิตของหนอนไหม	37
2.23 โมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวเหยียดของไหม	38
2.24 โครงสร้างของเส้นใยไหม	38
2.25 กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิด PET	40

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 กระบวนการดิ่งแบบ melt spinning	40
2.27 กระบวนการผลิตเส้นใยในลอน 6 ชนิดเส้นด้ายใยขาว รวมทั้งชนิด POY และ FDY	43
3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย	52
3.2 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	56
4.1 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยฝ้าย	62
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงและ ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย	64
4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และเส้นใยเซลลูโลส	65
4.4 ดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้า และเส้นใยฝ้าย	66
4.5 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยฝ้าย	66
4.6 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า	68
4.7 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย	70
4.8 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย	71
4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย	72
4.10 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยฝ้าย	75
4.11 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย	76
4.12 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินของ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยฝ้าย	77
4.13 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยตาล	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใย คาล	81
4.15 คิฟแฟร็กโตแกรมของ แป้งข้าวเจ้า และเส้นใยคาล	82
4.16 คิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยคาล	83
4.17 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยคาล	84
4.18 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยคาล	85
4.19 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยคาล	88
4.20 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยคาล	90
4.21 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยคาล	91
4.22 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยคาล	92
4.23 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยไหม	94
4.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม	96
4.25 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเส้นใยไหม	97
4.26 คิฟแฟร็กโตแกรมของแป้งข้าวเจ้า และเส้นใยไหม	97
4.27 คิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยไหม	98
4.28 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไหม	100
4.29 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไหม	101
4.30 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยไหม	103

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยไหม	105
4.32 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่มีการปรับปรุงและ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม	106
4.33 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชผสมเส้นใยไหม	107
4.34 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์	109
4.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและ ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	112
4.36 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ช และเส้นใยพอลิเอสเทอร์	112
4.37 ดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้า และเส้นใยพอลิเอสเทอร์	113
4.38 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ที่ไม่มีการปรับปรุงและ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์	114
4.39 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	115
4.40 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	116
4.41 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	118
4.42 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใย พอลิเอสเทอร์	120
4.43 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่มีการปรับปรุงและ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์	122
4.44 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินของ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่มีการปรับปรุงและผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์	123
4.45 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ที่ผสมเส้นใยไนลอน	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน	127
4.47 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเส้นใยในลอน	128
4.48 ดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้า และเส้นใยในลอน	128
4.49 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยในลอน	129
4.50 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยในลอน	130
4.51 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยในลอน	131
4.52 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยในลอน	133
4.53 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยในลอน	135
4.54 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน	137
4.55 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงและผสมเส้นใยในลอน	138
4.56 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยคาล เส้นใยไหม เส้นใยในลอน และเส้นใยพอลิเอสเตอร์	140
4.57 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ	141
4.58 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ	142
4.59 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	143
4.60 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.61 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm	147
4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม (E') และมอดุลัสสูญเสีย (E'') กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	148
4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	148
4.64 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิด ต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	151
4.65 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm	152

สัญลักษณ์และคำย่อ

TPS	Thermoplastic starch
T_m	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
ASTM	วิธีการทดสอบตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials)
POY	Pre-oriented yarn
FDY	Fully drawn yarn
T_d	Decomposition temperature
X_c	ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)
E'	Storage modulus
E''	Loss modulus
TGA	Thermogravimetric analyzer
SEM	Scanning electron microscope
XRD	X-ray Diffractometer
FTIR	Fourier transform infrared spectrophotometer
DMTA	Dynamic mechanical thermal analysis

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทุกวันนี้มีการใช้พลาสติกในปริมาณมาก ซึ่งจากปริมาณการใช้พลาสติกจนกลายเป็นปัญหาขยะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ซึ่งพลาสติกจากปิโตรเคมีเหล่านี้ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายร้อยปี และหากนำมาเผาทำลายจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจนนำไปสู่ภาวะโลกร้อน (Global Warming) แม้ในปัจจุบันจะมีการใช้เทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดภาวะโลกร้อนได้โดยที่พลาสติกเหล่านี้เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) แต่การที่จะทำให้พลาสติกเหล่านี้เกิดการย่อยสลายต้องใช้ระยะเวลาอันจึงส่งผลให้ยังคงมีปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ สำหรับในประเทศไทย ปัญหาด้านปริมาณขยะในภาพรวมยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณขยะเกิดขึ้นทั่วประเทศถึง 14.63 ล้านตัน [1] วิธีการหลักที่ใช้กำจัดขยะ คือ การนำไปฝังกลบ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีความอุดมสมบูรณ์ในเรื่องของวัตถุดิบเกษตร เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และถั่วต่างๆ ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกชีวภาพ อีกทั้งประเทศไทยยังสามารถผลิตข้าวและมีข้าวเป็นสินค้าส่งออกอันดับ 1 ของโลก จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรพบว่า การส่งออกของไทย ในแต่ละปีไทยส่งออกข้าวประมาณร้อยละ 40-45 ของปริมาณผลผลิต ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2547-2551) ปริมาณการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 9.98 ล้านตันข้าวสาร ในปี 2547 เป็น 10.57 ล้านตันข้าวสาร ในปี 2551 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 3.35 และแนวโน้มยังคงเพิ่มสูงขึ้นในปี 2552 โดยสร้างมูลค่าการส่งออกข้าวถึง 194,217 ล้านบาท [2] แป้ง (Starch) เป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีราคาถูก แป้งข้าวเจ้าเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มาจากข้าว จากการสำรวจของบริษัทผู้ผลิตแป้งข้าวเจ้าส่งออก พบว่าประมาณ 70-80% ของปริมาณการผลิตแป้งข้าวเจ้า จะส่งออกจำหน่ายต่างประเทศ และส่วนที่เหลือจะจำหน่ายเพื่อการบริโภคในประเทศ

แป้ง (Starch) ในรูปของเม็ดแป้งโดยทั่วไปไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปโดยเทคโนโลยีที่ใช้กับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดแป้ง ($T_m \sim 220-240^\circ\text{C}$) สูงกว่าอุณหภูมิสลายตัว ($T_d \sim 220^\circ\text{C}$) ส่งผลให้เม็ดแป้งสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว การผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ เช่น น้ำ กลิเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น ในสภาวะที่มีการให้

ความร้อน ความดัน และแรงเฉือนกับแป้งที่ผสมพลาสติกไซเซออร์ ทำให้ได้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นเส้นใยที่มนุษย์รู้จักมาเป็นเวลานานประกอบด้วยเส้นใยที่มาจากเซลลูโลส เช่น ฝ้าย (Cotton) เป็นเส้นใยพืชที่ใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในรูปของเส้นใยฝ้าย 100 % หรือใช้ร่วมกับเส้นใยอื่น ๆ อีกทั้งมีการเพาะปลูกอยู่ทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทยเอง ปอกระเจา (Jute) ลิ้นจี่ (Flax) เป็นต้น และเส้นใยโปรตีน เช่น ขนแกะ (Wool) ไหม (Silk) ไหม จัดเป็นสิ่งทอที่ล้ำค่า จนได้รับสมญานามว่า ราชนิแห่งเส้นใย มีการใช้งานหลากหลายทั้งด้านสิ่งทอ เครื่องสำอาง การแพทย์และอื่น ๆ [3] นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติจากต้นตาล โคนดเป็นอีกเส้นใยหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากส่วนที่เหลือทิ้ง นั่นคือการนำผลที่เหลือจากการคั้นเอาน้ำตาลออกแล้วมาใช้ นอกจากนี้ในบางจังหวัดยังนิยมนำเส้นใยตาลที่ได้จากกาบมาประดิษฐ์เป็นเครื่องจักรสานต่าง ๆ อาทิ เช่น ตะกร้า ชั้นวางของ ที่ใส่ขวดไวน์ เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติมีลักษณะเฉพาะตัวและมีความหลากหลาย โดยขึ้นกับปัจจัยทางธรรมชาติหลาย ๆ อย่าง มีข้อดี เช่น หาง่าย ราคาถูก ช่วยลดต้นทุนการผลิต น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นต้น จึงทำให้ยังคงเป็นชนิดเส้นใยที่มีความต้องการสูง แม้ว่าเส้นใยประดิษฐ์มีปริมาณการผลิตมากขึ้นก็ตาม

เส้นใยไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่มีมนุษย์ค้นพบโดยมีลักษณะ โครงสร้างของโมเลกุลที่คล้ายคลึงกับที่เกิดในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือ ไหม ซึ่งมีสมบัติเด่นต่างจากเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ ด้วยความแข็งแรงสูง ทนต่อความร้อน และต่อมาได้มีการค้นพบเส้นใยพอลิเอสเทอร์ตามมา โดยที่ประเทศไทยมีอัตราการผลิตค่อนข้างมาก ทั้งชนิด Filament yarn (P/FY), Pre-oriented yarn (P/POY) และ Staple fiber (P/SF) โดยมีกำลังการผลิตแบ่งออกเป็นชนิด P/FY 102,000 ตันต่อปี ชนิด P/POY 182,140 ตันต่อปี ชนิด P/SF 410,200 ตันต่อปี รวมทั้งสิ้น 694,340 ตันต่อปี วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยทั่วไปจะใช้กรดเทเรพทาสิกที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้ว (Purified terephthalic acid, PTA) หรือใช้ไดเมทิลเทเรพทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) และ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) [3]

จากการศึกษาพบว่าแนวทางหนึ่งในการช่วยลดปริมาณพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากหรือใช้ระยะเวลานาน คือ การใช้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) เพื่อทดแทนพลาสติก อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความว่องไวต่อความชื้น ความยืดหยุ่นหรือความอ่อนตัว สมบัติเชิงกลที่ต่ำ และการทนต่อความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสังเคราะห์อื่นๆ

ปัญหาของข้อจำกัดการใช้งานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีหลายวิธีแก้ไข ที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย อาทิ เช่น การดัดแปร โครงสร้างทางเคมี การผสมทางกายภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิเมอร์อื่นๆ และการผลิตวัสดุคอมโพสิต (Composite material) ที่มีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์เพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับพอลิเมอร์อื่น แต่วิธีเหล่านี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก อีกทั้งองค์ประกอบหลักบางส่วนไม่สามารถย่อยสลาย หรือสามารถย่อยสลายได้ แต่มีราคาค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมา [4] มีการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการศึกษาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนักและมีการดูดซับความชื้นสูง ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาρχด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น และทำให้สมบัติการดูดซับความชื้นลดลง นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายยังส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดเพื่อปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาρχให้มีสมบัติโดยรวมที่ดีขึ้น โดยใช้วัตถุดิบที่หาง่าย มีราคาต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ภาพรวมของงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการเตรียม การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้า โดยมุ่งศึกษาถึงการนำเส้นใยชนิดต่าง ๆ มาเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาρχเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลดการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาρχ สำหรับเส้นใยที่ใช้ได้แก่เส้นใยจากธรรมชาติ คือ เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นไหม และเส้นใยสังเคราะห์ คือ เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และ เส้นใยไนลอน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้า (Thermoplastic rice starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใย

2.ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ รวมถึงปริมาณและความยาวต่างกัน

3.ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้า เช่น สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งข้าวเจ้าที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งข้าวเจ้า โดยมีเส้นใยฝ้าย ไหม คาล ในลอน และพอลิเอสเตอร์ เป็นสารเสริมแรง
3. ศึกษาขนาดและปริมาณของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่เหมาะสม
4. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่เตรียมได้ ได้แก่
 - 4.1 สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
 - 4.2 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดซับความชื้น (Water absorption) การวัดสี (Color measurement)
 - 4.3 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyzer (TGA)
 - 4.4 สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)
 - 4.5 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)
 - 4.6 สมบัติพลวัตเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)
 - 4.7 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งข้าวเจ้า โดยมีเส้นใยฝ้าย ไหม คาล ในลอน และพอลิเอสเตอร์ซึ่งมีสมบัติโดยรวมดีขึ้น
2. ทราบปริมาณและความยาวของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่เสริมแรงด้วยเส้นใย
3. ทราบชนิดของเส้นใยที่เหมาะสมต่อการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ทำให้สมบัติโดยรวมดีขึ้น
4. ส่งเสริมการนำวัสดุจากธรรมชาติไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้กว้างขึ้นและเพิ่มมูลค่าให้กับฝ้าย ไหม และคาล

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ [5]

ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาที่ต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น มีกฎข้อบังคับ รวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลก ได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

- ASTM D6400-99 – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย
- ISO 472:1998 – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น
- BPS Japan (1994) – พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [5-6]

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) ว่าหมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากมีสมบัติที่เปลี่ยนไป แบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โพลีเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH)

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไซครายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis)

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะจับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP ก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำ เกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ

2.1.2 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเทอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพ [7-8]

	ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	ประเภทวัตถุดิบ
พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน	แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS)	มีแป้งเป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และผ่านการทำให้เป็นเจลลาติน	แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch-aliphatic polyester blends)	แป้งนำไปผสมกับพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA PCL PBS PBSA	- แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ - พอลิเอสเทอร์เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	แป้งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Starch-PVA blends)	แป้งนำไปผสมกับ PVA	- แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ - PVA จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
พอลิเอสเทอร์	พอลิแลคติกแอซิด (PLA) $\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} - \text{CH} - \text{O} \end{array} \right]_n$	พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง ที่มีกรดแลคติกหรือแลคไทด์เป็นมอนอเมอร์	เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (PHAs) $\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} - (\text{CH}_2)_m - \text{CH} - \text{O} \end{array} \right]_n$	กลุ่มพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง ซึ่งผลิตได้ทางธรรมชาติโดยแบคทีเรีย	เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	ประเภทวัตถุดิบ
พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) $\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} \right]_n$	พอลิเมอร์ที่สามารถละลาย น้ำได้ และการย่อยสลาย ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ ปิโตรเคมี
	พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ด้วย แสง	พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่มี พันธะเคมีที่แตกหักง่าย ภายใต้แสง UV	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ ปิโตรเคมี
	Controlled degradation additive master-batches	พลาสติกที่มีการเติม สารเติมแต่งเพื่อให้สามารถ ย่อยสลาย	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ ปิโตรเคมี

2.1.2.1 พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch-based plastics)

พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานอาจมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 90 แต่พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ต้องมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ขึ้นไป โดยที่ปริมาณแป้งยิ่งมากขึ้นส่งผลให้พลาสติกสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดีขึ้น และทิ้งสารตกค้าง (Recalcitrant residues) ปริมาณน้อยลง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานส่วนใหญ่ถูกผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมรรถนะสูง (High-performance polymers) (เช่น พอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรง และ PVA) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะ และเหมาะสมในการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานสามารถจำแนกได้หลายประเภท ได้แก่ แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (TPS) แป้งผสมพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA PCL PBS Poly(butylenes succinate adipate) (PBSA) และแป้งผสม PVA เป็นต้น

แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง โดยมักมีปริมาณแป้งผสมอยู่สูงกว่า 70 % แต่ส่วนใหญ่ในท้องตลาดพบว่า มีแป้งเป็นส่วนผสมถึง 90 % และมักเกิดจากกระบวนการทำให้แป้งเป็นเจล (Gelatinised) ร่วมกับการเติมสารทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม แป้งที่ได้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไปเช่น การฉีด (Injection) การอัดรีด (Extrusion) [9] ตัวอย่างที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้าเช่น TPS tube ผลิตโดยบริษัท American Excelsior Company เป็นท่อที่ถูกผลิตออกมาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

แป้งผสมแอลิฟาติก พอลิเอสเตอร์ (Starch aliphatic polyester blends) เช่นพอลิคาโพรแลกโตน (PCL) หรือพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การผลิตบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปมักมีการใช้พอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ ประมาณ 50-60 % ผสมกับแป้งและเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารพลาสติกไซเซอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น PLA เป็นพอลิเอสเทอร์แบบกิ่งผลึก ผลิตจากกรดแลคติก (Lactic acid) ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมัก ผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติกเมื่อนำมาแยกให้บริสุทธิ์แล้วจึงนำมาผ่านการสังเคราะห์เป็น PLA ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ (Lactide) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา

แป้งผสมแอโรแมติก พอลิเอสเทอร์ (Starch aromatic polyester blends) แป้งผสมกับพอลิบิวทิลีน ซักซิเนต (PBS) มีการเติมสาร เช่น พอลิเอสเทอร์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride functionalized polyester) ประมาณ 5% โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยให้ผสมเข้ากันได้ดี ลดความเปราะ และเพิ่มความยืดหยุ่น

แป้งผสมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Starch PVOH blends) มีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทก โดยบริษัท Novamont ประเทศอิตาลี โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า Mater-BiTM นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์จากประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ใช้ชื่อทางการค้าว่า NovonTM

ตารางที่ 2.2 ประเภทพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ [7]

ประเภทของพลาสติก	รายละเอียด
แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Starch)	<ol style="list-style-type: none"> <u>การคอมพาวด์</u> <ul style="list-style-type: none"> - TPS มีปริมาณแป้ง (อะไมโลส) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเจลาติน (Gelatinized starch) โดยทั่วไปแป้งมักถูกเติมสารเติมแต่ง เช่น สารปรับสภาพพลาสติก (Plasticizer) ถูกตัดแปร โครงสร้าง และ/หรือ ผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่มีประโยชน์และเหมาะสมในการนำไปใช้งาน และการย่อยสลายทางชีวภาพ <u>การขึ้นรูป</u> <ul style="list-style-type: none"> - TPS สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูป เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป
แป้งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่	<ol style="list-style-type: none"> <u>การคอมพาวด์</u> <ul style="list-style-type: none"> - โดยทั่วไปมักมีการใช้พอลิเอสเทอร์ประมาณร้อยละ 50 - 60 ผสมกับแป้ง เพื่อลดต้นทุนการผลิต และมีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น <u>การขึ้นรูป</u> <ul style="list-style-type: none"> - แป้งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง ใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดเป็นแผ่นฟิล์ม การเป่าเป็นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ [7]

นอกเหนือจากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพแล้ว TPS บางเกรดยังสามารถละลายในน้ำอีกด้วย PBSA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและแสดงสมบัติทางเทอร์โมพลาสติกดีมาก จากการวิจัยพบว่าเป็งผสมกับ PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5 - 30 โดยน้ำหนัก จะมี Tensile strength ต่ำกว่า ที่มี PBSA อย่างเดียว และ Tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณเป็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณเป็งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและสมบัติในการขึ้นรูป

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่ผลิตเพื่อการค้า [7]

สมบัติ	Starch(>85%)/copolyester (Mater-Bi® NF01U)	Starch/PCL (Mater-Bi® ZF03U/A)	Starch/PLA (Bio-flex 219F)
ลักษณะ	N/A*	N/A*	เม็ด, สีน้ำตาล
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.1 - 1.3	1.23	1.38
T _m (°C)	110	64	>125
Decomposition temperature (°C)	N/A*	N/A*	>280
Tensile strength at yield (MPa)	25	31	17.01
Elongation at yield (%)	600	900	319.96
Flexural Modulus (MPa)	120	180	335.6

หมายเหตุ N/A* คือ ไม่มีข้อมูล

2.1.2.3 ความสามารถในการย่อยสลาย

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานจะเกิดขึ้นที่ตัวเชื่อมไกลโคซิดิกระหว่างโมเลกุลน้ำตาล โดยเอนไซม์ ทำให้ความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และง่ายต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวเคมี สำหรับพลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 60 อุณหภูมิของเป็งทำหน้าที่เป็นตัวประสานอย่างอ่อนๆ ในเนื้อพลาสติกและเป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลาย ซึ่งพลาสติกจะแตกตัวเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เท่านั้น แต่จะไม่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์

2.1.2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [6]

2.1.2.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาหน้าหนักแห้ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_d คือ คาร์บอนที่ถูกย่อยสลาย

C_g คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = \frac{C_d}{C_i} \times 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.1.2.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2.1.2.4.3 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphosity) ของพอลิเมอร์ลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายเป็งในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนกับเป็ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณเป็งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.1.2.4.4 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x120 มิลลิเมตร หลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

2.2 คอมโพสิต (Composites) [10]

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุประกอบ (Composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่คนละวิถุภาค และทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติดีขึ้นมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุประกอบหรือคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในปัจจุบัน โดยเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูงขึ้นรูปได้ง่าย ความเสถียรในรูปร่าง และต้นทุนการผลิตต่ำ คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 2.1-2.2

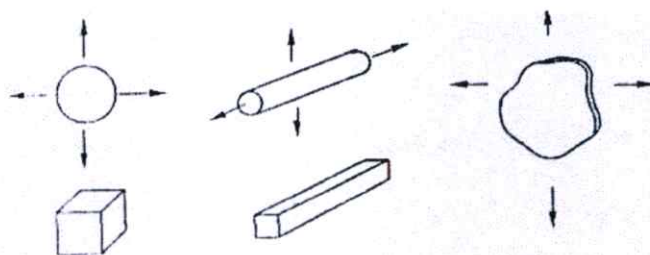
1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Staple fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Filament fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง ตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)



รูปที่ 2.1 รูปร่างของสารตัวเติม (ก) อนุภาค (ข) เส้นใยสั้น และ (ค) แผ่น [10]

นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรงตามรูปที่ 2.2 คอมโพสิตมีองค์ประกอบหลัก คือ

2.2.1 เมทริกซ์ (Matrix)

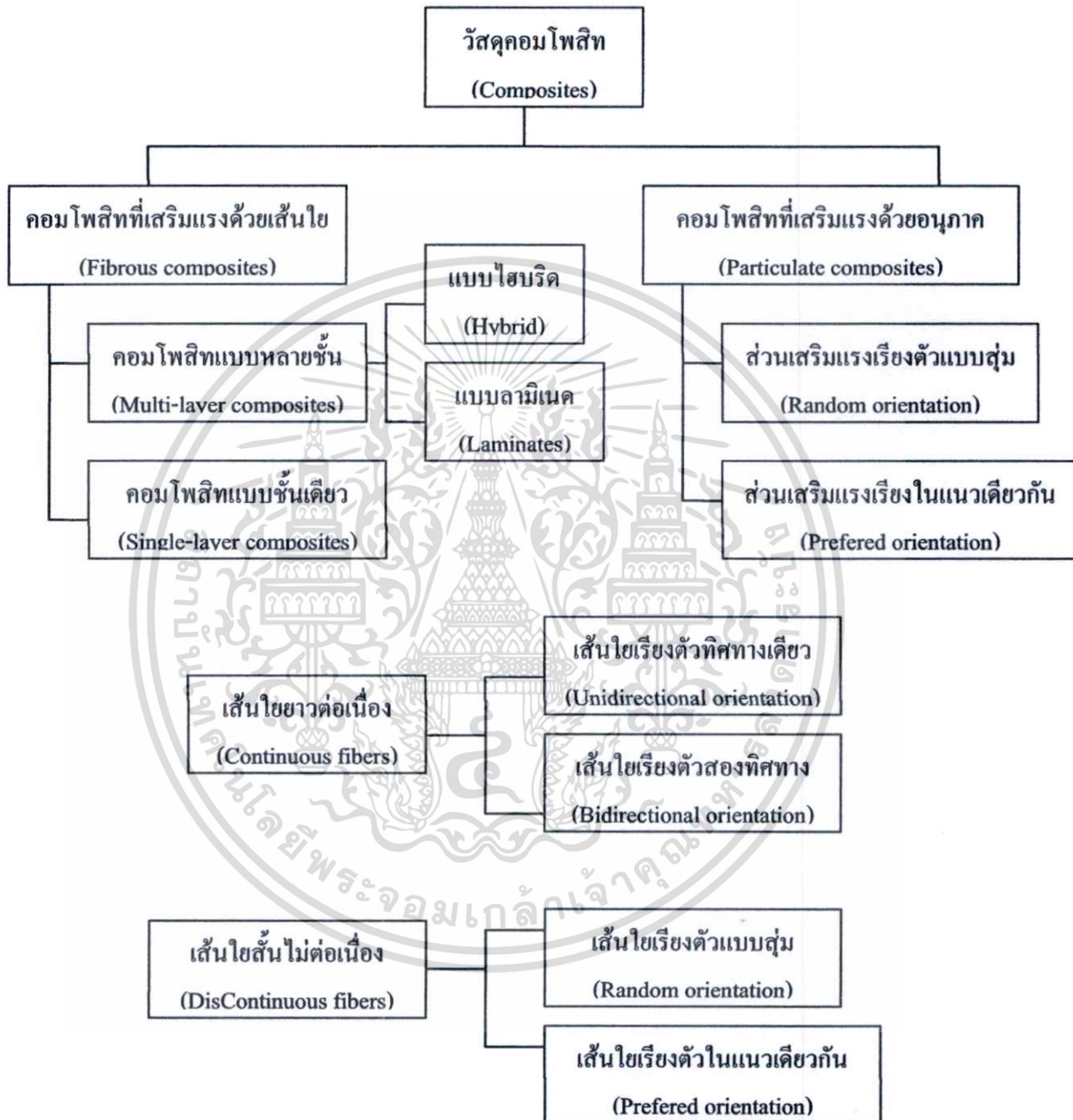
เป็นวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นโครงสร้างของคอมโพสิตทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดภาพ เนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและทำหน้าที่ปกป้องผิวนอกของคอมโพสิต 2 วัสดุเมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Polymer composites” สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermosets)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Metal composites”
- เซรามิก เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Ceramic composites”

พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกระบวนการวิหิตจะมีรูปร่างถาวรผลิตผลที่ได้นำไปหลอมขึ้นรูปใหม่อีกไม่ได้และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน หรือให้ความดันเข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงทนไม่หลอมละลาย ถ้าให้ความร้อนมาก ๆ จะไหม้เกรียม และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เทอร์โมเซตที่ใช้เป็น

เมทริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่พอลิเอสเทอร์ ไวนิลเอสเทอร์ อีพอกซี พอลิอิมิดและฟีนอลิก รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซตแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิตโดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต [12]

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมตัวได้ เมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถหลอมและแข็งตัวหลาย ๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างก่อนการใช้งาน ดังนั้นความแข็งแรงจึงต้องเป็นผลโดยตรงมาจากสมบัติของสายโซ่พอลิเมอร์ และการพันกันของสายโซ่ ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกที่นำมาใช้งานเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมโพสิต ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากหรือมีความยาวสายโซ่มากพอที่จะเกิดการพันกัน ข้อเสียของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงคือมีความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงทำให้ไหลยาก จึงเป็นอุปสรรคในการขึ้นรูป ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ (PA) พอลิสไตรีน (PS) เป็นต้นรูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติกแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์แสดงได้ในดังรูปที่

2.5

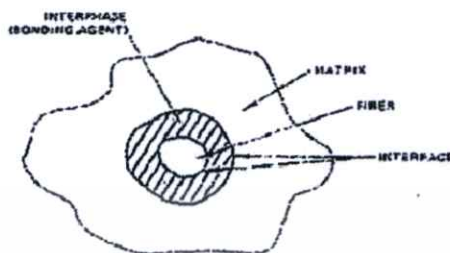


รูปที่ 2.4 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก [13]

เมทริกซ์มีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

1. ทำหน้าที่ถ่ายเทความเค้น (Transfer stresses) ที่ได้รับไปยังเส้นใยเสริมแรง และถ่ายเทความเค้นระหว่างเส้นใย
2. ป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสภาวะแวดล้อม
3. รักษาเสถียรทางรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต

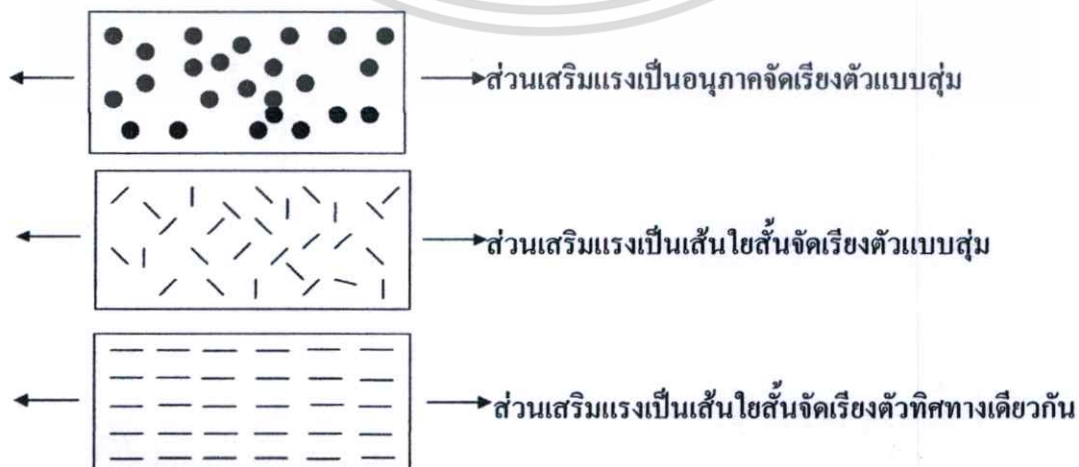
4. รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและป้องกันการรวมตัวของเส้นใย
5. ป้องกันเส้นใยจากการขาดคุณสมบัติ
6. ช่วยให้คอมโพสิตมีเสถียรภาพในตัวกลางต่าง ๆ



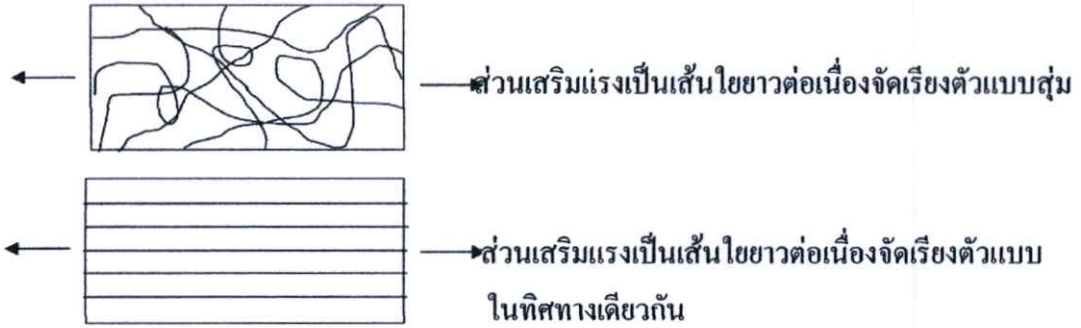
รูปที่ 2.5 การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ [10]

2.2.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็น โครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิตหมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ส่วนเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรือนอนุภาคเล็ก ๆ ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) ชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (Filament fibers) หรือเส้นใยสั้น (Staple fibers) ก้อน (Particulates) เป็นแผ่น (Lamellar) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [13]

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงควรมีลักษณะ ดังนี้

- เส้นใยควรมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต ได้แก่

- เส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความยาวของเส้นใย
- ลักษณะรูปร่างของเส้นใย

โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิต สามารถแบ่งเป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) เมื่อผสมลงในพอลิเมอร์ทำให้ได้ความแข็งแรงสูงขึ้น
2. เส้นใยธรรมชาติ ได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงไม่ดีเท่าเส้นใยสังเคราะห์ แต่สามารถย่อยสลายได้

การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น

- ความแข็งแรง
- ความเหนียว
- ความเสถียรภาพของรูปร่าง

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- การยึดเกาะ (Interfacial bonding) ระหว่างเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- สมบัติของเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรง

- ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง

2.3 แป้ง

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง [6]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร

“แป้ง” ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จัดอยู่ในประเภทฟลาวัวร์ เรียกว่า Corn flour, Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8% เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอื่น หมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch, Wheat starch เป็นต้น

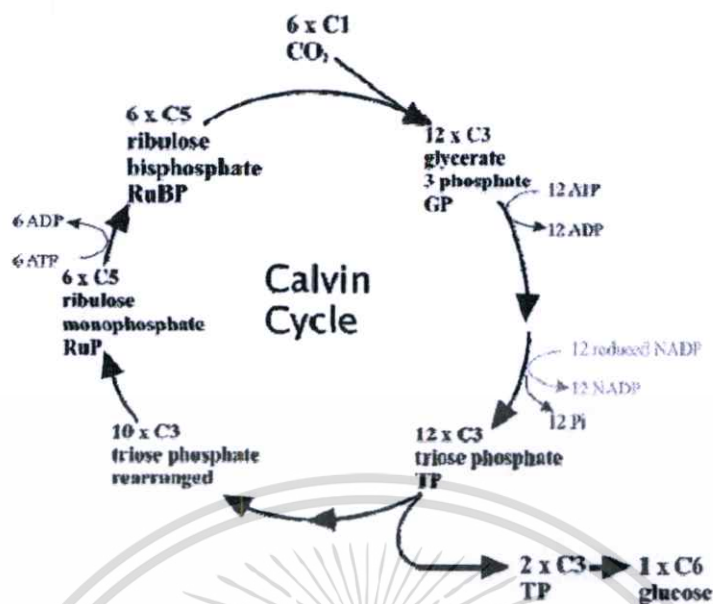
2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง [6]

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรพิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างกรดฟอสโฟกลีเซอริก (Phosphoglyceric acid; PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม PGA จะผ่านวัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่ายได้ดังนี้





รูปที่ 2.7 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) [14]

2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง [6]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4 ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [6]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะ โครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง

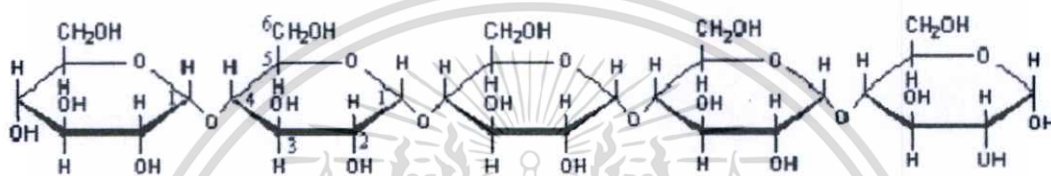
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบหลักภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin)
3. สารมัธยันต์ (Intermediate material)

2.3.3.1 อะไมโลส (Amylose) [6]

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลส [15]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสของแป้งหลายๆ ชนิดดังตารางที่ 2.5

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลส ที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและไม่ละลายในสารละลายสำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [6]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลส (%)	β -Amylolysis Limit (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
- อินดิกา	-	73	1,000	4.0	250	49
- จาโปนิก	-	81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	-

หมายเหตุ β -amylolysis = %การย่อยแป้งโดย β -amylase

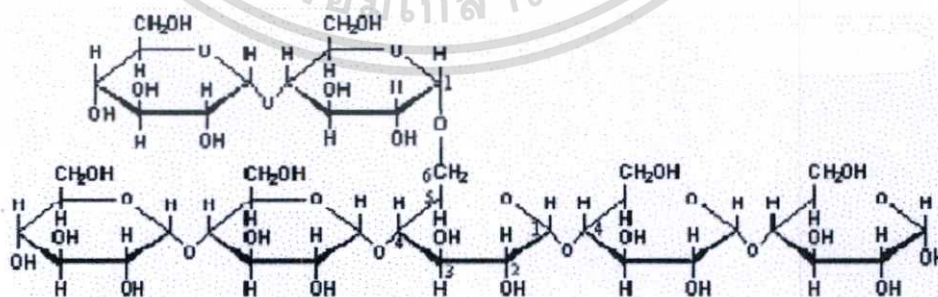
DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

2.3.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin) [6]

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.9 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกตินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.9 โครงสร้างอะไมโลเพกติน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกติน [6]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลเพกติน (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)เฉลี่ย	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย ภายนอกเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
- อินดิกา		4,700	21	220	14	6
- จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
- ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันฝรั่ง	83					

2.3.3.3 สารมัธยันต์ (Intermediate material)

สารมัธยันต์มีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกติน แต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และ สารมัธยันต์นี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกติน และ สารมัธยันต์ในเมล็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

2.3.4 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลส อะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็น โครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

2.3.5 สมบัติของแป้ง [6]

2.3.5.1 การดูดซับความชื้น การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แบ่งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้ง มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bond water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สูตรโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$

2.3.5.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ชิดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์ มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

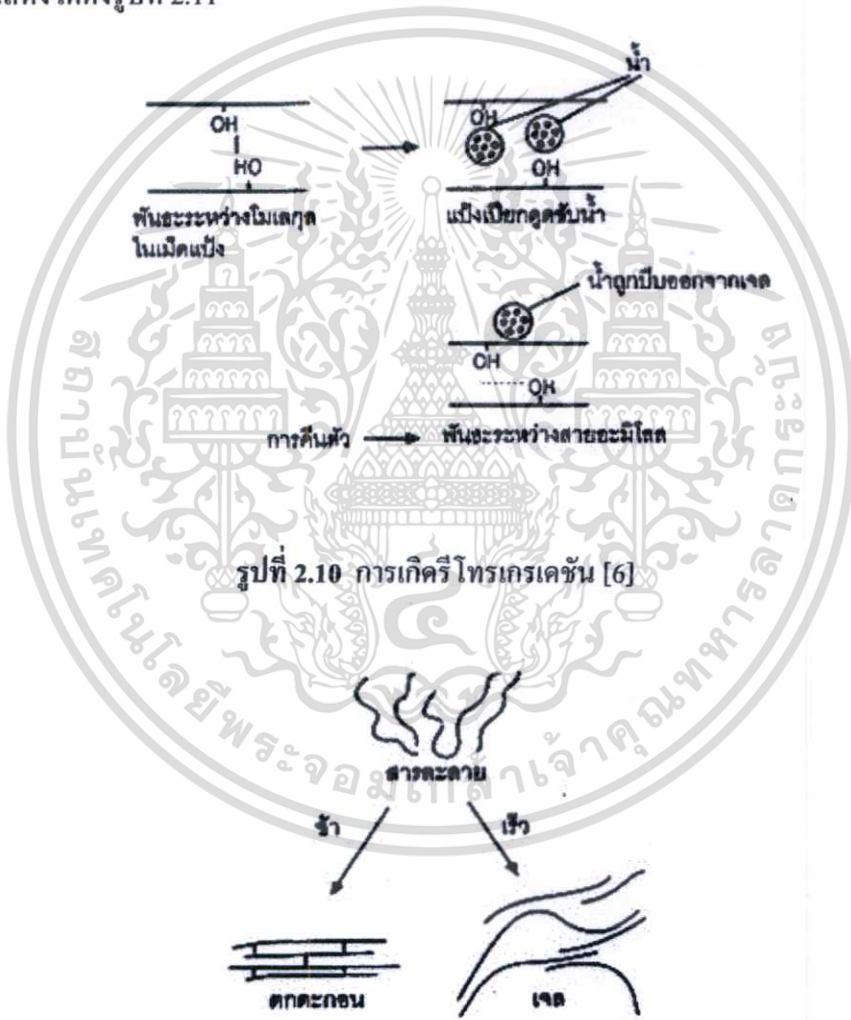
2.3.5.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือสลิค เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.10 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาค

แป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมาออกเจล ในการคั้นตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่าง ช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคั้นตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะมิโลส อะมิโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิค่าและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคั้นตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคั้นตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคั้นตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคั้นตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคั้นตัวของแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 แป้งข้าวเจ้า [6]

ข้าวเจ้ามีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีหลายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินดิกา ปลูกมากในแถบมรสุม ซึ่งมีฝนตกชุกและแสงแดดเพียงพอ และพันธุ์ จาปอนิกา ปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น ข้าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นข้าวหักหรือข้าวเกรดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง ข้าวหักมีองค์ประกอบดังตารางที่ 7 แป้งข้าวเจ้ามีใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆมากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

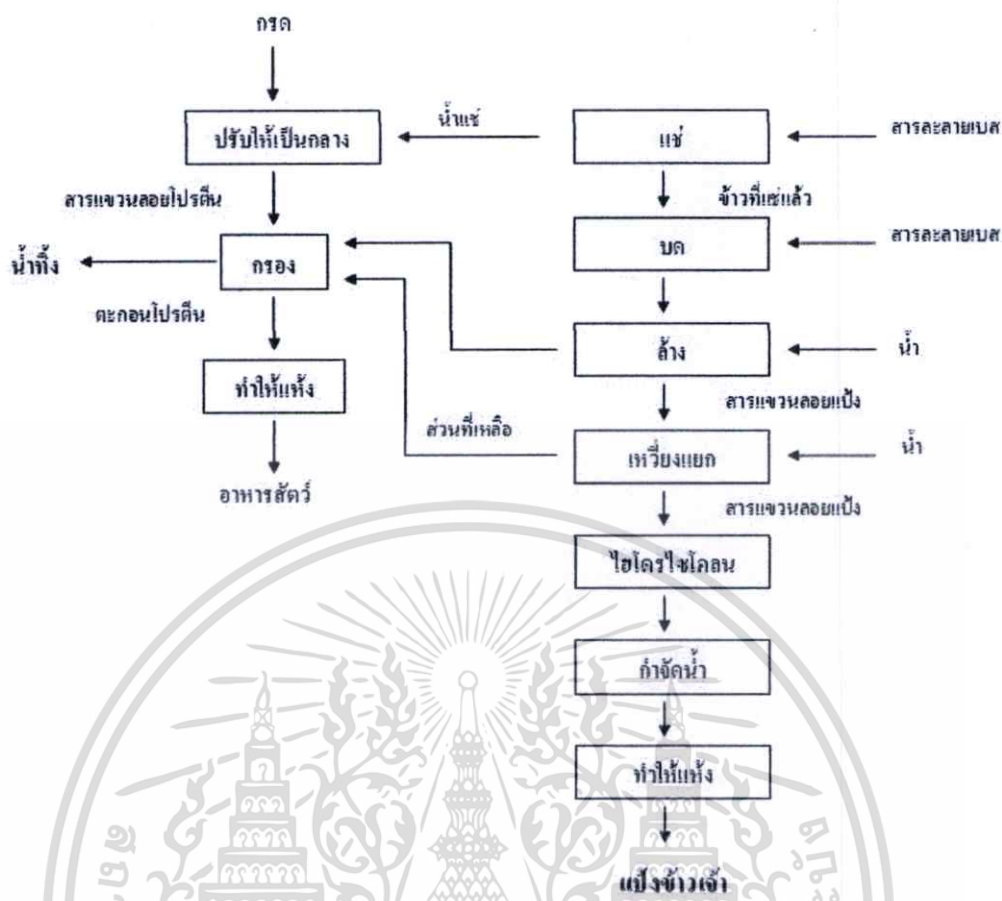
ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถึงจะเป็นการไม่เปียก แต่โปรตีนและสิ่งแปลกปลอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นประเภทฟลาว์ (Rice flour) และนิยมใช้ข้าวที่มีอะมิโลสสูงข้าวหอมมะลิที่บริโภคไม่เหมาะสมใช้ผลิตฟลาว์ เพราะมีปริมาณอะมิโลสต่ำ ส่วนการผลิตแป้งสตาร์ช (Rice starch) คือ การสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมในแป้งฟลาว์ ออกจนเกือบหมด

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก [6]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	12.0
แป้ง	79.2
โปรตีน	7.0
ไขมัน	0.4
เถ้า	0.5
ส่วนที่เหลือ	0.9

2.3.6.1 กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า

กระบวนการผลิต เริ่มจากนำข้าวเปลือกมาล้างทำความสะอาด แยกสิ่งแปลกปลอม (ถ้าเป็นข้าวเปลือก ต้องผ่านการคัดสีก่อน) แช่ในสารละลายเบสพร้อมกับการกวนช้า ๆ ทำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อแยกโปรตีนที่ติดอยู่กับเมล็ดข้าวเจ้าออก ปล่อยให้ข้าวตกตะกอน แยกส่วนใสที่มีโปรตีน (Steep liquor) ออก ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งเมล็ดข้าวนุ่ม แล้วนำเมล็ดข้าวมาคดเปียกด้วยสารละลายเบส ล้างน้ำ และเหวี่ยงแยกโปรตีนส่วนที่ติดอยู่ในสารแขวนลอยแป้งออก นำมาผ่านไฮโดรไลโซโคลน กำจัดน้ำ แล้วทำให้แห้ง นำแป้งมาทำให้แห้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งข้าวเจ้า ดังแสดงกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าในรูปที่ 2.12 สมบัติของแป้งข้าวเจ้าแสดงในตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.12 แผนภาพกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า [6]

ในการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าสามารถทำจากแป้งฟลาว์ก็ได้ โดยนำแป้งฟลาว์มาแช่น้ำเบสอ่อน (0.3% NaOH) ในเวลา 24 ชั่วโมง สามารถละลายโปรตีนออกมาได้ 86%

ตารางที่ 2.8 สมบัติของแป้งข้าวเจ้า [6]

สมบัติ	แป้งข้าวเจ้า
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	6-8
ปริมาณอะมิโลส (%)	18-27
ขนาดอะมิโลส (Degree of polymerization)	900-1,100
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลที่ไนซ์ (Onset temperature, T_0 , °C)	60
อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดเจลที่ไนซ์ (Peak temperature, T_p , °C)	77

2.4 เส้นใย (fibers) [16]

2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใย

เส้นใย คือ สารพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน เป็นส่วนใหญ่ มีออกซิเจนและไนโตรเจนบ้างเล็กน้อย มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและโมเลกุลมีลักษณะคล้ายโซ่ยาวๆ โดยแต่ละห่วงมีโครงสร้างเหมือนกัน ดังนั้น บางครั้งเรียกว่า โซ่โมเลกุล (Molecular chain)

คำจำกัดความของเส้นใย คือ หน่วยของสสารที่แยกประเภทโดยความยืดหยุ่น (Flexibility) ความละเอียด (Fineness) และมีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างสูงมาก (High ratio of length to thickness)

2.4.2 ประเภทของเส้นใย [17]

เส้นใยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เส้นใยที่มาจากธรรมชาติ (Natural Fibers)
2. เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made Fibers)

2.4.2.1 เส้นใยธรรมชาติ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามแหล่งกำเนิดเส้นใยคือ

1. เส้นใยที่ได้มาจากพืช (Vegetable Fibres) ซึ่งรวมถึงเส้นใยฝ้าย (Cotton) เส้นใยแฟล็กซ์ (Flax) เส้นใยป่าน ปอ และพืชชนิดอื่น ๆ เส้นใยเหล่านี้จะมีส่วนประกอบของเซลลูโลส (Cellulose)
2. เส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ (Animal Fibres) เช่น แพะ แกะ หรือ ไหม ซึ่งเส้นใยเหล่านี้จะมีส่วนประกอบของกรดอะมิโนต่าง ๆ ประกอบเป็นโปรตีน (Protein)
3. เส้นใยที่ได้มาจากแร่ (Mineral Fibres) นิยมใช้กับงานด้านทนไฟ และความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยหิน (Asbestos)

2.4.2.2 เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เส้นใยที่ดัดแปลงมาจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural Polymer Fibres) เนื่องจากเซลลูโลสมีจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นฝ้าย หรือลำต้นของต้นไม้ ดังนั้นมนุษย์สามารถนำมาดัดแปลงทำเป็นเส้นใยที่ต้องการ เช่น เรยอน วิสโคส หรือ อะซิเตด เป็นต้น พอลิเมอร์ธรรมชาติอีกแหล่งที่มีมากเช่นกัน คือ พวกรโปรตีนจากพืช เช่น ถั่วเหลือง นมสด ข้าวโพด เป็นต้น

2. เส้นใยอนินทรีย์ (Inorganic Fibres) เป็นเส้นใยที่มนุษย์ผลิตขึ้น เช่น ใยแก้ว เซรามิก หรือ โลหะ เป็นต้น
3. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthesis Fibres) เป็นเส้นใยที่ส่วนมากจะได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เช่น พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์ พอลิอะคริโลไนไทรล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น

2.4.3 ลักษณะวิทยาของเส้นใย

ลักษณะวิทยาเป็นเรื่องของศาสตร์ทางรูปร่าง ดังนั้น รูปร่างของเส้นใย จะเห็นได้จาก ความยาว ความละเอียด ลักษณะภาคตัดขวาง

2.4.3.1 ความยาว (Length)

เส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีความยาวเส้นใยต่างกัน เส้นใยมีทั้งชนิดสั้นและยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์

เส้นใยสั้น (Staple) คือ เส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 500 มิลลิเมตร ซึ่งได้แก่ ฝ้ายและขนสัตว์ ส่วนเส้นใยยาว (Filament) คือ เส้นใยที่มีความยาวไม่จำกัด สามารถมีหน่วยเป็นหลาหรือเมตรได้แก่ ไหม และเส้นใยสังเคราะห์ โดยยังแบ่งออกเป็นเส้นใยยาวเดี่ยว (Monofilament) และเส้นใยยาวหลายเส้น (Multifilament) เส้นใยยาวนี้สามารถตัดให้สั้นเป็นเส้นใยสั้นได้ เพื่อสะดวกในการผสมกับเส้นใยธรรมชาติ

2.4.3.2 ความละเอียด (Fineness) [3]

ความละเอียดมีบทบาทสำคัญในการกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ ความละเอียดนี้ หมายถึงขนาดเส้นใย หน่วยที่ใช้วัดอาจใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ภาคตัดขวางของเส้นใยเป็นตัวบ่งชี้ โดยจะใช้หน่วยของไมครอน (Micron) ซึ่งความยาว 1 ไมครอนก็คือ 1/1,000 มิลลิเมตร

เส้นใยประดิษฐ์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สามารถควบคุมได้ค่อนข้างแน่นอน ในกระบวนการผลิตเส้นใยโดยมากในการวัดความละเอียดนอกจากวัดจากความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางแล้วยังอาจใช้หน่วยที่เป็นการวัดความหนาแน่นเชิงเส้น (Linear density) ซึ่งเป็นการวัดน้ำหนักของเส้นใยต่อความยาวที่กำหนด โดยหน่วย 2 หน่วย คือ เดเนียล (Denier) และเทกซ์ (Tex) กำหนดนิยามดังนี้[3]

เดเนียล คือ หน่วยที่ใช้วัดความละเอียดของเส้นใยจากน้ำหนักเป็นกรัมในความยาว 9,000 เมตร

เทกซ์ คือ หน่วยที่ใช้วัดความละเอียดของเส้นใยจากน้ำหนักเป็นกรัมในความยาว 1 กิโลเมตร

2.4.3.3 รูปร่างภาคตัดขวางของเส้นใย (Cross-sectional shape) [16]

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือในการสำรวจรูปร่างภาคตัดขวางและรูปร่างตามความยาวของเส้นใยได้ โดยเฉพาะเส้นใยธรรมชาติ เราจะพบความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เช่น เส้นใยฝ้ายมีรูปร่างภาคตัดขวางคล้ายถั่วขนาดใหญ่ มีช่องตรงกลาง และมีรอยบิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้นตลอดความยาวเส้นใย

2.4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียกว่า พอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากการเรียงตัวของหน่วย โมเลกุลเล็กๆ คือ มอนอเมอร์ (Monomer) และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า โพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของ โมเลกุลซึ่งบอกได้จากจำนวนของมอนอเมอร์ที่อยู่ในพอลิเมอร์นั้น (Degree of polymerization, DP) พอลิเมอร์ที่มีเส้น โมเลกุลยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีเส้น โมเลกุลสั้นเนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเอง ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่พอลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่ [18]

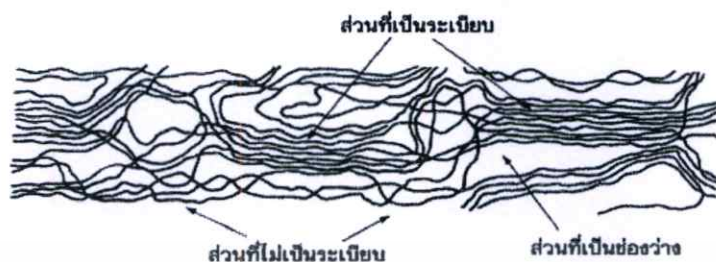
2.4.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย [17]

โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยจะมีการเรียงตัวแตกต่างกัน เมื่อแต่ละ โมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง (Random) จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบก็จะเป็นผลึก (Crystalline) เกิดขึ้นเส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย อย่างไรก็ตาม ปริมาณความเป็นผลึก ไม่ใช่ปัจจัยที่กำหนดความแข็งแรงของเส้นใย หากรวมไปถึงทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบเหล่านี้ด้วย ถ้า โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยให้เส้น ใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้น ใย(ตามความยาว) ทำให้สามารถมีส่วนช่วยในการรับแรงเต็มที่ เรียกว่าเส้นใยนั้นมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ดี (Oriented fiber) ในอีกกรณีหนึ่งแม้เส้นใยจะมีบริเวณที่เป็นผลึกมาก แต่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย โมเลกุลก็ไม่สามารถรับแรงในทิศทางการดึงเส้นใยได้เต็มที่ ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีแรก

บริเวณที่เป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Regions) เป็นบริเวณที่สามารถรับน้ำ และความชื้น ดังนั้นจะเป็นบริเวณที่ยอมให้สีย้อมเข้าไปได้ แต่จะเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรง

บริเวณที่เป็นส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline Regions) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถรับน้ำ และความชื้น เป็นส่วนที่แข็งแรงของเส้นใยเนื่องจากโซ่โมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบ

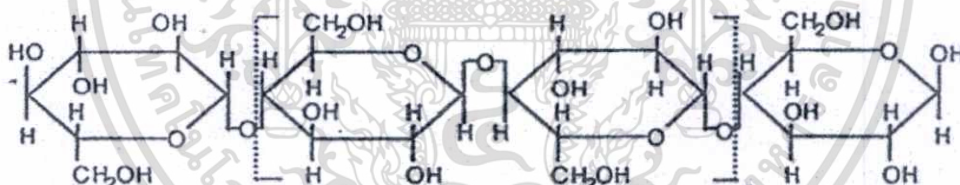
การจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นระเบียบตามแนวแกนเส้นใย (Orientation) เป็นบริเวณที่มีส่วนที่เป็นระเบียบเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย ทำให้เพิ่มความแข็งแรงในด้านการทนแรงดึงตามแนวแกนเส้นใยได้



รูปที่ 2.13 ลักษณะส่วนที่เป็นระเบียบ (ที่จัดเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย) ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ และส่วนที่เป็นช่องว่าง [19]

2.5 เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fibers) [20]

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วย anhydro-d-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.14



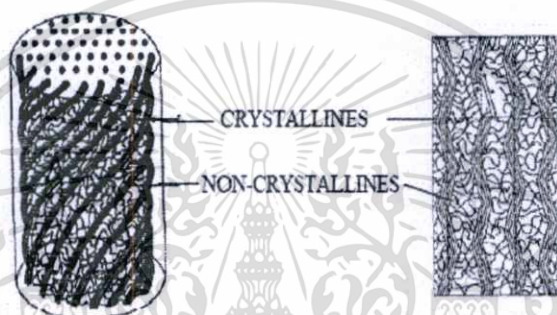
รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส [3]

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัวและมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพต่ำ

ความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมันจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ความหนาแน่น เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอนค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา หรืออาจเปลี่ยนไป เนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็งไม่มีรูปร่างที่ 2.15 แสดงการจัดเรียงตัวของผลึก และอสัณฐานในโครงสร้างของเซลลูโลส



รูปที่ 2.15 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของผลึก และอสัณฐานของเซลลูโลส [21]

2.5.1 เส้นใยฝ้าย (Cotton fiber) [15]

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่นิยมนามากที่สุดในกลุ่มเส้นใยเซลลูโลส มีอัตราการผลิตและการใช้งานสูง ประเทศที่ส่งออกฝ้ายเป็นหลัก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน อินเดีย ปากีสถาน แอฟริกา เป็นต้น

ฝ้ายมาจากปุยฝ้ายของพืชตระกูล *Gossypium* และมีหลายชนิด แต่เส้นใยฝ้ายในตลาดส่วนใหญ่ทั่วโลกเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่มีชื่อว่า กอสลีเปียม ฮิสซุตัม (*Gossypium hirsutum*) และ กอสลีเปียม บาบาเดนส์ (*Gossypium barbadense*) จากประเทศอเมริกา

ฝ้ายที่มีการปลูกสำหรับเพื่อใช้ทางการค้า สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ประเภทที่ 1 เส้นใยฝ้ายมีความยาวประมาณ 25-60 มิลลิเมตร เส้นใยขนาดเล็ก คุณภาพดี ได้แก่ ฝ้ายอียิปซ์ ฝ้ายชูดานและฝ้าย Sea Island ประเภทที่ 2 เส้นใยมีขนาดใหญ่กว่าและสั้นกว่า (13-33 มิลลิเมตร) เช่น ฝ้ายอเมริกัน ประเภทที่ 3 เส้นใยฝ้ายมีความยาวสั้นมาก ประมาณ 9-25 มิลลิเมตร ได้แก่ ฝ้ายจากประเทศกลุ่มเอเชีย

2.5.1.1 กระบวนการผลิต

เส้นใยฝ้ายสามารถผลิตได้จากการแยกเมล็ด ขี้ผึ้งและโปรตีนออก เป็นรูปของเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Cellulose) หรือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ผลิตภัณฑ์จากเส้นใยฝ้ายมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง มีความแข็งแรงสูง คงทน และดูดซับได้ดี เพราะมีการเสียน้ำหนักน้อยมากกว่า 10% ระหว่างกระบวนการแปรรูปจากวัตถุดิบฝ้าย (Raw cotton balls) เป็นเส้นใยฝ้าย โดยเส้นใยหนึ่งเส้นเกิดจากเซลล์โลส 20 ถึง 30 ชั้นเรียงตัวเป็นขดซึ่งยังช่วยให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นอีกด้วย เมื่อเมล็ดฝ้าย (Cotton boll) แตกออก เส้นใยแห่งจะถูกทำให้อยู่รูปแผ่นแบน เกลียว หรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon-like shapes) และจะขดเข้าด้วยกัน จากนั้นจะผูกติดกันไว้เพื่อความสะดวกในกระบวนการปั่น (Spinning) เป็นเส้นด้าย (Yarn) ต่อไป [22]

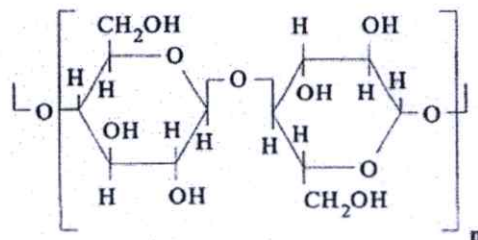
ดอกฝ้ายที่แก่เต็มที่จะถูกเก็บเกี่ยวแล้วนำมาแยกสิ่งปลอมปนที่ไม่ต้องการ (trash) ออก แล้วทำการแยกเมล็ดออกจากเส้นใยฝ้ายดังแสดงในรูป 2.16 จากนั้นทำการสาวใยและหวีเส้นใย (combing) เพื่อแยกเส้นใยที่สั้นเกินไปออก



รูปที่ 2.16 การแยกเส้นใยฝ้ายออกจากดอกฝ้าย [23]

2.5.1.2 โครงสร้าง [16]

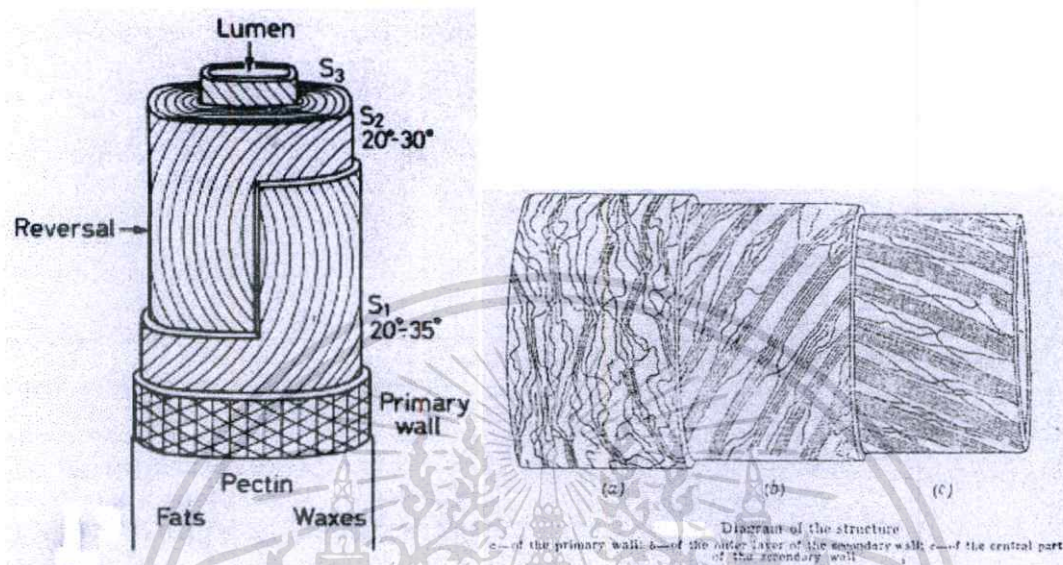
ฝ้ายเป็นเซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้น โครงสร้างทางเคมี คือ poly (1,4- β -D-anhydroglucopyranose) แสดงดังรูปที่ 2.17 โครงสร้างภายนอกของฝ้ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เส้นใยฝ้ายมีความละเอียดมาก มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 10-65 มิลลิเมตร ขึ้นกับคุณภาพของเส้นใย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-22 ไมครอน (ไมโครเมตร= 10^{-6} เมตร)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างซ้ำของ poly (1,4- β -D-anhydroglucopyranose) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเส้นใยฝ้ายมีความซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยผนังชั้นนอก (Primary wall) และผนังชั้นที่ 2 (Secondary wall) โดยส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เส้นใยจะมีรูตรงกลางภายในเรียกว่า ลูเมน (Lumen) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 สัณฐานวิทยาของเส้นใยฝ้าย [24]

ผนังชั้นนอกของเส้นใยฝ้าย ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่เคลือบด้วยผนังชั้นนอกสุดเป็น เพคติน โปรตีน แร่ธาตุและไขมัน ผนังชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่สมบูรณ์ของเส้นใยฝ้าย ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสเล็ก ๆ (Fibrils) เรียงตัวกันแบบเป็นเกลียวรอบแกนเส้นใย ทิศทางของเกลียวจะหมุนคนละทางในแต่ละชั้นเหมือน S กับ Z โดยมุมของเกลียวเส้นใยแต่ละชั้นประมาณ 20-35 องศา ในแต่ละเส้นเซลลูโลสเล็ก ๆ นี้ยังประกอบด้วย เส้นใยระดับไมโคร (Microfibrils) มัดรวมตัวกันอยู่มากมาย ดังนั้น จะเห็นว่า โครงสร้างเหล่านี้มีผลในการที่เส้นใยฝ้ายจะดูดซับความชื้น หรือทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ดีมากน้อยแค่ไหน ขึ้นกับระดับการเข้าถึงของสสาร ว่าอยู่ที่ใด อยู่ที่ผิวชั้นนอก ผิวชั้นใน หรือในระดับไมโคร

2.5.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.19 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [25]

Components	Whole fiber (%)	Primary Wall (Fiber Surface) (%)
Cellulose	94.0	54
Protein	1.3	14
Pectin	0.9	9
Wax	0.6	8
Ash	1.2	3
Others	-	4

2.5.2 เส้นใยตาล (Palmyra palm fiber) [27]

ตาล เป็นพันธุ์ไม้พุ่มปาล์มขนาดใหญ่ สกุล (Genus) Borassus ในวงศ์ (Family) Palmae ชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ Borassus flabellifer เป็นปาล์มที่ แข็งแรงมากชนิดหนึ่ง และเป็นปาล์มที่แยกเพศกันอยู่คนละต้น ต้นสูงถึง 40 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60 ซม. ลำต้นเป็นเสี้ยนสีดำแข็งแรง แต่ใ้กลางลำต้นอ่อน บริเวณ โคนต้นจะมีรากเป็นกลุ่มใหญ่ ใบเหมือนพัดขนาดใหญ่ กว้าง 1 – 1.5 เมตร มีก้านเป็นทางยาว 1 – 2 เมตร ขอบของทางของก้านทั้งสองข้าง มีหนามเหมือนฟันเลื่อยสีดำแข็ง ๆ และคมมาก ผลเป็นเส้นใยแข็งเป็นมัน มักมีสีเหลืองแกมดำคล้ำเป็นมันหุ้มห่อเนื้อเยื่อสีเหลืองไว้ภายในผลหนึ่ง ๆ จะมีเมล็ดใหญ่แข็ง 1 – 3 เมล็ด



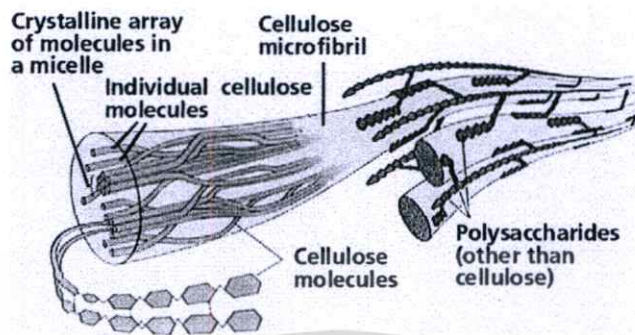
รูปที่ 2.19 ต้นตาล โคนดและผลตาล โคนด [26-27]

2.5.2.1 โครงสร้าง

เส้นใยตาลเป็นเส้นใยจากธรรมชาติ องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่ เป็นเซลลูโลสซึ่งเป็นไฮโมพอลิเมอร์ เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใย ซึ่งมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของเซลลูโลสที่อยู่ภายในผนังเซลล์ [28]

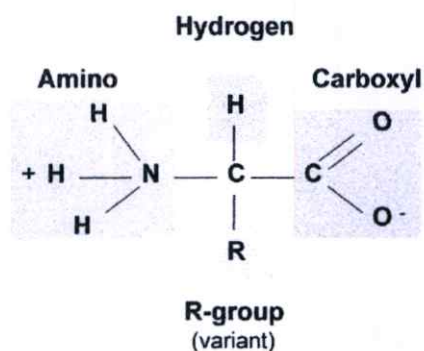
2.5.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยตาล [29-30]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
Cellulose	62.90
Hemicellulose	18.42
Pectin	1.55
Lignin	12.20
Ash	1.06
Wax and fats	0.80

2.6 เส้นใยโปรตีน (Protein Fibers) [3]

เส้นใยธรรมชาติกลุ่มที่ได้จากสัตว์ทุกชนิดจะเป็นเส้นใยโปรตีนทั้งหมด ซึ่งองค์ประกอบหลักของโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานในเนื้อเยื่อของสัตว์เกิดจากการต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวของกรดอะมิโน (Amino acids) โดยมีการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลด้วย amide (peptide) links ทั้งนี้ธาตุหลักที่ประกอบในโมเลกุลได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบทางเคมีทั้งที่มีความเป็นด่างและกรดอยู่ในโครงสร้างเดียวกันเป็นสารประเภท amphoteric แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน [31]

2.6.1 เส้นใยไหม (Silk fiber) [17]

ไหมเป็นเส้นใยขาวที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เส้นใยไหมได้ชื่อว่าเป็น ราชินีแห่งเส้นใย เป็นเส้นใยที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับออกมา เพื่อป้องกันตัวมันเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยจะมีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) แม้ว่าเส้นใยไหมจะเป็นเส้นใยที่ได้มาจากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ก็ตามแต่จะมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนน้อยมาก โดยทั่วไปจำแนกไหมออกเป็นสองประเภทคือ

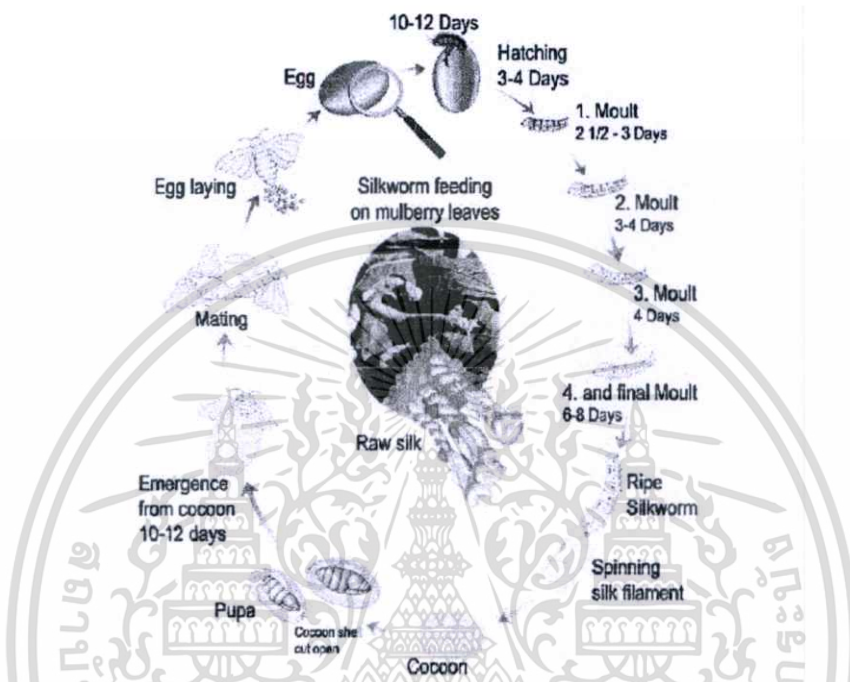
ไหมเลี้ยง (Mulberry Silk) หรือไหมบอมบิกซ์มอริ (Bombyx mori) เป็นหนอนไหมที่มีมนุษย์เพาะเลี้ยง โดยจัดหาอาหารคือ ใบหม่อน (Mulberry Leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้จะมีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวแล้วจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

ไหมป่า (Wild Silk) เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง โดยปกติไหมทาชาร์ (Tussah Silk) จะเป็นกลุ่มตัวแทนที่มีจำนวนมากสำหรับไหมชนิดนี้ ไหมทาชาร์จะมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีน และอินเดีย แต่พวกนี้จะไม่เลี้ยงตนเองด้วยใบไธม์ ซึ่งจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล มีความหยาบ และไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง สำหรับไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยง (ไหมบอมบิกซ์มอริ)

2.6.1.1 กระบวนการผลิต [3]

กระบวนการเพาะเลี้ยงไหมเรียกว่า sericulture เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศญี่ปุ่น โดยเริ่มตั้งแต่การพัฒนาพันธุ์ไหม วงจรการเพาะเลี้ยงไหมเริ่มจากขั้นตอนการวางไข่ของตัวแมลงไหม หลังจากไข่ฟักและแตกออก ตัวหนอนถูกเลี้ยงด้วยใบหม่อนอ่อน โดยใช้เวลาประมาณ 35 วัน หนอนไหมเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วจนมีน้ำหนักประมาณ 10,000 เท่าของเมื่อแรกเกิด กิ่งไม้เล็กๆ ที่วางเตรียมในจานก็จะถูกหนอนไหมนำไปใช้เริ่มสร้างรังเรียกว่า รังไหม (Cocoon) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยไหมที่เกิดจากหนอนไหมอัดปล่อยของเหลวออกจากต่อมรวมสองต่อมในรูเดียวกันจากส่วนหัวของตัวหนอน ดังนั้นจึงได้ออกมาเป็นเส้นใยคู่ที่เกาะติดกันด้วยสารเซอริซิน

(sericin) ช่วงเวลา 2-3 วัน หนอนไหมจะปั่นเส้นใยออกมาได้ยาวถึง 1 ไมล์ (1.6 กม.) และล้อมรอบตัวของมันเองเอาไว้อย่างสมบูรณ์ เมื่อตัวหนอนเจริญเติบโตต่อไปจะเปลี่ยนสภาพเป็นดักแด้แล้วจึงโตเป็นแมลง จากนั้นก็จะปล่อยสารละลายที่สามารถละลายเส้นใยที่เป็นรังไหมให้เปิดเป็นรูบริเวณปลายของรังเพื่อคลานออกสู่ภายนอก แสดงลักษณะวงจรชีวิตดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรชีวิตของหนอนไหม [32-33]

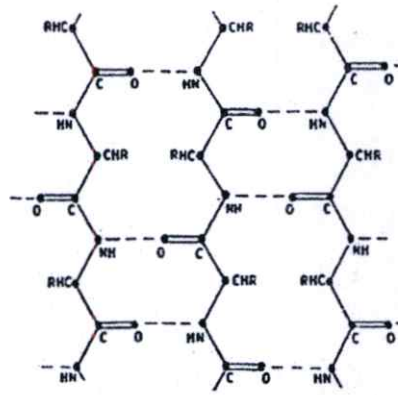
2.6.1.2 องค์ประกอบทางเคมี [3]

เส้นใยไหมประกอบด้วย เส้นใยโปรตีนที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) ติดกัน 2 เส้น คิดเป็น 65% โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยธาตุที่สำคัญคือ C H O N และปริมาณ S มีน้อยมากตามโมเลกุลข้างเคียง ลักษณะจะเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวเหยียด ไม่พันตัวกันเหมือนขนสัตว์จึงทำให้มีโครงสร้างผลึกประมาณ 65-70% แสดงดังรูปที่ 2.23 และสารคล้ายขาวเรียกว่า เซอริซิน (Sericin) ประมาณ 25% ที่เหลือเป็นน้ำ แร่ธาตุ และแวกซ์ สารเซอริซิน ละลายได้ในสารละลายเบสอ่อน เมื่อถูกเอาออกก็จะได้เส้นใยไหม 2 เส้น เรียกว่า degummed silk เส้นใยมีความเรียบตรง และมีภาคตัดขวางคล้ายรูปสามเหลี่ยม

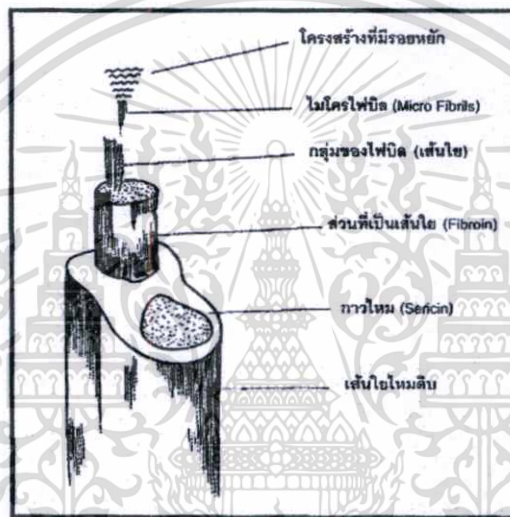
ส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ในไฟโบรอิน อาจวิเคราะห์รายละเอียดออกได้ดังต่อไปนี้

คาร์บอน	48.00-49.00 %
ไฮโดรเจน	6.40-6.51 %
ไนโตรเจน	17.35-18.89 %
ออกซิเจน	26.00-27.90 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 โมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวเหยียดของไหม [3]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของเส้นใยไหม [3]

2.6.1.3 สมบัติของเส้นใย [34]

ลักษณะและรูปร่าง เส้นใยเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องยาวประมาณ 900-1,700 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9-11 ไมครอน สีของเส้นไหมดิบจะมีสีเหลือง-สีครีม

ธรรมชาติของการดูดซึมความชื้น สามารถดูดซึมความชื้นประมาณ 11% ซึ่งมากกว่าฝ้ายที่ถูกเมอร์เซอร์ไรซ์แล้ว (10.5%) ความสามารถในการดูดซึมความชื้นขึ้นกับว่าเส้นใยดิบ หรือถูกลอกกาวแล้ว นอกจากนี้ยังขึ้นกับสปีชีส์ของหนอนไหมอีกด้วย

ความแข็งแรง ปกติจะมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง เส้นใยไหมมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่า ๆ กัน ค่าความเหนียวอยู่ในช่วง 2.4-5.1 กรัมต่อดีเนียร์ และเมื่อเปียกน้ำจะมีความแข็งแรงลดลงประมาณ 80-85 %

การยืดตัว การยืดตัวก่อนขาดของเส้นใยอยู่ประมาณ 20-25 % ในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) [35]

เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีการเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ และโมเลกุลส่วนใหญ่ต้องเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย โดยทั่วไปความยาวของเส้นใยต้องไม่น้อยกว่า 100 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนั้น เส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมใช้ก็มี พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์ พอลิอะคริโลไนไท์ ปกติเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติบางอย่างที่คล้ายกัน ดังนี้

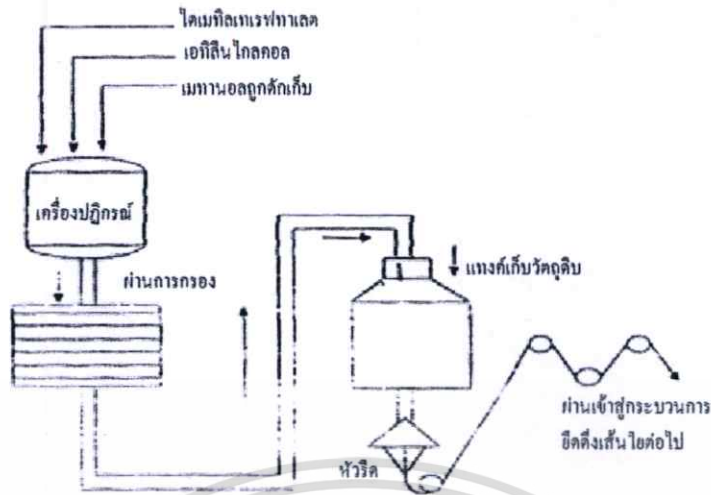
1. เส้นใยเหล่านี้จะไม่ดูดความชื้น (Hydrophobic)
2. ผิวหน้าของเส้นใยมักจะเรียบ
3. ส่วนมากเส้นใยเหล่านี้มีจุดหลอมเหลวต่ำ
4. เส้นใยเหล่านี้จะมีสมบัติดี เมื่อเทียบกับเส้นใยฝ้าย

2.7.1 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester fiber) [15]

เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ถูกสังเคราะห์โดยกลุ่มนักวิจัยของ Dr. William H. Carothers ในช่วงเวลาเดียวกับการผลิตไนลอน และในเวลาต่อมา การผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ได้แพร่หลายออกไป เส้นใยพอลิเอสเตอร์ส่วนใหญ่ คือ polyethylene terephthalate (PET) แต่ก็อาจเป็นชนิดอื่นได้ เช่น poly-1,4-cyclohexylene-dimethylene terephthalate (PCDT)

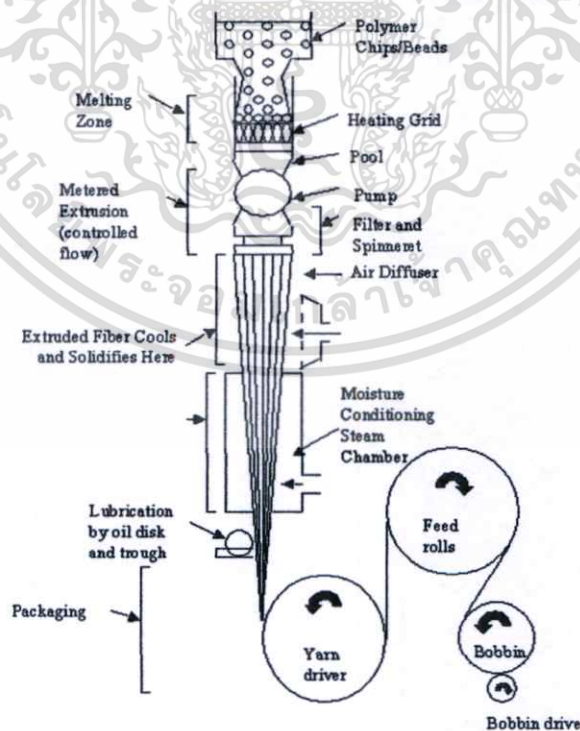
2.7.1.1 กระบวนการผลิต

ขั้นตอนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์เหมือนการผลิตไนลอน แตกต่างกันที่โครงสร้างทางเคมี สารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ คือ ethylene glycol และ terephthalic acid เริ่มจากการนำเอทิลีนมาทำการออกซิไดซ์ให้ได้มอนอเมอร์ที่เป็นไกลคอลในลักษณะไดไฮดริคแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์อีกตัวหนึ่ง คือ กรดเทเรฟทาลิก ในหม้ออบความดันสูงภายใต้สุญญากาศ โดยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป กระบวนการเกิดพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์สองตัวที่กล่าวมา พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นของเหลวที่หลอมตัวอยู่ ไม่มีสีและใส จากนั้นตัดเป็นชิ้นเป็นเม็ดที่เรียกว่า chip อบให้แห้งเพื่อขจัดความชื้น แล้วทำการผสมเพื่อให้มีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.25 กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิด PET [3]

การผลิตเส้นใยพอลิเอสเตอร์เป็นแบบปั่นหลอม (Melt spinning) เม็ดพอลิเมอร์จะถูกหลอมและฉีดออกมาเป็นเส้น การเติมแต่งสารต่าง ๆ เช่น สารลดความมัน สารลดไฟฟ้าสถิต สารทนไฟ สารลดน้ำหนักในขั้นตอนที่พอลิเมอร์ถูกหลอมนี้ จากนั้น เส้นใยพอลิเอสเตอร์จะถูกดึงยัด (Drawing) ที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะดึงยัดประมาณ 5 เท่าของความยาวเดิม เพื่อเพิ่มการจัดเรียงตัวของโมเลกุล อัตราการดึงยัดขึ้นกับการใช้งานของเส้นใย และมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วย



รูปที่ 2.26 กระบวนการดึงแบบ melt spinning [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.2 สมบัติของเส้นใย

- ค่าความเหนียว (Tenacity)

สำหรับเส้นใยยาว เส้นใย High Tenacity = 6.4-8.0 กรัมต่อดีเนียร์

สำหรับเส้นใยสั้น เส้นใย High Tenacity = 5.5-6.0 กรัมต่อดีเนียร์

- ค่าความคงทนต่อแรงดึง

สำหรับเส้นใยยาว เส้นใย High Tenacity = 105,000-125,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

สำหรับเส้นใยสั้น เส้นใย High Tenacity = 75,000-105,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

- ค่าการยืดตัว

สำหรับเส้นใยยาว เส้นใย High Tenacity = 8-11 %

สำหรับเส้นใยสั้น เส้นใย High Tenacity = 20-30 %

- อิทธิพลของความชื้น

ดูดความชื้นได้แก่ 0.4 % ดังนั้นสภาวะเปียกน้ำกับแห้งจึงไม่แตกต่างกันเท่าไร สำหรับค่าความแข็งแรง

- จุดอ่อนตัวของเส้นใย

มีจุดอ่อนตัวประมาณ 260 °C

2.7.2 เส้นใยไนลอน (Nylon fiber) [3]

ไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่มีมนุษย์ค้นพบมาอย่างบังเอิญ โดย บริษัท ดูปองท์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dr. Wallace H. Carothers และทีมงานให้ความสนใจกับงานวิจัยพื้นฐานเพื่อสร้างความเข้าใจถึงโครงสร้างโมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเรียกว่าพอลิเมอร์เหมือนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือไหม ในปี 2478 ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาของ hexamethylene diamine และ adipic acid ได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า 6,6 ต่อมาในปี 2481 เรียกพอลิเมอร์ที่ได้ว่าไนลอน ซึ่งเป็นชื่อตระกูลอย่างไรก็ดีได้มีการศึกษาพัฒนาอีกอย่างมากมาย สำหรับในประเทศไทยมีโรงงานการผลิตไนลอนรวมทั้งสิ้น 5 บริษัทเป็นการผลิตไนลอน 6 โดยใช้วัตถุดิบ คือ คาโปรแลกแทม ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นชนิดเส้นใยยาวและไนลอนชนิด POY

2.7.2.1 กระบวนการผลิต

ไนลอนเป็นเส้นใยประดิษฐ์ที่เนื้อเส้นใยเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวของพอลิเอไมด์สังเคราะห์ซึ่งมีปริมาณของแชนเอไมด์ ถูกแทนที่โดยตรงด้วยวงแหวนอะโรแมติกน้อยกว่า 85% ของปริมาณทั้งหมด

เส้นใยไนลอนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ ไนลอน 6,6 และไนลอน 6 มีความคล้ายกันมาก โดยโครงสร้างทางเคมีเป็นลักษณะองค์ประกอบของพอลิเอไมด์ (Polyamide) ประกอบด้วยธาตุหลักคือ CHON มีความแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวทางเคมีซึ่งส่งผลให้มีสมบัติต่างกันไปบ้าง

การผลิตไนลอน 6 เริ่มจากถ่านหิน มีขั้นตอนทางเคมีที่สลับซับซ้อนหลายขั้นตอนด้วยกัน โดยเริ่มจาก cyclohexanone-oxime ซึ่งเปลี่ยนสภาพไปเป็นคาโพรแลกแทมเมื่อถูกนำไปทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถัน ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของคาโพรแลกแทมเริ่มจากการให้ความร้อนที่ละน้อย โดยการใช้ไอน้ำกระทำให้หม้อที่ทำจากเหล็กไร้สนิม ซึ่งภายในมีการผสมสารเคมีดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นกรองให้สะอาดแล้วป้อนเข้าหม้อปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดพอลิเมอร์ ซึ่งมีการควบคุมความร้อนและความดันอย่างระมัดระวังทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความเสถียรในรูปของซูเปอร์พอลิเมอร์ ขั้นตอนต่อไปคือ การนำพอลิเมอร์เหลวมาเปลี่ยนรูปให้เป็นเม็ด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัตถุดิบในการนำไปหลอมเพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยต่อไป ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวคือ การปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลวหรือ melt spinning ขั้นตอนต่อไปคือ การนำไปทำการยืดดึงเย็น (Cold drawing) เพื่อให้โมเลกุลภายในจัดเรียงตัวกันให้เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของเส้นใยดีขึ้น กล่าวโดยสรุปได้ว่าหลักการสำคัญของการผลิตเส้นใยไนลอนประกอบด้วย

1. การเตรียมวัตถุดิบ
2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นเพื่อให้ได้พอลิเมอร์
3. การหลอมเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้แล้วทำการปั่นให้เป็นเส้นใย
4. ทำการยืดดึงเย็นให้กับเส้นใย

2.7.2.2 สมบัติของเส้นใย

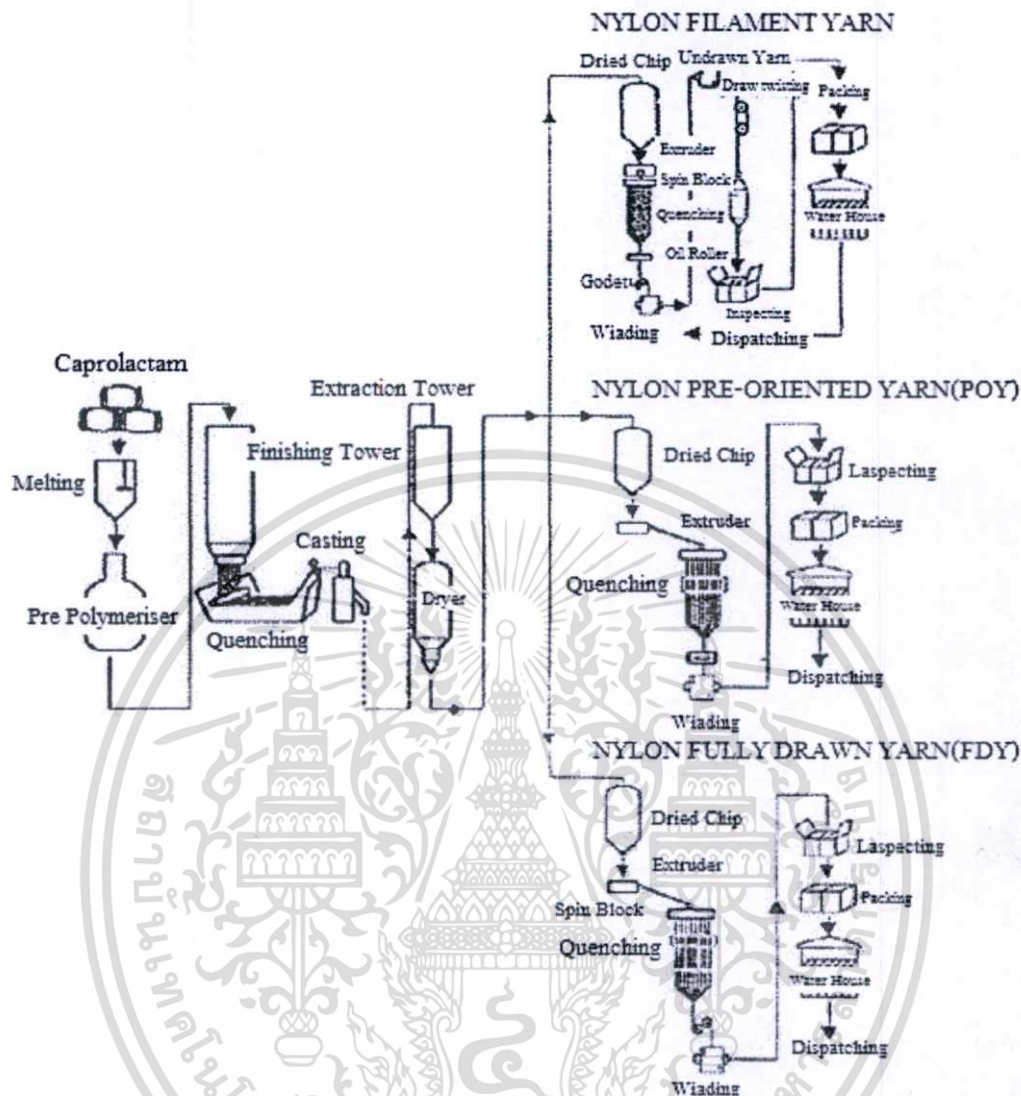
- ความคงทน ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีความคงทนสูง ความทนแรงดึง ณ จุดขาดของเส้นใยมีค่า 3.0-6.0 gpd นอกจากนี้ยังสามารถทนทานต่อการขีดถูได้ดี และสภาพยืดหยุ่นสูงมาก

- ความสามารถในการดูดซึมความชื้น มีการดูดซึมความชื้นต่ำ ความสามารถในการดูดซึมความชื้นประมาณ 4.0-4.5%

- การทนต่อความร้อน ไนลอนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมตัว โดยที่ไนลอน 6 มีจุดหลอมเหลวที่ 420 °F (216 °C) ซึ่งต่ำกว่าไนลอน 6,6 ซึ่งหลอมเหลวที่ 480 °F (250 °C)

- ความถ่วงจำเพาะ 1.14 ถือได้ว่าค่อนข้างเบา

- การยืดออก มีค่าประมาณ 23%



รูปที่ 2.27 กระบวนการผลิตเส้นใยไนลอน 6 ชนิดเส้นด้ายใยยาวรวมทั้งชนิด POY และ FDY [3]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์และคณะ [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบรอบ 40 รอบต่อนาที ให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด จึงถูกเลือกให้เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้า สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการคัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตา์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและ/หรือการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0:1 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 มีค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำที่สุด ส่วนฐานวิชาของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ ดีกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มในการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

พิมพ์ชนก แสงนิติเดชและเพียงฤทัย บุญประสิทธิ์ [36] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยการ ใช้เส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และสารช่วยผสมในปริมาณต่าง ๆ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ผสมเส้นใยและการใช้เส้นใยฝ้ายปริมาณ 10% โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และพบว่าเส้นใยฝ้ายมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากนั้นปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยการใส่โดยการใส่สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกไซด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนหรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนลงไป พบว่าเมื่อใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกไซด์กราฟท์พอลิเอทิลีน ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นชัดเจนกว่าการใช้สารก่อกวนไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่า ในส่วนฐานวิชาเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสม มาเลอิกแอนด์ไฮดรอกไซด์กราฟท์ พอลิเอทิลีน และสารก่อกวนไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน ทำให้เมทริกซ์ของแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ หรือใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกไซด์กราฟท์พอลิเอทิลีน หรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน

A.A.S Curvelo และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวโพดที่ผสมเส้นใยยูคาลิปตัส เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยใช้ความยาวเส้นใย 2-3 มิลลิเมตร ในปริมาณ 16 % โดยน้ำหนักของแป้ง โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็ว 80 รอบ/นาที เป็นเวลา 8 นาทีแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าการผสมเส้นใยลงไปช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ผสมเส้นใย ซึ่งมีมอดุลัสเพิ่มขึ้นจาก 125 เป็น 320 MPa และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลงจาก 31 % เป็น 11% และขึ้นตัวอย่างที่ผสมเส้นใยมีความชื้น 15% แต่ในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ผสมเส้นใยมีความขึ้น 22% จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการยึดเกาะและการกระจายตัวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเส้นใยมีการกระจายตัวอยู่บนเมทริกซ์ของแป้งได้เป็นอย่างดี และจากเทคนิค DSC เห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยมีค่า T_g สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ผสมเส้นใยเนื่องจากการมีเส้นใยเข้าไปผสมทำให้เส้นใยและพลาสติกไซเซออร์มีแรงกระทำซึ่งกัน จึงทำให้ช่องว่างของเมทริกซ์มีน้อยลง และทำให้อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าสูงกว่าเมื่อทดสอบด้วย เทคนิค DMTA

X. Ma และคณะ [38] ได้ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง โดยเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดที่ใช้กลีเซอรอล, ฟอรัมาดีไฮด์และยูเรียเป็นพลาสติกไซเซออร์ เส้นใยเสริมแรงที่ใช้ คือ Microwinceyette โดยใช้ความยาว 12 มิลลิเมตร ปริมาณการใช้ 0 5 10 15 และ 20 % โดยนำหนักเตรียมคอมโพสิตโดยการผสมแป้งข้าวโพดกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมระบบปิดเป็นเวลา 2 นาที ด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที ใช้อัตราส่วน 30:100 แล้วทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นนำของผสมที่ได้ผสมกับยูเรียและฟอรัมาดีไฮด์ แล้วทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดึงยึดลดลง สำหรับการดูดซับความชื้นทำการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 % พบว่าประมาณ 6 วัน เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีค่าคงที่ และในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรงผสมอยู่นั้นมีปริมาณเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ 37 % แต่เมื่อผสมเส้นใยลงไปทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นอยู่ในช่วง 21-24 %

J. H. Yang และคณะ [39] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดโดยใช้เอทิลีนบิสฟอรัมามายด์ (Ethylenebisformamide) เป็นพลาสติกไซเซออร์เปรียบเทียบกับการใช้กลีเซอรอล โดยใช้อัตราส่วนการผสมของแป้งข้าวโพดต่อพลาสติกไซเซออร์ทั้งสองเป็น 25:100 30:100 35:100 แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากการศึกษาพบว่า สมบัติทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR แสดงให้เห็นแรงกระทำระหว่างหมู่ไฮโดรเจนของวงแหวนแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) โดยพันธะ C-O ในหมู่ C-O-H ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซออร์ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซออร์และอะตอมของออกซิเจนในหมู่ C-OH มีความแข็งแรงและเสถียร แต่พันธะ C-O ในหมู่ C-O-C ไม่แข็งแรง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้กลีเซอรอลและเอทิลีนบิสฟอรัมามายด์ พบว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นของเอทิลีนบิสฟอรัมามายด์มีความแข็งแรงและเสถียรกว่าสำหรับสมบัติเชิงกลพบว่า ความแข็งแรงดึง มอดุลัส มีค่าสูงกว่าและเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลงจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่เติมเส้นใยน้อยกว่า นอกจากนี้ ค่า T_g ที่ได้มีค่าสูงกว่าด้วย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA แสดงให้เห็นว่าความเป็นผลึกมากกว่าจึงทนความร้อนได้สูงกว่า

Y. Lu และคณะ [40] ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตร์คอมโพลีเมอร์จากแป้งข้าวสาลีที่ผสมเส้นใยป่านรามิ โดยใช้ความยาว 538.5 ± 125.3 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85.4 ± 25.3 นาโนเมตร เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยใช้ปริมาณ เส้นใยที่ 0 5 10 15 20 25 30 และ 40 % โดยน้ำหนักของแป้ง จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยสูงขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยบนเมทริกซ์ของแป้งได้เป็นอย่างดี อีกทั้งเมื่อปริมาณเส้นใยสูงขึ้นทำให้คอมโพลีเมอร์สมบัติการดูดซับความชื้นได้น้อยลง จึงกล่าวได้ว่า การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตร์คอมโพลีเมอร์จากแป้งข้าวสาลีให้โครงสร้างของคอมโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นโครงร่างสามมิติ และมีแรงกระทำระหว่างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยกับเส้นใยและเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้ง

V. D. Alves และคณะ [41] ได้ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลและปริมาณอะไมโลสจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยเตรียมฟิล์มจากการหล่อแบบ (Casting) ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้คือ 5 20 32.5 และ 45 กรัมต่อน้ำหนักแป้ง 100 กรัม และเตรียมสารละลายอะไมโลส โดยผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำในเครื่องผสม (Brabender) โดยทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิ $30-60$ °C เพื่อให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์ จากการศึกษาเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้เพิ่มขึ้นทำให้ Strain at break และ Puncture deformation เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Stress at break, modulus และ puncture strength ลดลง และเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอลให้สมบัติเชิงกลที่ตรงกันข้ามกับสูตรที่ผสมกลีเซอรอล เนื่องจาก โครงสร้างของแป้งมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล โดยที่กลีเซอรอลเข้าไปอยู่บริเวณโครงตาข่ายของโมเลกุลแป้ง ทำให้เมทริกซ์ของฟิล์มเริ่มมีช่องว่างมากขึ้น เมื่อมีแรงมากระทำ จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น สำหรับปริมาณอะไมโลสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Stress at break, modulus, Puncture strength มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่า Strain at break, และ Puncture deformation มีค่าลดลงและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ไม่เติมกลีเซอรอล แต่มีและไม่มีปริมาณอะไมโลสพบว่าฟิล์มที่มีอะไมโลส ค่า Stress at break, Puncture strength มีค่าสูงขึ้นแต่ค่า Strain at break, modulus, Puncture deformation ไม่มีผลต่อสมบัติที่ได้ เนื่องจากปริมาณอะไมโลสนี้น้อยเกินไป แต่ถ้ามีปริมาณอะไมโลสที่มากเกินไปส่งผลให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างโครงตาข่ายของอะไมโลสมีความเสถียรมาก จึงทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีความแข็งแรงสมบูรณ์ และจากการศึกษาเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำออกน้อยลง เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งมีช่องว่างมากขึ้น และมีสมบัติชอบน้ำมากขึ้น จึงดูดซับความชื้นไว้ภายในโมเลกุล แต่เมื่อปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นอัตราการระเหยน้ำออกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีหมู่ O-H ของโมเลกุลอะไมโลสจำนวนมากทำให้สามารถเกิดแรงยึดเกาะกับโมเลกุลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X. Cao และคณะ [42] ได้เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วที่ผสมปานเฮมปี เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 36 % โดยน้ำหนักและใช้เส้นใย 0 5 10 15 20 25 และ 30 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มเส้นใยทำให้ ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 3.9 เป็น 11.5 MPa และมอดูลัสเพิ่มขึ้นจาก 31.9 เป็น 823.9 MPa นอกจากนี้ ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นช่วยลดความว่องไวในการดูดซับความชื้นของคอมโพสิต และจากเทคนิค FESEM แสดงให้เห็น ลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสจากเส้นใยปานเฮมปีพบว่า การกระจายตัวไม่ค่อยดี เนื่องจากมีแรงกระทำที่แข็งแรงจากผลึกนาโนของตัวเอง จึงทำให้ต้องเตรียมเส้นใยโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดก่อน และเมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลพบว่า เส้นใยกระจายตัวอยู่บนเมทริกซ์แป้งได้เป็นอย่างดี เนื่องจากแรงกระทำที่แข็งแรงของเส้นใยถูกทำลายและทำให้เกิดแรงยึดเกาะแรงใหม่ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ขึ้นมาแทน จากการศึกษาด้วย WAXD ทำให้ทราบหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏขึ้นของเส้นใยในแต่ละสูตร และเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางด้านความร้อนพบว่า ค่า T_g ในส่วนของวัฏภาคแป้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเส้นใยสามารถเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ของแป้งมีผลให้ความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลแป้งลดลง จึงทำให้ T_g มีค่าสูงขึ้น

Y. Z. Wan และคณะ [43] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น และการย่อยสลายของคอมโพสิตชีวภาพที่ได้จากการหล่อแบบ (Casting) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial cellulose) โดยนำเส้นใยเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งสาลีโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ด้วยกระบวนการทำให้อิมัลชันในสารละลาย โดยใช้อัตราส่วนของแป้งสาลีต่อกลีเซอรอล 30 % โดยน้ำหนัก และปริมาณเส้นใยเซลลูโลส 0 7.8 15.1 และ 22% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยเมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติมพบว่า ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าสูงขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง จุดขาดมีค่าลดลง และจากเทคนิค SEM แสดงให้เห็น โครงสร้างของชั้นเส้นใยที่เพิ่มขึ้นและกระจายอยู่ในเมทริกซ์ จากค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสที่สูงขึ้นแสดงว่าเมทริกซ์และเส้นใยสามารถยึดเกาะกันได้ดี สำหรับสมบัติการดูดซับความชื้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นการดูดซับความชื้นได้น้อยลง ถึงแม้ว่าสมบัติของแป้งและเส้นใยมีความชอบน้ำเหมือนกันแต่เนื่องจากผลของโครงสร้างทางเคมี ที่สามารถยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวของ 2 องค์ประกอบที่เกาะกันอย่างแน่นหนา จึงทำให้การดูดซับความชื้นได้น้อยลง สำหรับการย่อยสลายโดยการฝังดินทำการทดสอบที่ปริมาณเส้นใย 15.1 % โดยน้ำหนัก โดยทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 30x10 มิลลิเมตร ฝังลงดินลึก 10 เซนติเมตรแล้วนำมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 5 วัน เป็นเวลาทั้งสิ้น 20 วัน หลังจากนั้นนำไปคำนวณหา น้ำหนักที่สูญหายไปของชิ้นงาน พบว่าการย่อยสลายคอมโพสิตเกิดช้ากว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ผสม เส้นใย โดยอัตราการย่อยสลายเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.9 % ต่อวัน ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ผสมเส้นใยอัตราการย่อยสลายเฉลี่ยอยู่ที่ 1.0 % ต่อวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L. Dobircau และคณะ [44] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้จากแป้งข้าวสาลีที่มีโปรตีนสูงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายความยาวระดับนาโนเมตรถึงมิลลิเมตร โดยทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ปริมาณเส้นใยที่ใช้ คือ 0 5 7.5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ก่อนที่ทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเส้นใยที่ผสมมากขึ้นทำให้สมบัติการดึงยึดได้น้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ค่าการดึงยึดที่ได้ลดลง 78 % เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ไม่ผสมเส้นใย เนื่องจากเส้นใยที่มากขึ้นทำให้ความเหนียวลดลงจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสที่ได้มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นด้วย และที่ปริมาณเส้นใย 10 % โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยกับเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ดี การกระจายตัวดี และการกระจายแรงระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน ระหว่างแป้งกับเซลลูโลสที่อยู่ในเส้นใยด้วยจึงทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (Flax) พบว่าแนวโน้มของสมบัติเชิงกลเป็นไปในแนวเดียวกันแต่ค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยึดสูงกว่าการใช้เส้นใยฝ้ายเสริมแรงเนื่องจากสภาวะการอัดรีดที่อุณหภูมิและความดันต่างกัน และผลของการระเหยออกของน้ำและกลีเซอรอลเป็นอีกส่วนหนึ่งเช่นกันที่ทำให้สมบัติของคอมโพสิตที่ได้แตกต่างกัน จากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นการกระจายตัวของเส้นใยบนเมทริกซ์และเห็นได้ว่าเส้นใยมีการกระจายตัวอยู่ทั่วเมทริกซ์ แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปพบว่าเส้นใยเริ่มจับตัวกันเป็นก้อนเช่นจากการศึกษาที่ปริมาณการใช้เส้นใย 15 % โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของเส้นใยเริ่มไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดต่ำลง จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยลงไปไม่ได้มีผลต่อความเป็นผลึกของคอมโพสิตที่ได้ โดยลักษณะพีคของสเปกตรัมคล้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ไม่ผสมเส้นใย สำหรับสมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วย TGA การที่มีเส้นใยผสมอยู่ด้วยไม่มีผลทำให้สมบัติทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แป้งข้าวเจ้าตราใบหยก ชนิดไม่น้ำตาลพิเศษ จากบริษัท บางกอกอินเตอร์ฟู้ด จำกัด องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้าแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า

รายละเอียด	ผลวิเคราะห์
อะไมโลส	18-27%
อะมิโลเพกติน	70-90%
ความแห้ง	86.90-88.05%
ความชื้น	11.50-13.00%
ไขมัน	0.25%
เถ้า	0.23%
โปรตีน	6.50-7.00%
ขนาด	ไม่เกิน 160 ไมครอน
ความเป็นกรด-ด่าง	6.0-7.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3. กรดสเตียริก เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

4. เส้นใยฝ้าย

องค์ประกอบของเส้นใยฝ้าย แสดงดังตารางที่ 3.2

5. เส้นใยตาล

องค์ประกอบของเส้นใยตาล แสดงดังตารางที่ 3.2

6. เส้นใยไหม (*Bombyx mori*) ที่ผ่านการลอกกาวแล้ว จาก บริษัท จุลไหมไทย จำกัด จังหวัดเพชรบูรณ์

7. เส้นใยพอลิเอสเทอร์ จากบริษัท Teijin Polyester (Thailand) Ltd. จังหวัดปทุมธานี

สมบัติของเส้นใยพอลิเอสเทอร์แสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.เส้นใยไนลอน จากบริษัท Thai Polymer Textile Co., Ltd. จังหวัดสมุทรปราการ
สมบัติของเส้นใยไนลอนแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยตาล

องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)	เส้นใย		มาตรฐาน (Standard)	หน่วย (Unit)
	ฝ้าย	ตาล		
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	99.22	68.64	Acid chlorite Method of Browing	%โดยน้ำหนักอบแห้ง (% by oven dry weight)
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (α -Cellulose)	97.76	43.82	TAPPI-T203-om-93	%โดยน้ำหนักอบแห้ง (% by oven dry weight)
ปริมาณลิกนิน (Lignin)	N/A	14.79	TAPPI-T222-om-98	%โดยน้ำหนักอบแห้ง (% by oven dry weight)

หมายเหตุ Holocellulose = Hemicellulose + α -Cellulose

N/A = ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 3.3 สมบัติของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ Polyethylene terephthalate (PET) รุ่น BHT.1500-144
P100L

จาก บริษัท Teijin Polyester (Thailand). Ltd

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
ความละเอียด (Fineness)	denier	1512.00 \pm 25.00
ความเหนียว (Tenacity)	g/ denier	9.65 \pm 0.55
การดึงยืด (Elongation)	%	14.00 \pm 2.00
การดูดซับความชื้นมัน (Oil pick up)	%	0.50 \pm 0.25
การหดตัวด้วยความร้อน (Dry heat shrink)	%	11.00 \pm 2.00

หมายเหตุ Dry heat shrink ทำการทดสอบที่ 150 °C 30 นาที

ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติของเส้นใยไนลอน 6 รุ่น 70-24 I/L

จาก บริษัท Thai Polymer Textile Co., Ltd.

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
ความเหนียว (Tenacity)	g/ denier	5
การดึงยืด (Elongation)	%	40
จุดหลอมเหลว (melting point)	°C	220
การดูดซับความชื้นมัน (Oil pick up)	%	3
การหดตัวด้วยความร้อน (Dry heat shrink)	%	10

หมายเหตุ Dry heat shrink ทำการทดสอบที่ 105 °C

ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) : LABTECH ENGINEERING
2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP 20
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD.

รุ่น LR 5K

5. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore A) : Intro enterprise CO., Ltd
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก : Precisa Instrument
7. แผ่นเปลวอลูมิเนียม (Aluminium Foil)
8. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
9. เครื่องแก้ว
10. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer, TGA) : Parkin Elmer

Instrument Co., Ltd รุ่น Pyris I TGA HT

11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : JEOL

รุ่น JSM-6400

12. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX

13. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) : Hunter lab รุ่น Miniscan XE plus

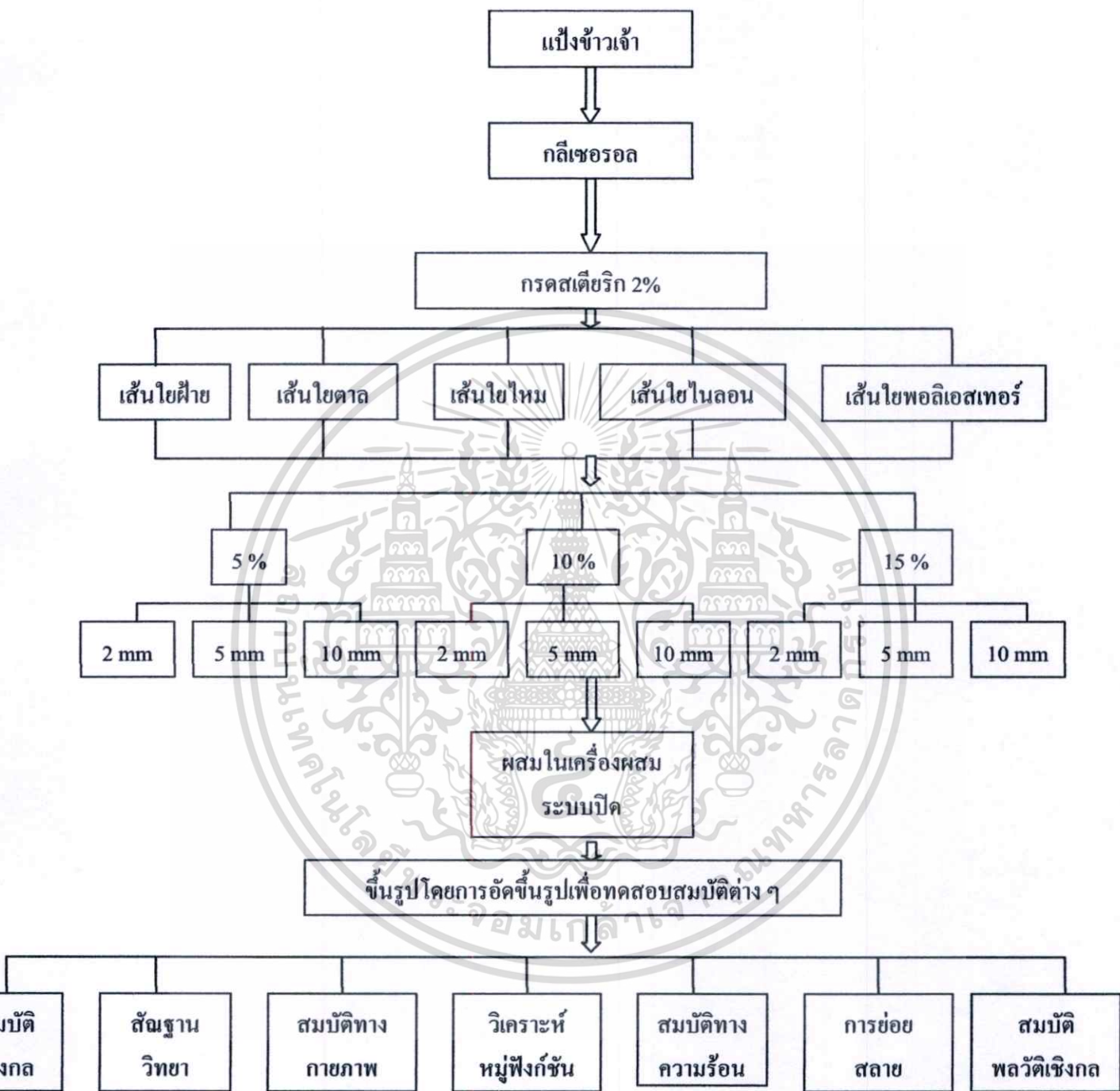
14. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) : รุ่น D 8 Advance

15. เครื่องทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic Thermo-Mechanical Analyser, DMTA) :

Rheometric Scientific รุ่น DMTA V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า

1. ชั่งน้ำหนักแป้งและกลีเซอรอลอย่างละ 100 g ใส่ลงในภาชนะ เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง หลังจากนั้นนำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยกรดสเตียริก 2% โดยน้ำหนัก

2. นำแป้ง กลีเซอรอล และกรดสเตียริก ที่เตรียมได้มาทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง เป็นเวลา 3 นาที ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm

3. นำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า

1. นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากพอลิเมอร์

2. ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแล้วประกบด้วยแผ่นโลหะชนิดพอลิเอสเตอร์

3. วางเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลงในแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันแล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (170 องศาเซลเซียส) และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที

4. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปคัมเบลเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

3.3.3 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ

1. นำเส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยตาล เส้นใยพอลิเอสเตอร์และเส้นใยไพลอน มาตัดให้ได้ขนาดความยาวต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความยาวและขนาดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) (μm)	ความยาว (L) (mm)	L/D ratio
ฝ้าย	11.30 \pm 0.60	2	176/1
		5	442/1
		10	884/1
ตาล	105.00 \pm 13.94	2	19/1
		5	47/1
		10	95/1
ไหม	9.57 \pm 1.42	2	208/1
		5	522/1
		10	1044/1
พอลิเอสเตอร์	32.14 \pm 0.00	2	62/1
		5	155/1
		10	311/1
ไนลอน	17.86 \pm 0.00	2	111/1
		5	279/1
		10	559/1

2. ทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตา์ช โดยการผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวต่าง ๆ และปริมาณเส้นใยต่าง ๆ โดยน้ำหนักของแป้งกับกลีเซอรอล แสดงดังตารางที่ 3.6

3. นำของผสมในแต่ละสูตรมาทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมชนิด ความเร็วสูง เป็นเวลา 3 นาที ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm จากนั้นผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

4. นำเทอร์โมพลาสติกสตา์ชแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ที่ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที

5. นำเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใย

ปริมาณ							
แป้ง (g)	กลีเซอรอล (g)	กรดสเตียริก (%wt.)	เส้นใย				
			ฝ้าย (%wt.)	ไหม (%wt.)	ตาล (%wt.)	พอลิเอสเทอร์ (%wt.)	ไนลอน (%wt.)
100	100	2	0	0	0	0	0
100	100	2	5	5	5	5	5
100	100	2	10	10	10	10	10
100	100	2	15	15	15	15	15

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่ได้หลังจากขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป

1. ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูป ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore A โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาน้อยกว่า ¼ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาความแข็งแรงกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกด อยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือ ความแข็งกดของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว

2. สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูป ตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่เตรียมได้ [45]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด (Elongation)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Strain at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240	Shore A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด
 ทำการทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล(Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปคัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60%ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed	:	40 mm/min
Gauge length	:	25 mm
Load cell	:	100 N



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [46]

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = F/A$$

$$\text{มอดุลัส (Young's modulus, E)} = (F/A) / [(L-L_0)/L_0]$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)} = [(L-L_0)/L_0] * 100$$

- เมื่อ
- F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
 - L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
 - L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

3.1ปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

ทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 104 [47] นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปเก็บในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซิลิกาเจล (Silica gel) ความชื้นสัมพัทธ์ 0% โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความชื้นสัมพัทธ์ 75% และน้ำกลั่น (Distilled water) ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 วัน ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

$$M_t (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น
 W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ
 W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

3.2การวัดสี (Color measurement) [48]

ทำการทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แล้วทำการเปรียบเทียบกับแทบมาตรฐานโดยวัดทั้งสิ้น 10 จุด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเดนหรือซินอน D 65/10° โดย

L^* : ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)
 $L = 0$ = perfect black sample
 $L = 100$ = perfect white sample

a^* : ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (red-green)
 a เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีแดง
 a เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

b^* : ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellow-blue)
 b เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง
 b เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

C^* : ความสดใสของสี

สามารถคำนวณได้จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$

h^* : เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใดมีหน่วยเป็นองศา

สามารถคำนวณได้จาก $h^* = \tan^{-1} [b^* / a^*]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [49]

ตัดชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20x50 มิลลิเมตร ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยการฝังดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิในการย่อยสลาย 32 ± 2 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-20% ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ลดลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน

5. การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูป โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยในเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ และรอยต่อระหว่างวัฏภาคของเส้นใยและเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์

6. สมบัติทางความร้อน

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสถียรภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ ในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

7. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน $10^4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้กราฟสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

8. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) [48]

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่มีความหนา 200 μm และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2 θ) ในช่วง 3-33° ด้วยอัตราเร็ว 1°/นาทีแล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าในตัวอย่าง

9. การทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล (Dynamic mechanical thermal analysis)

นำชิ้นตัวอย่างแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปที่ต้องการทดสอบ มาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร มาทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล โดยใช้สภาวะการทดสอบแบบ Dual Cantilever Bending ด้วยอัตราการให้ความร้อน 3°C/min ในช่วงอุณหภูมิ -100 °C ถึง 100 °C ความถี่ 1 Hz และความเครียด (Strain) 0.1%



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์โดยใช้เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอนเป็นส่วนเสริมแรง โดยเลือกศึกษา ชนิด ปริมาณและขนาดที่เหมาะสมของเส้นใยที่ทำให้สมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าดีขึ้น โดยศึกษาจาก สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลาย

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

4.1 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย

4.1.1 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยฝ้าย

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	40.44	7.36	17.47	18.96	67.1
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	55.02	5.51	22.14	22.79	76.0
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	48.13	6.01	18.23	19.20	71.7

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง, ค่า a^* กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว, ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C แสดงความสดใของสี, ค่า h° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L^*) ของเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้ากับเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายพบว่า เมื่อผสมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้ค่าความสว่างมากขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นตัวอย่างที่ผสมเส้นใยฝ้ายมีสีจางลงและเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเส้นใยที่ต่างกัน (5% และ 10%) พบว่าแนวโน้มของสีชิ้นงานมีสีจางลงโดยที่ความสว่างมีค่ามากขึ้นจาก 40.44 เป็น 48.13 แต่เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยที่ต่างกัน (2 mm และ 10 mm) พบว่าแนวโน้มของสีชิ้นงานมีสีเข้มขึ้นโดยค่าความสว่างลดลงจาก 55.02 เป็น 48.13

ค่า a^* พบว่าทั้งเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีแดงเช่นเดียวกันหมด แต่ทั้งนี้เทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้าแสดงสีแดงใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย สำหรับกรณีเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณและขนาดที่แตกต่างกันพบว่าค่าแสดงสีแดงใกล้เคียงกัน

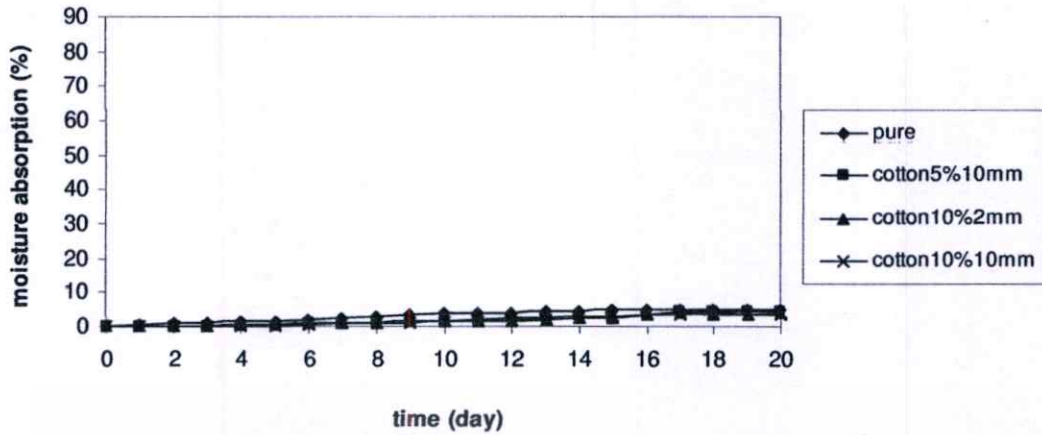
ค่า b^* พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้ามีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายและเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยและขนาดที่แตกต่างกันพบว่าแสดงค่า b^* ใกล้เคียงกันซึ่งโดยรวมแล้วเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ทุกสูตรมีแนวโน้มแสดงค่าไปทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมด

ค่า C^* ซึ่งแสดงถึงความสดใสพบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้ามีความสดใสต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายและพบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายมีความสดใสใกล้เคียงกันทั้งกรณีปริมาณและความยาวที่แตกต่างกัน

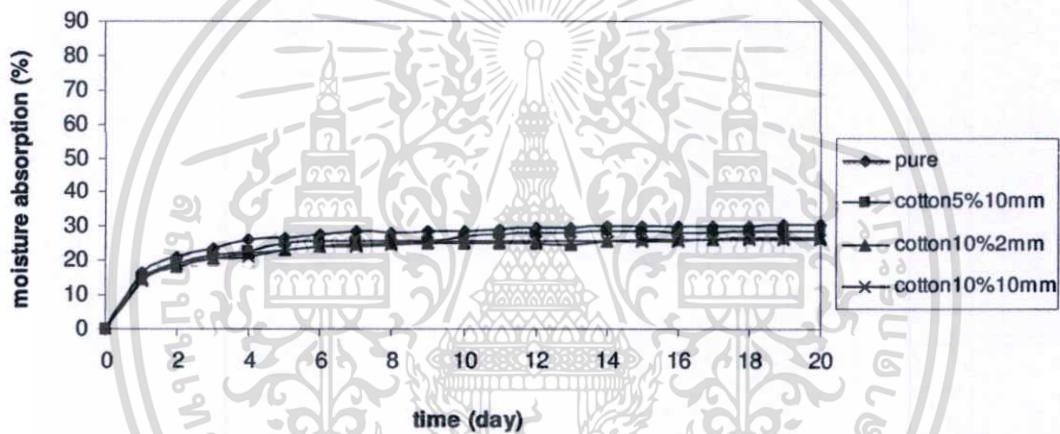
ค่า h° พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกที่ผสมเส้นใยฝ้าย 5% ความยาว 10 mm มีตำแหน่งของสีใกล้เคียงกันเนื่องมาจากค่าตัวเลขของ a^* และ b^* ของทั้งสองตัวอย่างค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ปริมาณและความยาวพบว่า กรณีปริมาณเส้นใยที่มากกว่า (10%) และเส้นใยที่สั้นกว่า (2 mm) ทำให้ค่า h° สูงกว่ากรณีเส้นใยปริมาณน้อยกว่า (5%) และยาวกว่า (10 mm) เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชั้นตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายแสดงสีชิ้นงานเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง

4.1.2 การดูดซับความชื้น

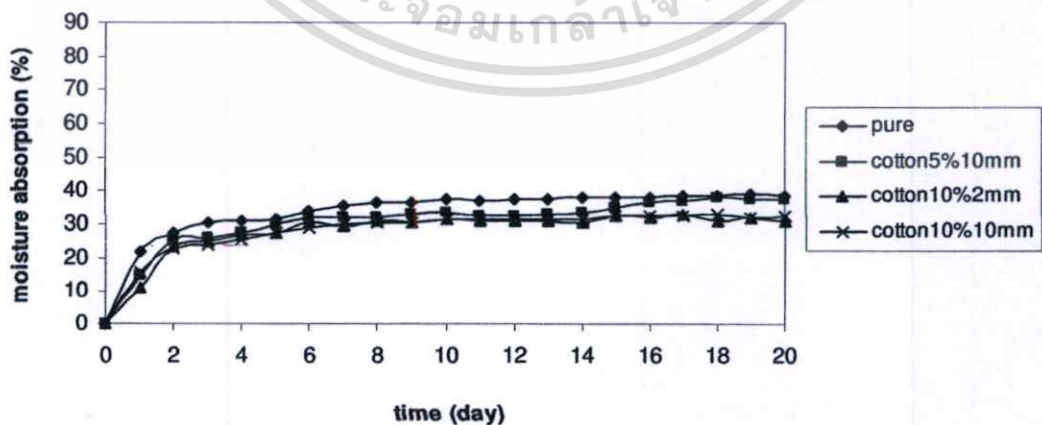
ศึกษาการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสไตรช์จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก)-(ง)



รูปที่ 4.1 (ก) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

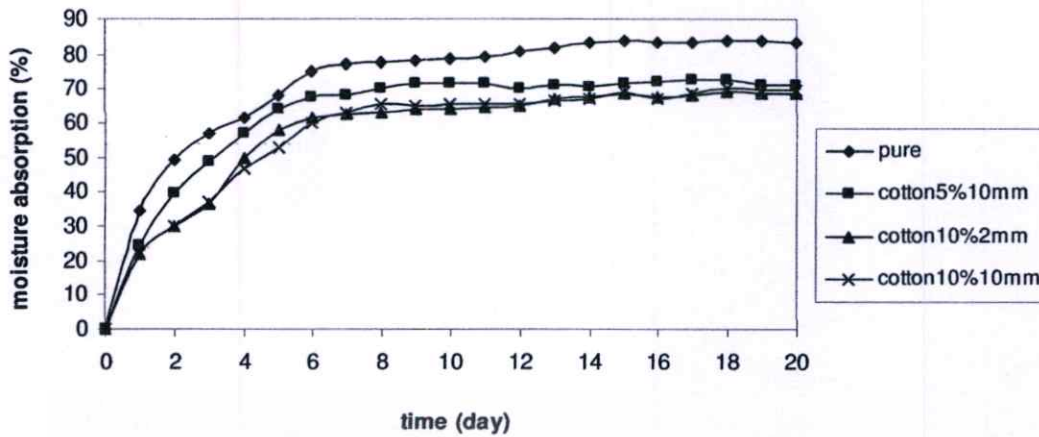


รูปที่ 4.1 (ข) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 4.1 (ค) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (ง) เเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

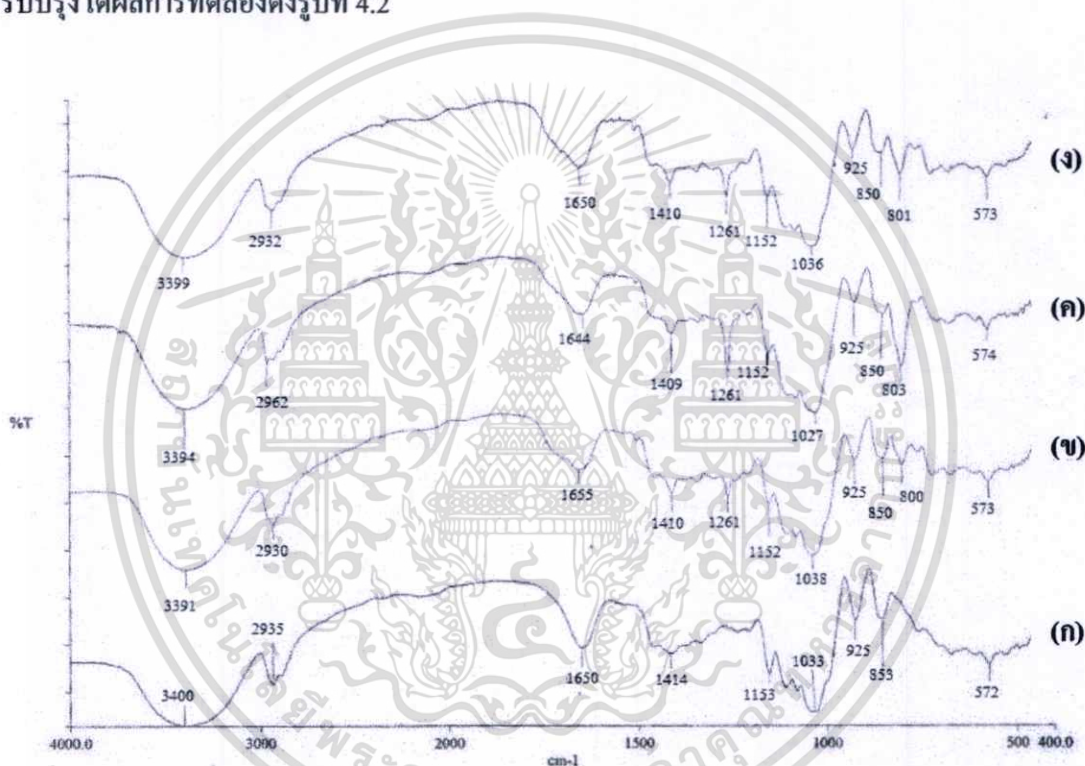
จากการทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในทุก ๆ ความชื้นสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.1 (ก)-(ง)) พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เป็นไปทำนองเดียวกัน คือ ในช่วง 3 วันแรกมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไปขึ้นตัวอย่างมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นน้อยลงจนกระทั่งอิ่มตัว เมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% ประมาณ 5% 30% 38% และ 83% ตามลำดับ เนื่องจากแป้งมีองค์ประกอบเป็นอะไมโลสและอะมิโลเพกทินซึ่งมีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี [37,50] และเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์พบว่าความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง แสดงว่าการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีความต้านทานต่อความชื้นดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเส้นใยฝ้ายมีสภาพขั้วที่น้อยกว่าแป้ง ดังนั้นจึงดูดซับความชื้นได้ลดลง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ M.Gaspar et al. [51]

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยฝ้ายสามารถดูดซับความชื้นได้ 7-8% [52] และแป้งสามารถดูดซับความชื้นได้ 11.5-13% [51] และเมื่อพิจารณาการเพิ่มของปริมาณเส้นใยฝ้ายต่อความสามารถในการดูดซับความชื้น พบว่า เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5% ของน้ำหนักแป้ง ความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% ประมาณ 4% 28% 33% และ 70% ตามลำดับและเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายปริมาณ 10% ของน้ำหนักแป้งความสามารถในการดูดซับความชื้นมีค่าประมาณ 3% 25% 31% และ 68% ตามลำดับ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลงซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ X. Ma et al. [38], M.G. Martins et al. [53] และความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกันใน

ที่นี้ คือ ความยาว 2 mm และ 10 mm ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% ของน้ำหนักแห้งที่ความยาว 2 mm และ 10 mm แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.1(ก)-(ง)) ในทุก ๆ ความชื้นสัมพัทธ์

4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจากแป้งข้าวเจ้าที่ยังไม่มีการปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2

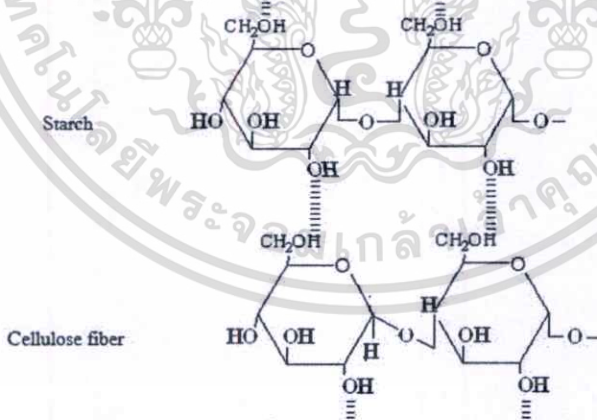


รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ (ก) ที่ไม่ได้ปรับปรุง (ข) ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค) ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm และ (ง) ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซที่ไม่ได้ปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย ช่วง $3500-3250\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ OH-stretching จากแป้งและกลีเซอรอล แลบฟีก ช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH-stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของแป้งแลบฟีกที่ 1650 cm^{-1} เป็นลักษณะ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง [54-57] แลบฟีกที่ 1410 cm^{-1} เป็น

ลักษณะการสั่นแบบ OH-bending ของแป้ง [56] แถบพีกช่วง $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของ แป้ง ลักษณะพีกในช่วง $1200-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [57]

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายนั้น พบว่า พีกที่ 3400 cm^{-1} และ 1410 cm^{-1} ที่แสดงลักษณะการสั่นของ OH-stretching และ OH-bending ในแป้งเมื่อผสมเส้นใยฝ้ายทำให้พีกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.2(ข)-(ง)) ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและเส้นใยที่ใส่เข้าไป [58-59] ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Pawlak and M. Mucha และ K. Aoi et.al [60-61] โดยรายงานการวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FTIR โดยที่เมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น (พันธะไฮโดรเจน) ระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ได้ โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยว ๆ นอกจากนี้ยังพบพีกสเปกตรัมที่ 1261 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending สเปกตรัมในช่วง $860-800\text{ cm}^{-1}$ และที่ 803 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลสที่มีอยู่ในเส้นใยฝ้าย [62] อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งและเส้นใยเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 4.3

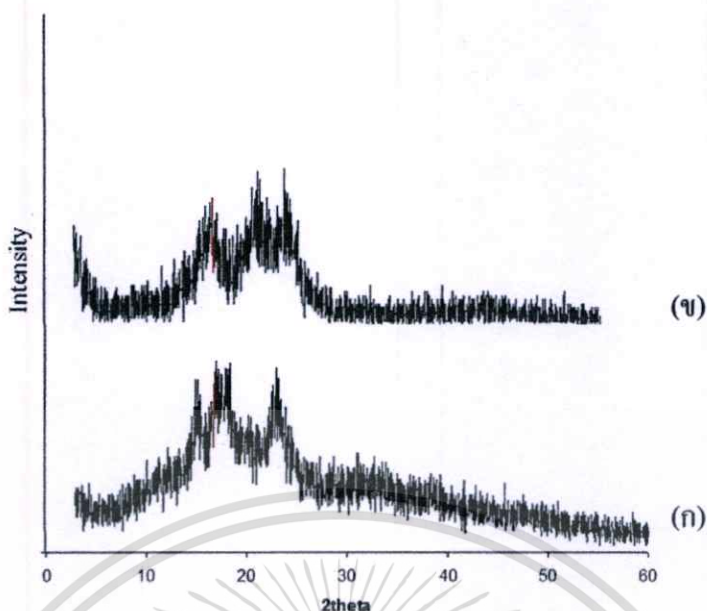


รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชและเส้นใยเซลลูโลส

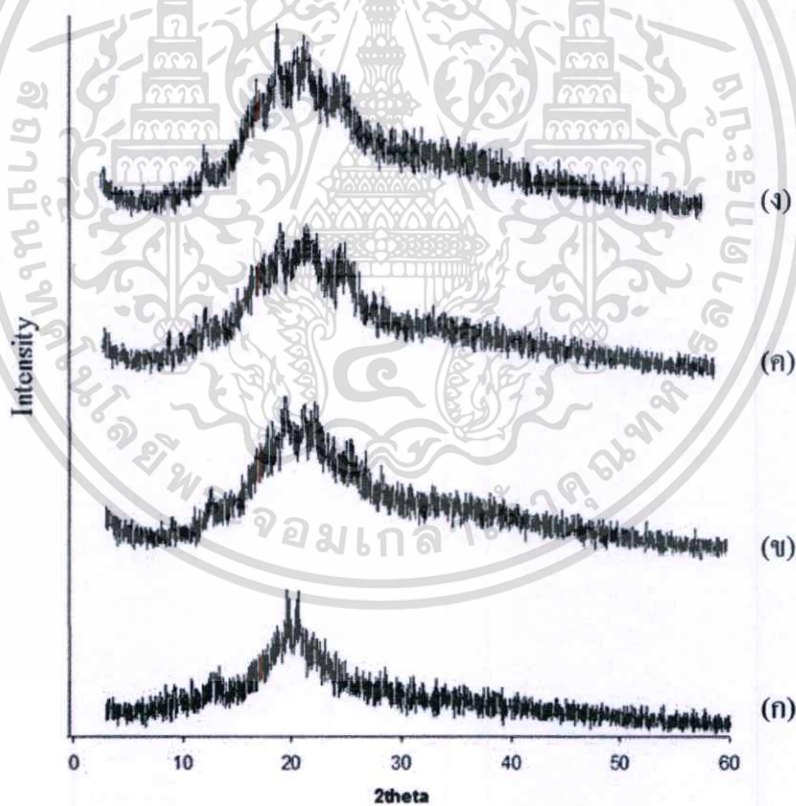
4.1.4 XRD

รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติคสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชที่เติมเส้นใยฝ้าย โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4-4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟรกโตแกรมของ (ก) แป้งข้าวเจ้า และ (ข) เส้นใยฝ้าย



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 5% ความยาว 10 mm
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 2 mm
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4-4.5 พบว่า X-ray diffraction pattern ของแป้งข้าวเจ้าแสดงโครงสร้างผลึกแบบ A-type พบพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 14.9° , 17.4° , 18.1° และ 23.3° [63] เส้นใยฝ้ายพบพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 17.7° , 23.3° , 26.4° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Cellulose I [64] เมื่อนำแป้งมาเติมพลาสติกไซเซอรส์และผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยให้ความร้อนและแรงเฉือน ผลึกของแป้งถูกทำลายทำให้ลักษณะผลึกแบบ A-type ของแป้งหายไปและแสดงผลึกแบบ V_H -type ซึ่งเป็นลักษณะผลึกระหว่างพลาสติกไซเซอรส์กับแป้ง [57] จากผลการทดลองพบว่า (รูปที่ 4.5) X-ray diffraction patterns ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เกิดเป็นโครงสร้างผลึกใหม่ที่มีความเป็นผลึกลดลง (V-type) ให้พีกที่ตำแหน่งเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับ X-ray diffraction patterns ของแป้ง โดยเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้า ให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 20.6° ซึ่งเป็นพีกที่พบเนื่องจากผลของความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปที่ทำให้ผลึกของแป้งบริสุทธิ์ถูกทำลายไป ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ให้พีกที่มุม 2θ ประมาณ 19.6° [65]

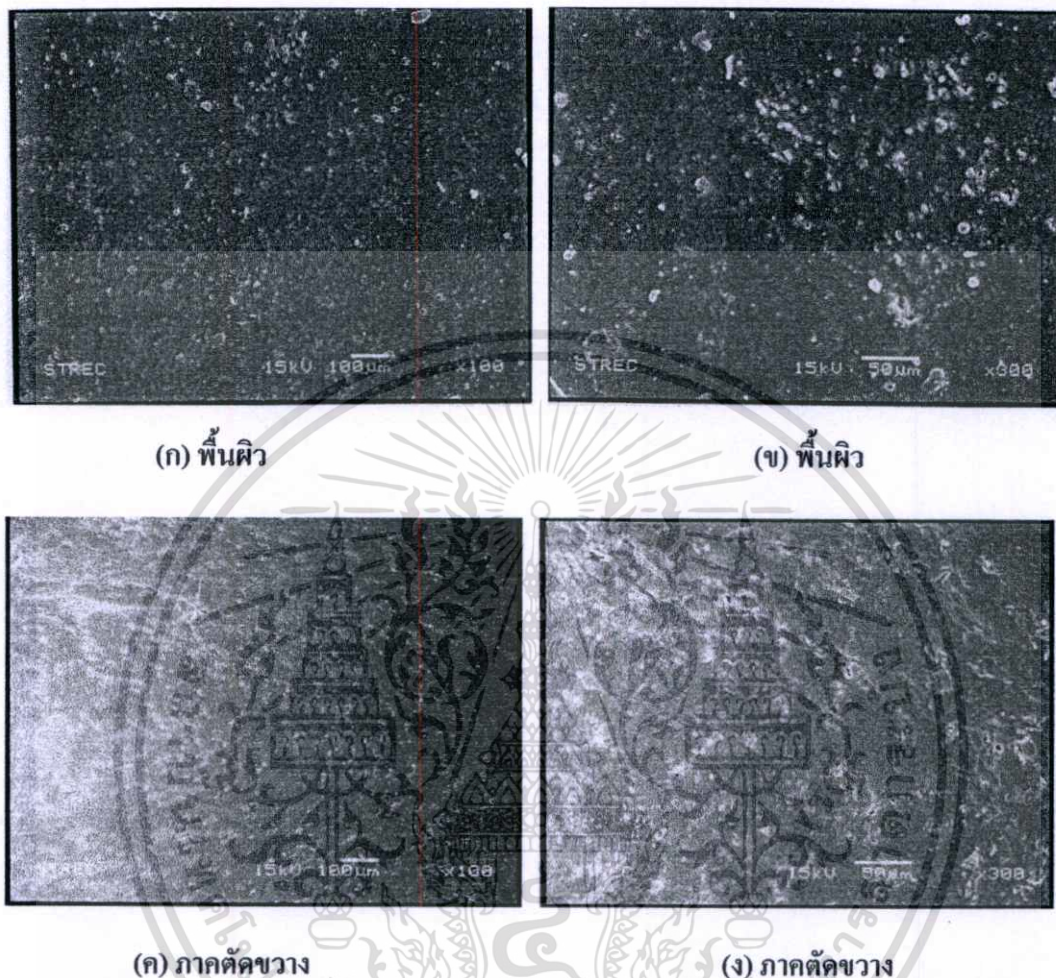
เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยฝ้ายพบพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 19.6° , 22.2° และ 25.7° โดยที่เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายทำให้ความเข้ม (Intensity) ของพีกที่มุม 2θ มีความเข้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยฝ้ายที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้า [64] ซึ่งพบว่าพีกที่มุม 2θ ประมาณ 12.7° นั้นเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้ความเข้มของพีกจากองค์ประกอบแป้งมีความชัดเจนมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบพีกอื่น ๆ ของเส้นใยฝ้ายปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยฝ้ายให้ X-ray diffraction patterns ที่แสดงพีกต่าง ๆ จากเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเส้นใยฝ้าย [44]

4.1.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยฝ้ายทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แป้งและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้ง โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 5% และ 10% ของน้ำหนักแป้งที่มีความยาวเส้นใย 2 mm และ 10 mm เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ก้ำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงผลดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 (ก)-(ง) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ก้ำลังขยาย 100 และ 300 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ พบว่า (รูปที่ 4.6 (ก)-(ข)) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายมีลักษณะพื้นผิวมีส่วนที่เรียบและส่วนที่ขรุขระ และ (รูปที่ 4.6 (ค)-(ง)) แสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์โดยพบว่า

ลักษณะของพื้นผิวมีความเรียบและขรุขระเช่นเดียวกับภาพเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่สังเกตจากลักษณะพื้นผิว (รูปที่ 4.6 (ก)-(ข))



(ก) พื้นผิว

(ข) พื้นผิว

(ค) ภาคตัดขวาง

(ง) ภาคตัดขวาง

รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 100 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยแสดงแสดงพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 5% ความยาว 10 mm (รูปที่ 4.7 (ก)-(ข)) เส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 2 mm (รูปที่ 4.7 (ค)-(ง)) เส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 10 mm (รูปที่ 4.7 (จ)-(ฉ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่า มีเส้นใยฝ้ายบางส่วนที่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แป้ง

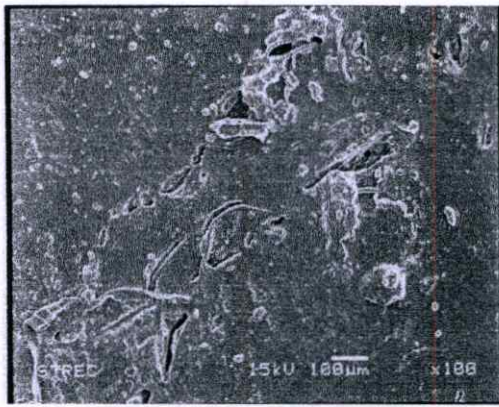
จากรูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้งและเส้นใยมีการฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

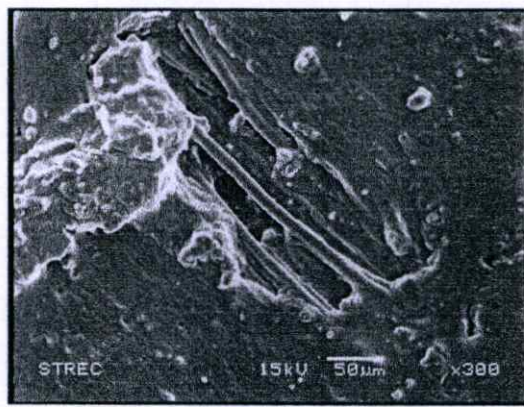
ของแปรงได้ โดยพบว่าเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% พบว่าเส้นใยมีการกระจายตัวในเมทริกซ์แปรงได้มากขึ้นซึ่งแสดงถึงความเข้ากันระหว่างเมทริกซ์แปรงและเส้นใยที่มากขึ้น การที่เส้นใยฝ้ายสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้กับเมทริกซ์แปรงเนื่องมาจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งแสดงความมีขั้วเหมือนกันทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุภาค มีการกระจายตัวที่ดี มีการยึดเกาะกันแน่นหนา ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แปรงกับเส้นใยฝ้ายที่แข็งแรง

สำหรับความยาวของเส้นใยเมื่อใช้ปริมาณที่เท่ากัน คือ 10% โดยน้ำหนักของแปรงแสดงดังรูปที่ 4.8 (ค) และ (จ) พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยไม่ต่างกันมากนัก คือ อนุภาคของแปรงสามารถเกาะอยู่บนผิวของเส้นใย แต่เส้นใย 10 mm สังเกตเห็นว่ามีส่วนที่เส้นใยไม่ถูกปกคลุมด้วยอนุภาคแปรง

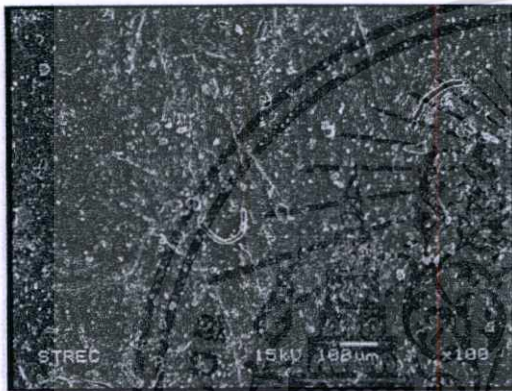




(ก)



(ข)



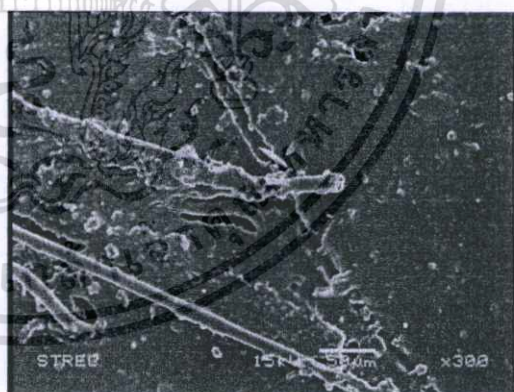
(ค)



(ง)



(จ)



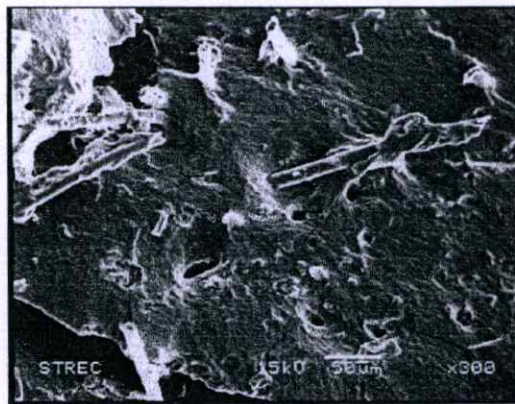
(ฉ)

รูปที่ 4.7 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้ายที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยฝ้าย 10% โดย น้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

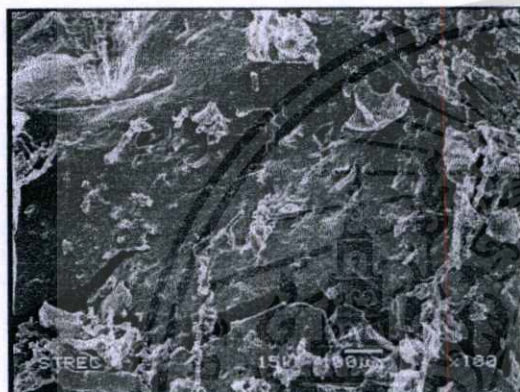
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



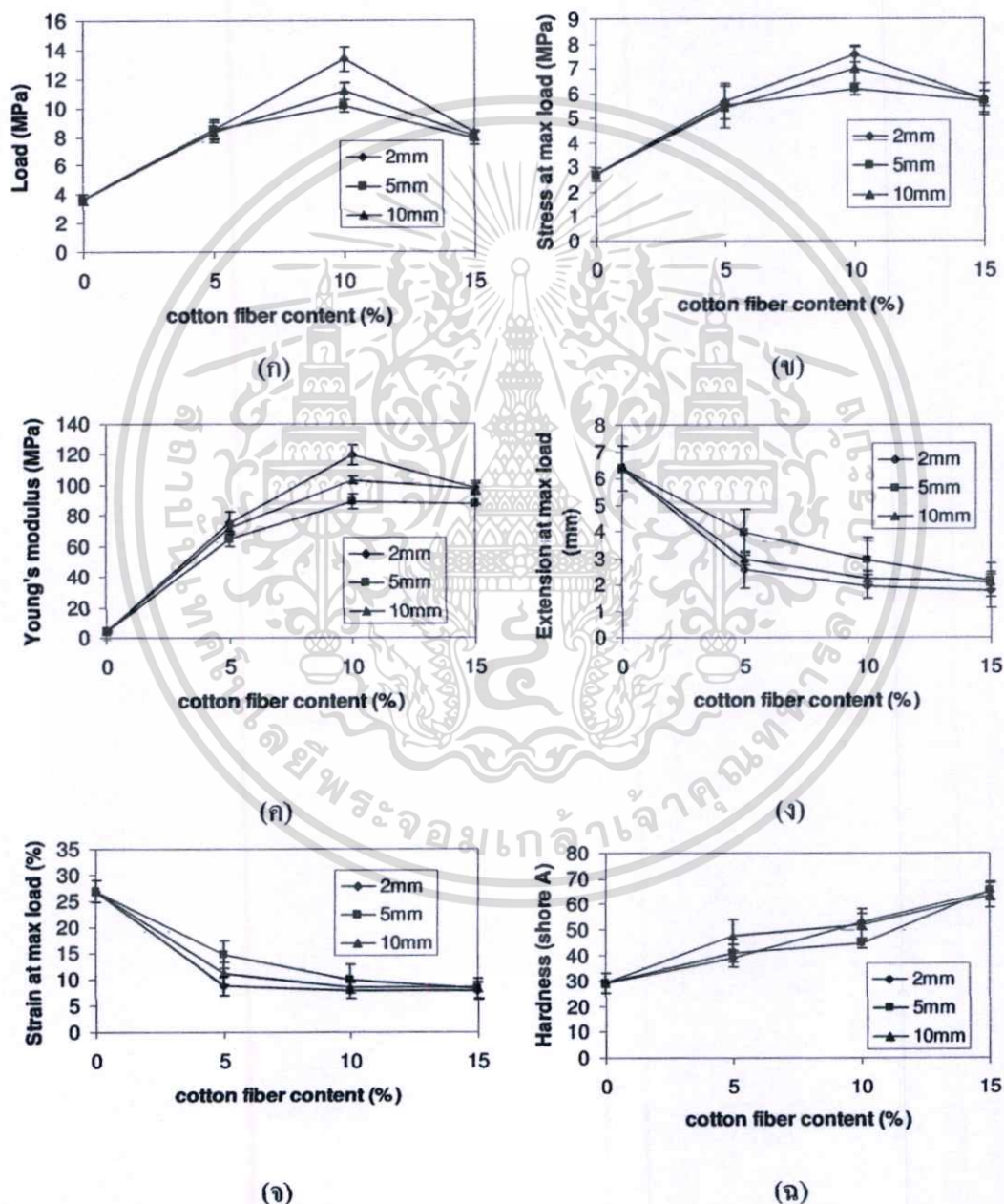
(ฉ)

รูปที่ 4.8 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตา์รซ์จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้ายที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การยืดออก เบอร์เซนต์ ความเครียด และความแข็งกด โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักที่ขนาดความยาว 2 mm 5 mm และ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) 176/1 442/1 และ 884/1 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง โดยให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) การดึงยืด (จ) เบอร์เซนต์ความเครียด และ (ฉ) ความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 (ก) - (ฉ) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่เติมเส้นใยฝ้ายในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.9 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.9 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.9 (ค)) ของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรง มีมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์และสามารถทนแรงดึงตามแนวแกนเส้นใยได้ดีเนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยฝ้ายได้ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของฟังก์ชันการสั่นที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ที่ตำแหน่ง OH-stretching และ OH-bending มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง (รูปที่ 4.2) จึงทำให้ผสมเข้ากันได้ดี (ภาพจาก SEM รูปที่ 4.8 (ก)-(ฉ)) นอกจากนี้โครงสร้างของแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยฝ้ายมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ มีความมีขั้ว จึงทำให้เกิดความเข้ากันได้ของวัฏภาคระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ แต่เมื่อมีปริมาณเส้นใยฝ้ายเพิ่มมากขึ้นที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ลดลง ได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส เนื่องมาจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปส่งผลให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของเนื้อแป้ง เมทริกซ์จึงขาดความต่อเนื่องเกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาคจึงทำให้การรับแรงและส่งผ่านแรงทำได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ บุญยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ และคณะ [4] ที่ศึกษาการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยพบว่าปริมาณเส้นใยฝ้าย 15 % โดยน้ำหนักไม่สามารถทำการผสมเส้นใยฝ้ายให้เข้ากับเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ได้ สำหรับความยาวของเส้นใยฝ้ายที่ใช้แตกต่างกันพบว่า ความยาวที่ 2 mm ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดเนื่องจากเส้นใยมีพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์แป้งได้เป็นอย่างดี (ภาพจาก SEM รูปที่ 4.8 (ค) และ (ง))

ส่วนการดึงยึด (รูปที่ 4.9 (ง)) และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.9 (จ)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพราะมีเส้นใยฝ้ายเข้าไปช่วยเสริมแรงเนื่องจากสมบัติของเส้นใยฝ้ายที่มีผลึกสูงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำจึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ไม่มีการเติมเส้นใยฝ้าย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยืดออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า สำหรับความยาวของเส้นใยส่งผลต่อการยืดออก และเปอร์เซ็นต์ความเครียดเช่นเดียวกับปริมาณของเส้นใยที่ใช้ โดยที่ขนาดความยาวของเส้นใยที่ 2 mm มีค่าการยืดออก และเปอร์เซ็นต์ความเครียดน้อยกว่าที่ขนาดความยาวเส้นใยที่ 5 mm และ 10 mm

สำหรับความแข็งกด (รูปที่ 4.9 (ฉ)) เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายในเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์มีผลทำให้ความแข็งกดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากทำให้พื้นที่ผิวของเมทริกซ์แข็งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ไม่เติมเส้นใยฝ้ายและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้นด้วยเนื่องจากมีปริมาณเส้นใยฝ้ายกระจายอยู่บนพื้นผิวเมทริกซ์มากขึ้น ทั้งนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยฝ้ายพบว่าความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกันให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เติมเส้นใยฝ้ายพบว่า ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักและความยาว 2 mm เป็นปริมาณและความยาวที่เหมาะสม ที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด

4.1.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

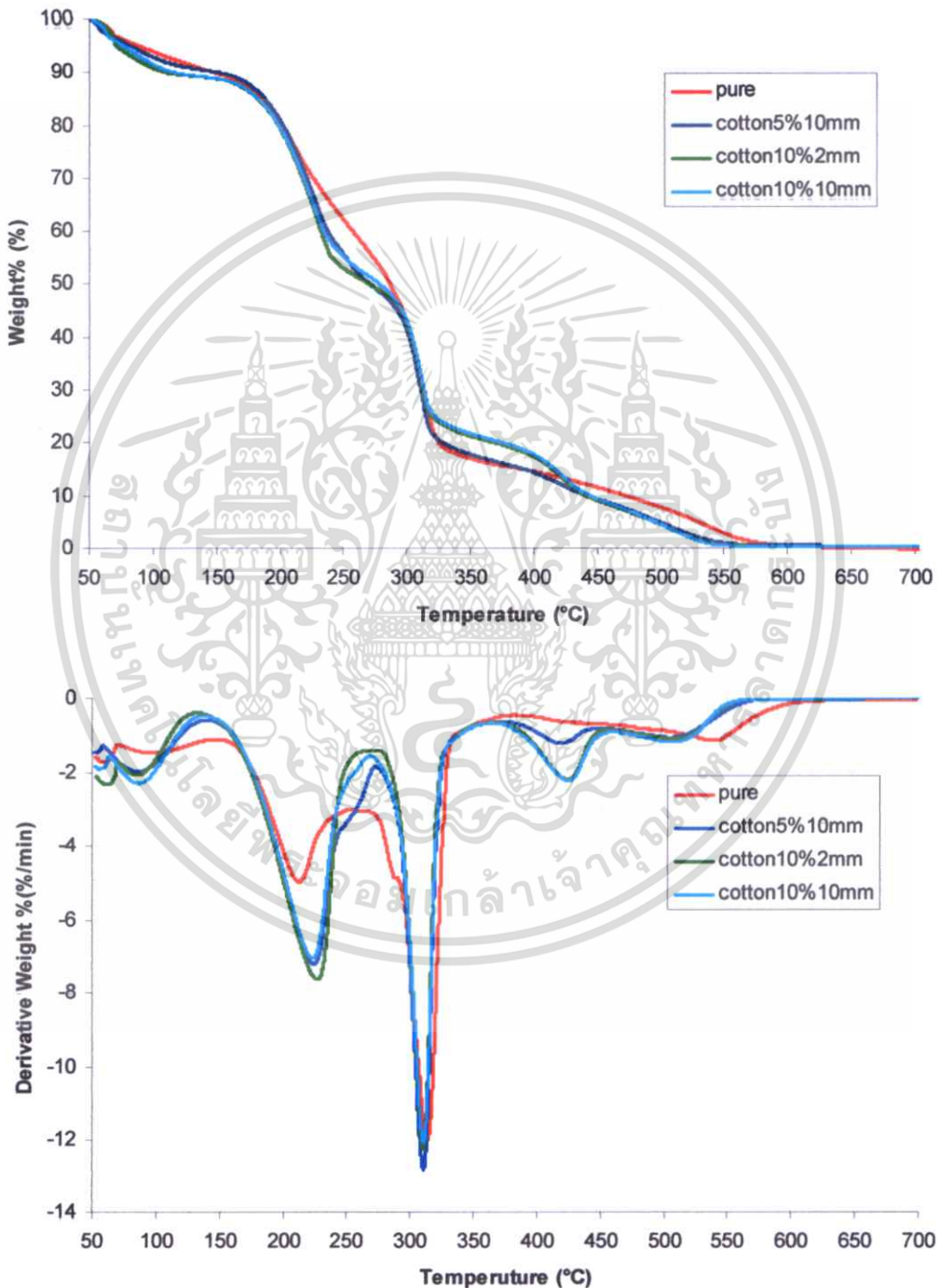
สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเทอร์โมพลาสติกสตาρχได้มีการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตาρχและเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยฝ้าย)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	191.7	300.5	399.6	31.4
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	193.6	301.0	403.7	29.7
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	194.3	299.9	403.1	30.6

จากตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาρχโดยการเติมเส้นใยฝ้ายพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมี 3 ช่วงโดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 185.3°C [37-38] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ประมาณ 300.0°C [44] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายซึ่งพบว่าอุณหภูมิประมาณ 400°C [66] โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่ไม่มีการปรับปรุงและยังพบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก

ที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ ซึ่งอธิบายได้ว่าการเติมเส้นใยฝ้ายทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และความยาวที่ 2 mm เป็น 10 mm พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงได้ว่าปริมาณและความยาวเส้นใยไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน

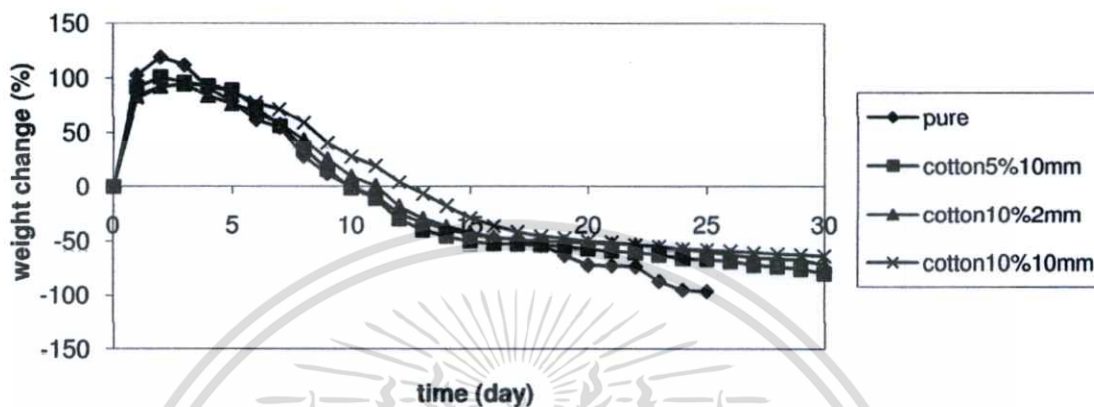


รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่เติมเส้นใยฝ้าย (1) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ไม่มีการปรับปรุง (2) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ผสมเส้นใยฝ้าย 5% ความยาว 10 mm (3) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 2 mm (4) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ต้องทำหนังสือแจ้งตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

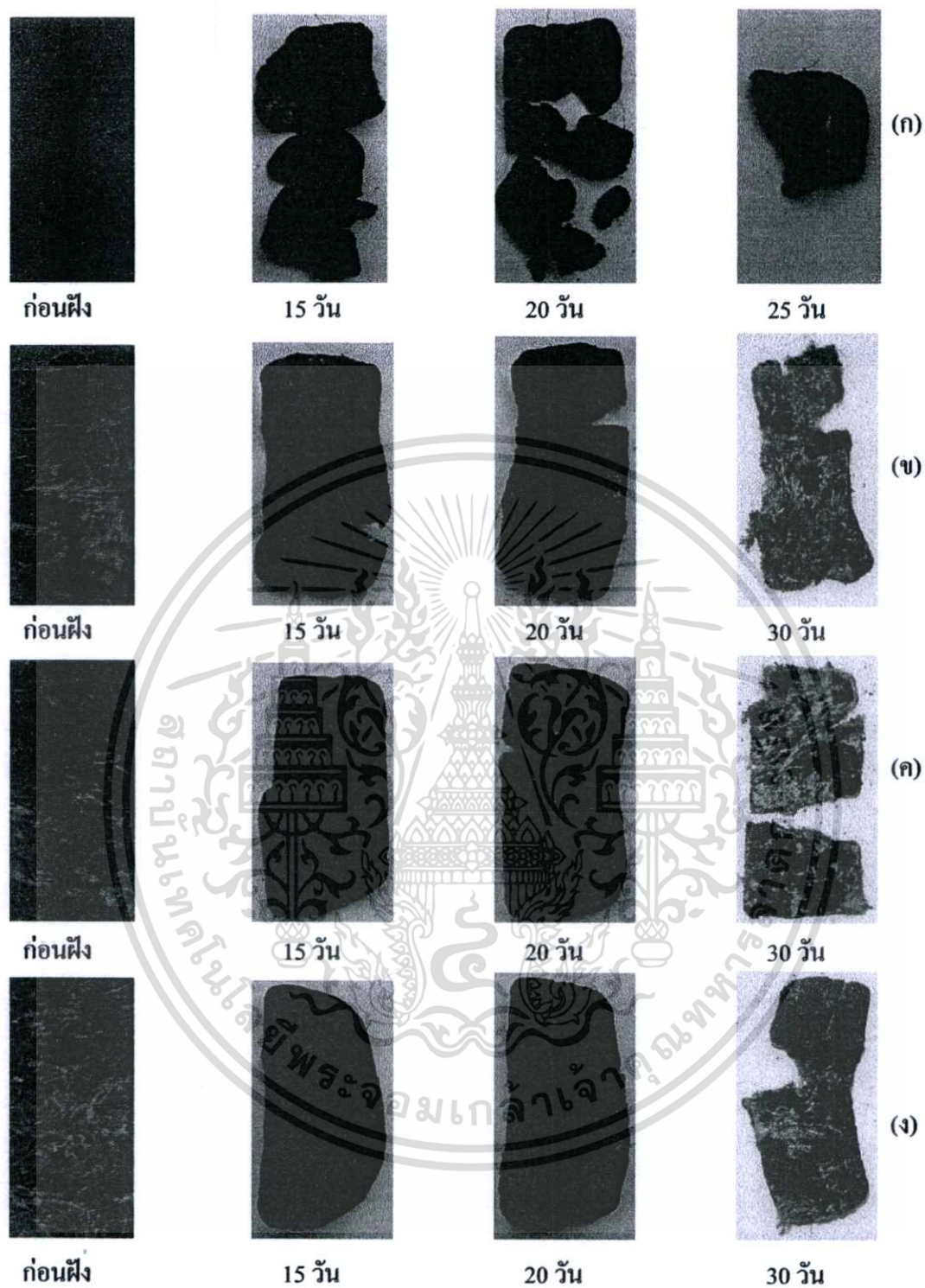
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ สูตรต่างๆ ให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง ในช่วง 3 วันแรก มีการดูดซับความชื้นเข้าไปในชิ้นงานโดยเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ เริ่มบวมตัวโดยสังเกตเห็นได้ว่าน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับความชื้นในหัวข้อที่ 4.1.2 จากนั้นจึงเริ่มเกิดการย่อยสลายโดยสังเกตได้จากน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมีน้ำหนักลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 4.12) เกิดการเปื่อยยุ่ย และขาด จนชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ เสียสภาพไปในที่สุดภายในเวลา 25 วัน สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุงพบว่าในช่วง 3 วันแรกให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันแต่เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการย่อยสลายพบว่า ชิ้นงานคงสภาพได้นานกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง เนื่องจากมีเส้นใยช่วยในการเกาะชิ้นงาน ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแข็งเกิดการย่อยสลายก่อนส่วนที่เป็นเส้นใย และเกิดการเสียหายของชิ้นงานภายใน 30 วัน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนักและ 10% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.11) พบว่า ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนัก มีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าเนื่องจากมีเส้นใยช่วยในการยึดเกาะกับอนุภาคแข็งมากขึ้น จุลินทรีย์ในดินจึงแทรกซึมเข้าไปถึงเมทริกซ์แข็งได้ยากกว่า และจากผลการทดลองระหว่างความยาวของเส้นใย 2 mm และ 10 mm ในปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน พบว่าอัตราการย่อยสลายค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ของเส้นใยฝ้ายไม่มีผลต่อการย่อยสลายโดยการฝังดินมากนัก



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 5% ความยาว 10 mm
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 2 mm
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล

4.2.1 การวัดสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยตาล

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	31.89	4.91	13.56	14.42	70.1
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	36.35	5.48	14.77	15.75	69.7
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	28.17	3.84	8.36	9.20	65.3

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง, ค่า a^* กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว, ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C แสดงความสดใของสี, ค่า h° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

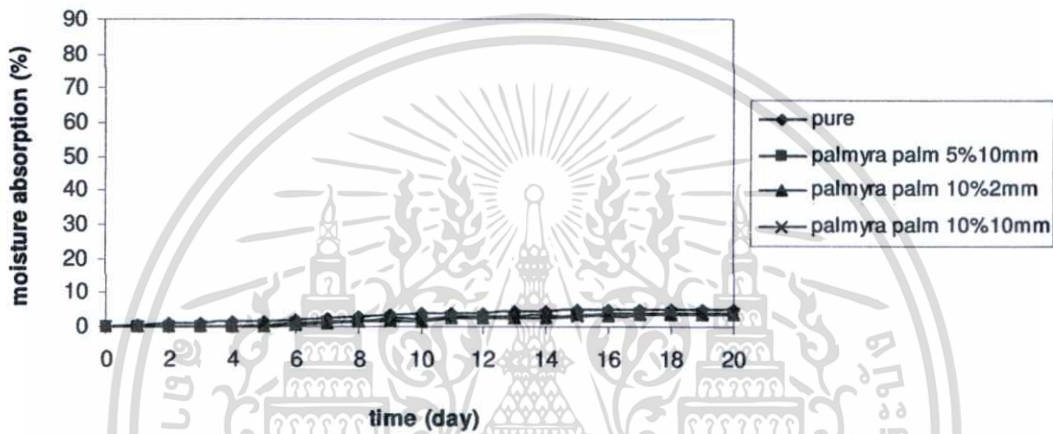
จากตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยตาล พบว่า ค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยตาลมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าโดยที่ค่าความสว่าง (L^*) ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชมีค่าใกล้เคียงกันแต่ที่ปริมาณเส้นใย 10% ความยาว 2 mm มีความสว่างมากที่สุด

สำหรับค่า a^* มีแนวโน้มการเปลี่ยนสีเป็นไปทางเดียวกันโดยแสดงสีออกสีแดงและตัวเลขแสดงค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยที่ปริมาณ 10% ความยาว 10 mm สีออกแดงน้อยที่สุด สำหรับค่า b^* แสดงสีไปในทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมดแต่เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใย 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 10 mm ตัวเลขแสดงค่าค่อนข้างแตกต่างจากสูตรอื่น ๆ จึงทำให้ค่า C^* ซึ่งแสดงความสดใของสีต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ตำแหน่งของสี (h°) ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยตาลแสดงตำแหน่ง

ค่อนข้างใกล้เคียงกันยกเว้นในสูตรของปริมาณเส้นใยที่ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 10 mm ที่แสดงตำแหน่งของสีต่ำกว่า โดยภาพรวมแล้วขึ้นตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยตาลแสดงสีขึ้นงานเป็นสีน้ำตาลเข้ม

4.2.2 การดูดซับความชื้น

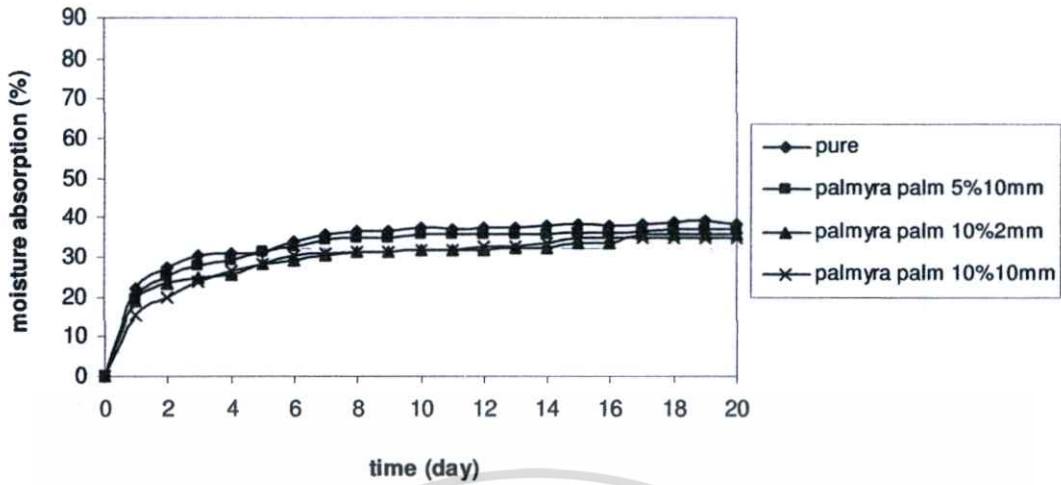
ศึกษาการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ก)-(ง)



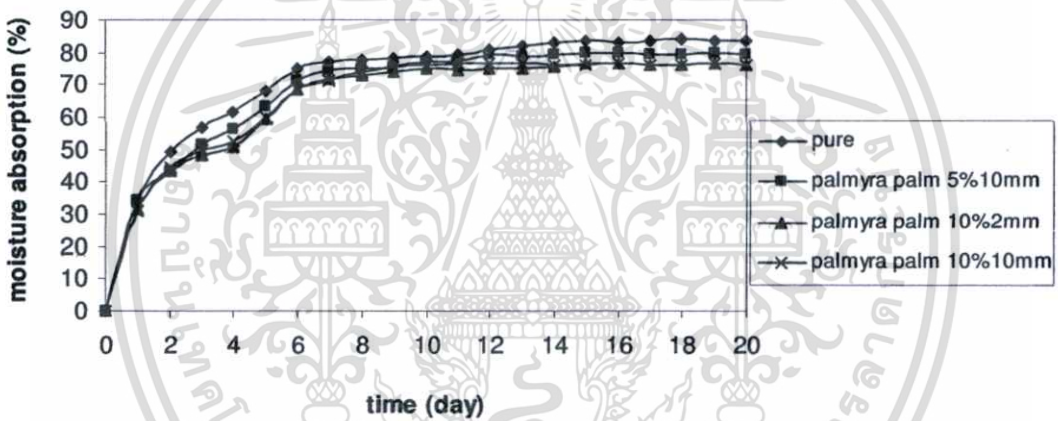
รูปที่ 4.13 (ก) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยตาล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%



รูปที่ 4.13 (ข) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยตาล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 4.13 (ค) เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมเส้นใยตาล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 4.13 (ง) เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมเส้นใยตาล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากการทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซในทุก ๆ ความชื้นสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.13 (ก)-(ง)) พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีลักษณะเป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ ในช่วง 3 วันแรกมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อเวลาผ่านไป ชื้นตัวอย่างมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งอิ่มตัวและที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% ประมาณ 5% 30% 38% และ 83% ตามลำดับ

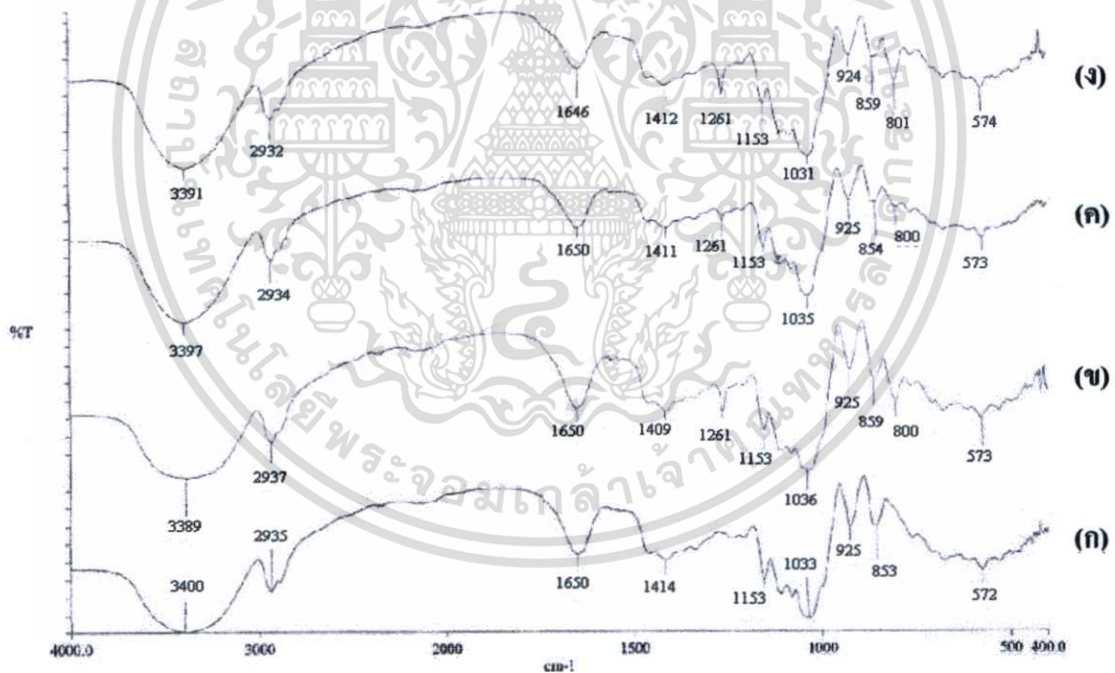
เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่เติมเส้นใยตาลพบว่า ปริมาณเส้นใยตาล 5% และ 10% ของน้ำหนักแบ่งความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% มีค่าประมาณ 3% 28% 36% และ 78% ตามลำดับและ 2% 27% 33% และ 76% ตามลำดับ ซึ่ง

เห็นได้ว่าการเติมเส้นใยตาลทำให้ความต้านทานต่อความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยตาลเป็นเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีสภาพขั้วที่น้อยกว่าแป้ง[43] ทำให้เมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีสภาพขั้วลดลง จึงดูดซับความชื้นได้ลดลง

สำหรับความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกันในที่นี่คือ 2 mm และ 10 mm ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นไม่แตกต่างกันโดยสังเกตได้จากปริมาณเส้นใยตาล 10% ของน้ำหนักแป้งที่ความยาว 2 mm และ 10 mm แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.13 (ก)-(ง)) ในทุก ๆ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งโดยภาพรวมแล้วที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ดูดซับความชื้นได้น้อยที่สุด

4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาลเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14

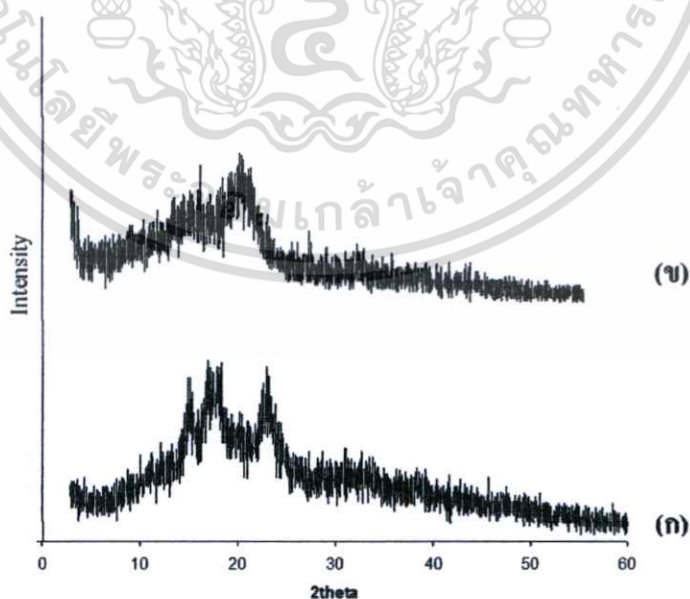


รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (ก) ที่ไม่ได้ปรับปรุง (ข) ปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค) ปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm และ (ง) ปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

จากรูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใย คาล สำหรับพีกของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุง ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยคาล (รูปที่ 4.14 (ก - ง)) แสดงลักษณะของ พีกสเปกตรัมคล้ายคลึงกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แต่พบว่าลักษณะการสั่นแบบ OH-stretching และ OH-bending มีการเลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลงและพีกมีลักษณะแหลมขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็น ว่ามีอันตรกิริยาเกิดขึ้นโดยเกิดพันธะไฮโดรเจน [59] ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและเซลลูโลส ในเส้นใยคาลอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งและเส้นใยเซลลูโลสแสดงดัง รูปที่ 4.3 นอกจากนี้ยังพบพีกสเปกตรัมที่ 1261 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending และ สเปกตรัมที่ 801 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเซลลูโลส ของเส้นใยคาล ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยฝ้าย แต่ ลักษณะความเข้ม (Intensity) ของพีกที่สเปกตรัม 1261 cm^{-1} และ 801 cm^{-1} มีน้อยกว่าในเส้นใยฝ้าย เนื่องจากปริมาณของเซลลูโลสในเส้นใยคาลมีน้อยกว่าที่พบในเส้นใยฝ้าย (จากผลการทดลองหา ปริมาณองค์ประกอบในเส้นใย (ตารางที่ 3.2))

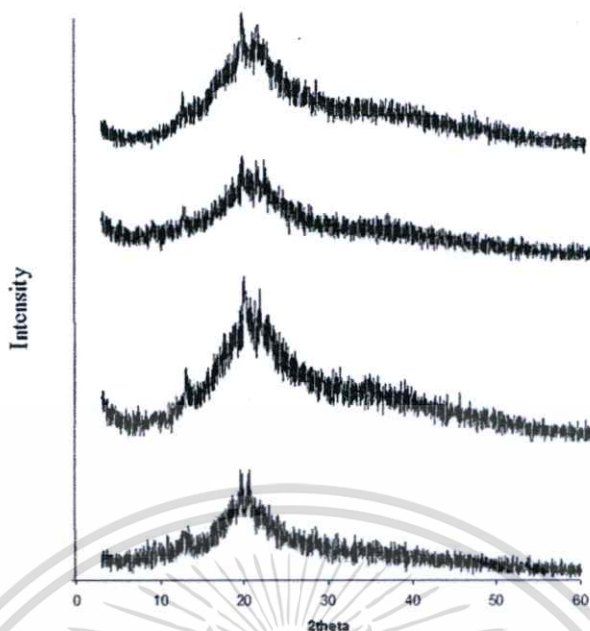
4.2.4 XRD

รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติม เส้นใยคาล โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15-4.16



รูปที่ 4.15 คีฟแฟรกโตแกรมของ (ก) แป้งข้าวเจ้า และ (ข) เส้นใยคาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



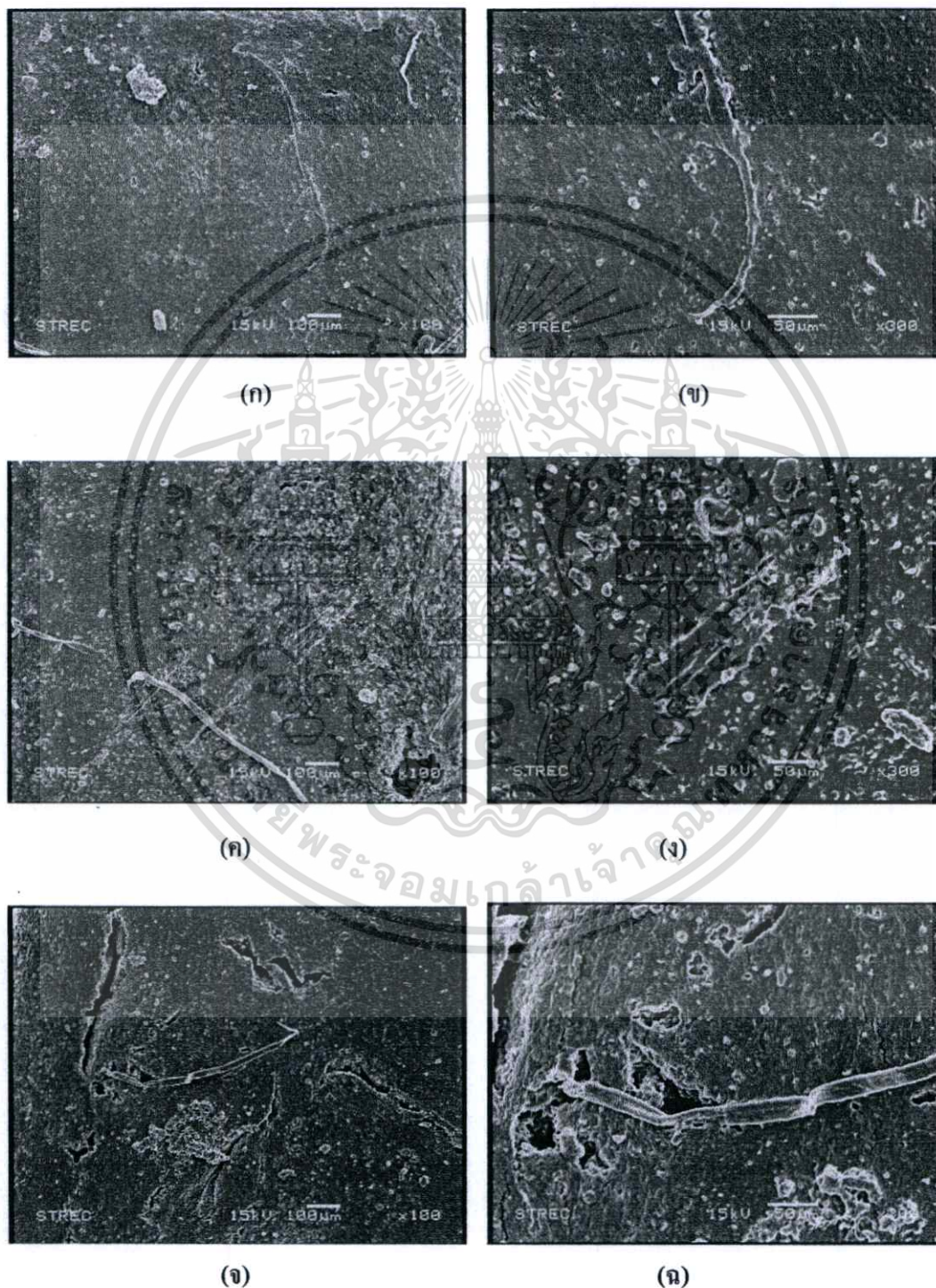
รูปที่ 4.16 ดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยตาล 5% ความยาว 10 mm
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 10 mm

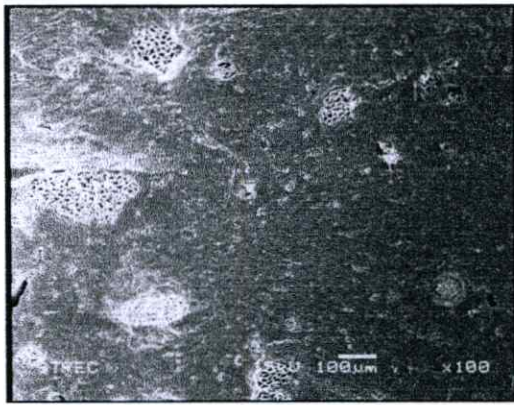
จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.15) แสดงดิฟแฟร็กโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์และเส้นใยตาลซึ่งลักษณะของดิฟแฟร็กโตแกรมและลักษณะผลึกของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.4 สำหรับดิฟแฟร็กโตแกรมของเส้นใยตาลให้พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 22.5° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Cellulose I [67] เมื่อพิจารณา เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปพบว่า (รูปที่ 4.16) ลักษณะของดิฟแฟร็กโตแกรมและผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แสดงดังคำอธิบายที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.4 (ให้พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° และ 20.6°) เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มาปรับปรุง โดยเติมเส้นใยตาลแสดงดังรูปที่ 4.16 (ข)-(ง) พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 21.3° , 22.3° ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อเติมเส้นใยตาลทำให้พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° นั้นมีความเข้มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 20.6° ที่พบในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์นั้นเกิดการซ้อนทับกับตำแหน่งของพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.3° และนอกจากนี้ยังแสดงพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 22.3° ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากเส้นใยตาลในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

4.2.5 สัณฐานวิทยา

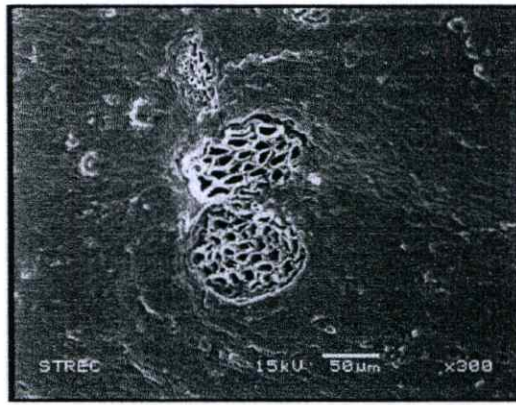
ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยคาลาปริมาณ 5% และ 10% ของน้ำหนักแป้งที่ขนาดความยาวเส้นใย 2 mm และ 10 mm ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยคาลที่กำลังขยาย 100 เท่าและ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยคาล 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยคาล 10% โดย
 ไม่ว่ากรณีใดข้างต้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 น้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยคาล 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm



(ก)



(ข)



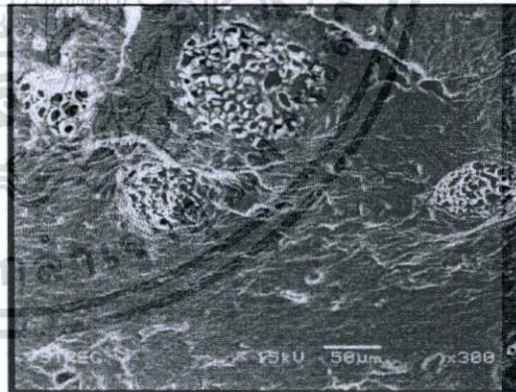
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.18 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยคาร์บอนที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยคาร์บอน 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยคาร์บอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยคาร์บอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 (ก)-(จ) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยแสดงพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล 5% ความยาว 10 mm (รูปที่ 4.17 (ก)-(ข)) เส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm (รูปที่ 4.17 (ค)-(ง)) และเส้นใยตาล 10% ความยาว 10 mm (รูปที่ 4.17 (จ)-(ฉ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่ามองเห็นเส้นใยได้บ้างเป็นบางส่วนบนเมทริกซ์แข็ง

จากรูปที่ 4.18 (ก)-(ฉ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาลพบว่า เส้นใยตาลมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แข็งและเห็นเส้นใยที่มีการฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์ของแข็งได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาพบริเวณพื้นผิว (รูปที่ 4.17 (ก)-(ฉ)) การที่เส้นใยตาลสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้กับเมทริกซ์แข็งนั้นเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลสซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับการใช้เส้นใยฝ้าย (หัวข้อ 4.1.3) นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยตาลมีลักษณะกลวง ดังที่เห็นได้จากภาคตัดขวางในรูปที่ 4.18

4.2.6 สมบัติเชิงกล

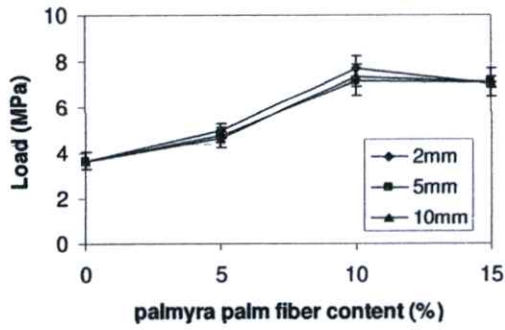
การทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยตาล ปริมาณ 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm 5 mm และ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) 19/1 47/1 และ 95/1 ตามลำดับ ให้ผลการทดลองดังนี้

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงโดยการย้อมเส้นใยตาลแสดงดังรูปที่ 4.19 จากผลการทดลองพบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.19 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.19 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.19 (ค)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงเพราะว่ามีเส้นใยตาลเป็นตัวรับแรงกระทำแทน ส่งผลให้แรงที่กระทำสามารถส่งผ่านจากเมทริกซ์แข็งสู่เส้นใยตาลอีกทั้งโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์แข็งได้ ดังนั้นจึงทนแรงดึงตามแนวแกนได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ไม่เติมเส้นใยตาล และปริมาณเส้นใยตาล 10% โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลดีที่สุดและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 15% โดยน้ำหนักทำให้สมบัติเชิงกลตกลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้เกิดรอยแยกของวัฏภาคจึงทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อ [4] เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่เติมเส้นใยฝ้ายพบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.9 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.9 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.9 (ค)) ของเส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มสูงกว่า ถึงแม้เส้นใยทั้งสองต่างมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์แข็งได้เช่นเดียวกันแต่จากโครงสร้างของเส้นใยฝ้ายที่ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่มีลักษณะบิดเป็นเกลียวที่แข็งแรงอีกทั้งยังมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง (High crystallinity) [22] นอกจากนี้ปริมาณเซลลูโลสในเส้นใยฝ้ายมีมากกว่าเส้นใยตาลจึงทำให้เส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรงที่

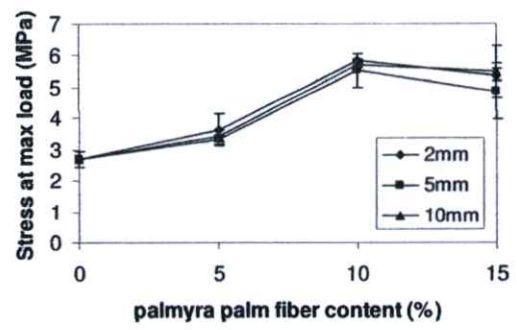
มากกว่า เมื่อนำเส้นใยฝ้ายมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ประกอบกับ Aspect ratio ที่สูงกว่า (176/1 442/1 และ 884/1) ทำให้เส้นใยฝ้ายสามารถรับแรงที่มากกว่าที่ส่งผ่านจากเมทริกซ์มา เส้นใยได้ดีกว่า มีพื้นที่ในการรับแรงสูง ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมีค่า สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยตาล

การยืดออกของตัวอย่าง (รูปที่ 4.19 (ง)) และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.19 (จ)) มี แนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยตาลลงไปมากขึ้น อันเนื่องมาจากเส้นใยตาลมีความ แข็งแรงมากขึ้น จึงมีการยืดตัวได้ต่ำกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ทำให้ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยตาลมีการยืดออกของตัวอย่างและเปอร์เซ็นต์ความเครียด น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการเติมเส้นใยตาล

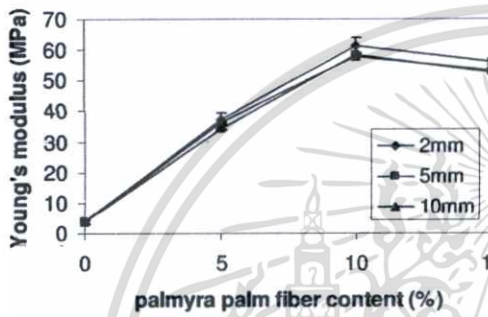
ค่าความแข็งแรง (รูปที่ 4.19 (ฉ)) พบว่าเมื่อเติมเส้นใยตาลลงในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ทำ ให้ความแข็งแรงมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยตาลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แข็งแรงขึ้นและ ความแข็งแรงเป็นสมบัติทางพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของเส้นใยตาลในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพราะมีเส้นใยกระจายอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน จากภาพรวมทั้งหมด พบว่า ปริมาณเส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด



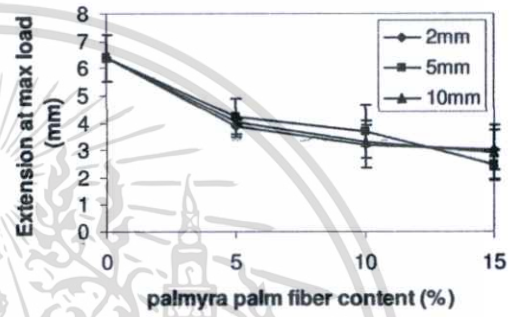
(ก)



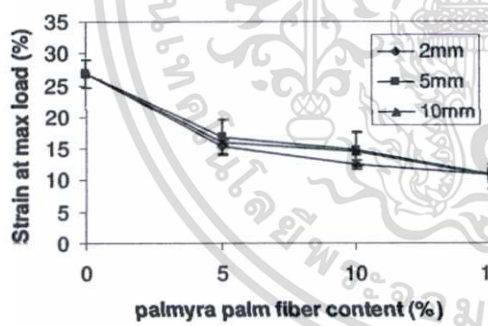
(ข)



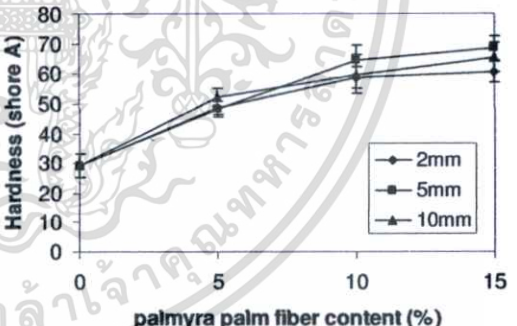
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ทำกรผสมด้วยเส้นใยตาล (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) โมดูลัส (ง) การดึงยืด (จ) เปอร์เซนต์ความเครียด และ (ฉ) ความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

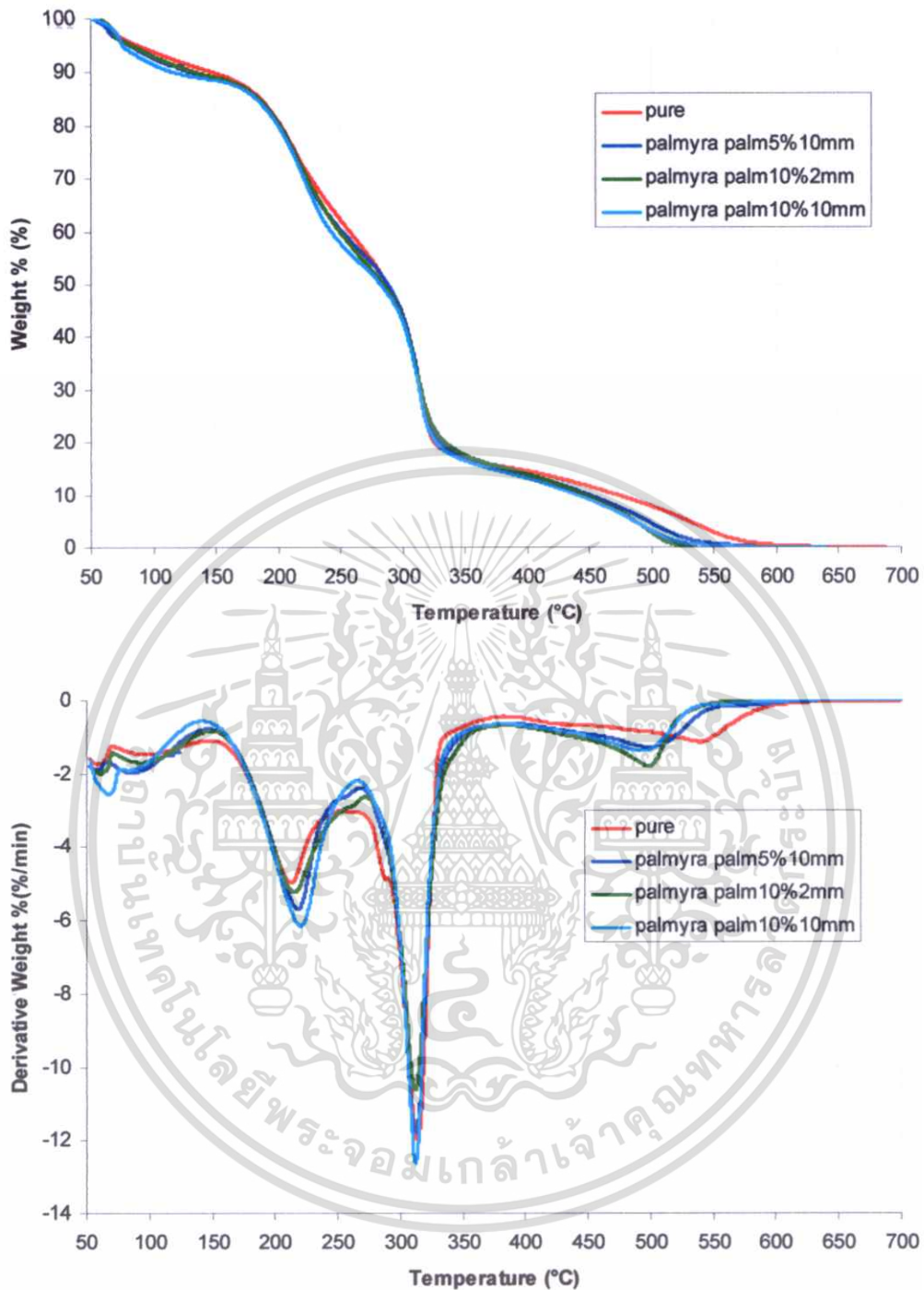
อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยตาล ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยตาล)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	190.5	298.9	458.7	40.8
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	187.5	299.7	458.0	37.3
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	189.0	300.3	455.4	38.7

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.20 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงเกิดการสลายตัวที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 185.3 $^{\circ}\text{C}$ เป็นการสลายตัวของกลีเซอรอล [37-38] และที่อุณหภูมิ 294.3 $^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง [44] และเมื่อปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตา์ชด้วยเส้นใยตาลพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยตาล มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณและความยาวเส้นใยตาลพบว่า ที่ปริมาณเส้นใยจาก 5% เป็น 10% และที่ความยาว 2 mm เป็น 10 mm แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณและความยาวเส้นใย ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยตาล

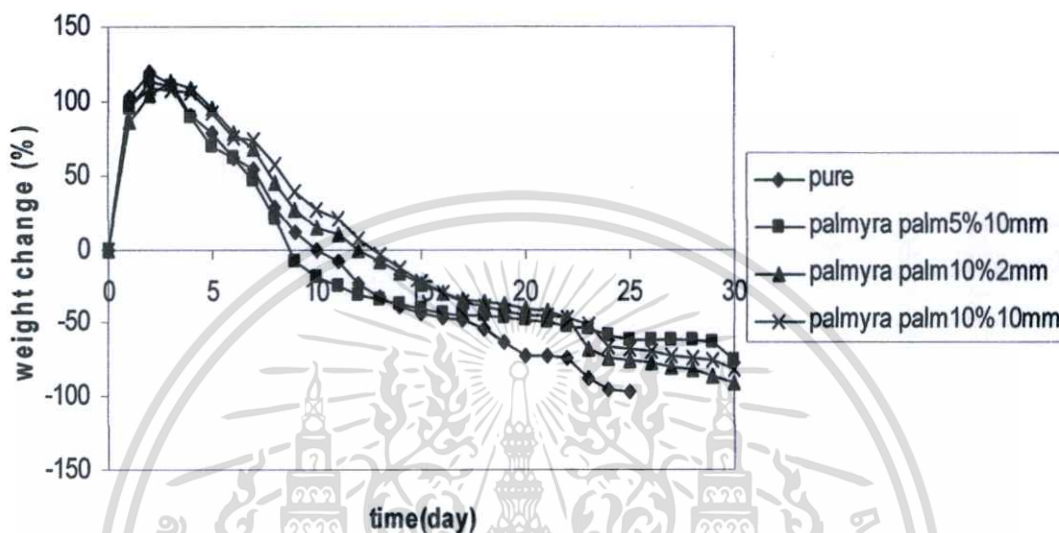


รูปที่ 4.20 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยตาล (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยตาล 5% ความยาว 10 mm (3) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm (4) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สูตรต่างๆ ดังนี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เส้นใยตาล 5% ความยาว 10 mm, เส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm เส้นใยตาล 10% ความยาว 10 mm มาทำการทดสอบ โดยการฝังดินที่ให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22

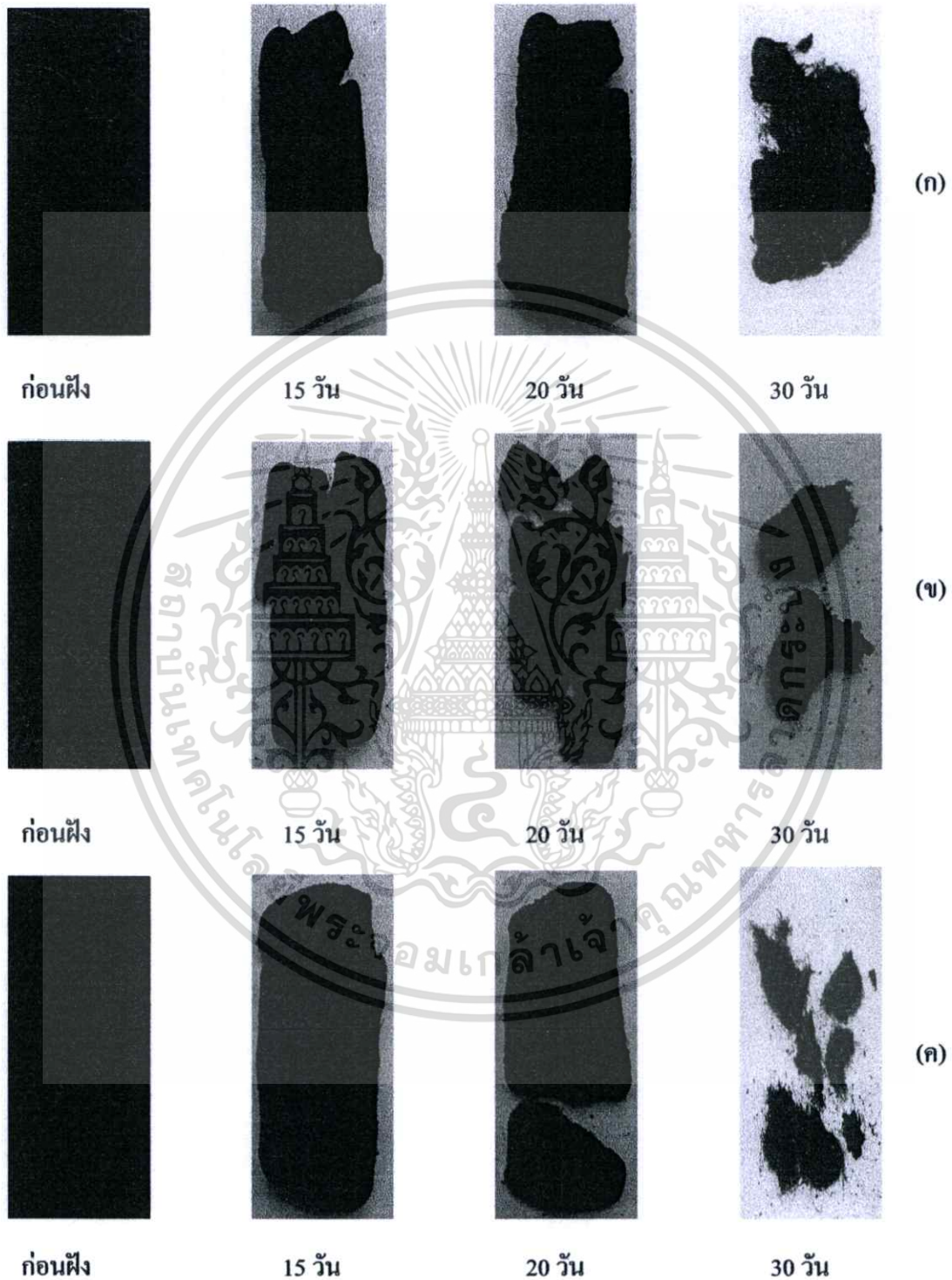


รูปที่ 4.21 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยตาล

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง ในช่วง 3 วันแรก มีการดูดซับความชื้นเข้าไปในชิ้นงานโดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เริ่มบวมตัว โดยสังเกตเห็นได้ว่า น้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับความชื้นในหัวข้อที่ 4.1.2 จากนั้นจึงเริ่มเกิดการย่อยสลายโดยสังเกตได้จากน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมีน้ำหนักลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องเกิดการเปื่อยยุ่ย และขาด จนชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ เสียสภาพไป ในที่สุดภายในเวลา 25 วัน สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยตาล (รูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.21) เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงพบว่าในช่วง 3 วันแรกให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันแต่เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการย่อยสลายพบว่า ชิ้นงานคงสภาพได้นานกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง เนื่องจากมีเส้นใยตาลช่วยในการเกาะชิ้นงาน ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งเกิดการย่อยสลายก่อนส่วนที่เป็นเส้นใยตาล และเกิดการเสีสภาพของชิ้นงานภายใน 30 วัน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยตาล 5% โดยน้ำหนักและ 10 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.21) พบว่า ปริมาณเส้นใยตาล 10 % โดยน้ำหนัก มีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าและจากผลการทดลอง

ระหว่างความยาวของเส้นใย 2 mm และ 10 mm ในปริมาณเส้นใยที่เท่ากันพบว่าอัตราการย่อยสลายค่อนข้างใกล้เคียงกัน อธิบายได้เช่นเดียวกับการทดลองการย่อยสลายโดยการฝังดินของเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 4.22 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

(ก) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยตาล 5% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานที่มอบหมายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่ข้อมูลของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศไปยัง

(ข) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 2 mm

(ค) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยตาล 10% ความยาว 10 mm

4.3 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหม

4.3.1 การวัดสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหม เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่า L^* a^* b^* และ C^* ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยไหมมีค่าต่างไปจากของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช โดยที่ค่า L^* ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชปริมาณ 10% ความยาว 2 mm สว่างมากที่สุดและที่ปริมาณเส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm สว่างน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาค่า a^* พบว่า เมื่อเติมเส้นใยไหมค่า a^* มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยแสดงเจดสีเป็นสีแดงเช่นเดียวกันหมด ยกเว้นที่ปริมาณเส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm ที่ค่า a^* มีค่าต่ำกว่าในสูตรอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีเจดสีแดงน้อยกว่า

ค่า b^* มีค่าลดลงเมื่อเติมเส้นใยไหมแต่ยังคงแสดงเจดสี เป็นสีเหลืองเช่นเดียวกัน กับเทอร์โมพลาสติกสตา์ช และสังเกตเห็นได้ว่า ค่า b^* เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยและความยาวมากขึ้น

สำหรับ ค่า C^* ที่แสดงความสดใสของสีนั้น เห็นได้ชัดว่า ความสดของสีลดลงเมื่อเติมเส้นใยไหมเป็นผลเนื่องมาจาก ค่า a^* และ b^* ที่แสดงสีของชิ้นงานออกแดงอมเหลือง ซึ่งพบว่า ถ้าค่า a^* หรือ b^* มีค่ามาก ความสดของสีจะมากตามไปด้วย โดยที่ปริมาณเส้นใยไหม 10% ความยาว 10 mm มีความสดใสของสีมากที่สุด และที่ปริมาณ 5% ความยาว 10 mm มีความสดใสของสีน้อยที่สุด ส่งผลถึงตำแหน่งของสี (h°) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ทำให้มีตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไปโดยรวมแล้วชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยไหมมีสีน้ำตาลเข้ม

ตารางที่ 4.5 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยไหม

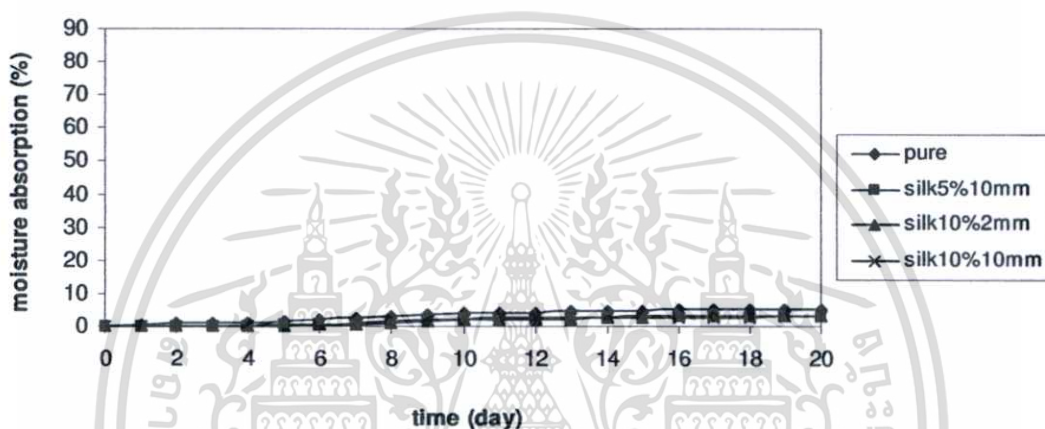
ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	24.96	1.10	4.75	4.88	77.0
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	33.79	5.04	9.87	11.08	63.0
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	31.50	5.87	11.46	12.88	62.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

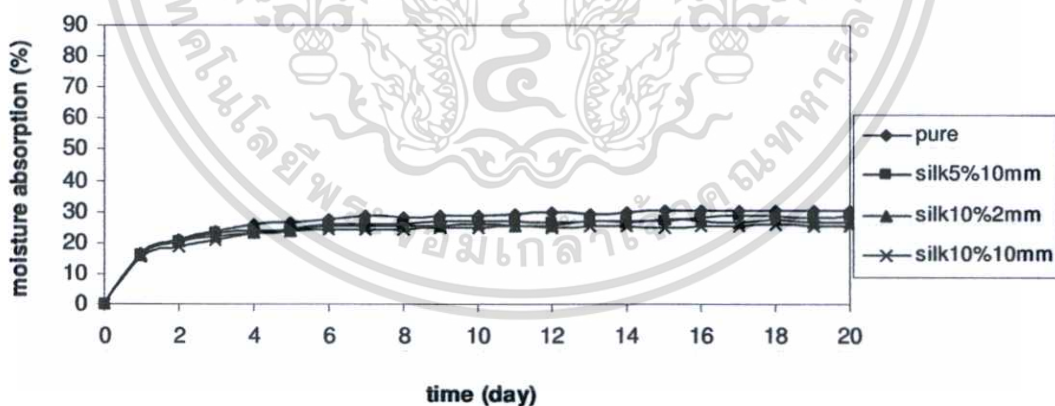
หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง, ค่า a^* กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว, ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C แสดงความสดใสของสี, ค่า h° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

4.3.2 การดูดซับความชื้น

การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหม ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 (ก)-(ง)

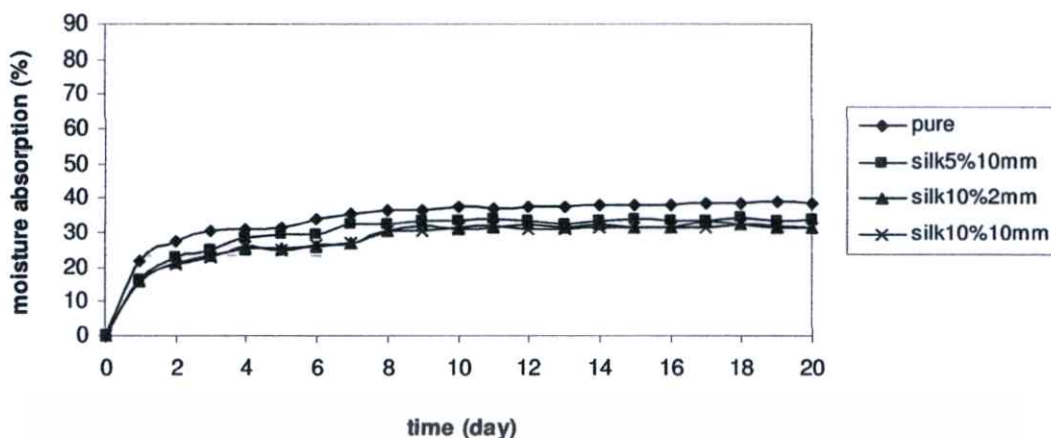


รูปที่ 4.23 (ก) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยไหม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

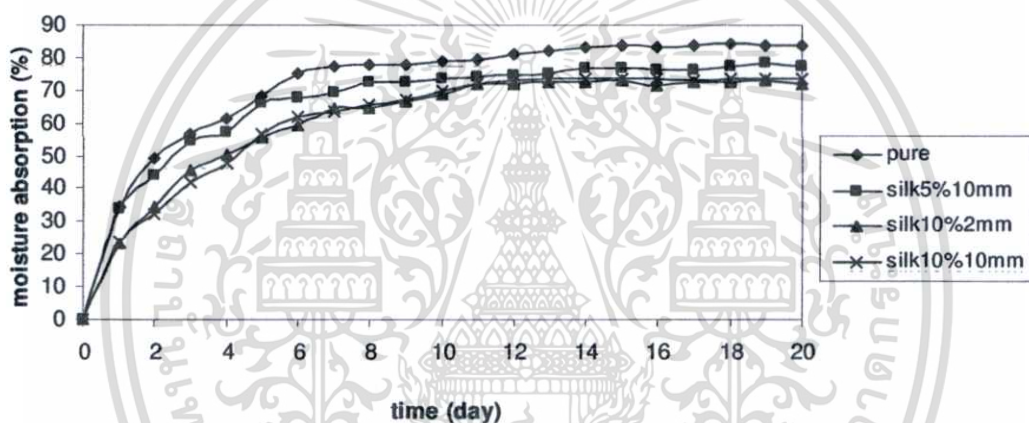


รูปที่ 4.23 (ข) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยไหม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 (ค) เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยไหม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



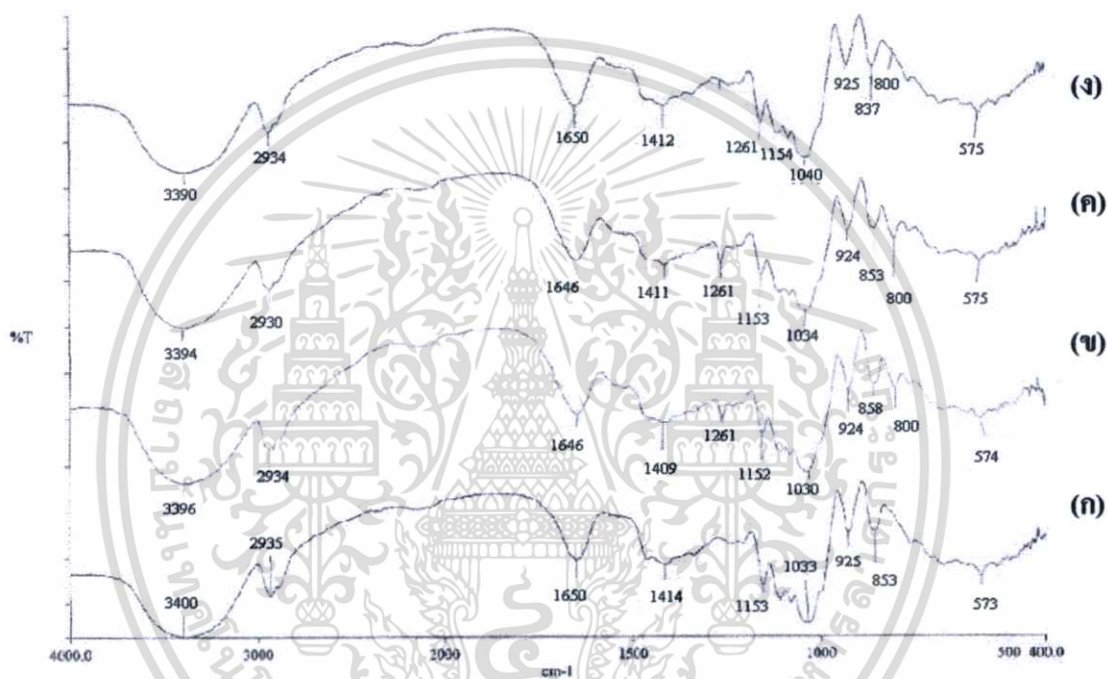
รูปที่ 4.23 (ง) เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยไหม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากการทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในทุก ๆ ความชื้นสัมพัทธ์พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยไหมเป็นไปในทำนองเดียวกันคือความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง แสดงว่าการเติมเส้นใยไหมลงไปทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความต้านทานต่อความชื้นดีขึ้นเพราะเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลงจึงทำให้ดูดซับความชื้นลดลงซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยไหมดูดซับความชื้นได้ประมาณ 11% ที่ 65% RH ณ อุณหภูมิ 20 °C [52] และเมื่อพิจารณาการเพิ่มของปริมาณเส้นใยไหม (รูปที่ 4.23 (ก)-(ง)) พบว่า ที่ปริมาณของเส้นใยไหมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ลดลงและเมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกันในที่นี้คือความยาว 2 mm และ 10 mm ที่ปริมาณเส้นใยไหมที่เท่ากัน 10% ของน้ำหนักแป้ง พบว่าความสามารถใน

การดูดซับความถี่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยภาพรวมแล้วที่ปริมาณเส้นใยไหม 10% ความยาว 2 mm มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความถี่ที่น้อยที่สุด

4.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

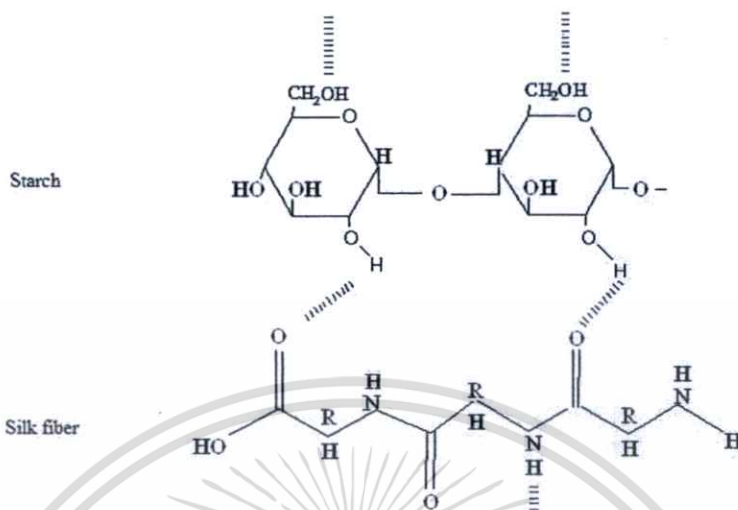
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหมเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าที่ยังไม่มีการปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (ก) ที่ไม่ได้ปรับปรุง (ข) ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค) ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm และ (ง) ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

จากรูปที่ 4.24 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม (รูปที่ 4.24 (ข = ง)) พบว่าแถบพิกการสั่นแบบ OH-stretching และ OH-bending มีการเลื่อน (shift) ซึ่งอาจเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งกับเส้นใย อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นดังรูปที่ 4.25 และแถบพิกนี้เกิดการซ้อนทับกับพิกในช่วง $3500-3310 \text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นลักษณะการสั่นแบบ N-H stretching ที่พบในเส้นใย

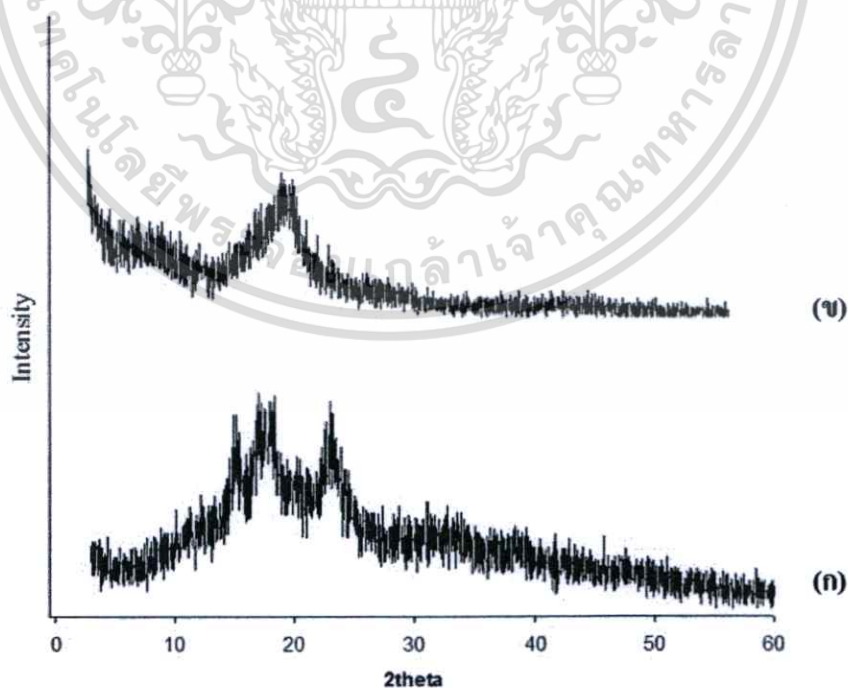
ไหม และที่ 1261 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-N vibration พีกที่ 800 cm^{-1} เป็น N-H bending ซึ่งพบใน เส้นใยไหม [68]



รูปที่ 4.25 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยไหม

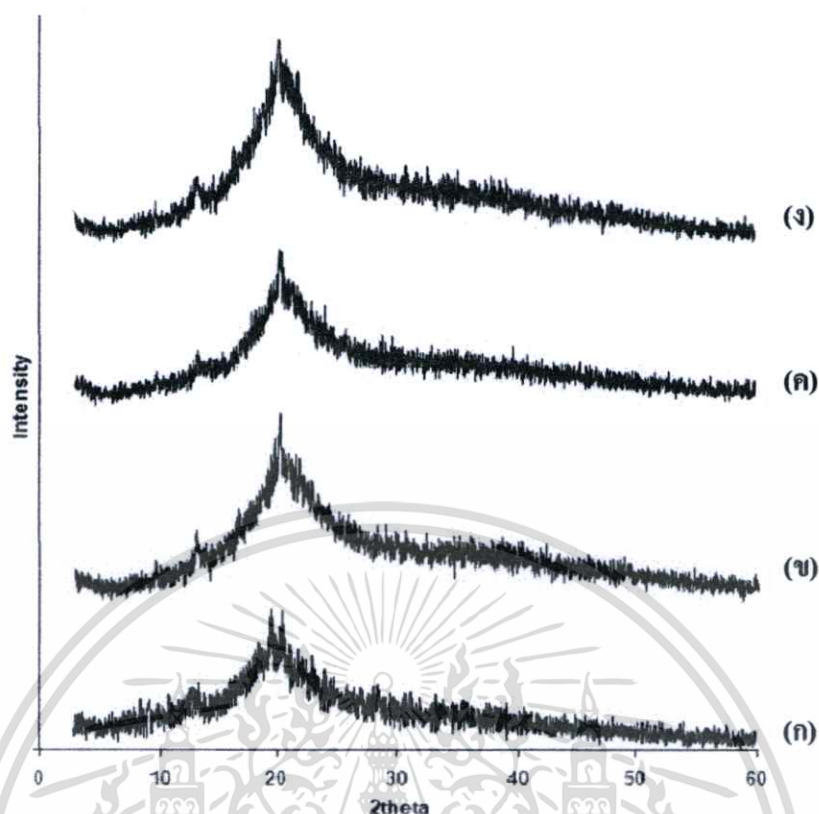
4.3.4 XRD

รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยไหม โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26-4.27



รูปที่ 4.26 ดิฟแฟรคโตแกรมของ (ก) แป้งข้าวเจ้า และ (ข) เส้นใยไหม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 2 mm
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 10 mm

จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.26) แสดงดิฟแฟร็กโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์และเส้นใยไหมซึ่งลักษณะของดิฟแฟร็กโตแกรมและลักษณะผลึกของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ให้มุม 2θ เท่ากับ 14.9° , 17.4° , 18.1° และ 23.3° สำหรับดิฟแฟร็กโตแกรมของเส้นใยไหมให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 20.6° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Fibroin β -sheet [69]

รูปที่ 4.27 พิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูป พบว่าลักษณะของดิฟแฟร็กโตแกรมและผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 20.6° เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาปรับปรุงโดยเติมเส้นใยไหมแสดงดังรูปที่ 4.27 (ข)-(ง) พบว่าดิฟแฟร็กโตแกรมแสดงรูปแบบที่คล้ายกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ลักษณะของพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° มีความเข้ม (Intensity) ขึ้น และที่มุม 2θ เท่ากับ 20.6° ซึ่งเป็นพีกที่พบทั้งในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยไหมซึ่งซ้อนกัน (Overlap) จึงทำให้ลักษณะของดิฟแฟร็กโตแกรม

(Diffractogram) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยใหม่มีความเรียบมากขึ้น สำหรับปริมาณของเส้นใยและขนาดที่แตกต่างกัน พบว่า ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

4.3.5 สัณฐานวิทยา

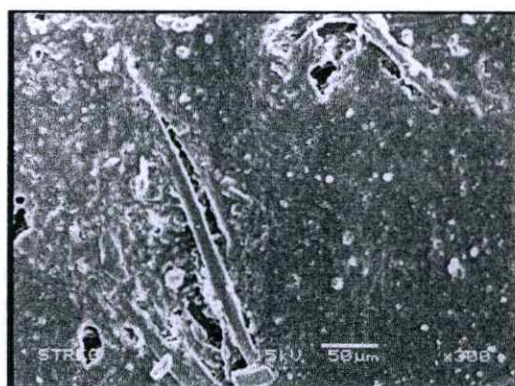
การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยใหม่ปริมาณ 5% และ 10% ของน้ำหนักแบ่งความยาวเส้นใย 2 mm และ 10 mm แสดงผลดังรูปที่ 4.28 และ 4.29

จากรูปที่ 4.28 (ก)-(ค) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยแสดงแสดงพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยใหม่ 5% และ 10% ของน้ำหนักแบ่ง ขนาดความยาว 2 mm และ 10 mm ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่า สังเกตเห็นเส้นใยบางส่วนที่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แข็ง

จากรูปที่ 4.29 (ก)-(ค) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาคตัดขวาง พบว่าเส้นใยใหม่มีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แข็งและสังเกตเห็นเส้นใยใหม่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แข็งและเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยใหม่ที่เพิ่มขึ้นจาก 5% ของน้ำหนักแบ่งเป็น 10 % ของน้ำหนักแบ่งพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยใหม่ที่เติมมากขึ้นเห็นลักษณะการยึดเกาะกันของเส้นใยกับเมทริกซ์แข็งมากขึ้นเนื่องจากความมีขี้ของทั้งเส้นใยและแบ่งจึงส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างภูมิภาคที่แข็งแรงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค FTIR ที่สังเกตเห็นหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยใหม่และลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับความยาวของเส้นใยพิจารณาจากปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน 10% โดยน้ำหนักของแบ่ง แสดงดังรูปที่ 4.29 (ค) และ (จ) พบว่า การกระจายตัวของเส้นใย 10 mm หนาแน่นกว่า 2 mm โดยเส้นใยเกิดการรวมตัวกันทำให้การกระจายตัวไม่ทั่วเมทริกซ์แข็ง



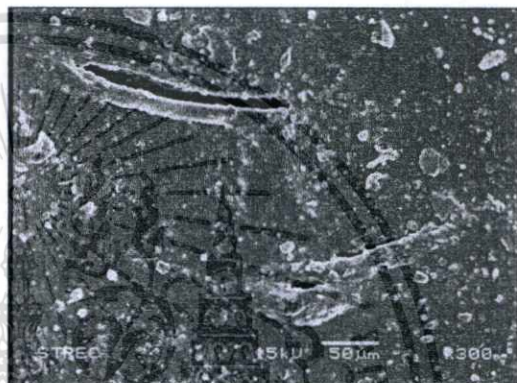
(ก)



(ข)



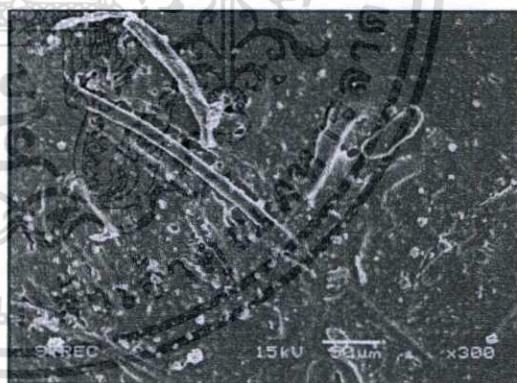
(ค)



(ง)



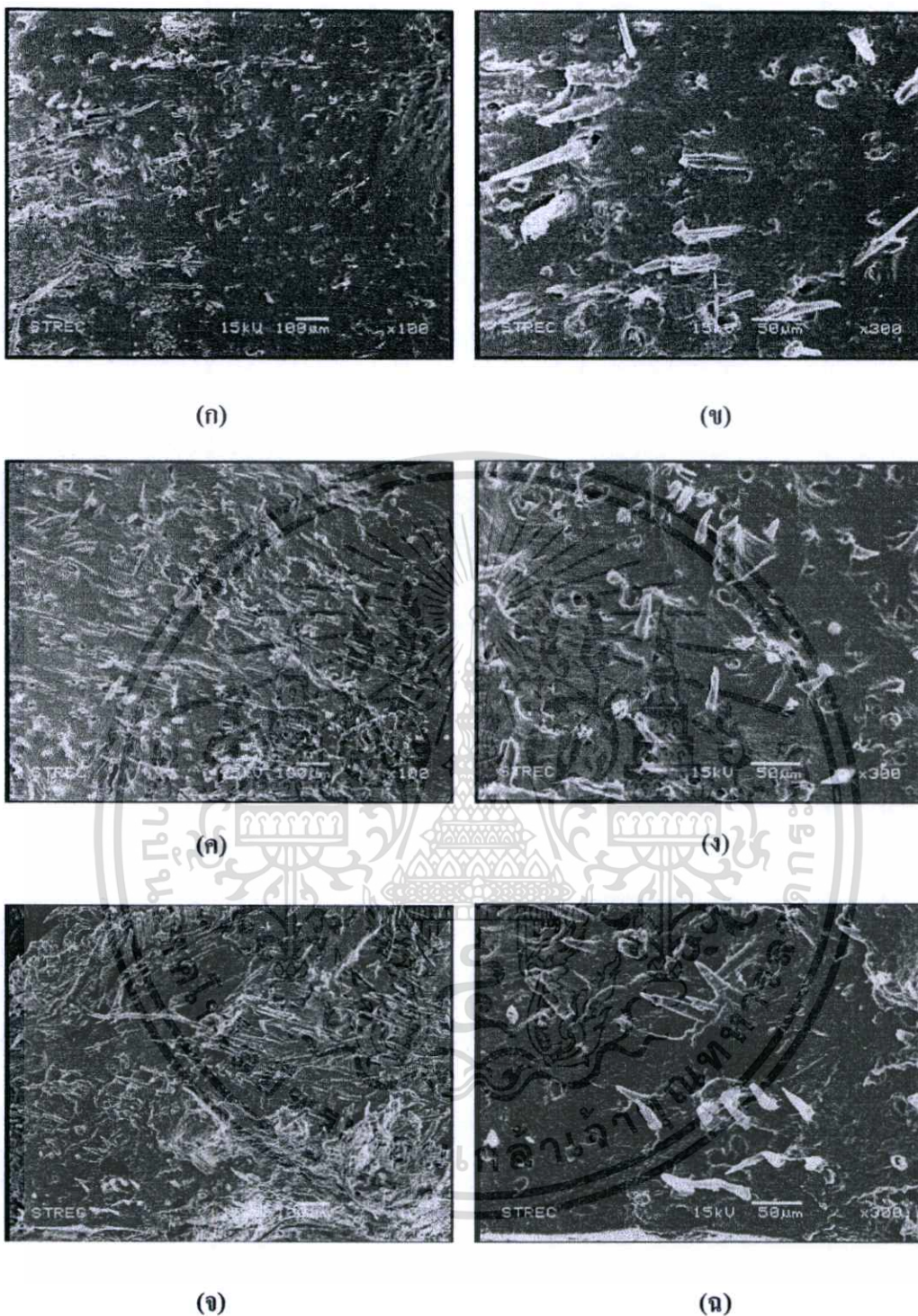
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.28 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไหมที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยไหม 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไหมที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยไหม 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยไหม 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 สมบัติเชิงกล

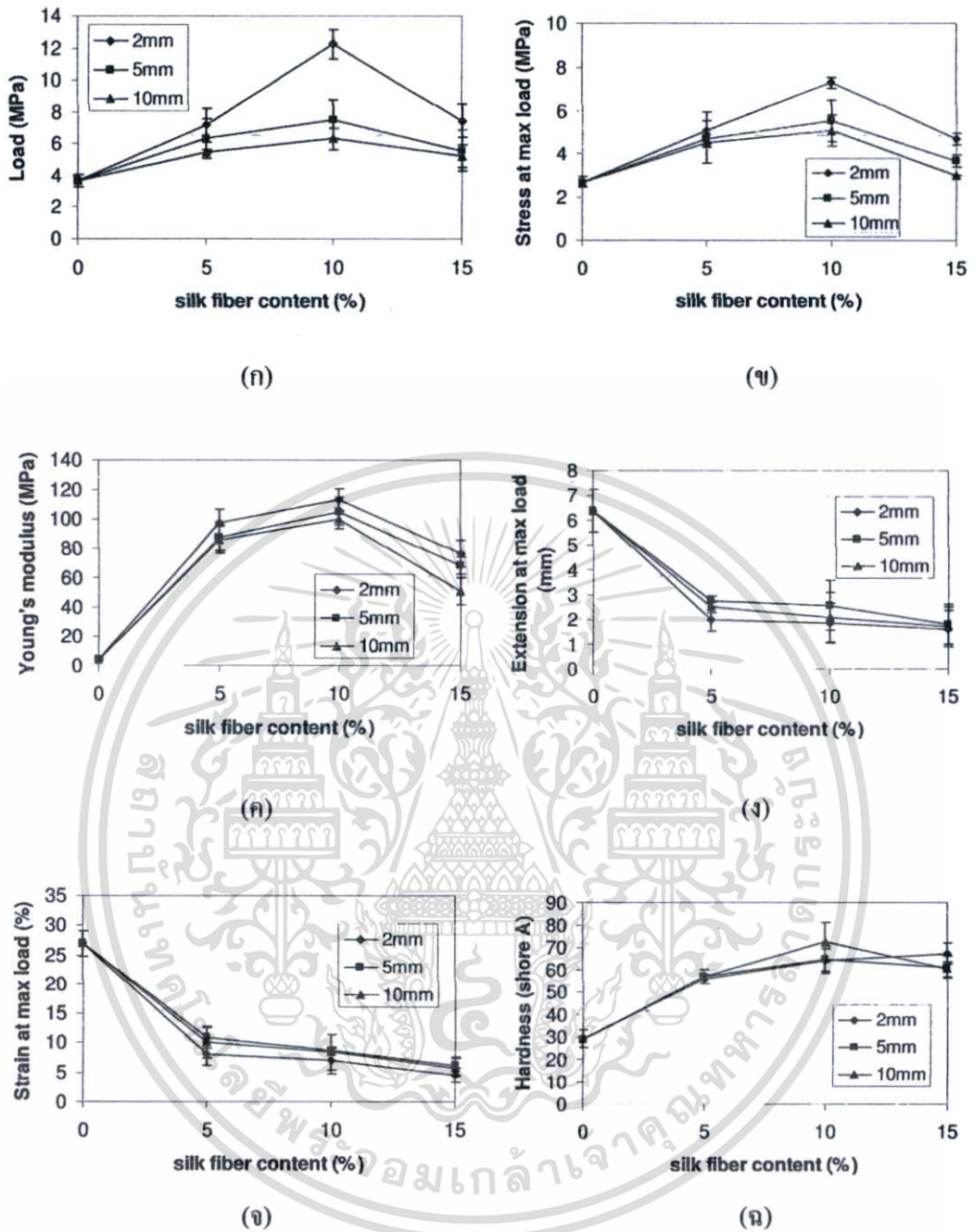
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมด้วยเส้นใยไหมปริมาณ 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm 5mm และ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) 208/1 522/1 และ 1044/1 ตามลำดับ ให้ผลการทดลองดังนี้

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงโดยการใช้เส้นใยไหม แสดงดังรูปที่ 4.30 จากผลการทดลองพบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.30 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.30 (ข)) และมอดูลัส (รูปที่ 4.30 (ค)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสมบัติของเส้นใยไหมที่มีความแข็งแรงอีกทั้งสามารถทนแรงและรับแรงตามแนวแกนได้เป็นอย่างดีโครงสร้างของเส้นใยไหมสามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้งข้าวเจ้าได้ โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่อะมิโน (Amino group) หรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของเส้นใยไหม ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค FTIR ทำให้ผสมเข้ากันได้และจากการปรับปรุงโดยการผสมเส้นใยไหมในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์พบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด คือ แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัส คือ ปริมาณของเส้นใยไหม 10 % โดยน้ำหนัก และพบว่าเมื่อผสมเส้นใยไหมในปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ลดลงเนื่องจากมีปริมาณเส้นใยมากเกินไปทำให้เกิดการรวมกลุ่มของเส้นใยส่งผลให้เมทริกซ์แป้งเกิดจุดบกพร่อง

สำหรับการยืดออกของตัวอย่าง (รูปที่ 4.30 (ง)) และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.30 (จ)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยไหมลงไปมากขึ้น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยไหมมีความแข็งแรงมากขึ้นดังนั้นการยืดตัวจึงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่เติมเส้นใยไหม

ค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.30 (ฉ)) พบว่าเมื่อเติมเส้นใยไหมลงในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ทำให้ความแข็งกดมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยไหมเข้าไปปกคลุมเนื้อที่ของเมทริกซ์แป้งจึงทำให้บริเวณพื้นผิวแข็งขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งกดที่เป็นการวัดเฉพาะพื้นผิวภายนอกจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยไหมจาก 2 mm เป็น 10 mm ในขณะที่ใช้ปริมาณเส้นใยไหมเท่ากันที่ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.30 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.30 (ข)) และมอดูลัสมีค่าลดลงในขณะที่การยืดออกมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใย 10 mm เกิดรวมเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับภาพจาก SEM (รูปที่ 4.29 (จ)) โดยภาพรวมแล้วพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยไหมปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด



รูปที่ 4.30 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ทำการผสมด้วยเส้นใยไหม (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) การดึงยืด (จ) เปรอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ฉ) ความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

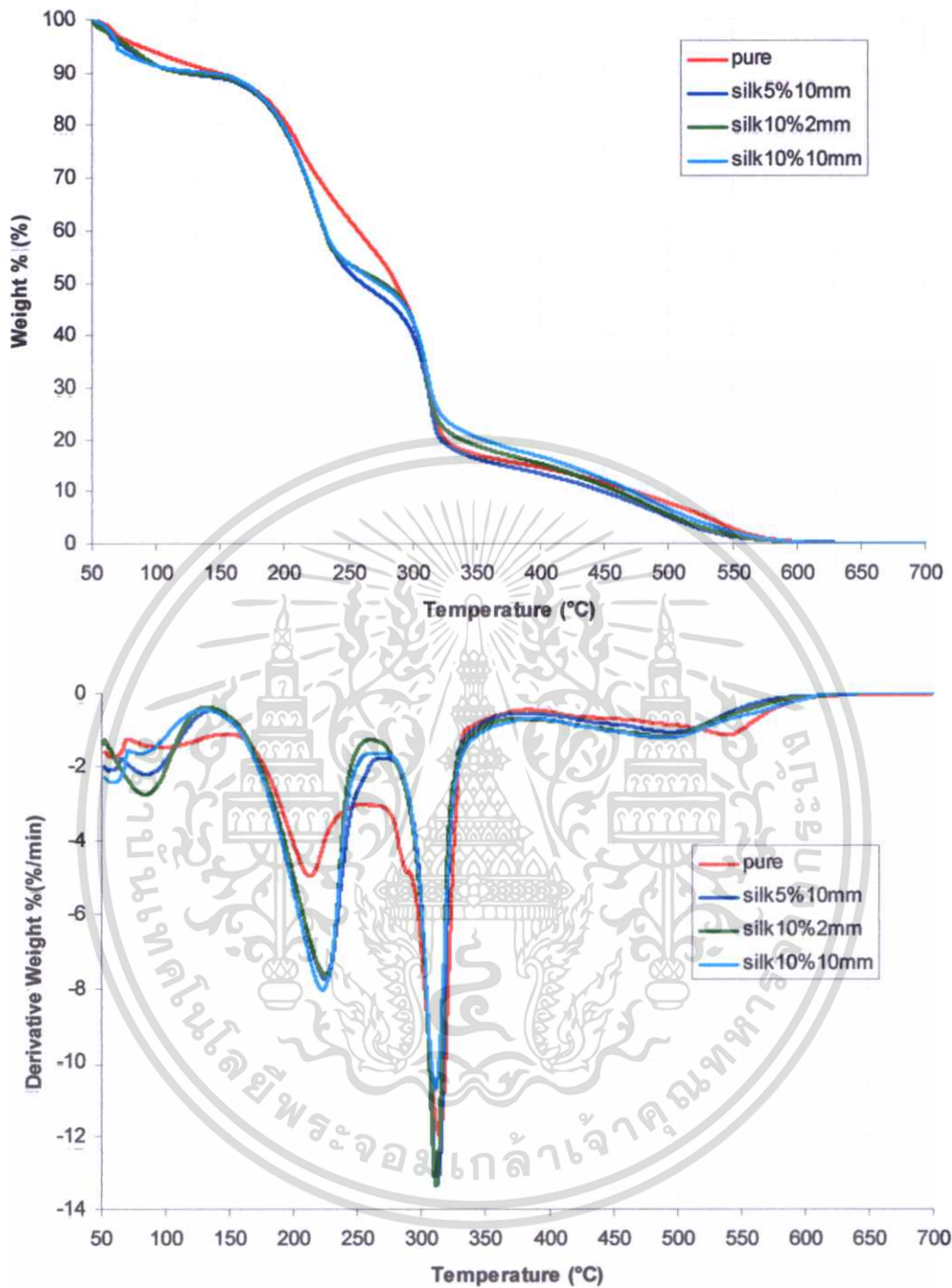
4.3.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไหม ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยไหม)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	191.2	303.0	445.1	33.3
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	191.4	301.9	438.6	35.3
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	186.5	300.1	428.9	33.6

จากรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตา์ชโดยการเติมเส้นใยไหมพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมี 3 ช่วงด้วยกัน โดยช่วงที่ 1 เป็นการสลายตัวของกลีเซอรอล [37-38] ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้ง [44] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไหม [70] ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองพบว่า การเติมเส้นใยไหมทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยไหมมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นและ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และความยาวที่ขนาด 2 mm เป็น 10 mm พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงได้ว่าปริมาณและความยาวเส้นใยไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมเส้นใยไหมที่ปริมาณและความยาวที่เท่ากัน

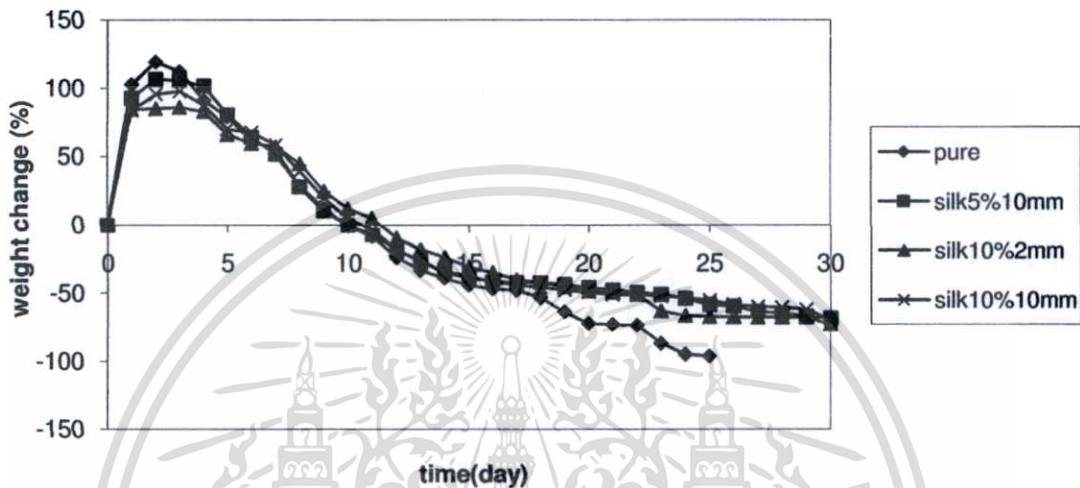


รูปที่ 4.31 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยไหม (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm (3) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 2 mm (4) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

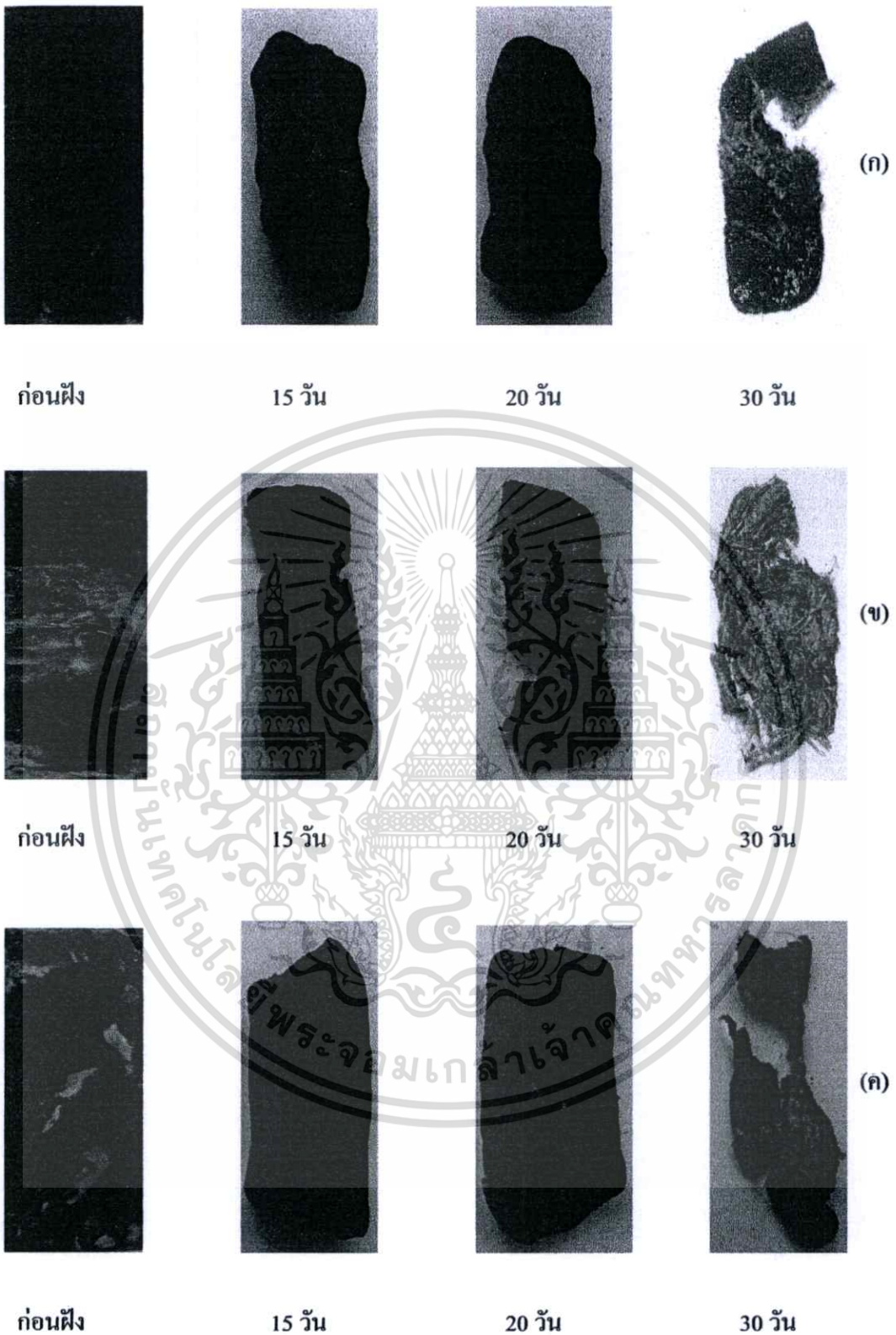
4.3.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ สูตรต่างๆ ดังนี้ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ เส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm เส้นใยไหม 10% ความยาว 2 mm และ เส้นใยไหม 10% ความยาว 10 mm มาทำการทดสอบ โดยการฝังดินให้ผลการทดลองแสดงดัง รูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ที่ไม่มีการปรับปรุง และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยไหม

จากรูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ที่ไม่มีการปรับปรุง ในช่วง 3 วันแรก มีการดูดซับความชื้นเข้าไปในชิ้นงาน โดยเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ เริ่มบวมตัว โดยสังเกตเห็นได้ว่าน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับความชื้น จากนั้นจึงค่อยเริ่มเกิดการย่อยสลาย โดยสังเกตได้จากน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมีน้ำหนักลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปื่อยยุ่ย และขาด จนชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ เสียสภาพไปในที่สุดภายในเวลา 25 วัน สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ที่ผสมเส้นใยไหมพบว่าในช่วง 3 วันแรก ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันแต่ชิ้นงานคงสภาพได้นานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลล์ที่ไม่มีการปรับปรุงเนื่องจากมีเส้นใยไหมช่วยในการเกาะชิ้นงาน หลังจากนั้นเริ่มเกิดการย่อยสลายโดยสังเกตจากน้ำหนักที่ลดลง โดยที่ ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแข็งเกิดการย่อยสลายก่อนส่วนที่เป็นเส้นใย หลังจากนั้นเริ่มเกิดการเสีสภาพของชิ้นงานและคงเหลือไว้แต่เส้นใยไหม



รูปที่ 4.33 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

(ก) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยไหม 5% ความยาว 10 mm

(ข) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 2 mm

(ค) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมเส้นใยไหม 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานนี้เท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์

4.4.1 การวัดสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์

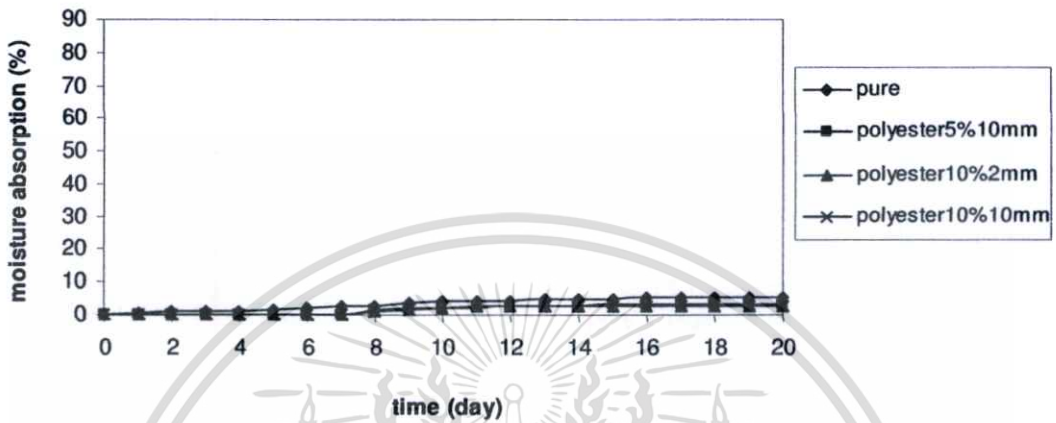
ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	37.50	7.30	17.35	18.82	67.2
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	39.42	9.64	20.49	22.64	64.8
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	39.61	7.34	18.53	19.93	68.4

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง, ค่า a^* กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว, ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C แสดงความสดใของสี, ค่า h° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

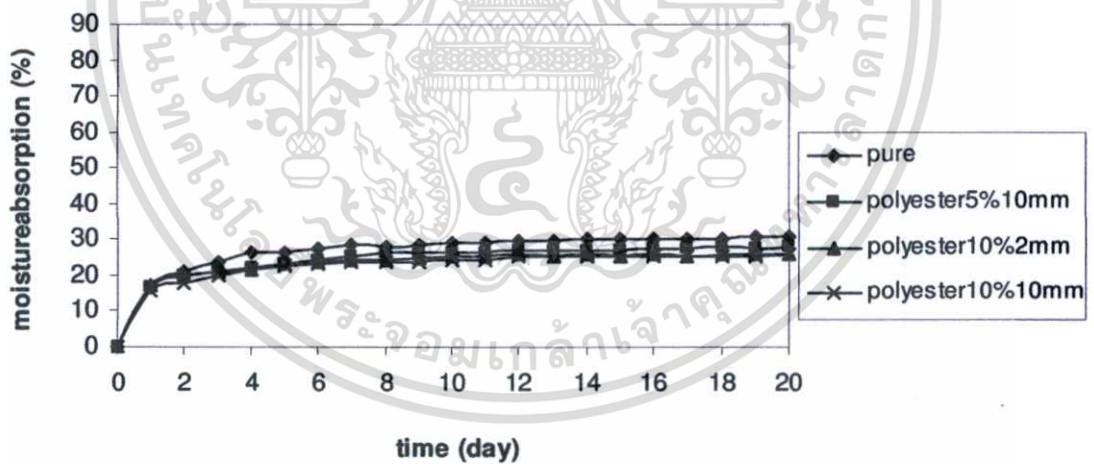
จากตารางที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ พบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (L^* , a^* , b^* และ C^*) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นแต่ไม่ทำให้ตำแหน่งของสี (h°) มีการเปลี่ยนแปลง อาจเนื่องมาจากค่า h° ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมาจากค่า a^* และ b^* ($h^\circ = \tan^{-1} [b^*/a^*]$) ซึ่งจากตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่าค่า b^* ของทุกสูตรมีค่ามากกว่า a^* ประมาณ 2 เท่า จึงทำให้เมื่อคำนวณหาตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน ได้ค่าที่มีแนวโน้มไม่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกันและพิจารณาขนาดเส้นใยที่ต่างกัน พบว่า กรณีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และความยาวเส้นใย จาก 2 mm เป็น 10 mm ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน

4.4.2 การดูดซับความชื้น

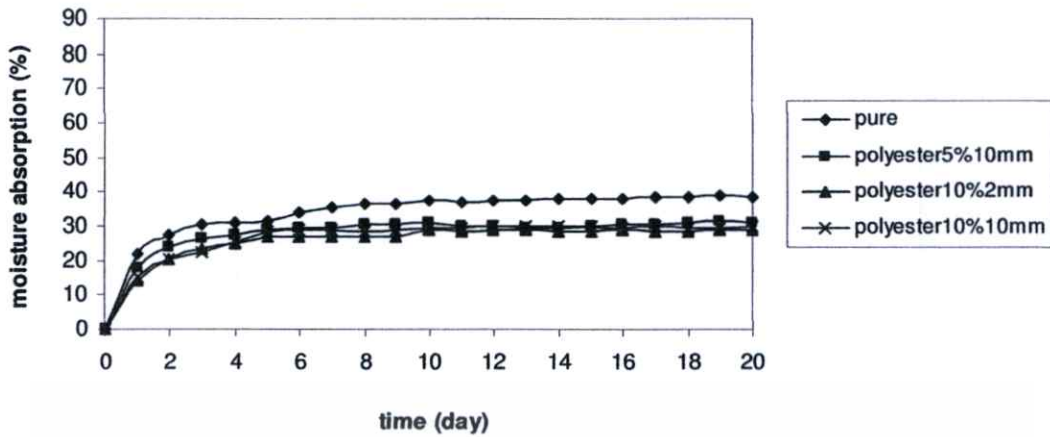
ศึกษาการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.34 (ก)-(ง)



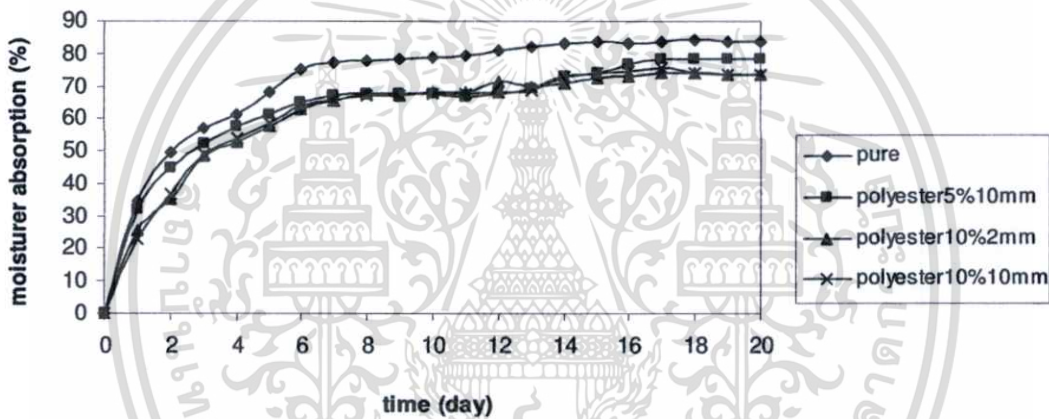
รูปที่ 4.34 (ก) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%



รูปที่ 4.34 (ข) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 4.34 (ค) เปรอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 4.34 (ง) เปรอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.34 (ก)-(ง) แสดงผลการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในระยะเวลา 20 วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% พบว่าในช่วง 3 วันแรกเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อเวลาผ่านไปมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นประมาณ 5% 30% 38% 83% ตามลำดับ

เมื่อมีการเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่เป็นไปในการทำงานเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ กล่าวคือในช่วง 3 แรกแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากนั้นมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งเริ่มคงที่ แต่การผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ลงไปทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ลดลง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นประมาณ 3% 27%

30% และ 77% ตามลำดับเมื่อเติมเส้นใย 5% ของน้ำหนักแป้งและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 10% ของน้ำหนักแป้งพบว่าเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นประมาณ 2% 25% 28% และ 73% ตามลำดับ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% (รูปที่ 4.34) เทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ดูดซับความชื้นได้ถึง 77% และ 73% เมื่อผสมเส้นใย 5% และ 10% ซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยพอลิเอสเทอร์สามารถดูดซับความชื้นได้ประมาณ 0.4% [52] แต่จากการทดลองเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นค่อนข้างสูง อาจเป็นผลเนื่องมาจากชิ้นงานที่มีรอยแยกระหว่างเมทริกซ์แป้งกับเส้นใยพอลิเอสเทอร์ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ที่แสดงรอยแยกของเมทริกซ์แป้งดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.4.5 จึงทำให้เกิดรอยตำหนิขึ้น น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์แป้งได้ง่ายขึ้น ทำให้ เมทริกซ์แป้งเกิดการพองตัว จึงส่งผลให้การดูดซับความชื้นค่อนข้างสูง แต่ทั้งนี้ยังคงมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ซึ่งเป็นผลจากสมบัติของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ทำให้มีความต้านทานต่อความชื้นดีขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีสภาพขั้วน้อยกว่าแป้ง จึงดูดซับความชื้นได้ลดลง

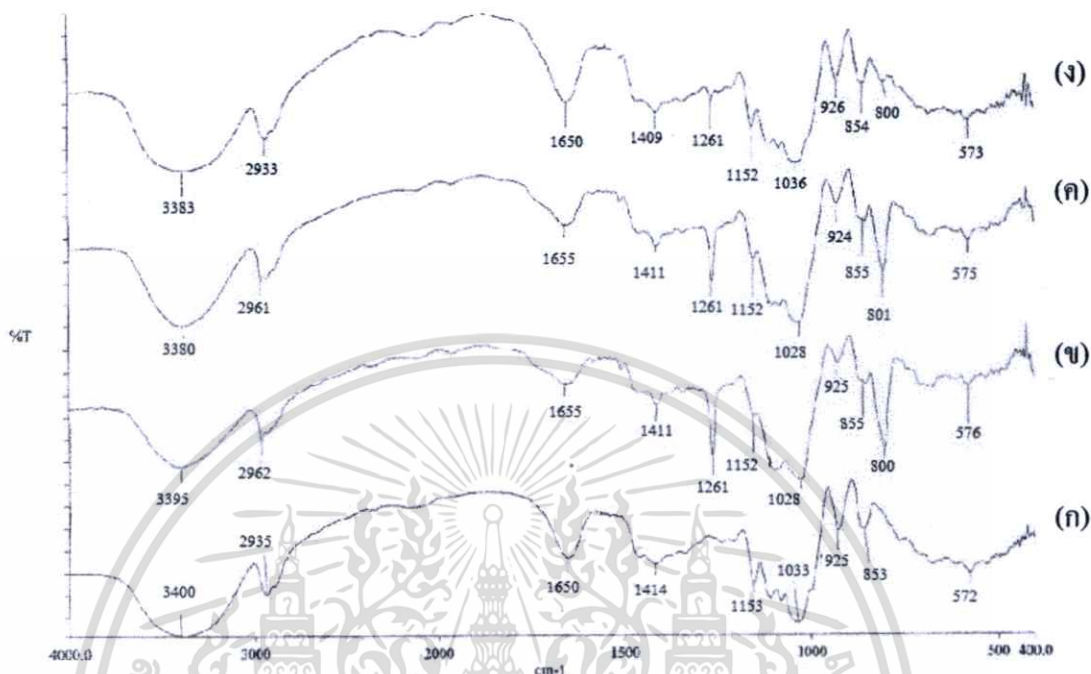
จากรูปที่ 4.34 (ก)-(ง) สำหรับเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ปริมาณ 10% ของน้ำหนักแป้งแต่มีความยาวต่างกัน คือ 2 mm และ 10 mm พบว่ามีแนวโน้มการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ใกล้เคียงกัน คือ ช่วงแรกมีการดูดซับความชื้นอย่างเห็นได้ชัด และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุล

4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

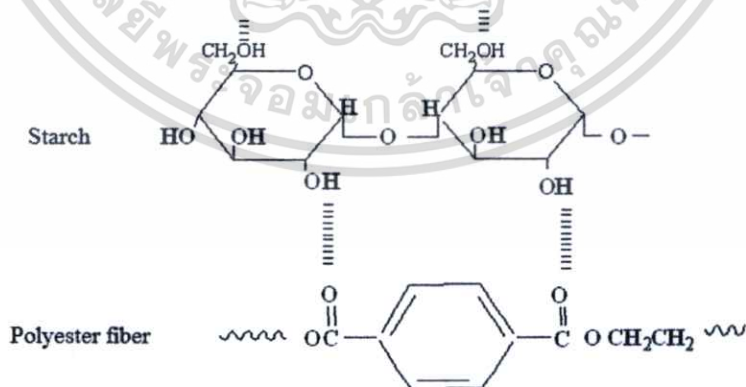
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้าที่ยังไม่มีการปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.35

จากรูปที่ 4.35 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์โดยที่พีกสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ไม่ได้ปรับปรุงได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 และเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ จากสเปกตรัมในรูปแบบพีกอินฟราเรดสเปกตรัมช่วงเดียวกับที่พบในเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์โดยที่พีกในช่วงการสั่นแบบ OH-stretching และ OH-bending พีกมีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง อาจเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งและเส้นใยพอลิเอสเทอร์ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.36 นอกจากนี้ พีกที่ตำแหน่ง 1153 cm^{-1} ที่เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-H bending ที่พบในเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ มีความเข้มของพีกลดลงเมื่อผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังพบพีกที่

ตำแหน่ง $1260-1267\text{ cm}^{-1}$ เป็นตำแหน่งพีกที่เกิดจาก C-O stretch in ester และที่ 800 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของ C-H Out of plane bending ที่ได้มาจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ [71]



รูปที่ 4.35 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (ก) ที่ไม่ได้ปรับปรุง (ข) ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค) ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm และ (ง) ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

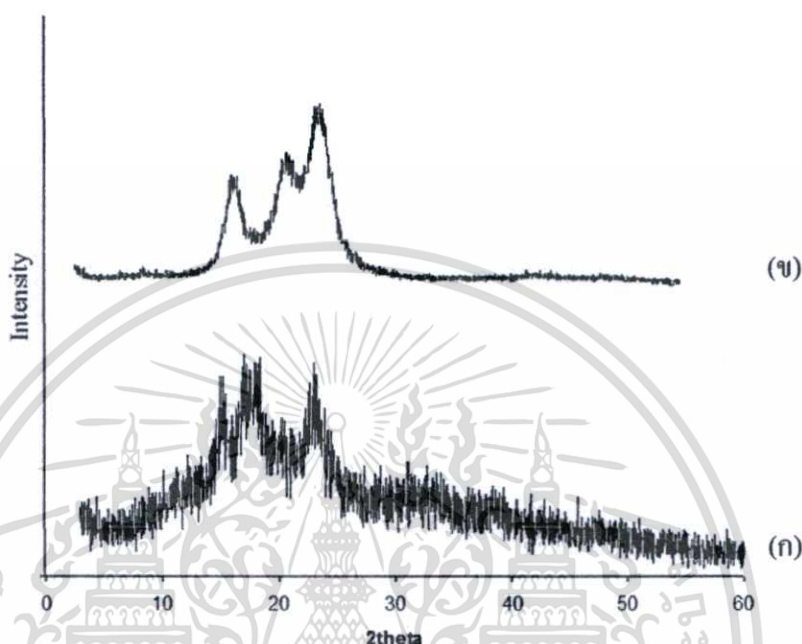


รูปที่ 4.36 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยพอลิเอสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 XRD

รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.37-4.38

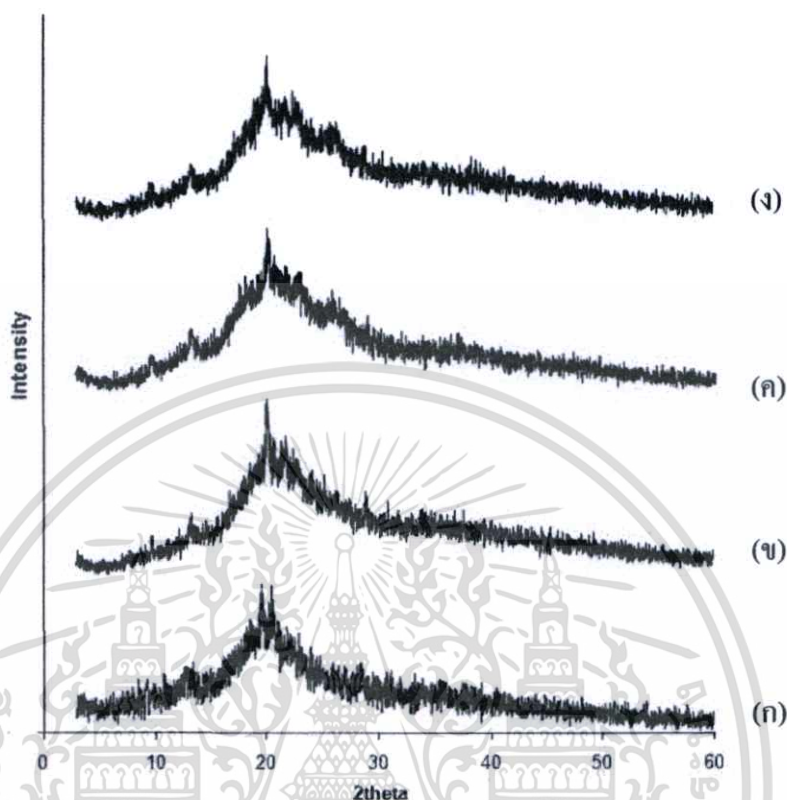


รูปที่ 4.37 ดิฟแฟรกโตแกรมของ (ก) แป้งข้าวเจ้า และ (ข) เส้นใยพอลิเอสเทอร์

จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.37) แสดงดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ซึ่งลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 14.9° , 17.4° , 18.1° , 23.3° สำหรับดิฟแฟรกโตแกรมของเส้นใยพอลิเอสเทอร์จะเห็นได้ว่ามีความเรียบ (Smooth) และให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 17.9° , 22.9° , 26.0° ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ orthorhombic [72-73]

เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูป พบว่า (รูปที่ 4.38) ลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 20.6° และเมื่อนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาปรับปรุงโดยเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์แสดงดังรูปที่ 4.38 (ข)-(ง) พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมมีรูปแบบที่มีแนวโน้มคล้ายกับดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมมีความเข้ม (Intensity) มากขึ้น โดยพบพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° ชัดขึ้น และพีกที่มาจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์ โดยที่เมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น พบว่า Intensity ของพีกมุม 2θ ที่ 17.9° , 22.9° , 26.0° มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยจาก 2 mm เป็น 10 mm ใน

ปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน พบว่า ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ ความเข้มของพีกที่มุม 2θ มีความเข้ม (Intensity) มากขึ้น

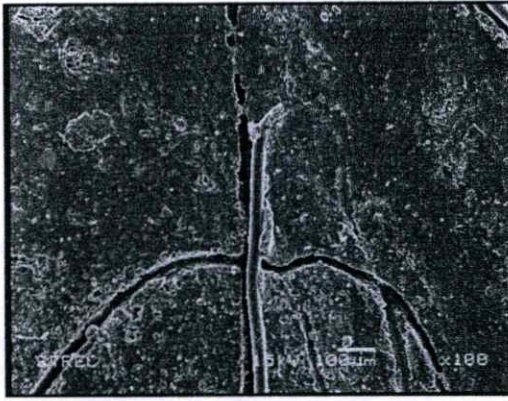


รูปที่ 4.38 คิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

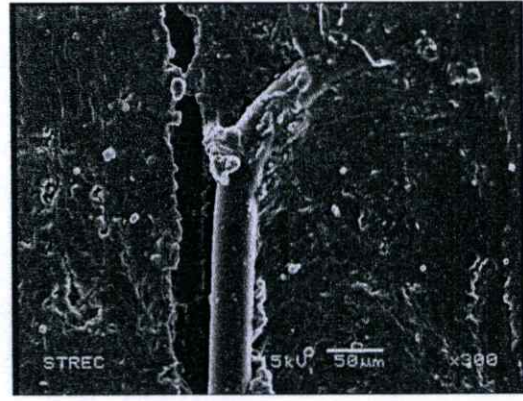
- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 5% ความยาว 10 mm
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% ความยาว 2 mm
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% ความยาว 10 mm

4.4.5 สัณฐานวิทยา

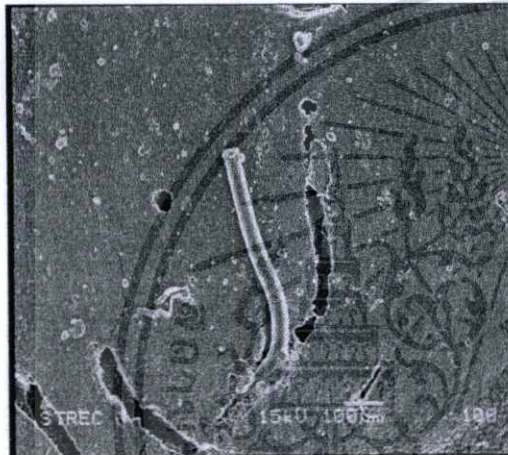
ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ปริมาณ 5% และ 10% ของน้ำหนักแป้งที่ความยาวเส้นใย 2 mm และ 10 mm ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.39 และ 4.40



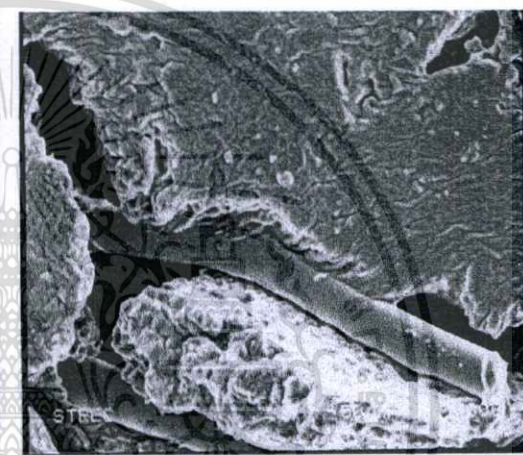
(ก)



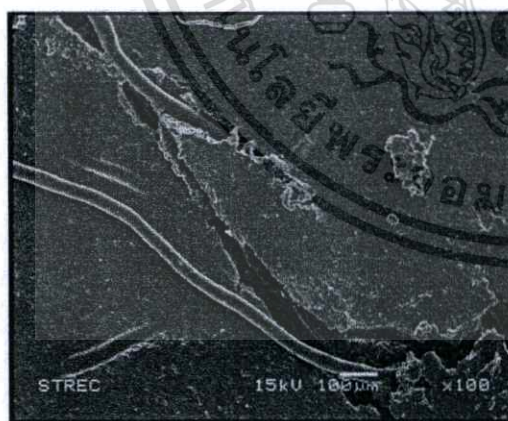
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



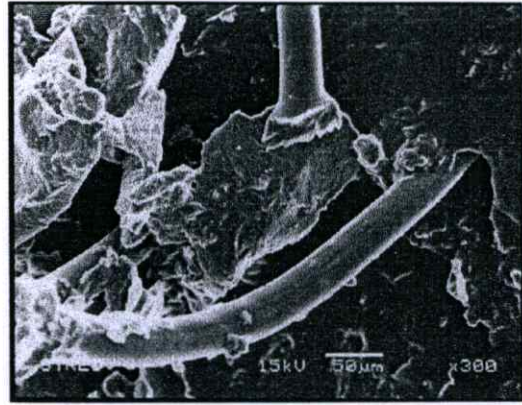
(ฉ)

รูปที่ 4.39 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



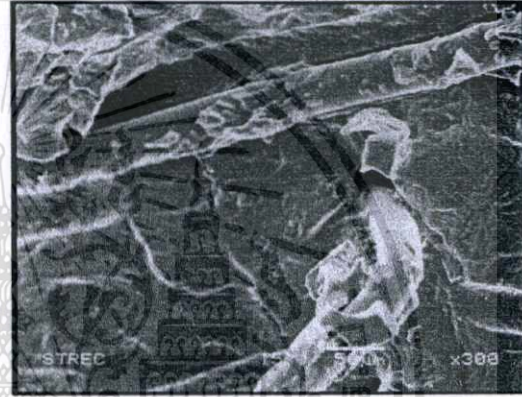
(ก)



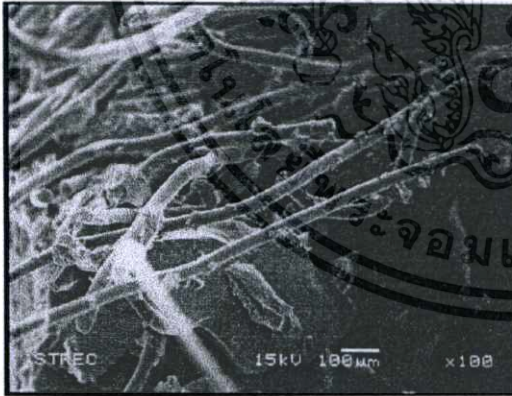
(ข)



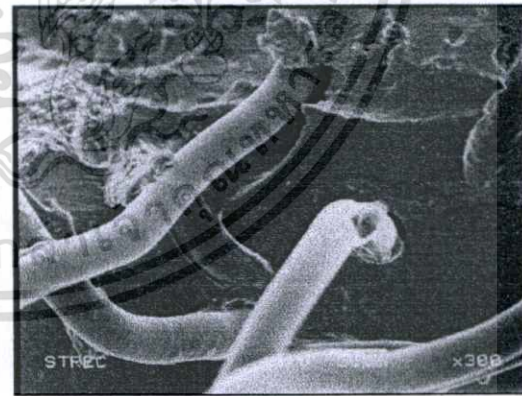
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.40 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่
 กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง)
 ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% โดยน้ำหนัก
 ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

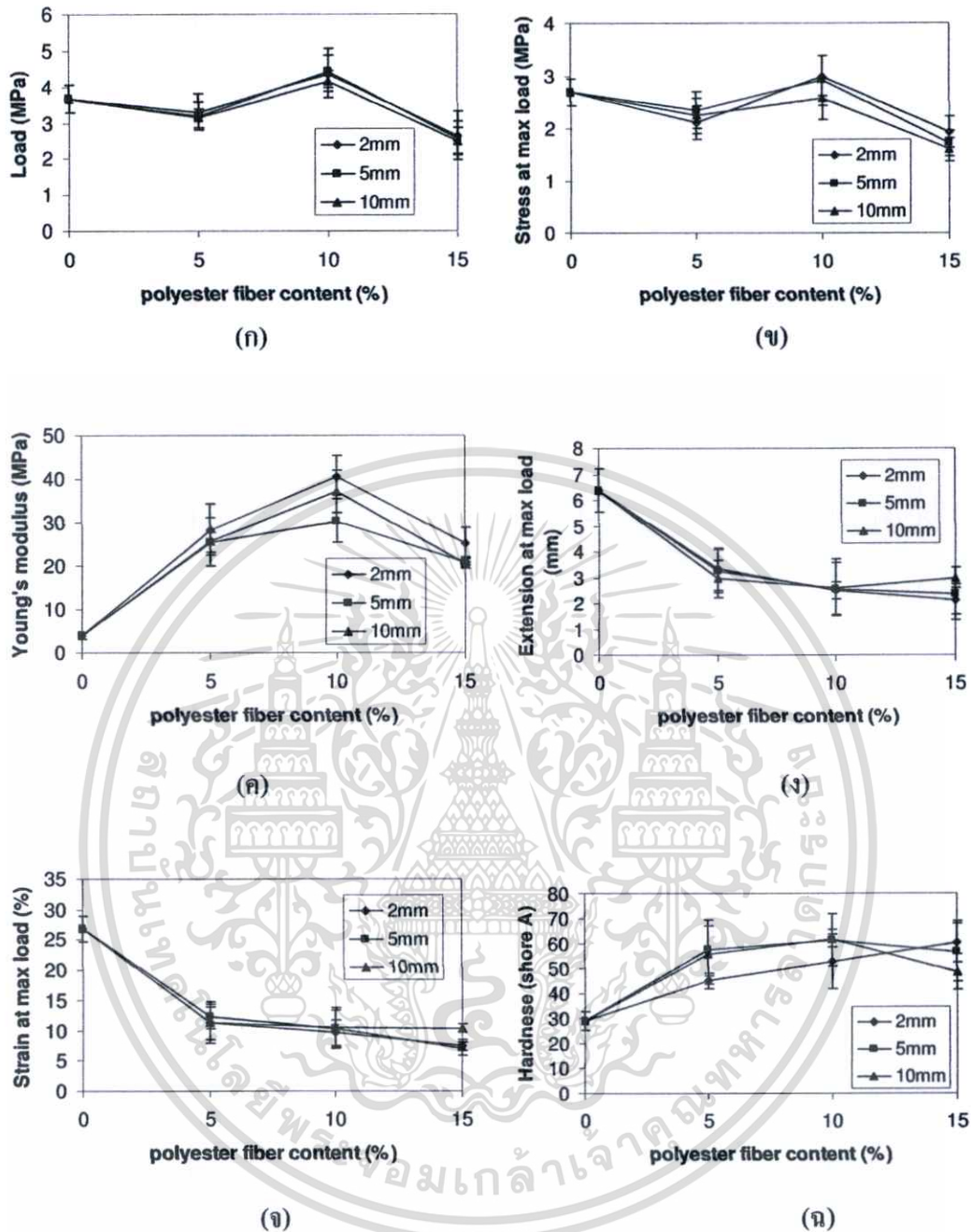
ลักษณะพื้นฐานวิทยาของลักษณะพื้นผิวและคำอธิบายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์แสดงดังรูปที่ 4.39 (ก)-(ง) ซึ่งพบว่าเห็นเส้นใยพอลิเอสเทอร์บนเมทริกซ์แป้งและเห็นรอยแยกในเมทริกซ์แป้งเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง (รูปที่ 4.6) เนื่องจากเมทริกซ์แป้งและเส้นใยพอลิเอสเทอร์เข้ากันได้น้อยจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันเองของเส้นใยและเกิดการแยกวัฏภาคจากเมทริกซ์แป้ง

จากรูปที่ 4.40 (ก)-(ง) แสดงภาพจาก SEM ที่แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์พบว่าแสดงการกระจายตัวของเส้นใยบนเมทริกซ์แป้งได้ชัดเจนกว่าการดูจากลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพบว่าเมื่อเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ในปริมาณที่มากขึ้นสังเกตเห็นการฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์แป้งได้ชัดเจนขึ้น และเห็นได้ชัดว่าเมทริกซ์แป้งเกิดรอยแยกขึ้น (รูปที่ 4.39 (ก)-(ง)) เนื่องจากความมีขี้ตัวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่น้อยกว่าเมทริกซ์แป้ง

เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่ใช้ดังรูปที่ 4.40 (ค)-(ง) พบว่าเมื่อความยาวของเส้นใยมากขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณที่เท่ากันนั้นเห็นได้ว่าเส้นใยไม่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แป้งได้ทั่วถึงตลอดความยาวเส้นใย โดยจะเกิดการเกี่ยวพันและจับกลุ่มกันเองของเส้นใย ดังรูปที่ 4.40 (จ)

4.4.6 สมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์ในปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักที่ความยาว 2 mm 5 mm และ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) 62/1 155/1 และ 311/1 ตามลำดับเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง โดยให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.41 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ทำการผสมด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) การดึงยืด (จ) เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ฉ) ความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

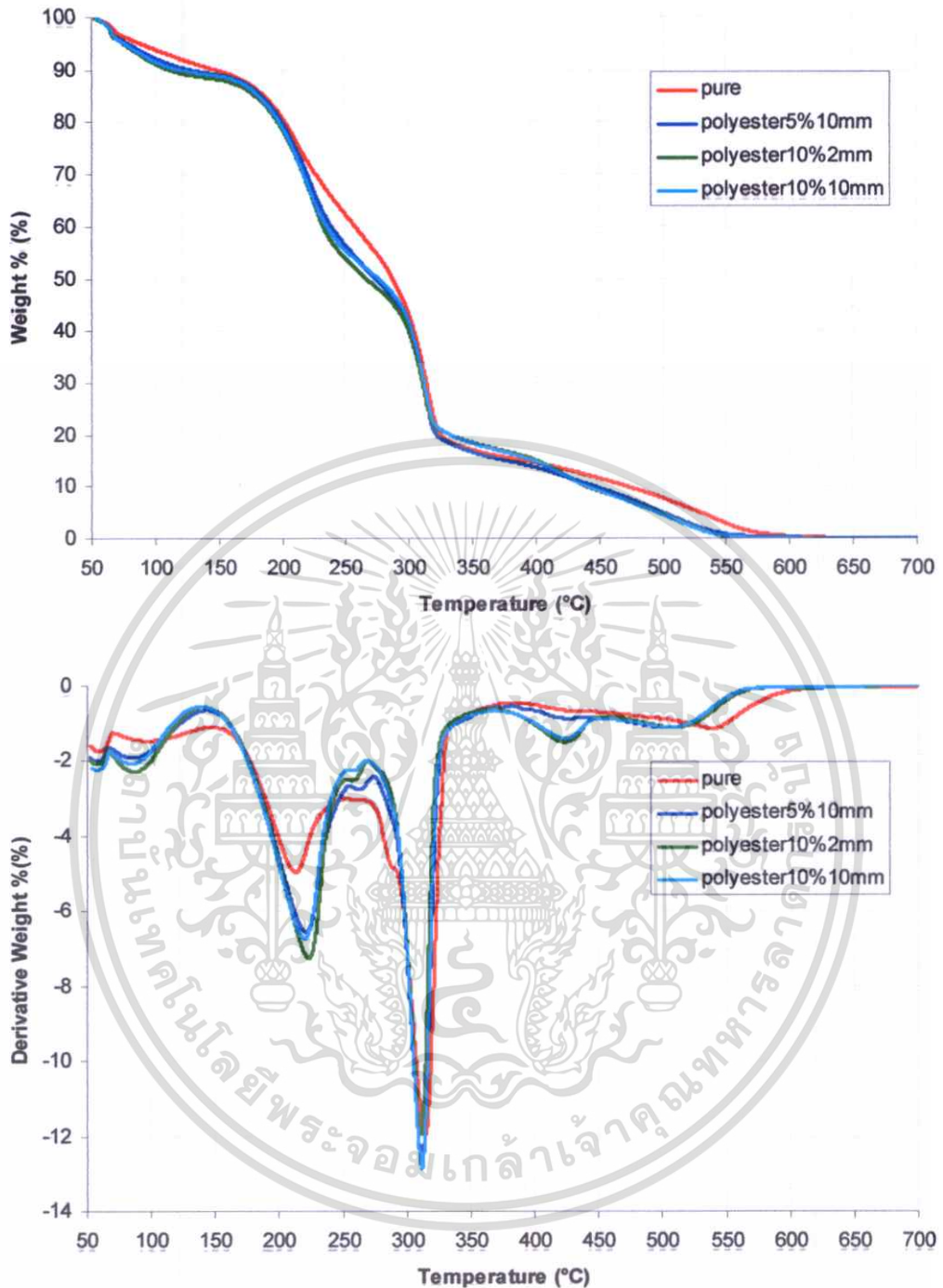
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงโดยใช้เส้นใยพอลิเอสเทอร์ แสดงดังรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ จากผลการทดลองพบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.41 (ก)) และความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.41 (ข)) มีแนวโน้มไม่แตกต่างซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ที่แสดงรอยแตกระหว่างวัฏภาคจึงทำให้ค่าแรงดึง และความแข็งแรงดึง ที่วัดได้มีความใกล้เคียงกัน โดยเป็นค่าที่พิจารณาจากค่าสูงสูงที่ขึ้นตัวอย่างสามารถทนได้ แต่พบว่าค่ามอดูลัส (รูปที่ 4.41 (ค)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากเป็นค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงแรก ($E = \sigma/\epsilon$) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM ที่แสดงว่าเส้นใยพอลิเอสเทอร์กระจายตัวบนเมทริกซ์แป้ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงที่ส่งผ่านจากเมทริกซ์มายังเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใย 10% โดยน้ำหนักให้ค่ามอดูลัสสูงที่สุด ความแตกต่างระหว่างความยาวมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน พบว่าแรงดึงและความแข็งแรงดึงไม่แตกต่าง แต่ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความยาว 2 mm ให้ค่ามอดูลัสสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากเส้นใยมีความยาวน้อย ดังนั้น การกระจายตัวจึงคิดว่าเส้นใยที่ยาวขึ้น สามารถรับแรงที่มากกระทำได้มากขึ้น จึงงานเกิดการยืดตัวออกได้น้อย ซึ่งสอดคล้องกับภาพจากเทคนิค SEM (รูปที่ 4.40 (ค)-(ง))

การยืดออกของตัวอย่าง (รูปที่ 4.41 (ง)) และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.41 (จ)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยพอลิเอสเทอร์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์มีความแข็งแรงมากขึ้นและด้วยสมบัติของเส้นใยที่มีการยืดตัวค่อนข้างต่ำ

ค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.41 (ฉ)) พบว่าเมื่อเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ทำให้ความแข็งกดมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างมีเส้นใยปกคลุมอยู่ จึงทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อทำการวัดค่าความแข็งกดซึ่งวัดเฉพาะบริเวณพื้นผิวภายนอกจึงทำให้ค่าความแข็งกดมีแนวโน้มสูงขึ้น

4.4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์แสดงดังรูปที่ 4.42 และ ตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.42 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง (2) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 5% ความยาว 10 mm (3) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 10% ความยาว 2 mm (4) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์

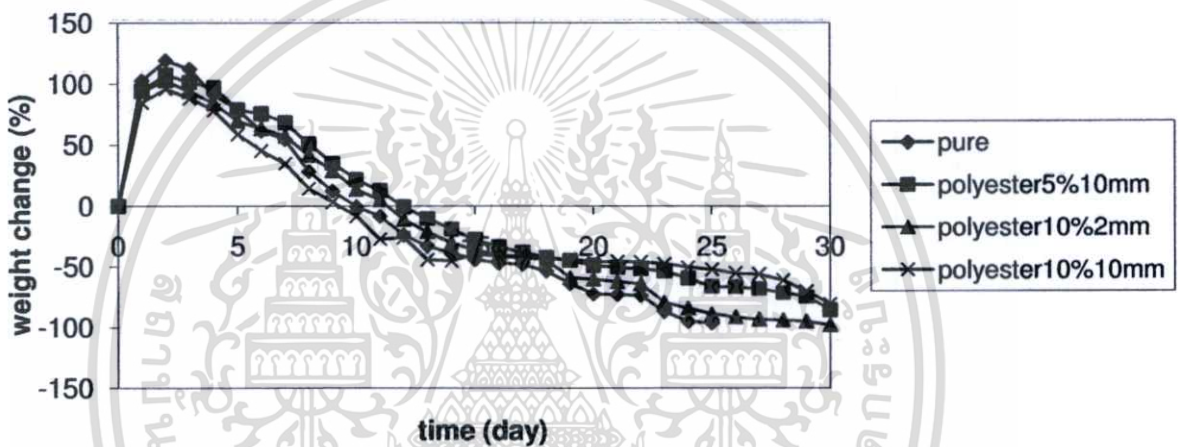
ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว(°C)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยพอลิเอสเทอร์)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	189.0	298.3	443.0	37.0
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	191.1	300.1	406.4	31.3
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	188.9	299.8	403.1	34.3

จากรูปที่ 4.42 และตารางที่ 4.8 เห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่มีการปรับปรุงโดยการเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ มีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิ 185.3 °C เป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอล [37-38] และ 294.3 °C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง [44] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ พบที่ประมาณ 420 °C [71] ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มการหายไปลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ลงใน เทอร์โมพลาสติกสตา์ชทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

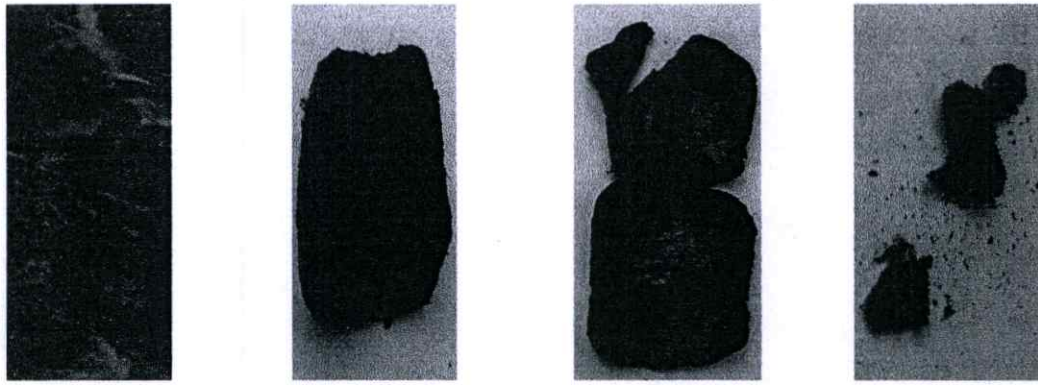
ผลของความยาวของเส้นใยพอลิเอสเทอร์ต่อเสถียรภาพทางความร้อนพบว่าเมื่อเพิ่มความยาวจาก 2 mm เป็น 10 mm (รูปที่ 4.42 (3) - (4)) อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มไม่แตกต่างหรืออาจกล่าวได้ว่าเสถียรภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยและเมื่อพิจารณาที่ปริมาณที่มากขึ้น จาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนักมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

4.4.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์จากรูปที่ 4.43-4.44 เห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ มีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยในช่วง 3 วันแรก เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการดูดซับความชื้นไว้ค่อนข้างมากทำให้เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานเริ่มเกิดการบวมและเปื่อยยุ่ย หลังจากนั้นวัฏภาคระหว่างเส้นใยพอลิเอสเทอร์และเมทริกซ์เริ่มเกิดการย่อยสลายทำให้น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างลดลง โดยที่เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยพอลิเอสเทอร์เกิดการเสถียรภาพภายใน 30 วัน



รูปที่ 4.43 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยพอลิเอสเทอร์



ก่อนฝัง

15 วัน

20 วัน

30 วัน



ก่อนฝัง

15 วัน

20 วัน

30 วัน



ก่อนฝัง

15 วัน

20 วัน

30 วัน

รูปที่ 4.44 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

(ก) เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง

(ข) เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 5% ความยาว 10 mm

(ค) เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 10% ความยาว 2 mm

(ง) เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไพลอน

4.5.1 การวัดสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไพลอน เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยไพลอน

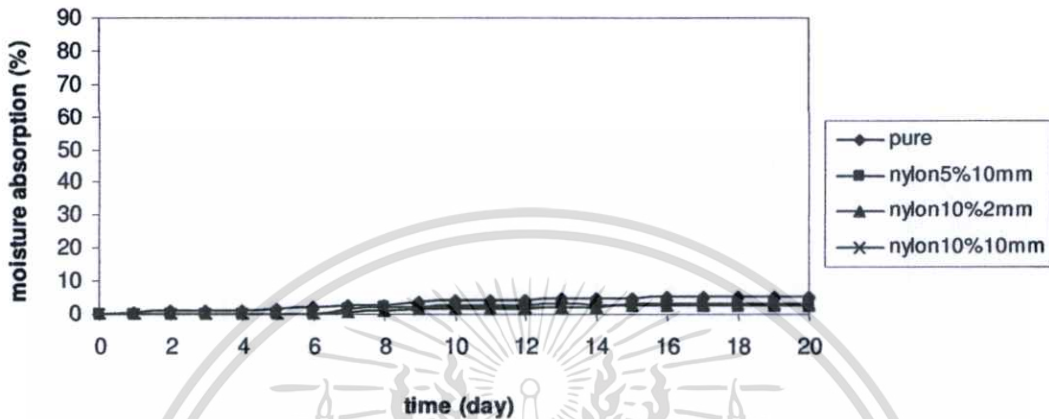
ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	43.41	5.39	16.81	17.66	72.2
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	47.01	5.74	17.11	18.05	71.4
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	49.56	6.60	18.50	19.64	70.4

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง, ค่า a^* กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว, ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C^* แสดงความสดใสของสี, ค่า h° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

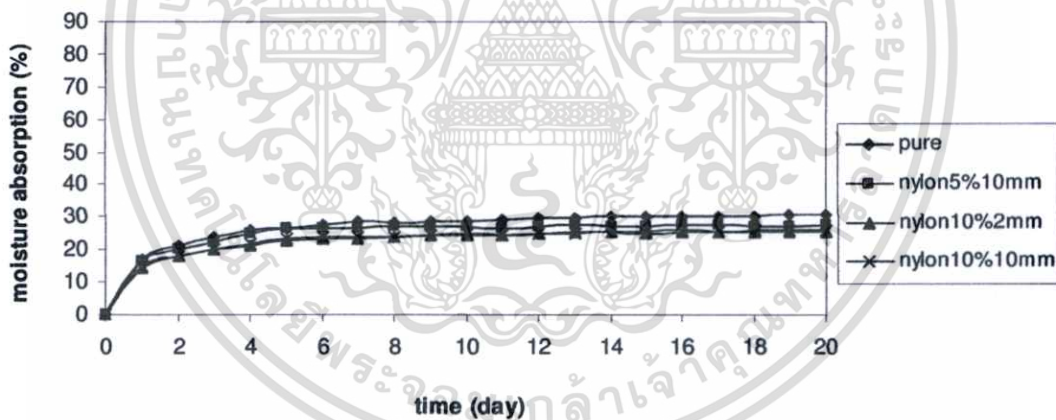
จากตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarch และเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยไพลอน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยไพลอน มีแนวโน้มค่าความสว่าง (L^*) และความสดใส (C^*) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า ค่า a^* มีแนวโน้มใกล้เคียงกันแต่ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นตัวอย่างแสดงสีแดงเช่นเดียวกันแต่มีเจดออกเหลืองที่ชัดเจนกว่า และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยไพลอนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย จาก 5% เป็น 10% และกรณีความยาวจาก 2 mm เป็น 10 mm พบว่า ทั้งในกรณีที่ปริมาณและความยาวเพิ่มขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยดูจากค่า L^* a^* b^* C^* และ h° ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

4.5.2 การดูดซับความชื้น

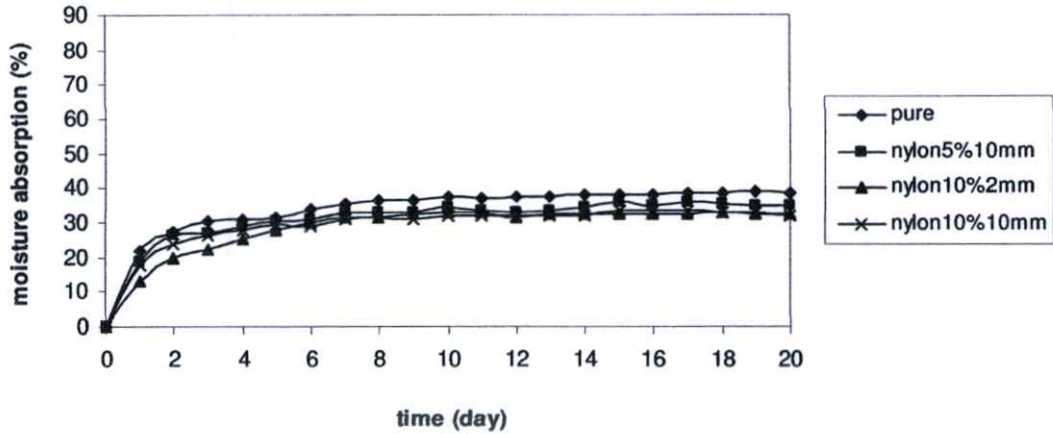
ศึกษาการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยไพลอน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.45 (ก)-(ง)



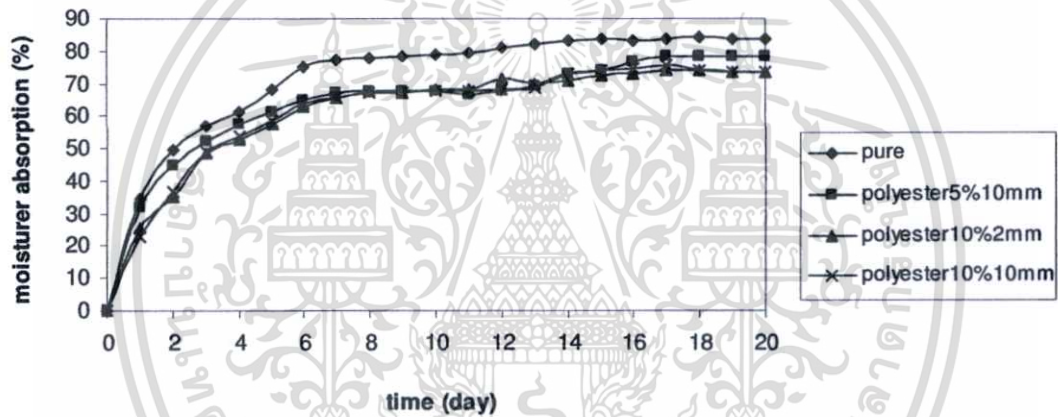
รูปที่ 4.45 (ก) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยไพลอน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%



รูปที่ 4.45 (ข) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยไพลอน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 4.45 (ค) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยไนลอน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



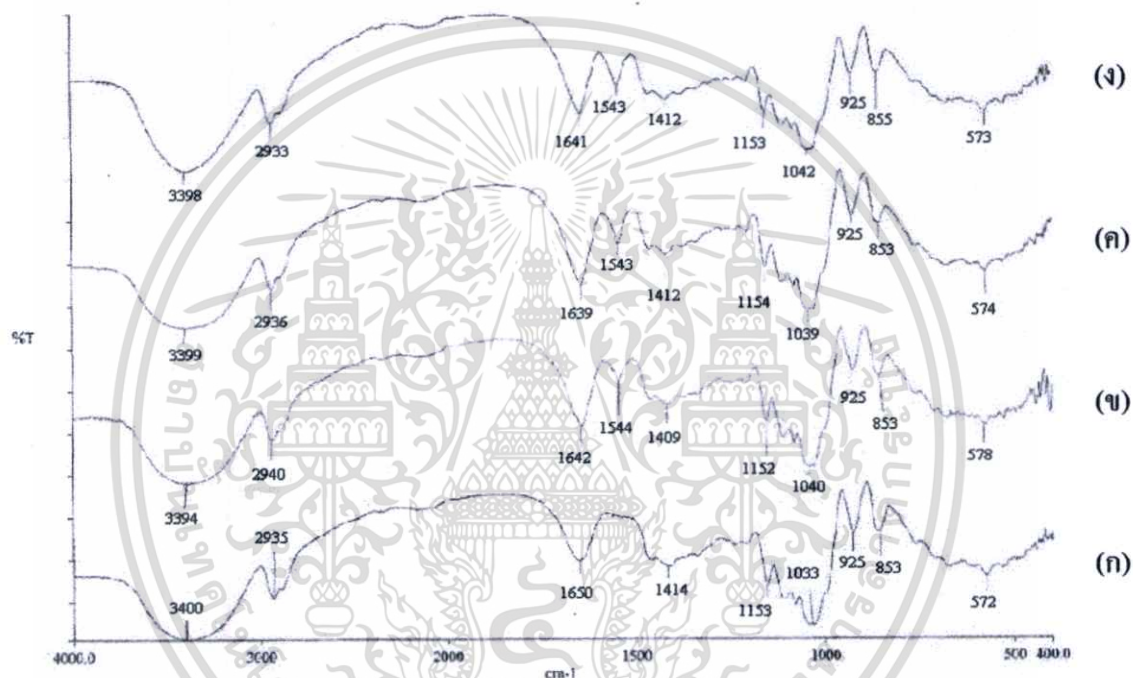
รูปที่ 4.45 (ง) เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยไนลอน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.45 (ก)-(ง) แสดงผลการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการผสมเส้นใยไนลอนในปริมาณและความยาวต่าง ๆ สามารถดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าในกรณีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวเนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเส้นใยไนลอนมีความสามารถในการดูดซับความชื้นค่อนข้างต่ำโดยที่สามารถดูดซับความชื้นได้เพียง 4.0-4.5 % [3] ดังนั้นเมื่อผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจึงทำให้มีความต้านทานต่อความชื้นดีขึ้น โดยที่ในช่วง 3 วันแรกมีการดูดซับความชื้นไว้มากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและหลังจากวันที่ 15 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเริ่มเข้าสู่ระดับสมดุล และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยไนลอนที่มากขึ้นจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนักที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% 50% 75% และ 100% ตามลำดับ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลงจากประมาณ 3% 27% 34% และ 68% ตามลำดับเป็น 2% 25% 32% และ 65% ตามลำดับ แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

ความถี่มีแนวโน้มไม่แตกต่างกันตามความยาวของเส้นใยในลอน แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวไม่มีผลต่อการดูดซับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

4.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

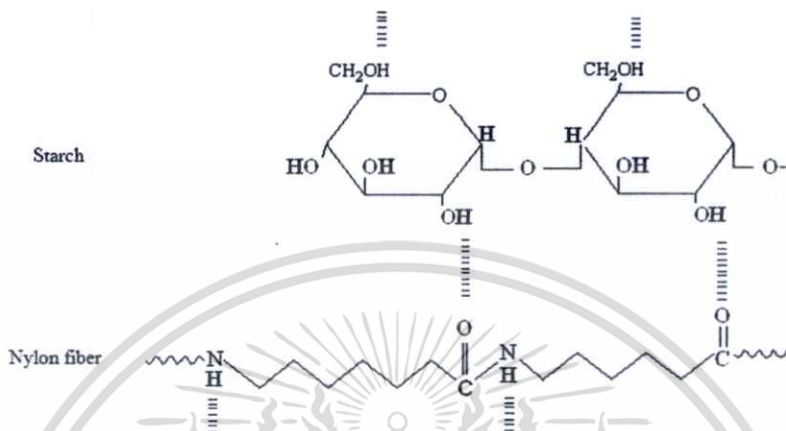
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยในลอนเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าที่ยังไม่มีการปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (ก) ที่ไม่ได้ปรับปรุง (ข) ปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค) ปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm และ (ง) ปรับปรุงด้วยเส้นใยในลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

จากรูปที่ 4.46 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยที่ทีสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยในลอน จากเส้นสเปกตรัมพบว่าที่ตำแหน่ง การสั่นของ OH-stretching และ OH-bending พิกมีเลื่อน (Shift) ไปยังค่าที่ต่ำลงอาจเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างเมทริกซ์แป้งกับเส้นใย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.47 และนอกจากนี้ยังพบตำแหน่งที่เกิดการซ้อนทับกันที่ ช่วง $3500 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ N-H stretching พิกในช่วง $1300 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-N stretching ที่ตำแหน่ง สเปกตรัมในช่วง

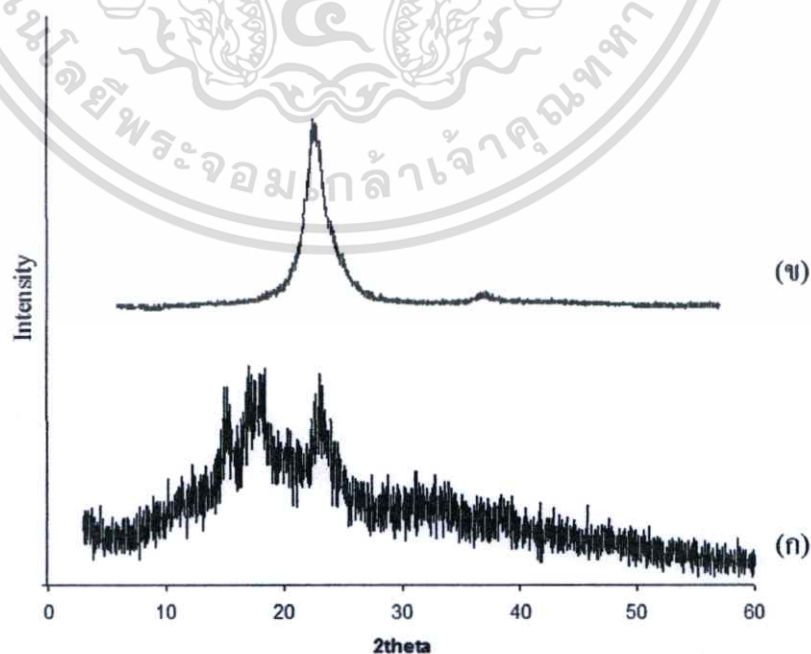
1715-1650 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (Amide functionality) [74-75] ซึ่งซ้อนทับกับลักษณะการสั่นของ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง และสเปกตรัมในช่วง 1540 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ N-H bending ของเส้นใยไนลอน [76]



รูปที่ 4.47 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยไนลอน

4.5.4 XRD

รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยไนลอน โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.48-4.49

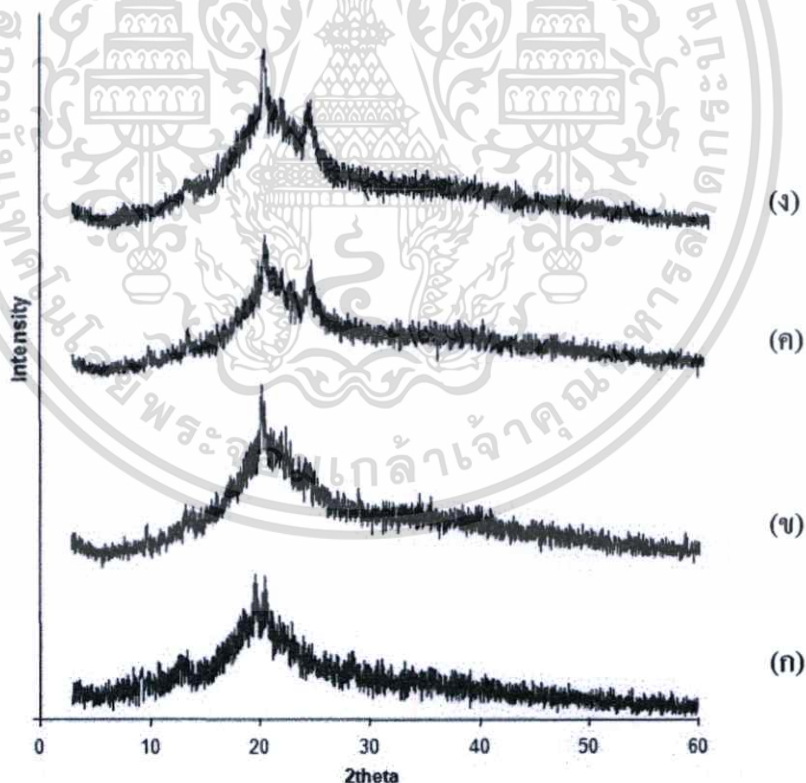


รูปที่ 4.48 ดิฟแฟรคโตแกรมของ (ก) แป้งข้าวเจ้า และ (ข) เส้นใยไนลอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง (รูปที่ 4.48) แสดงดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์และเส้นใยในลอนซึ่งลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์ ให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 14.9° , 17.4° , 18.1° , 23.3° สำหรับดิฟแฟรกโตแกรมของเส้นใยในลอนจะเห็นได้ว่ามีความเรียบ (Smooth) และให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 22.7° ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ monoclinic α -phase [77-78] เมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูป พบว่า (รูปที่ 4.49) ลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ให้พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 12.7° , 20.6°

เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มาปรับปรุงโดยเติมเส้นใยในลอนแสดงดังรูปที่ 4.49 (ข)-(ง) พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมมีรูปแบบที่มีแนวโน้มคล้ายกับดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แต่จะเห็นได้ว่า ลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมมีความเข้ม (Intensity) มากขึ้น โดยที่ พีกที่มุม 2θ เท่ากับ 22.7° ซึ่งมาจากเส้นใยในลอนชัดขึ้นเมื่อพิจารณาปริมาณของเส้นใยในลอนที่มากขึ้นพบว่า Intensity ของพีกมุม 2θ เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยในลอนเพิ่มจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยจาก 2 mm เป็น 10 mm ในปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน พบว่า ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.49 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

(ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่มีการปรับปรุง

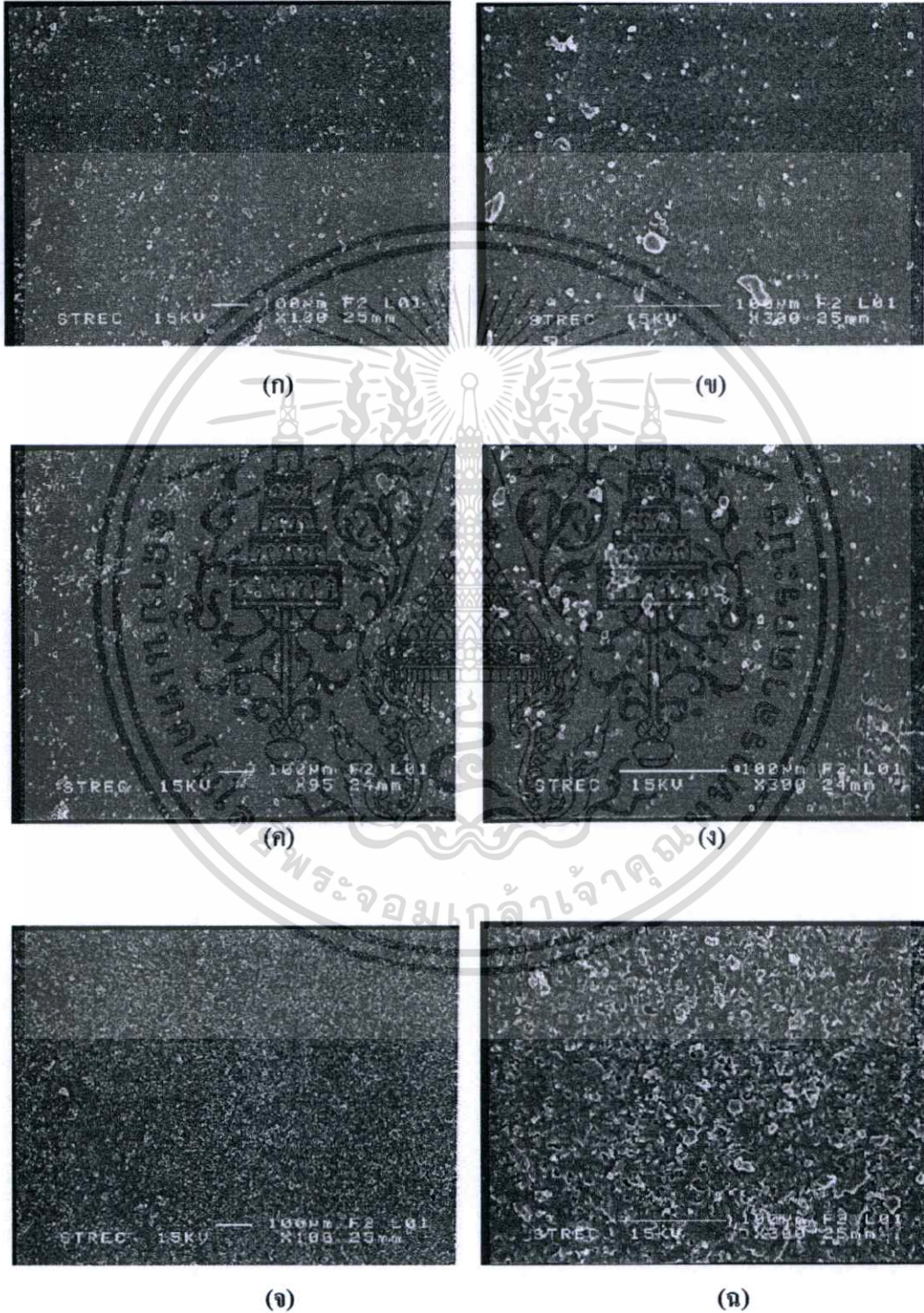
(ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยในลอน 5% ความยาว 10 mm

(ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยในลอน 10% ความยาว 2 mm

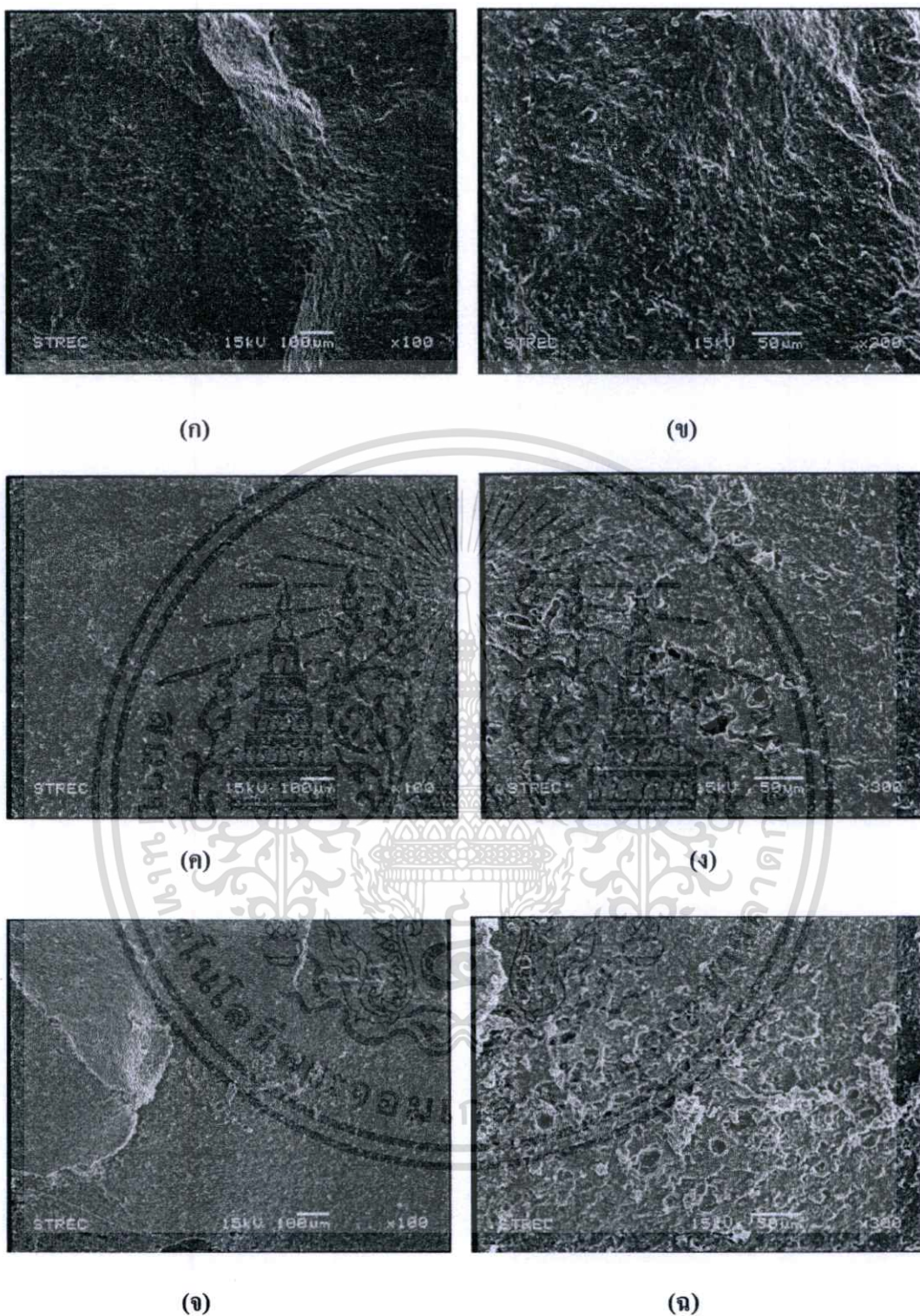
(ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยในลอน 10% ความยาว 10 mm

4.5.5 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เติมเส้นใยไนลอนที่ปริมาณ 5% และ 10% ของน้ำหนักแป้งที่ความยาวเส้นใย 2 mm และ 10 mm ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.50 และ 4.51



รูปที่ 4.50 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไนลอนที่กำลังขยาย 100 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยไนลอน 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยไนลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยไนลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (ฉ-ฉ) ผสมเส้นใยไนลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm



รูปที่ 4.51 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยไพลอนที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยไพลอน 5% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm (ค-ง) ผสมเส้นใยไพลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 mm (จ-ฉ) ผสมเส้นใยไพลอน 10% โดยน้ำหนักความยาว 10 mm

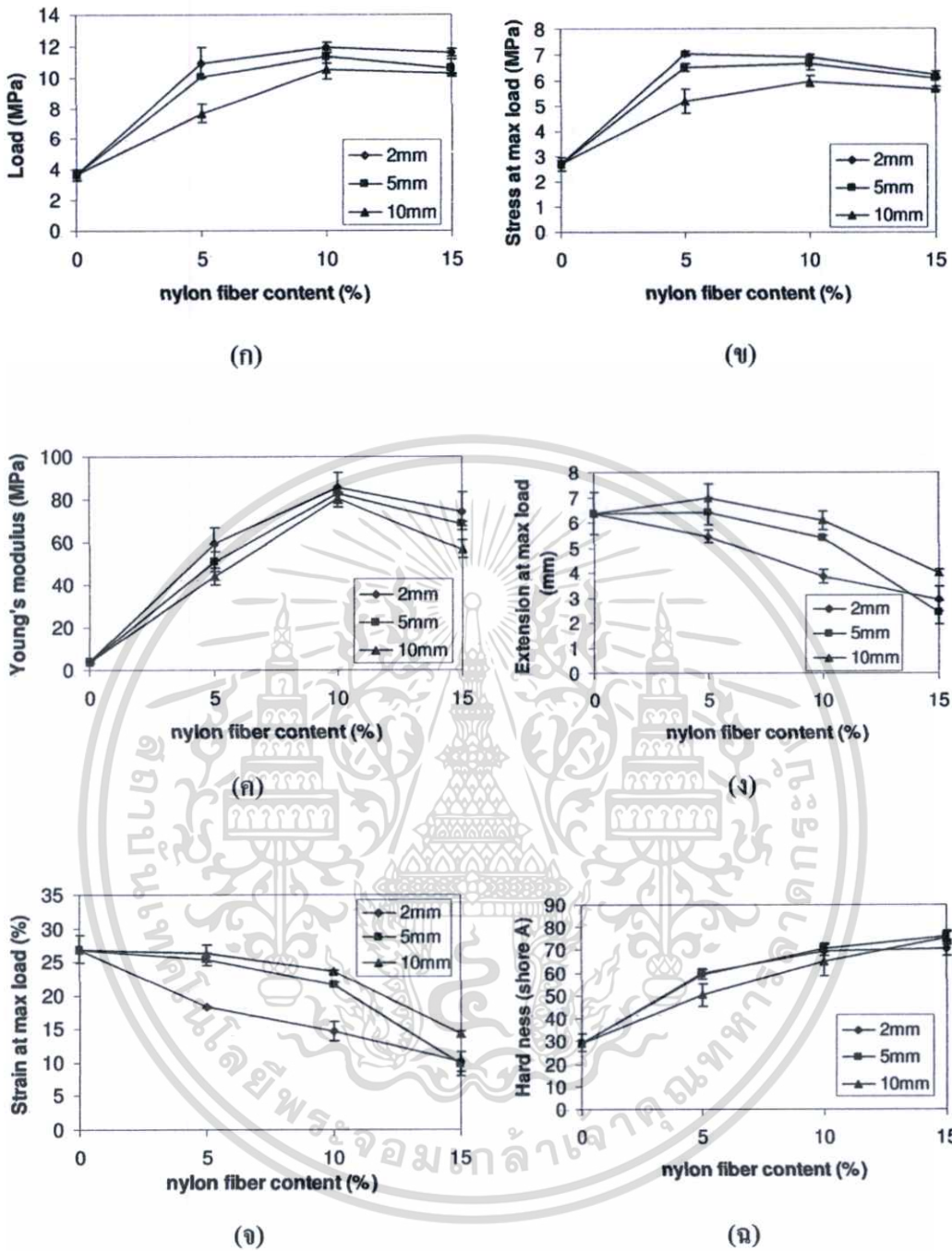
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยในลอนดังรูปที่ 4.50-4.51 พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความเรียบ เห็นเส้นใยกระจายตัวเป็นก้อนเล็ก ๆ บนเมทริกซ์แข็ง เมื่อพิจารณาที่ภาคตัดขวางพบว่าแนวโน้มของภาพจาก SEM เป็นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยจาก 5% เป็น 10% พบว่าเส้นใยมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แข็งมากขึ้น

เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยจาก 2 mm เป็น 10 mm (รูปที่ 4.50 (จ)-(ฉ)) พบว่าเส้นใย 2 mm กระจายในเมทริกซ์แข็งได้สม่ำเสมอและนอกจากนี้จากลักษณะภาคตัดขวางเส้นใย 10 mm (รูปที่ 4.51 (จ)-(ฉ)) พบหลุมเส้นใยที่เกิดการหลุดออกไปได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใย 2 mm เนื่องจากเส้นใยที่ยาวกว่า ทำให้การเข้าไปอยู่ในเมทริกซ์แข็งได้ทั้งหมดค่อนข้างยาก จึงทำให้มีบางส่วนเกิดการหลุดออก ซึ่งแสดงถึงการยึดติดกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์แข็งที่น้อยกว่าการผสมเส้นใยสั้นกว่า

4.5.6 สมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยในลอนในปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักที่ขนาดความยาว 2 mm 5 mm และ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) 111/1, 279/1 และ 559/1 ตามลำดับเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุง โดยให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.52 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยไนลอน (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) การดึงยืด (จ) เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ฉ) ความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

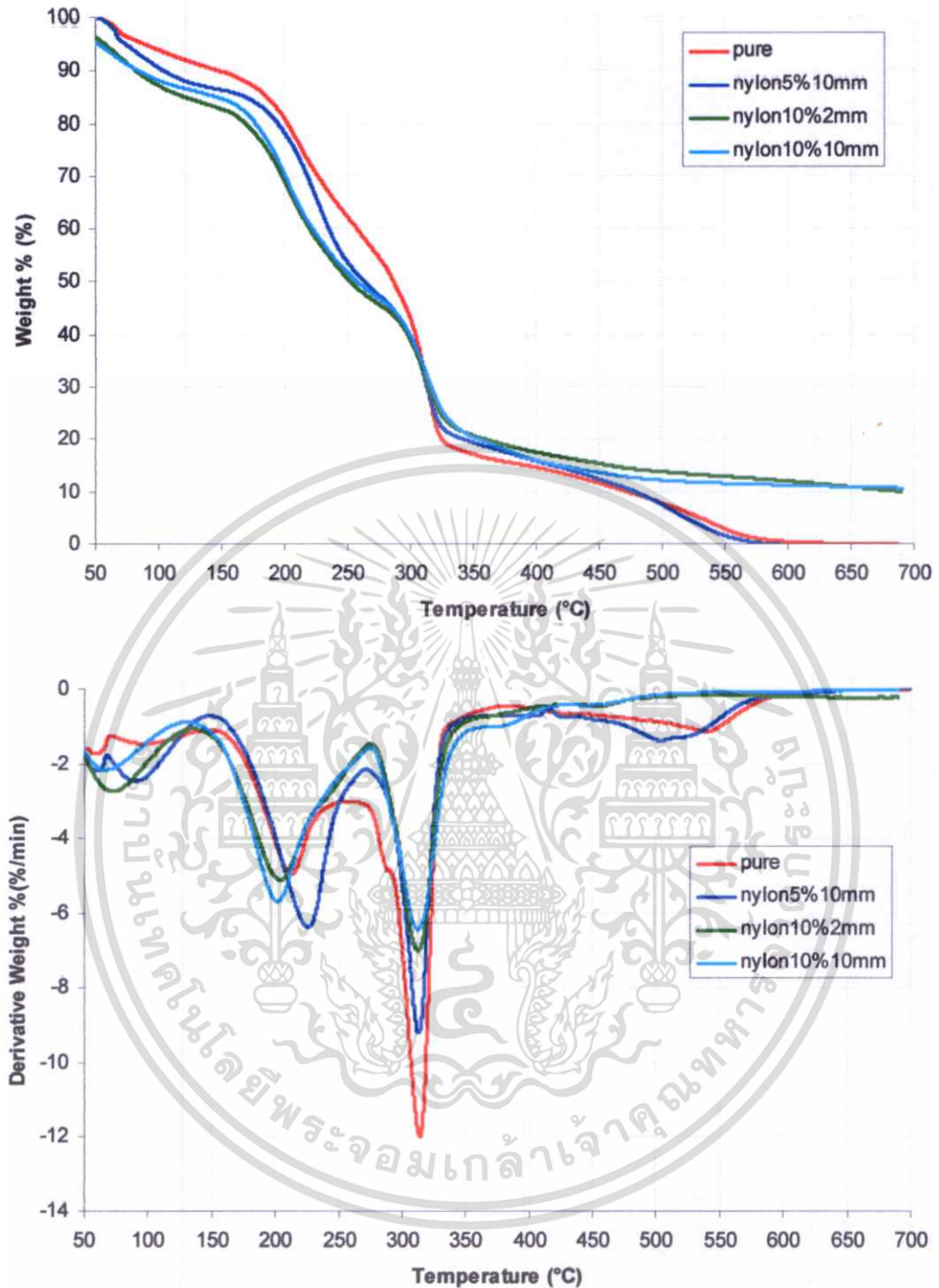
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าที่ปรับปรุงโดยการใส่เส้นใยไพลอนแสดงดังรูปที่ 4.52 จากผลการทดลองพบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.52 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.52 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.52 (ค)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยไพลอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยไพลอนที่จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอไมด์ซึ่งหมู่เอไมด์ $-(CO-NH)-$ ในสายโซ่โมเลกุลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์แป้งได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง FTIR ที่พีกสเปกตรัม OH-stretching ของแป้งมีการเลื่อน (Shift) และนอกจากนี้เส้นใยซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงกระทำ หากมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยไพลอนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และพบว่าปริมาณเส้นใย 10% โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยจาก 2 mm เป็น 10 mm พบว่า แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้เพราะเมื่อเส้นใยมีความยาวมากขึ้น พื้นที่ผิวลดลงดังนั้นจึงรับแรงที่มากกระทำได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4.51 (จ)-(ฉ)) ที่สังเกตเห็นหลุมเส้นใยไพลอนที่หลุดออกไปมากขึ้น

การยืดออกของตัวอย่าง (รูปที่ 4.52 (ง)) และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.52 (จ)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยไพลอนลงไปมากขึ้น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยไพลอนมีความแข็งแรงมากกว่า ดังนั้นการยืดตัวจึงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่เติมเส้นใยไพลอน

ค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.52 (ฉ)) พบว่าเมื่อเติมเส้นใยไพลอนลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ทำให้ความแข็งกดมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยไพลอนเข้าไปปกคลุมเนื้อที่ของเมทริกซ์แป้งจึงทำให้บริเวณพื้นผิวแข็งขึ้น ดังนั้นค่าความแข็งกดที่เป็นการวัดเฉพาะพื้นผิวภายนอกจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น

4.5.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไพลอนแสดงดังรูปที่ 4.53 และ ตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.53 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยไนลอน (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุง (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไนลอน 5% ความยาว 10 mm (3) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไนลอน 10% ความยาว 2 mm (4) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไนลอน 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่¹ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยไพลอน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว(°C)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยไพลอน)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Fiber 5% 10 mm	193.1	299.5	489.8	34.4
Thermoplastic starch + Fiber 10% 2 mm	183.5	298.3	440.5	29.1
Thermoplastic starch + Fiber 10% 10 mm	183.6	295.5	445.9	32.2

จากรูปที่ 4.53 และตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ โดยการเติมเส้นใยไพลอนพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมี 3 ช่วงด้วยกัน โดยช่วงที่ 1 เป็นการสลายตัวของกลีเซอรอล [37-38] ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้ง [44] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไพลอนซึ่งพบว่าอุณหภูมิประมาณ 450 °C [79] ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ไม่เติมเส้นใยไพลอน แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยไพลอนมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนัก และความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจาก 2 mm เป็น 10 mm พบว่าแนวโน้มอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งกล่าวได้ว่า ผลของปริมาณและความยาวไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ ที่เติมเส้นใยไพลอน

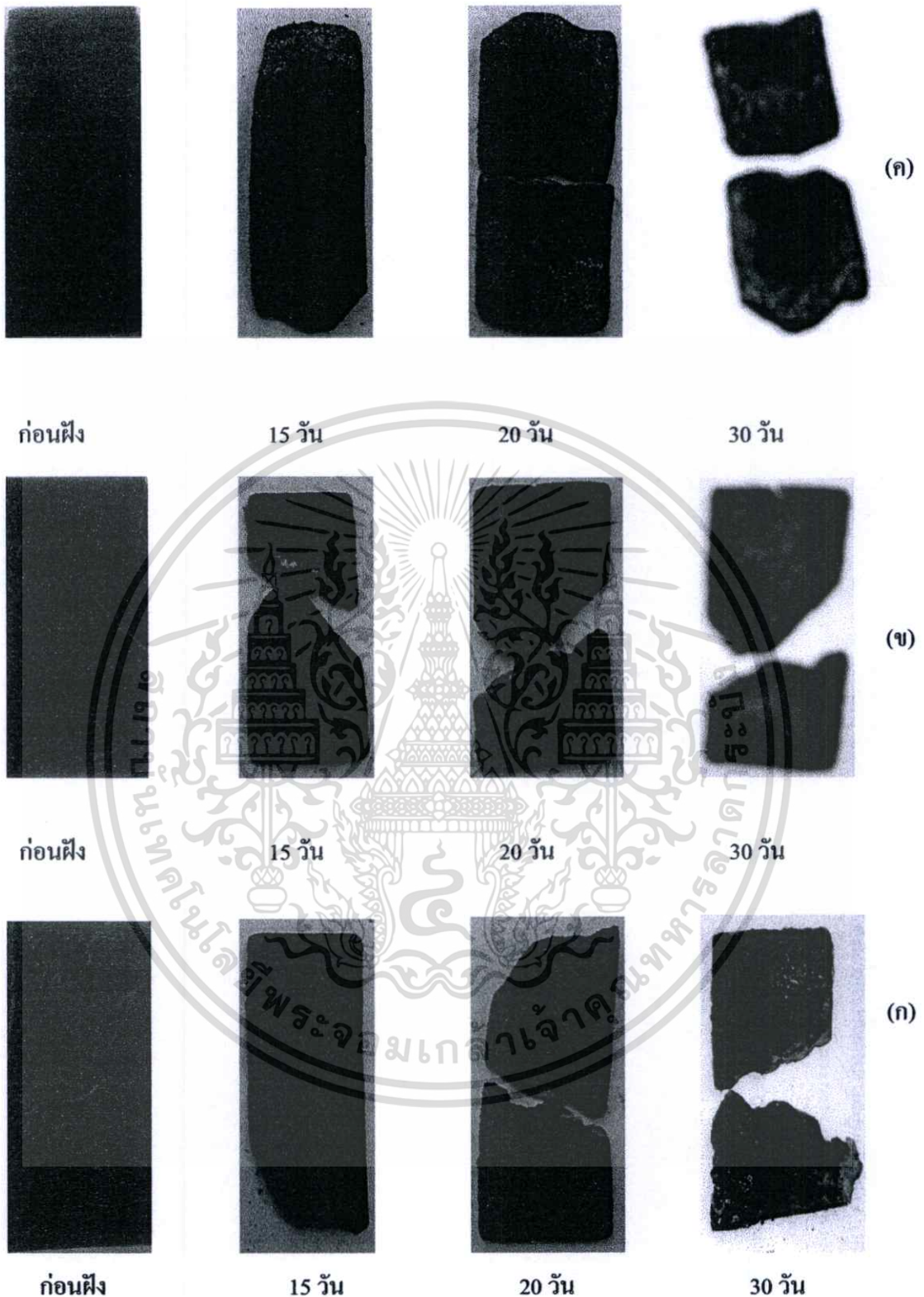
4.5.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ สูตรต่างๆ มาทดสอบ ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.54 และ รูปที่ 4.55

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินจากผลการทดลอง พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่เติมเส้นใยไนลอนมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นจาก 5 % เป็น 10 % โดยน้ำหนัก ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยที่ 3 วันแรกจะมีการดูดซับความชื้นไว้บางส่วนและเมื่อเวลาผ่านไปเริ่มเกิดการย่อยสลายโดยสังเกตจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าเมื่อเริ่มเกิดการย่อยสลายน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่เติมเส้นใยไนลอนกลับมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างช้า ๆ เห็นได้จาก ปริมาณเส้นใยที่ 10% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปคงอยู่ที่ประมาณ 30% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยไนลอนทำให้เมทริกซ์แข็งเกิดการย่อยสลายได้ช้าลง



รูปที่ 4.54 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ไม่มีการปรับปรุงและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยไนลอน



รูปที่ 4.55 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเรททดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

(ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเรทที่ไม่มีการปรับปรุง

(ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเรทผสมเส้นใยไพลอน 5% ความยาว 10 mm

(ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเรทผสมเส้นใยไพลอน 10% ความยาว 2 mm

(ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเรทผสมเส้นใยไพลอน 10% ความยาว 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดไปโดยไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทั้งนี้ยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและรายละเอียดการดำเนินงานไปใช้

4.6 ผลของชนิดเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarch

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงภาพรวมของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ โดยทำการเลือกจากสมบัติต่าง ๆ ที่ศึกษาไปแล้วในหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์และเส้นใยในลอนที่ปริมาณเส้นใย 10% ความยาว 2 mm มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด จึงเลือกที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm มาทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยทั้งหมด

4.6.1 การวัดสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์และเส้นใยในลอน

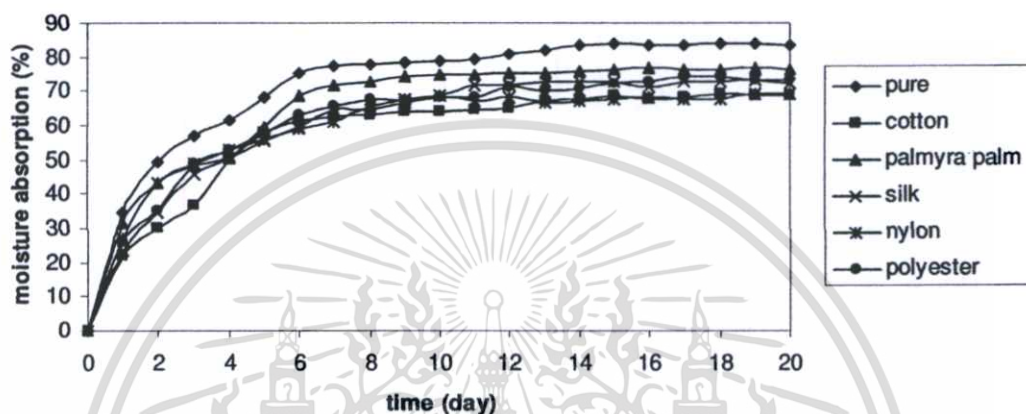
ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L*	a*	b*	C*	h°
Pure Thermoplastic starch	29.85	5.25	13.65	14.71	68.2
Thermoplastic starch + Cotton fiber	55.02	5.51	22.14	22.79	76.0
Thermoplastic starch + Palmyra palm fiber	36.35	5.48	14.77	15.75	69.7
Thermoplastic starch + Silk fiber	33.79	5.04	9.87	11.08	63.0
Thermoplastic starch + Polyester fiber	39.42	7.34	18.53	19.93	68.4
Thermoplastic starch + Nylon fiber	47.01	5.74	17.11	18.05	71.4

จากตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกสตาarchและเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ พบว่า จากค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ มีแนวโน้มความสว่างมากขึ้น และขึ้นตัวอย่างแสดงเจดสีไปทางสีแดงและเหลือง ส่งผลให้ตำแหน่งของสี (h°) ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ มีตำแหน่งที่แตกต่างกันไป

ตามค่าของ a^* และ b^* ($h^\circ = \tan^{-1} [b^*/a^*]$) ซึ่งโดยภาพรวมแล้วเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ แสดงสีของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาลเช่นเดียวกันหมด

4.6.2 การดูดซับความชื้น

การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ภายใต้อุณหภูมิสัมพัทธ์ 100% แสดงดังรูปที่ 4.56

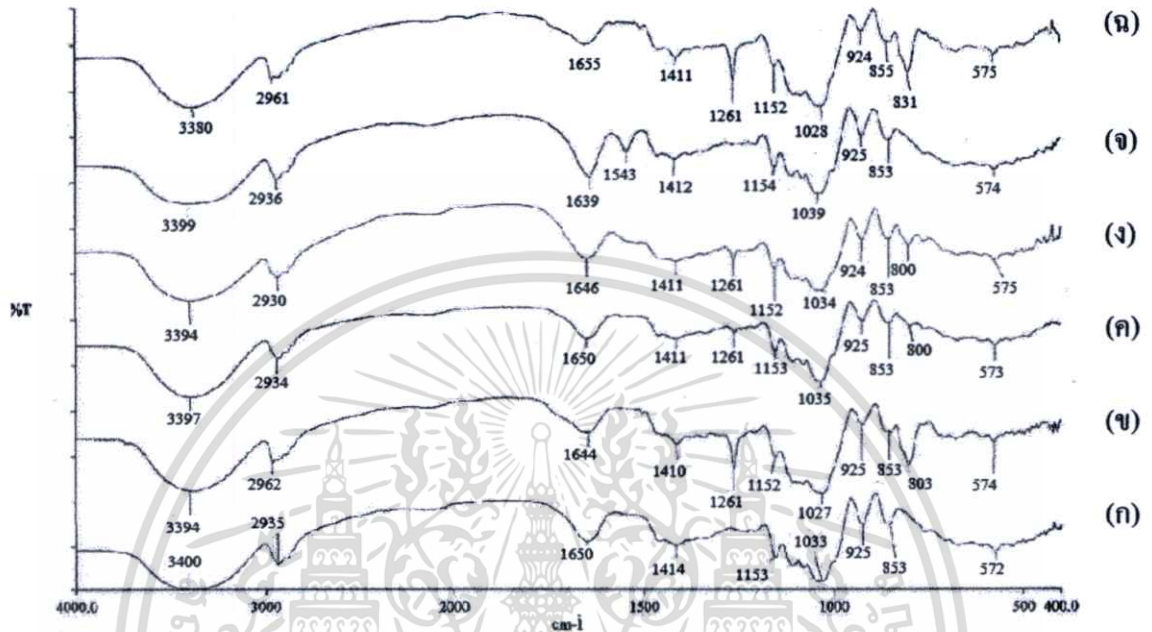


รูปที่ 4.56 เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยไนลอน และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm

จากผลการทดลองการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พบว่า เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลงในทุก ๆ เส้นใย และเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยแต่ละชนิด พบว่า เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยไนลอน และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ประมาณ 68% 76% 72% 65% 73% ตามลำดับ โดยภาพรวมเห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยไนลอนมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นน้อยที่สุด รองลงมาคือเส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยตาล ตามลำดับเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับความชื้นของเส้นใยแต่ละชนิดยกเว้นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นสูงเนื่องจากรอยแตกของชิ้นงาน

4.6.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.57

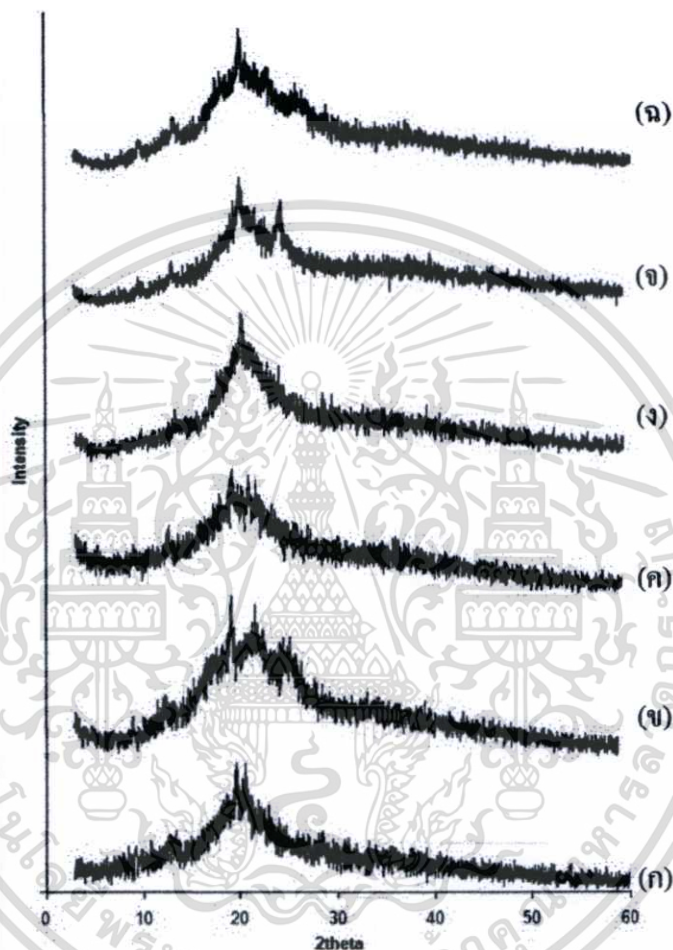


รูปที่ 4.57 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (ค) ผสมเส้นใยคาล (ง) ผสมเส้นใยไหม (จ) ผสมเส้นใยไพลอน และ (ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

จากรูปที่ 4.57 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ พบว่า พีคอินฟราเรดสเปกตรัมการสั่นของ OH-stretching และ OH-bending มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง ซึ่งแสดงถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์แป้งกับเส้นใยต่าง ๆ นอกจากนี้อินฟราเรดสเปกตรัมยังแสดงตำแหน่งการสั่นต่าง ๆ ขององค์ประกอบที่มีอยู่ในเส้นใยแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างของเส้นใยแต่ละชนิด

4.6.4 XRD

รูปแบบผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.58



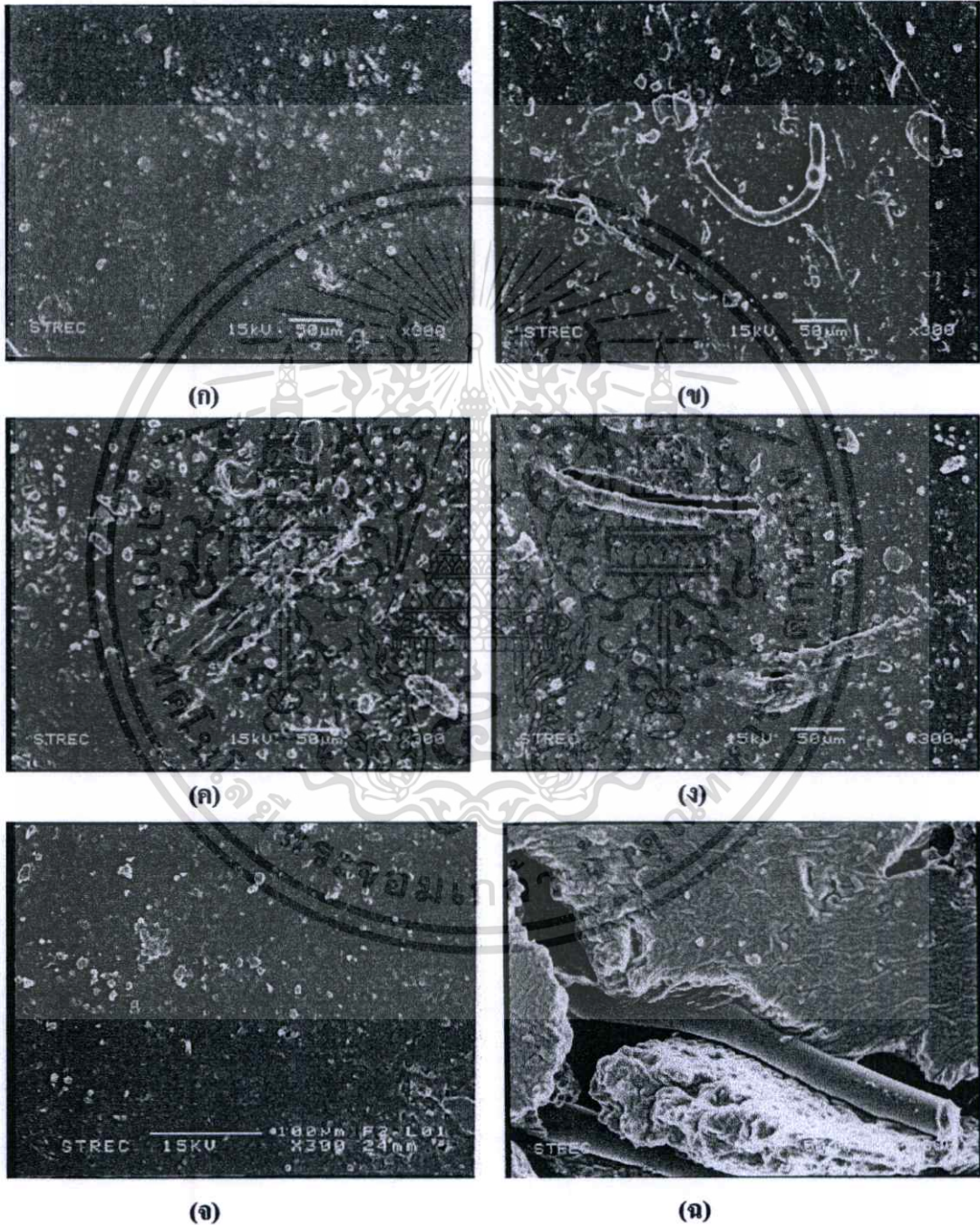
รูปที่ 4.58 ดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (ค) ผสมเส้นใยคาร์บอน (ง) ผสมเส้นใยไหม (จ) ผสมเส้นใยไพลอน และ (ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

จากรูปที่ 4.58 แสดงดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์ พบว่า ดิฟแฟร็กโตแกรมมีรูปแบบที่มีแนวโน้มคล้ายกับดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ์ โดยแสดงพีกที่มุม 2θ แตกต่างกันไป ซึ่งโดยรวมแล้วพีกที่มุม 2θ ที่มาจากส่วนของแป้งมีความเข้มมากขึ้นและนอกจากนี้ยังแสดงพีกที่มุม 2θ ที่มาจากองค์ประกอบของเส้นใย โดยรวมแล้วจาก X-ray diffraction patterns พบว่าการเติมเส้นใยต่าง ๆ ไม่มีผลทำให้โครงสร้างของแป้งมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

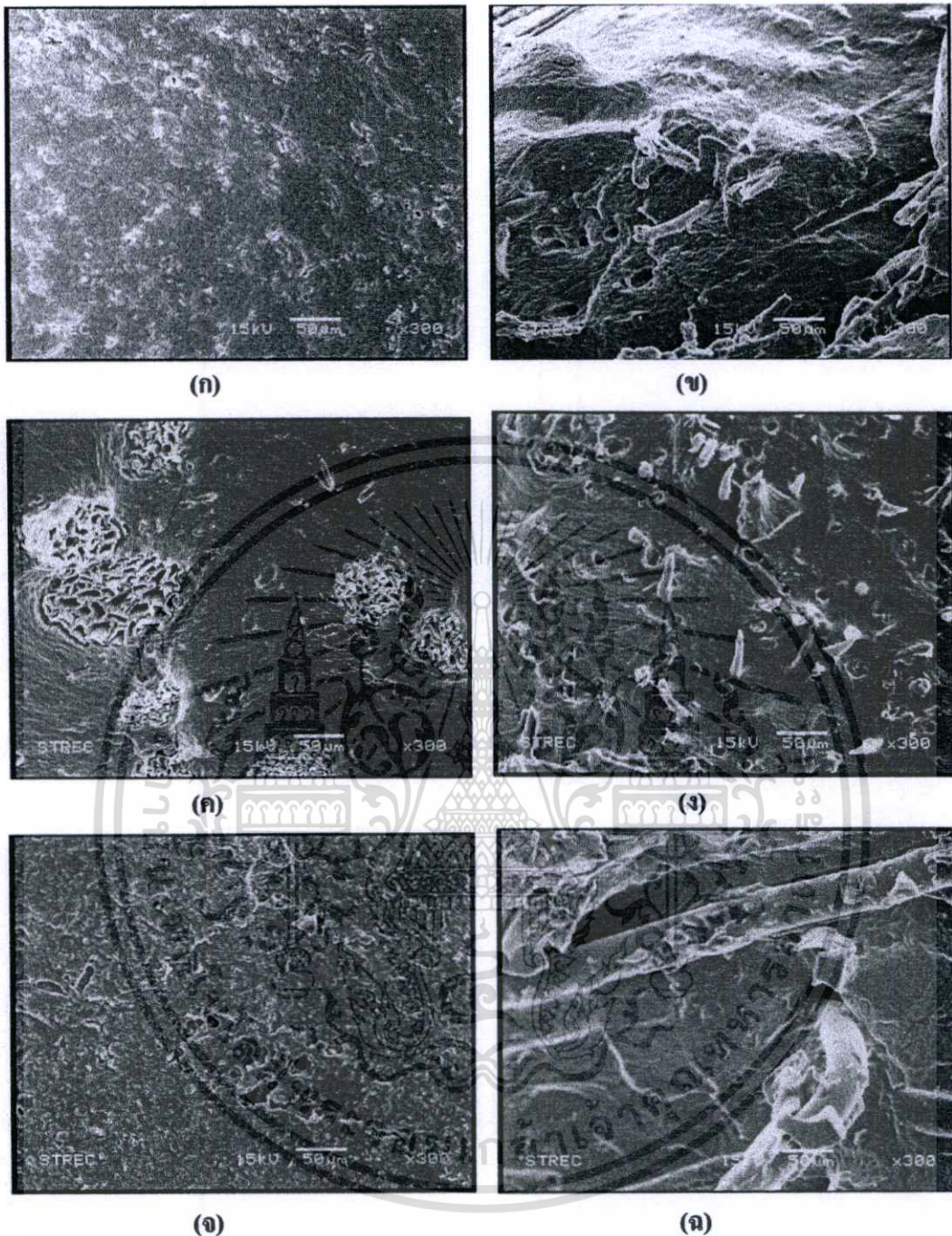
4.6.5 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 300 เท่า ให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.59 และ 4.60



รูปที่ 4.59 พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (ค) ผสมเส้นใยตาล (ง) ผสมเส้นใยไผ่ (จ) ผสมเส้นใยโนลอน และ (ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (ค) ผสมเส้นใยตาล (ง) ผสมเส้นใยไหม (จ) ผสมเส้นใยไนลอน และ (ฉ) ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์

จากรูปที่ 4.59 และ 4.60 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ พบว่า จากภาพพื้นผิว สังเกตเห็น ได้ว่ามีเส้นใยบางส่วนถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์เป็งในเส้นใยแต่ละชนิด ยกเว้นเส้นใยพอลิเอสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นอกจากเห็นเส้นใยถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แข็งได้บางส่วนแล้วแต่ยังพบรอยแยกเกิดขึ้นบนเมทริกซ์แข็งอย่างชัดเจน

สำหรับภาพภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ พบว่าเส้นใยสามารถกระจายตัวและถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์แข็ง แต่ยังคงมีบางส่วนของเส้นใยที่เกิดการหลุดออกจากเมทริกซ์แข็งบ้าง โดยพบว่า การผสมเส้นใยฝ้ายเกิดการหลุดออกของเส้นใยค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น ๆ โดยที่การผสมเส้นใยในลอนเกิดการหลุดออกของเส้นใยอย่างชัดเจน แทบจะไม่เห็นส่วนของเส้นใย และการผสมเส้นใยตาลพบการฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์แข็ง และลักษณะของเส้นใยที่เป็นท่อกลวง สำหรับการผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ยังคงพบรอยแยกของเมทริกซ์แข็งเช่นเดียวกับภาพพื้นผิว จากภาพรวมทั้งหมคกล่าวได้ว่า เส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มการกระจายตัวบนเมทริกซ์แข็งได้ดีที่สุด

4.6.6 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาของเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยในลอน แสดงดังรูปที่ 4.61

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์พบว่า แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส มีค่าสูงขึ้นและค่าการยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด มีค่าลดลง เมื่อเติมเส้นใยชนิดต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาระหว่างเส้นใยฝ้าย และ เส้นใยตาลซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสเหมือนกันพบว่า แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของเส้นใยฝ้ายมีค่าสูงกว่า เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีปริมาณของเซลลูโลส 99.2% ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยตาลที่มีปริมาณของเซลลูโลส 68.6% อีกทั้งมีองค์ประกอบของลิกนินที่ถึงแม้จะมีความแข็งแรงแต่จะแสดงสมบัติเชิงกลด้อยกว่าเซลลูโลส นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM เห็นได้ว่าเส้นตาลมีลักษณะเป็นท่อกลวง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นเส้นใยฝ้ายจึงมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างเด่นกว่าเมื่อนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่ามากกว่าในกรณีผสมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ด้วยเส้นใยตาล

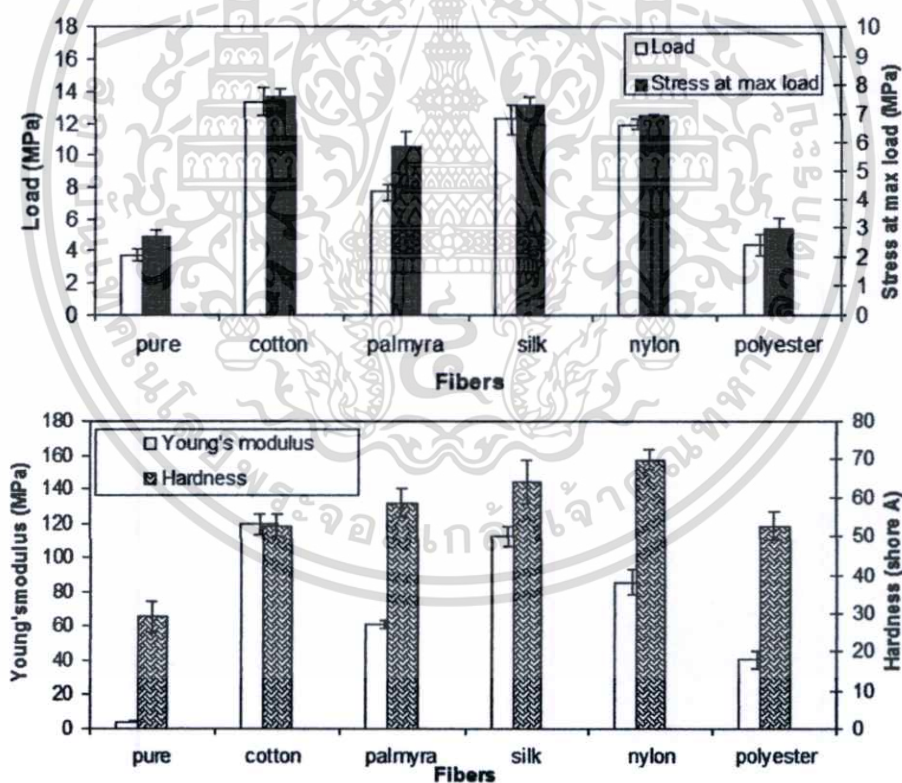
เมื่อพิจารณาค่าการยืดออก และเปอร์เซ็นต์ความเครียด พบว่า แนวโน้มของค่าการยืดออก และเปอร์เซ็นต์ความเครียดของเส้นใยฝ้ายมีค่าต่ำกว่าเส้นใยตาล เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่า จึงทำให้สามารถยืดตัวได้ค่อนข้างยาก เมื่อมีการให้แรงไปกระทำกับชิ้นงาน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมและเส้นใยในลอน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกันคือ มีหมู่เอไมด์ (Amine group) เช่นเดียวกันซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์แข็งได้ ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมและเส้นใยในลอนพบว่า แรงดึง

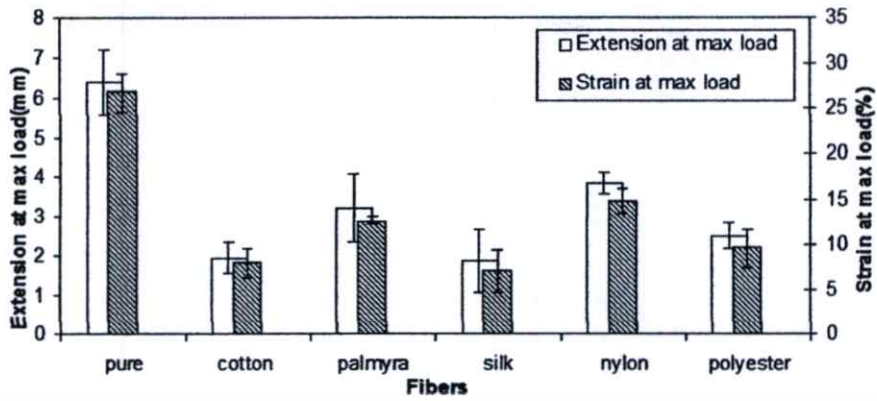
ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยไหมมีค่าสูงกว่าเส้นใยไนลอน ถึงแม้เส้นใยทั้งสองจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์แป้งได้เช่นเดียวกัน แต่จากภาพ SEM เห็นได้ว่าสามารถเห็นลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยไหมได้ชัดเจน เห็นลักษณะเส้นใยที่ถูกปกคลุมด้วยอนุภาคแป้ง ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุได้ชัดเจนกว่าเส้นใยไนลอน ซึ่งจากภาพ SEM ของเส้นใยไนลอน จะเห็นว่าผิวชิ้นงานขรุขระและมีลักษณะคล้ายช่องว่างเกิดขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการติดประสานของเมทริกซ์แป้งและเส้นใยได้น้อยกว่าเส้นใยไหม

สำหรับค่าการยืดออก และ เปอร์เซ็นต์ความเครียด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยไหมกับเส้นใยไนลอน พบว่าแนวโน้มเส้นใยไหมต่ำกว่า สำหรับค่าความแข็งแรงเห็นได้ว่าเส้นใยไนลอนมีค่ามากกว่า เนื่องจากวัดเฉพาะที่ผิวเท่านั้น

ส่วนสมบัติเชิงกลของการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์มีค่าต่ำกว่าเส้นใยอื่น ๆ เนื่องจากเส้นใยมีการกระจายตัวได้ต่ำ และลักษณะของเมทริกซ์แป้งมีรอยแตกอย่างชัดเจน สังเกตได้จากภาพ SEM ทำให้อาจเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน



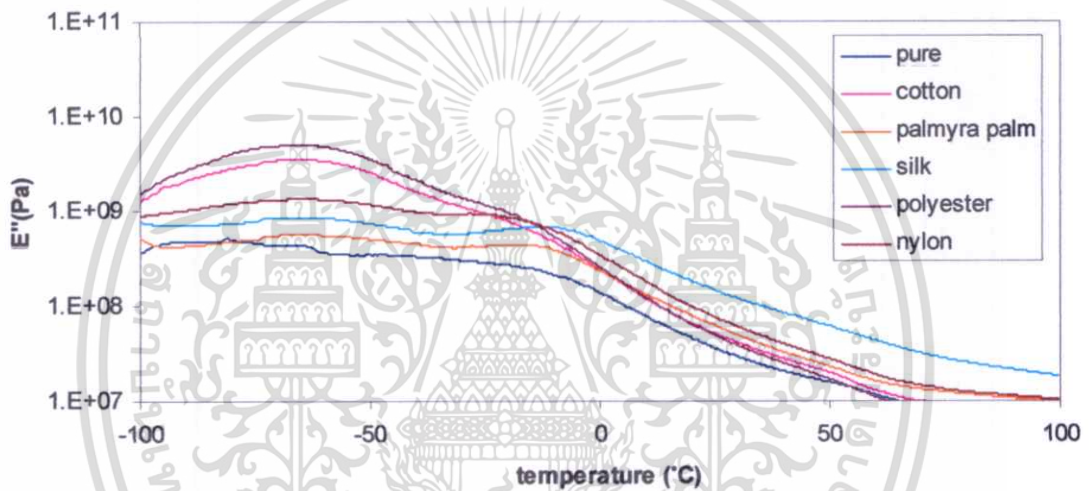
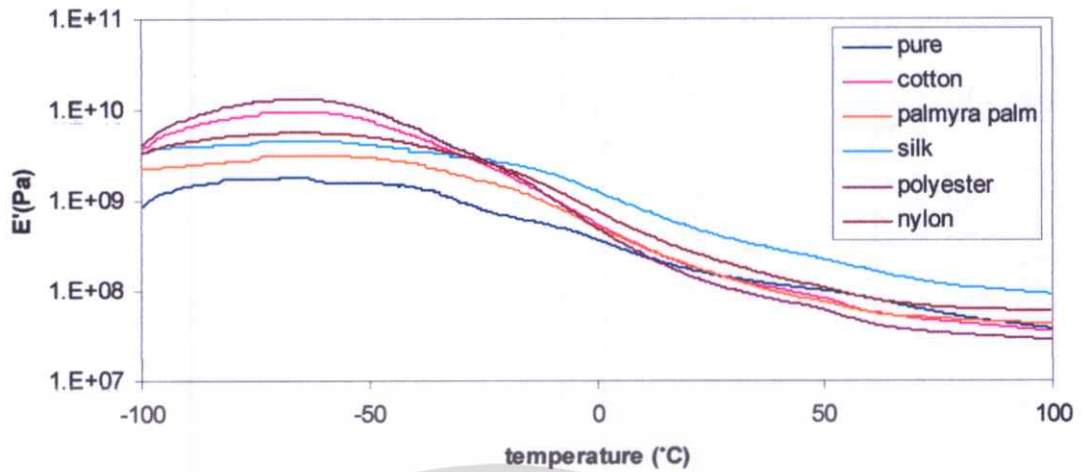
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



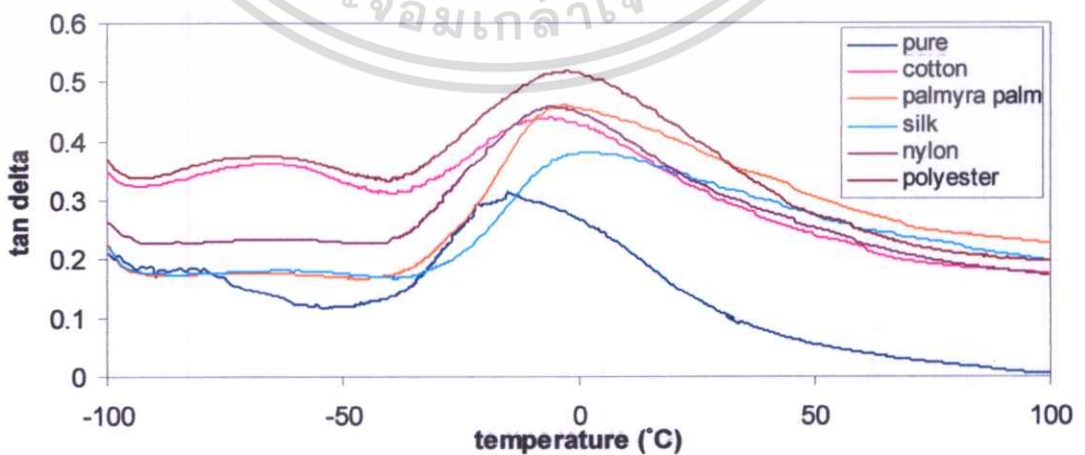
รูปที่ 4.61 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ทำกรผสมด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm

4.6.7 สมบัติพลวัตเชิงกล

รูปที่ 4.62-4.63 แสดงผลการทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเทคนิค DMTA เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) โมดูลัสสะสม (Storage modulus, E') และโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'')



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม (E') และมอดุลัสสูญเสีย (E'') กับอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 มม



รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tan δ กับอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้น

ใยชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 10% ความยาว 2 มม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากค่า E' (Storage modulus) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่เก็บสะสมไว้เมื่อมีการให้แรงและสั่นเป็นจังหวะพร้อมทั้งให้ความร้อน โดยจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรง (Strength) ของชิ้นงาน ส่วนค่า E'' (Loss modulus) เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานที่สูญเสียไปเมื่อมีการให้แรงและสั่นเป็นจังหวะพร้อมทั้งให้ความร้อน โดยจะเป็นค่าที่บอกถึงความยืดหยุ่น (Flexible) ของชิ้นงาน โดยค่า $\tan \delta$ เป็นค่าที่ใช้บอก T_g ซึ่งค่า $\tan \delta$ หาได้จากอัตราส่วนระหว่าง E'' กับ E' [80] ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า จากรูปที่ 4.63 เห็นได้ว่าการเติมเส้นใยทำให้ค่ามอดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น ในทุก ๆ เส้นใย แสดงว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้งกับเส้นใย [40] และค่ามอดูลัสสูญเสียที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะของวัฏภาคระหว่างเมทริกซ์แป้งและเส้นใยยึดติดกันได้ดี จึงไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล [81]

ตารางที่ 4.12 ผลของชนิดเส้นใยต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์	T_g (°C)
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์	-14.99
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยฝ้าย	-5.97
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยคาล	-2.84
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยไหม	3.89
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์	-2.51
เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ผสมเส้นใยไนลอน	-5.67

จากรูปที่ 4.63 และตารางที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ ซึ่งบอกถึงค่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ โดยพบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์พบที่ -14.99 °C ซึ่งคล้ายคลึงกับผลรายงานการวิจัยของ Martin et al. [53] และเมื่อเติมเส้นใยต่าง ๆ พบว่าทำให้ค่า T_g มีการเลื่อนไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าการเติมเส้นใยลงไปทำให้โมเลกุลแป้งเคลื่อนไหวได้ลดลงเนื่องมาจากผลของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยกับแป้ง [82]

เมื่อพิจารณาค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ พบว่า เส้นใยไหมให้ค่า T_g มีค่าสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของเส้นใยไหมซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของแป้งที่ตำแหน่งหมู่อะมิโน (Amino group) และ/ หรือที่หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) จึงมีผลทำให้อันตรกิริยาระหว่างแป้งกับเส้นใยไหมค่อนข้าง

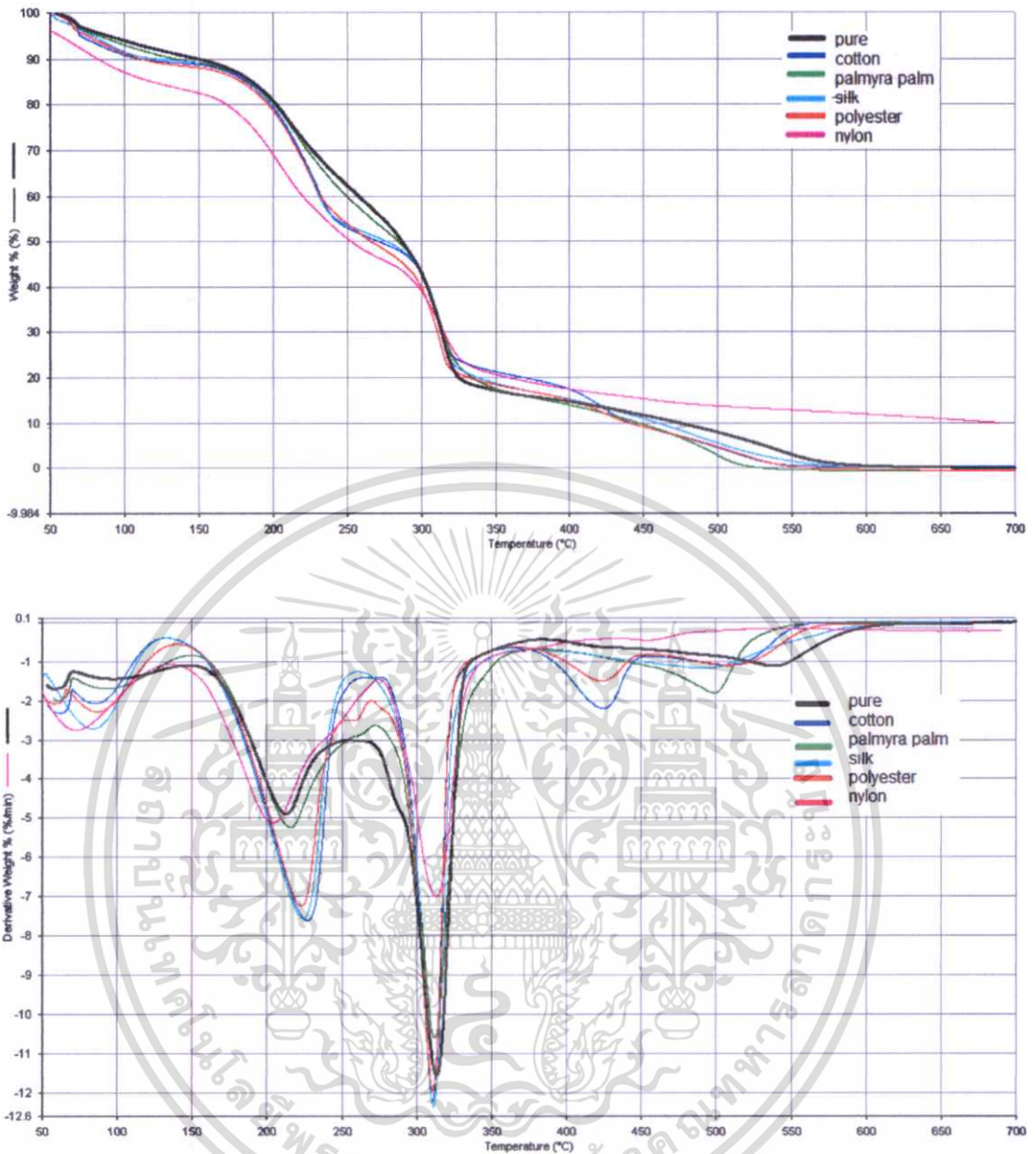
แข็งแรงทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นการที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวจึงต้องใช้แรงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าสูง

4.6.8 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาarch และเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm แสดงดังรูปที่ 4.64 และตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาarch และเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)			% น้ำหนักที่หายไป
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใย)	
Pure Thermoplastic starch	185.3	294.3	-	43.1
Thermoplastic starch + Cotton fiber	193.6	301.0	403.7	29.7
Thermoplastic starch + Palmyra palm fiber	187.5	299.7	458.0	37.3
Thermoplastic starch + Silk fiber	191.4	301.9	438.6	35.3
Thermoplastic starch + Polyester fiber	191.1	300.1	406.4	31.3
Thermoplastic starch + Nylon fiber	183.5	298.3	440.5	29.1



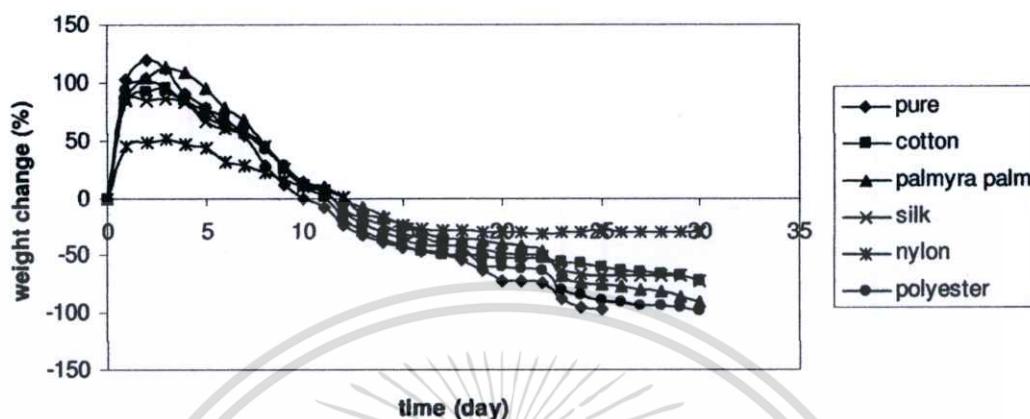
รูปที่ 4.64 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm

จากผลการทดลองพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยทั้ง 5 ชนิด อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง หรือกล่าวได้ว่าการเติมเส้นใย ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น โดยที่เส้นใยไนลอน มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปน้อยที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยฝ้าย เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยไหม และเส้นใยตาล ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.9 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 10% ความยาว 2 mm

จากรูปที่ 4.65 เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ มีอัตราการย่อยสลายได้ช้าลง โดยพบว่า การผสมเส้นใย ไนลอน ทำให้เมทริกซ์แป้งมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายน้อยที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยตาล และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ประมาณ 30% 60% 65% 75% และ 90% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติต่าง ๆ ที่ทดสอบมาแล้วประกอบในหัวข้อข้างต้น กล่าวโดยรวมได้ว่า เส้นใยชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของสี การย่อยสลาย การดูดซับความชื้นใกล้เคียงกัน ยกเว้น เส้นใยไนลอนที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำที่สุด เนื่องจากสมบัติของตัวเส้นใยเอง จึงทำให้อัตราการย่อยสลายของเส้นใยไนลอนต่ำตามไปด้วย

สำหรับสาขาวิชา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงพลวัตของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ก่อนข้างแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่า โดยภาพรวมแล้ว เส้นใยฝ้ายช่วยปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้ดีที่สุด โดยพิจารณาจากกรณีวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สาขาวิชา และสมบัติเชิงกล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้า ต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 โดยมีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลโดยใช้เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1.จากการศึกษาการวัดสี พบว่า การผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอนทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีค่าความสว่างและสคโสมมากขึ้น สีชิ้นงานออกแดงและเหลืองมากขึ้น ซึ่งโดยภาพรวมแล้วสีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ มีสีน้ำตาล

2.จากการศึกษาการดูดซับความชื้นในอากาศ พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เทอร์โมพลาสติกสตาบิลทุกสูตรมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น โดยที่เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่มีการปรับปรุงมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นสูงสุดและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอนมีความสามารถในการดูดซับความชื้นน้อยลง โดยที่การผสมเส้นใยไพลอนทำให้แนวโน้มการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยตาล

3.จากการศึกษาความเป็นผลึก พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลทุกสูตรมีความเป็นผลึกลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นผลึกของแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน แสดงถึงความไม่เป็นผลึกที่มาจากเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิล และยังพบว่าการเติมเส้นใยต่าง ๆ ไม่มีผลทำให้โครงสร้างของแป้งเปลี่ยนไป

4.จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงโดยการผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm เส้นใยมีการกระจายดีที่สุด

5.ผลของปริมาณ เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอนในปริมาณ 5 10 และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณ 10% โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลที่สูงที่สุดและต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 15% โดยน้ำหนัก

6.ผลของความยาว เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอนที่ 2 mm 5mm และ 10 mm พบว่า ความยาวที่ 2 mm ให้สมบัติเชิงกลที่สูงที่สุด

7. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน โดยเทคนิค TGA พบว่า มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยพิจารณาจากอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

8. จากการศึกษาการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงมีแนวโน้มการย่อยสลายสูงที่สุดและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน มีการย่อยสลายน้อยลงโดยที่เส้นใยไพลอนมีแนวโน้มการย่อยสลายต่ำที่สุด เพราะมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด รองลงมาคือ เส้นใยฝ้าย เส้นใยไหม เส้นใยตาล และเส้นใยพอลิเอสเทอร์

9. เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่ผสมเส้นใยฝ้ายปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 mm มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจาก จากสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และ สมบัติทางความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซออร์ต่างๆ เช่น โกลคอด ซอร์บิทอล เป็นต้น และปริมาณที่แตกต่างกันออกไป
2. เนื่องจากชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีสีน้ำตาล อาจมีการศึกษาต่อไปถึงวิธีการปรับปรุงสีที่ได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น การเติมสีต่าง ๆ เพื่อประโยชน์ในการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้หลากหลายต่อไป
3. เนื่องจากเส้นใยยังมีการหลุดออกจากเมทริกซ์แป้ง อาจมีการศึกษาต่อไปถึงความเป็นไปได้ในการนำแป้งไปดัดแปรโมเลกุลก่อนเช่น การใช้แป้งครอสลิง (Crosslinked starch) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการติดประสานที่มากขึ้น
4. ศึกษาชนิดและอัตราส่วนของแป้งต่าง ๆ เช่น แป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับแป้งดัดแปรต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. 2006. ปริมาณขยะ. [Online]. Available : <http://www.pcd.go.th/>.; 19 พฤศจิกายน 2552.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. ข้าวเจ้า. Available : <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook50> ; 20 พฤศจิกายน 2552.
- [3] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย .พิมพ์ครั้งที่ 1.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , กรุงเทพฯ 10330
- [4] บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ ประภาวดี เกตุสุภา และวีรยา ธรรมมิกะ, “การเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2550.
- [5] National Metal and Materials Technology Center. 2007. เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน[Online].Available:http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html; 20 พฤศจิกายน 2552.
- [6] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง.พิมพ์ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] Nolan-ITU Pty Ltd. 2002. Environment Australia Biodegradable Plastics -Development and Environment Impact [Online]. Available : <http://www.deh.gov.au/settlements/publications/waste/degradables/biodegradable/index.html>.; 12 September 2009.
- [8] JRC/IPTS, Spain. 2005.Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe [Online]. Available : www.biomatnet.org/publications/1944rep.pdf .; 12 September 2009.
- [9] ธนาวดี ลีจากภย์. 2549.พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอฟเฟล็กซ์ สตุคิโอ.
- [10] อธิพิณ แจ่มชัด. 2544. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : เอกสารประกอบคำสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. 2543. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: 65-96
- [12] P.K. Mallich. 1993. Fiber-reinforced Composites : Material, Manufacturing and Desing. 2nd ed. Marcel Dekker. New York

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] F.L. Methews and R.D. Rawlings. 1994. Composite Material : Engineering and Science. CHAPMAN & HALL. London
- [14] Biotopics. Calvin cycle. 2007. [Online]. Available : www.biotopics.co.uk/a2/calmin3.gif; 6 October 2009.
- [15] Science-projects. Amylase. [Online]. Available : www.science-projects.com/starch.GIF. 2001.; 6 October 2009.
- [16] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. 2550. เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพฯ. กราฟแมนเพรส.
- [17] อภิชาติ สนธิสมบัติ. 2545. กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ. พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพฯ. ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [18] S. J. Kadolph and A.L. Langford. Textiles. 8th ed. Prentice-Hall. London
- [19] E.P.G.Gohl, and L.D. Vilensky, 1993. Textile Science 2nd ed. Longman Cheshire. Melbourne.
- [20] S.Eero. 1993. Wood Chemistry : Fundamental and Application. 2nd ed. Academic Press. San diego.
- [21] P.K. Mallich. 1993. Fiber-reinforced Composites : Material, Manufacturing and Desing. 2nd ed. Marcel Dekker. New York.
- [22] มณฑา จันทร์เกตุเล็ก. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. 2541. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร. สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด หอรัตนชัยการพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- [23] B.P. Corbman. 1987. Textiles Fiber to Fabric. 6th ed. Mc Graw-Hill .Singapore
- [24] Available : <http://textileinformation.blogspot.com/>; 6 October 2009.
- [25] R. Yamamoto.2008. "Bioprocessing of the Cotton Fiber", IPEJ-BIO.
- [26] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2540. ผลตาล โตนด . [Online].Available: <http://kanchapisek.or.th/kp6 /home.htm>; 6 October 2009.
- [27] มุลนิธิวิกิมีเดีย. 2552. ตาล [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/> ; 6 October 2009.
- [28] Purves. Life: The Science of Biology, 4th ed, Sinauer Associates. [Online]. Available : <http://www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/BioBookCHEM2.html>; 6 October 2009.
- [29] กรรณิกา นววรรณ จุฑามาศ ชื่อนานาต์ วัลภาภรณ์ บริสุทธิ์ และอรสา แดบเกิด, "การเพิ่มมูลค่าเส้นใยตาลเป็นสิ่งทอธรรมชาติ เพื่อผลิตภัณฑ์ผ้าทอมือจากเส้นใย", วิทยาลัยอาชีวศึกษาสุโขทัย, 2552.
- [30] Available:http://www.alibaba.com/product-tp/106395184/Long_Palm_Fiber.html

- [31] Aloe Vera Pills.amino acid. .2007. [Online]. Available : <http://www.aloeveraibs.com/aloe-vera-vitamins>; 27 September 2009.
- [32] Kraig Biocraft Laboratories. Lifecycle of silkworms.2008. [Online]. Available:<http://www.wallstreetreportonline.com/KBLB/technicalbg.htm>. ; 27 September 2009.
- [33] พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติผ้าไหมทอไทย. 2008.[Online].Available:<http://www.Thaitextilemuseum.com>; 27 September 2009.
- [34] J.W. Bell.1955. Practical Textile Chemistry. 2nd ed The National Trade Press. London
- [35] R.W. Moncrieff. 1975. Man-made Fibres. 4th ed. Nownes-Butterworths. London
- [36] พิมพ์ชนก แสงนิตติเดชและเพ็ญฤทัย บุญประสิทธิ์, 2551. “ผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสติกส์จากแป้งข้าวเจ้า”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M. Agnelli. 2001. “Thermoplastic starch cellulosic fibers composites preliminary results”, Carbohydrate Polymers, 45 : 183-188.
- [38] X. Ma, J. Yua and J. F. Kennedy. 2005. “Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites”, Carbohydrate Polymers ,62: 19–24.
- [39] J.H. Yang, J.G. Yu and X.F. Ma. 2006. “Preparation of a Novel Thermoplastic Starch (TPS) Material using Ethylenebisformamide as the Plasticizer”, Starch, 58: 330–337.
- [40] Y. Lu , L. Weng and X. Cao. 2006. “Morphological, thermal and mechanical properties of ramie crystallites—reinforced plasticized starch biocomposites”, Carbohydrate Polymers , 63: 198–204.
- [41] V. D. Alves, S. Mali, A. Beleia, M. Victoria and E. Grossmann. 2007. “Effect of glycerol and amylase enrichment on cassava starch film properties” Journal of food engineering, 78: 941-946.
- [42] X. Cao, Y. Chen, P. R. Chang, M. Stumborg and M. A. Huneaul. 2008. “ Green Composites Reinforced with Hemp Nanocrystals in Plasticized Starch”, Journal of Applied Polymer Science, 109: 3804–3810.
- [43] Y.Z. Wan, H. Luo, F. He, H. Liang, Y. Huang and X.L. Li . 2009. “Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre reinforced starch biocomposites”, Composites Science and Technology , 69: 1212–1217.
- [44] L.Dobircan, P.A. Sreekumar, R. Satah, N. Leblanc, C. Terrie, R. Gattin and J.M. Saiter. 2009.“Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre : Agro-green composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40: 329-334.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] A.L. Da ROZ, A.J.F. Carvalho, A. Gandind and A.A.S. Curvelo. 2006. "The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing", *Carbohydrate Polymers*, 63: 417-424.
- [46] ASTM D 638. 1996. "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic(Metric)". Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [47] ASTM E 104. 2002. "Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions". Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [48] L. Fama, L. Gerschenson and S. Goyanes. 2009. "Starch-vegetable fibre composites to protect food products", *Carbohydrate Polymers*, 75: 230-235.
- [49] R.Chandra and R.Rustgi. 1998. "Biodegradable polymers", *Progress in Polymer Science*, 23 :1273-1335.
- [50] U.Funke,W.Bergthaller and M.G. Lindhauer.1998. " Processing and characterization of biodegradable products based on starch" , *Polymer degradation and stability* 59: 293-296.
- [51] M.Gaspar, Z. Benko, G. Dogossy, K. Reczey and T. Czigany.2005. "Reducing water absorption in compostable starch-based plastics", *Polymer degradation and stability* 90: 563-569.
- [52] W.E Morton and J.W.S. Hearle .1997. *Physical properties of textile fibres*. Manchester: The Textile Institute.
- [53] M.G. Martins, P. Sandra, L. Oliveira, S.R. Carmen and J.D. Armando. 2009. "New biocomposites based on thermoplastic starch and bacterial cellulose", *Composites science and Technology* 69: 2163-2168.
- [54] J.M. Fang, P.A. Fowler, J. Tomkinson and C.A.S. Hill. 2002. "The preparation and characterization of a series of chemically modified potato starches", *Carbohydrate Polymers*, 47: 245-252.
- [55] X. Ma, P.R. Cheng, J.Yo and M. Stumborg. 2009. "Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites", *Carbohydrate Polymers*, 75: 1-8.
- [56] D. Najgebauer, T. Grega, M. Sady and P. Tomasik. 2004. "Polymeric Complexes of Cornstarch and Waxy Cornstarch Phosphates with Milk Casein and Their Performance as Biodegradable Materials", *Molecules*, 9: 550-567.
- [57] J. Yang, J. Yu and X. Ma. 2006. "Study on the properties of ethylenebisformamide and sorbitol plasticized corn starch (ESPTPS)", *Carbohydrate Polymers* 66 : 110–116.
- [58] T.Bourtoom and M.S. Chinnan. 2008. "Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film", *Food Science and Technology*, 41: 1633-1641.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] X.Cao, Y.Chen, P.R. Chang, A.D. Muir and G. Falk. 2008. "Starch-based nanocomposites reinforced with flax cellulose nanocrystals", *Express Polymer Letters*, 7: 502-510.
- [60] A. Pawlak and M. Mucha. 2003. "Thermogravimetric and FTIR studies of chitosan blends", *Thermochimica Acta*, 396: 153-166
- [61] K. Aoi, A. Takasu, M. Tsuchiya and M. Okada. 1998. "Miscibility of chitin-graft-poly (2-ethyl-2-oxazoline) with poly (vinyl alcohol)", *Macromolecular chemistry physical*, 199: 2805-2811.
- [62] T. Baldinger, J. Moosbauer and H. Sixta.2000. "Supermolecular structure of cellulosic materials by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) calibrated by WAXS and ¹³C NMR". *Lenzing Berichte* :15-17.
- [63] Y. Wu, Z.Chen, X.Li and M. Li.2009. "Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch", *Food Research International* 42: 221-225.
- [64] US. Elesini, AP. Cuden and AF. Richards. 2002. "Study of green cotton fiber". *Acta Chim Slov*,49: 815-833.
- [65] E.M. Teixeira, A.L. Da Roz, A.J.F. Carvalho and A.A.S. Curvelo.2007. "The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch". *Carbohydrate Polymers*, 69: 619-624.
- [66] N. Abidi, E.Hequet and D. Ethridge.2007. "Thermogravimetric Analysis of Cotton Fibers: Relationships with Maturity and Fineness". *Journal of Applied Polymer Science*,103: 3476–3482.
- [67] S. Perez and W. Mackie. 2001. *Structure and morphology of cellulose*, CERMAV-CNRS, Chapter IV.
- [68] Li. Shiqun, Li. Biao, Ji. Cheng and Hu. Jiashan.2008. "Composite cement of magnesium-bearing phosphoaluminate-hydroxyapatite reinforced by treated raw silk fiber", *Composites* 30: 347–352.
- [69] He. Jianxin , Yan Wang, Cui . Shizhong, Gao. Yaying and Wang. Shanyuan . 2010. "Structure and properties of silk fibroin/carboxymethyl chitosan blend films", *Polymer Bulletin* 65: 395–409.
- [70] H.Y. Cheung, K.T. Lau, Xi.M. Tao and D. Hui. 2008. "A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite", *Composites*, 39: 1026–1033.
- [71] S.S. Umare , A.S. Chandure and R.A. Pandey.2007. "Synthesis, characterization and biodegradable studies of 1,3-propanediol based polyesters", *Polymer Degradation and Stability* 92 : 464-479.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [72] S. Bal and R.C. Behera.2006. “Structural Investigation of Chemical Treated Polyester Fibers Using SAXS and Other Techniques”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 5: 179-198.
- [73] E. Armelin, A. Almontassir, L. Franco and J. Puiggali.2002. “Crystalline Structure of poly (decamethylene sebacate).Repercussions on lamellar folding surface”.*Macromolecules*. Available : www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/.../14CAPITULO4_6_2.pdf; 14 December 2010.
- [74] M. Parvinzadeh , R. Assefipour and A. Kiumarsi.2009. “Biohydrolysis of nylon 6,6 fiber with different proteolytic enzymes”, *Polymer Degradation and Stability* 94 : 1197–1205.
- [75] J. Maillo , P. Pages , E. Vallejo , T. Lacorte and J. Gacen.2005. “FTIR spectroscopy study of the interaction between fibre of polyamide 6 and iodine”, *European Polymer Journal* 41 : 753-759.
- [76] G.X Chen, H.S Kim.2006. “Multi-walled carbon nanotubes reinforced nylon 6 composites”, *Polymer* 47 : 4760-4767.
- [77] M.V. Jose, B.W. Steinert, V. Thomas, D.R. Dean, M.A. Abdalla, G. Price and G. M. Janowski .2007. “Morphology and mechanical properties of Nylon 6/MWNT nanofibers”. *Polymer*, 48 : 1096-1104.
- [78] Z. Zhao, W. Yu, Y. Liu, J. Zhang and Z. Shao.2004. “Isothermal crystallization behaviors of nylon-6 and nylon-6/ montmorillonite nanocomposite”.*Materials Letters*, 58: 802-806.
- [79] I. Goitisoló, J. I. Eguiazabal and J. Nazabal.2008. “ Effects of reprocessing on the structure and properties of polyamide 6 Nanocomposites”. *Polymer Degradation and Stability*, 93: 1747–1752.
- [80] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. 2545. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [81] M. Tajvidi, R. H. Falk and J. C. Hermanson.2006. “Effect of Natural Fibers on Thermal and Mechanical Properties of Natural Fiber Polypropylene Composites Studied by Dynamic Mechanical Analysis”. *Journal of Applied Polymer Science*, 101: 4341– 4349.
- [82] A. Alemdar and M. Sain.2008. “Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties”. *Composites Science and Technology*, 68 :557–565.

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกดีคาร์ชและเทอร์โมพลาสติกดีคาร์ชที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)																				
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TPS	0.00	0.32	0.96	0.96	1.29	1.54	2.25	2.57	2.89	3.52	4.15	4.18	4.20	4.58	4.68	4.87	5.14	5.15	5.18	5.24	5.14
cotton5%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.99	0.99	1.48	1.48	1.97	2.30	2.50	2.87	3.00	3.45	4.44	4.46	4.43	4.46
cotton10%2mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.50	0.98	0.98	0.98	1.45	1.48	1.50	1.70	1.88	2.40	2.50	3.43	3.92	3.42	3.62	3.92
cotton10%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	1.25	1.15	1.16	1.71	1.65	1.83	1.96	2.60	3.00	3.44	3.81	3.84	3.81	3.78
palmyra5%10mm	0.00	0.00	0.21	0.21	0.00	0.50	0.87	1.30	1.74	2.61	2.17	2.94	2.94	3.04	3.41	3.12	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91
palmyra10%2mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.20	0.46	0.94	1.42	1.89	1.42	2.36	2.36	2.58	2.66	3.36	3.30	3.64	3.62	3.72	3.62
palmyra10%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.48	0.96	1.30	1.74	1.74	2.40	2.43	2.50	2.61	3.00	3.48	3.85	3.85	3.85	3.85
silk5%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.50	0.97	1.46	2.24	2.24	2.48	2.55	2.78	2.88	3.08	3.40	3.37	3.39	3.37	3.36
silk10%2mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.70	1.17	1.73	1.87	2.02	2.26	2.32	2.61	2.86	3.23	3.22	3.21	3.22	3.22
silk10%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.59	1.21	1.61	1.91	2.03	2.36	2.42	2.41	2.62	2.75	2.88	2.86	2.96	2.96
polyester5%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.55	1.97	2.06	2.27	2.58	2.73	2.89	3.00	3.19	3.18	3.39	3.39	3.39
polyester10%2mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	1.69	2.18	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.90	2.73	2.45	2.60	2.60
polyester10%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	1.80	2.35	2.52	2.65	2.67	2.67	2.67	2.70	2.65	2.65	2.79	2.79
nylon5%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.58	1.98	2.30	2.82	2.83	2.85	2.93	2.89	2.93	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16
nylon10%2mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	1.09	1.56	1.67	1.71	1.81	2.03	1.99	2.57	2.69	2.85	2.85	2.85	2.85
nylon10%10mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	1.10	1.66	1.95	1.97	1.97	1.94	2.05	2.59	2.83	2.93	2.93	2.93	2.93

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)																					
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
TPS	0.00	16.78	20.99	23.81	26.19	26.63	27.41	28.49	28.27	28.62	28.84	29.19	29.75	29.45	29.95	30.28	30.30	30.14	30.09	30.48	30.48	30.48
cotton5%10mm	0.00	14.71	19.35	21.44	22.73	25.11	25.76	25.79	25.83	25.88	26.99	27.77	28.10	28.10	28.47	28.82	28.22	28.30	28.54	28.54	28.54	28.52
cotton10%2mm	0.00	14.66	18.32	20.86	21.99	23.11	24.24	24.80	25.09	25.08	25.08	25.08	25.36	24.80	25.65	25.93	25.94	25.94	26.78	26.49	26.49	26.50
cotton10%10mm	0.00	14.29	18.90	20.40	21.35	23.06	24.29	24.29	24.53	25.03	25.51	25.79	25.78	25.79	25.71	25.44	25.44	25.94	26.20	25.96	25.96	26.00
palmyra5%10mm	0.00	15.59	19.72	22.31	23.79	24.75	26.50	27.38	27.49	27.52	28.25	28.37	28.28	28.14	28.23	28.22	28.21	28.22	28.65	28.60	28.60	28.60
palmyra10%2mm	0.00	14.40	18.40	21.87	22.67	23.73	25.87	26.40	26.67	26.93	27.20	27.20	27.20	27.20	27.73	27.73	27.73	27.47	27.74	27.47	27.47	27.47
palmyra10%10mm	0.00	14.21	18.25	21.64	22.63	23.62	25.53	26.45	26.45	26.38	26.45	27.02	27.23	27.38	27.80	27.73	27.80	27.38	27.73	27.03	27.03	27.03
silk5%10mm	0.00	16.26	20.43	23.08	23.67	24.47	25.95	25.92	25.97	26.89	27.22	26.83	26.62	27.19	27.16	27.16	28.34	28.96	28.70	28.08	28.74	28.74
silk10%2mm	0.00	16.02	20.39	21.85	23.26	23.59	25.43	25.40	25.64	25.15	25.88	25.65	25.58	26.82	26.37	27.44	26.98	26.51	27.44	26.51	26.51	26.59
silk10%10mm	0.00	15.25	18.96	21.19	23.08	23.96	24.25	24.29	24.25	24.80	24.81	25.65	25.09	25.36	25.36	25.08	25.42	25.37	25.99	25.58	25.58	25.36
polyester5%10mm	0.00	16.53	19.86	21.01	21.90	22.95	24.11	25.34	26.15	26.34	26.36	26.57	26.78	27.18	26.89	26.89	27.36	27.36	27.83	27.43	27.43	27.83
polyester10%2mm	0.00	17.48	19.77	20.78	21.49	23.21	23.78	24.14	24.07	24.64	25.29	25.50	25.80	25.44	25.86	25.29	25.86	25.29	25.86	25.76	25.76	25.86
polyester10%10mm	0.00	15.42	17.94	20.12	21.31	22.71	23.37	23.67	23.90	23.94	24.43	24.47	25.47	25.47	25.53	25.47	25.53	25.53	25.60	25.60	25.60	25.65
nylon5%10mm	0.00	16.15	20.38	22.07	24.72	26.21	26.21	26.21	26.91	26.92	26.95	26.56	26.92	27.69	27.21	27.25	27.33	27.29	27.21	27.21	27.21	27.69
nylon10%2mm	0.00	14.17	18.11	19.90	21.26	22.66	23.44	23.44	23.62	24.41	24.31	24.32	24.71	25.49	25.49	25.10	25.49	25.28	25.67	25.20	25.20	25.34
nylon10%10mm	0.00	14.69	18.18	19.98	21.68	23.08	23.78	23.87	23.78	24.48	24.95	24.48	24.78	24.78	25.48	25.48	25.78	25.48	25.99	25.99	25.99	25.78

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไฮดราเจลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)																				
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TPS	0.00	0.00	22.05	27.38	30.49	30.84	31.29	34.14	35.71	36.81	36.65	37.44	37.22	37.42	37.48	38.04	38.35	38.04	38.45	38.65	39.26
cotton5%10mm	0.00	0.00	14.68	25.65	26.18	27.58	29.84	31.94	32.03	32.22	32.97	33.46	32.48	32.48	32.97	33.51	35.08	36.80	37.02	38.03	37.51
cotton10%2mm	0.00	0.00	11.37	23.61	24.80	27.15	27.40	30.35	29.74	30.86	30.62	31.75	30.90	30.86	30.90	30.59	32.63	32.09	33.04	31.05	31.78
cotton10%10mm	0.00	0.00	15.70	22.95	24.15	25.39	27.22	28.76	30.05	30.56	30.33	31.30	31.34	31.34	31.30	31.34	32.32	32.50	32.46	33.24	32.18
palmyra5%10mm	0.00	0.00	19.35	25.24	27.70	28.91	31.13	32.59	34.31	35.04	35.04	35.53	35.53	35.54	35.78	35.78	36.26	36.27	36.51	37.00	37.25
palmyra10%2mm	0.00	0.00	19.15	23.52	24.57	25.43	28.40	29.09	30.53	31.36	31.53	31.58	31.70	31.88	32.05	32.05	33.33	33.68	35.69	35.65	35.91
palmyra10%10mm	0.00	0.00	15.28	19.69	23.61	26.28	28.31	30.49	30.96	31.46	31.46	31.69	31.95	32.45	32.68	33.55	34.72	34.74	35.03	35.05	35.05
silk5%10mm	0.00	0.00	16.30	22.73	24.84	28.66	29.55	29.71	32.38	32.35	33.54	33.81	33.84	33.56	32.63	33.81	34.09	33.50	33.53	34.40	33.66
silk10%2mm	0.00	0.00	15.79	21.25	23.63	25.68	25.28	25.71	26.71	30.51	31.94	31.08	31.38	32.64	31.64	32.64	31.72	31.42	33.33	32.72	31.72
silk10%10mm	0.00	0.00	16.17	20.83	22.92	25.69	25.03	26.47	26.99	30.47	30.73	31.71	31.98	31.23	31.22	31.50	31.58	31.42	31.77	32.29	32.29
polyester5%10mm	0.00	0.00	17.76	23.72	26.57	27.33	29.05	29.47	29.43	30.69	30.69	31.02	30.06	30.06	29.43	29.72	30.00	30.31	30.69	30.98	31.61
polyester10%2mm	0.00	0.00	14.01	20.52	23.15	24.87	26.98	26.98	27.01	27.07	27.05	28.79	28.55	28.79	29.11	28.68	28.30	28.91	28.40	28.57	29.08
polyester10%10mm	0.00	0.00	15.23	20.20	22.55	25.60	28.29	28.81	28.86	28.37	28.92	29.30	29.55	29.90	30.04	29.79	29.79	29.37	29.84	29.37	29.70
nylon5%10mm	0.00	0.00	18.80	26.40	27.20	28.90	30.53	31.27	32.85	32.85	33.23	34.39	33.61	33.21	33.61	34.40	35.92	35.18	35.96	35.60	35.18
nylon10%2mm	0.00	0.00	13.41	19.88	22.36	25.53	27.83	29.81	31.34	31.65	32.60	33.24	32.93	31.63	32.61	32.30	32.30	32.78	32.30	32.92	32.65
nylon10%10mm	0.00	0.00	17.65	24.09	26.28	28.21	29.69	28.94	30.77	31.50	31.13	32.23	31.87	31.87	32.23	32.12	33.58	33.58	33.39	33.12	33.28

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของเทอร์โมพลาสติกคาร์บอนและเทอร์โมพลาสติกคาร์บอนที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)																						
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
TPS	0.00	34.51	49.45	56.76	61.45	68.27	75.11	77.27	77.59	78.06	78.90	79.25	81.01	81.87	83.17	83.75	83.23	83.54	83.97	83.81	83.54	83.54	
cotton5%10mm	0.00	24.43	39.90	48.90	56.71	64.01	67.66	68.33	70.14	71.95	71.92	71.95	70.42	71.04	70.59	71.95	72.00	72.55	72.85	71.04	71.04	71.14	71.14
cotton10%2mm	0.00	21.96	30.18	36.79	50.00	57.76	61.68	62.50	62.96	64.11	64.20	64.58	65.21	67.22	67.87	68.70	67.60	68.22	69.16	68.69	68.69	68.69	68.69
cotton10%10mm	0.00	21.76	30.08	36.99	46.75	52.85	60.21	63.30	65.41	65.04	65.45	65.45	65.77	66.67	67.10	68.96	67.07	68.45	69.96	69.61	69.61	69.64	69.64
palmyra5%10mm	0.00	34.45	43.55	51.60	56.50	63.11	71.18	74.32	75.00	75.69	77.07	77.25	79.38	79.00	79.50	79.71	79.70	79.50	79.50	79.60	79.60	79.55	79.55
palmyra10%2mm	0.00	31.63	43.42	48.19	50.87	59.50	68.82	71.76	72.68	74.16	74.78	74.72	75.23	75.23	75.74	76.45	76.85	76.23	76.24	76.75	76.75	76.32	76.32
palmyra10%10mm	0.00	31.06	44.54	49.70	52.51	59.88	68.50	71.00	74.00	75.77	76.33	76.60	76.74	76.50	76.30	76.21	76.50	76.30	76.20	76.50	76.50	76.31	76.31
silk5%10mm	0.00	33.67	43.89	54.69	57.29	65.95	68.02	69.19	72.67	72.75	73.84	74.20	74.42	75.00	76.74	76.63	76.02	76.02	77.23	78.23	78.23	77.23	77.23
silk10%2mm	0.00	23.22	34.46	45.69	50.19	55.43	59.55	64.79	64.53	66.69	68.81	71.80	71.80	72.55	72.55	72.92	71.21	72.54	72.52	72.99	72.99	72.12	72.12
silk10%10mm	0.00	23.83	32.24	41.59	47.66	56.81	61.68	63.55	65.89	67.31	69.63	72.14	72.90	73.70	73.83	73.36	73.69	73.22	73.83	73.83	73.83	73.83	73.83
polyester5%10mm	0.00	31.75	44.88	51.97	57.46	61.47	65.07	67.07	67.47	67.87	67.47	66.67	67.47	69.48	72.75	73.77	76.73	78.53	78.13	78.35	78.35	78.35	78.35
polyester10%2mm	0.00	25.76	35.12	48.71	52.68	57.56	62.93	65.37	67.39	67.24	68.34	68.33	71.22	69.98	70.78	72.29	72.83	74.02	74.15	73.37	73.37	73.37	73.37
polyester10%10mm	0.00	23.01	36.86	48.88	53.54	58.39	63.67	65.77	67.12	67.02	67.47	67.88	68.33	68.63	73.19	74.07	74.51	75.40	74.07	73.63	73.63	73.63	73.63
nylon5%10mm	0.00	30.92	45.68	53.00	58.25	63.08	67.91	74.42	74.54	74.02	74.02	75.92	75.02	75.64	75.51	75.02	75.31	74.58	75.31	74.96	74.96	74.60	74.60
nylon10%2mm	0.00	27.12	43.46	48.62	53.02	56.03	59.20	61.00	65.61	67.40	68.72	67.15	67.92	66.84	66.99	67.42	68.15	67.42	67.57	68.99	68.99	68.99	68.99
nylon10%10mm	0.00	26.87	42.85	48.97	51.53	55.14	58.22	61.10	62.88	67.41	68.18	67.95	67.27	67.21	66.33	67.58	67.97	67.97	67.25	68.60	68.60	68.60	68.60

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล					
	แรงดึง (MPa)	ความ แข็งแรง ดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	การดึงยืด (mm)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด (%)	ความแข็ง กด (Shore A)
TPS	3.67±0.38	2.70±0.26	3.90±0.70	6.39±0.84	26.89±2.12	29.20±3.85
TPS+cotton5% 2mm	9.12±1.27	5.67±0.70	75.35±27.72	2.58±0.70	8.84±1.99	38.60±3.20
TPS+cotton10% 2mm	13.37±0.83	7.58±1.33	119.71±11.49	1.94±0.43	7.91±1.58	53.00±3.13
TPS+cotton15% 2mm	8.34±0.02	5.78±0.32	98.15±42.29	1.78±0.67	5.28±1.07	65.20±3.46
TPS+cotton5% 5mm	8.46±1.72	5.55±1.02	64.97±11.90	3.97±0.85	14.78±4.56	40.60±3.47
TPS+cotton10% 5mm	10.13±3.46	6.17±1.22	89.24±42.90	2.94±0.83	10.08±2.75	44.60±2.17
TPS+cotton15% 5mm	7.90±1.49	5.66±1.43	87.50±0.49	2.16±0.65	8.33±1.84	65.30±3.06
TPS+cotton5% 10mm	8.32±0.68	5.44±0.84	71.75±21.25	2.99±0.24	11.15±2.16	47.60±6.02
TPS+cotton10% 10mm	11.15±3.57	7.02±1.86	103.30±22.48	2.25±0.25	8.64±1.20	52.00±6.20
TPS+cotton15% 10mm	8.01±2.29	5.77±0.65	97.08±39.51	2.08±0.28	8.53±0.99	63.70±5.01
TPS+palmyra5% 2mm	4.99±0.28	3.62±1.51	37.25±1.86	3.86±0.29	15.45±1.17	48.80±2.20
TPS+ palmyra 10% 2mm	7.69±0.53	5.85±0.05	61.40±7.74	3.21±0.85	12.61±3.89	58.70±3.59
TPS+ palmyra 15% 2mm	7.07±3.06	5.39±1.02	55.97±1.18	2.99±0.72	10.83±2.21	60.50±3.60
TPS+ palmyra 5% 5mm	4.79±0.15	3.31±0.15	33.98±1.85	4.20±0.69	16.80±2.76	48.10±2.69
TPS+ palmyra 10% 5mm	6.90±0.63	5.54±0.52	58.53±1.36	3.69±0.99	14.77±3.91	64.60±4.77
TPS+ palmyra 15% 5mm	6.66±0.89	4.86±0.88	52.71±2.26	2.46±0.55	11.01±0.77	68.60±3.98
TPS+ palmyra 5% 10mm	4.67±0.46	3.42±0.19	36.22±3.75	4.03±0.10	16.10±0.42	52.20±3.01
TPS+ palmyra 10% 10mm	7.33±0.40	5.70±0.05	57.75±1.33	3.31±0.61	14.64±3.94	59.80±6.48
TPS+ palmyra 15% 10mm	7.12±0.01	5.50±1.03	53.02±6.51	2.93±0.99	10.65±1.93	65.50±4.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล					
	แรงดึง (MPa)	ความ แข็งแรง ดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	การดึงยืด (mm)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด (%)	ความแข็ง กด (Shore A)
TPS+silk5% 2mm	7.17±1.03	5.11±0.79	96.12±39.81	2.01±0.49	8.06±1.97	55.60±2.14
TPS+ silk 10% 2mm	12.26±1.35	7.30±1.14	112.96±28.13	1.85±0.81	6.98±3.33	64.10±5.57
TPS+ silk 15% 2mm	7.46±4.30	4.71±3.49	76.57±19.24	1.63±0.74	4.49±1.22	67.40±4.95
TPS+ silk 5% 5mm	6.02±0.69	4.70±2.13	97.10±8.35	2.75±1.21	11.01±4.85	57.00±3.06
TPS+ silk 10% 5mm	7.53±1.67	5.52±1.12	105.39±29.57	2.17±0.10	8.67±0.42	65.00±5.33
TPS+ silk 15% 5mm	5.58±2.80	3.68±2.30	68.35±15.50	1.83±0.81	6.13±1.54	61.30±5.19
TPS+ silk 5% 10mm	6.50±0.11	5.75±0.96	91.07±6.91	2.50±0.66	10.01±2.64	55.20±5.09
TPS+ silk 10% 10mm	7.89±2.21	6.10±2.72	99.88±11.62	2.09±0.99	8.38±2.36	72.50±8.56
TPS+ silk 15% 10mm	5.23±0.70	3.02±0.02	50.99±22.89	1.71±0.37	5.83±1.49	60.40±3.31
TPS+polyester5% 2mm	3.31±0.50	2.12±0.32	28.33±5.85	3.34±0.81	11.38±3.46	45.40±5.68
TPS+ polyester 10% 2mm	4.39±0.66	3.01±0.38	40.16±5.01	2.49±0.32	9.65±2.16	52.80±5.01
TPS+ polyester 15% 2mm	2.65±0.69	1.93±0.30	25.23±3.60	2.16±0.57	7.39±0.78	60.70±8.34
TPS+ polyester 5% 5mm	3.20±0.39	2.34±0.35	25.42±2.18	3.24±0.85	12.43±2.02	57.50±9.51
TPS+ polyester 10% 5mm	4.44±0.45	2.92±0.48	30.42±4.93	2.57±1.01	10.26±3.02	61.30±8.20
TPS+ polyester 15% 5mm	2.58±0.46	1.71±0.24	20.81±1.31	2.37±1.02	7.14±1.31	56.50±7.51
TPS+ polyester 5% 10mm	3.14±0.26	2.25±0.33	25.60±5.65	2.96±0.71	11.28±2.78	55.60±8.90
TPS+ polyester 10% 10mm	4.17±0.30	2.57±0.40	37.12±4.78	2.63±1.08	10.51±3.33	62.00±5.59
TPS+ polyester 15% 10mm	2.51±0.35	1.60±0.22	20.54±0.19	3.00±0.38	10.41±0.71	48.50±7.23

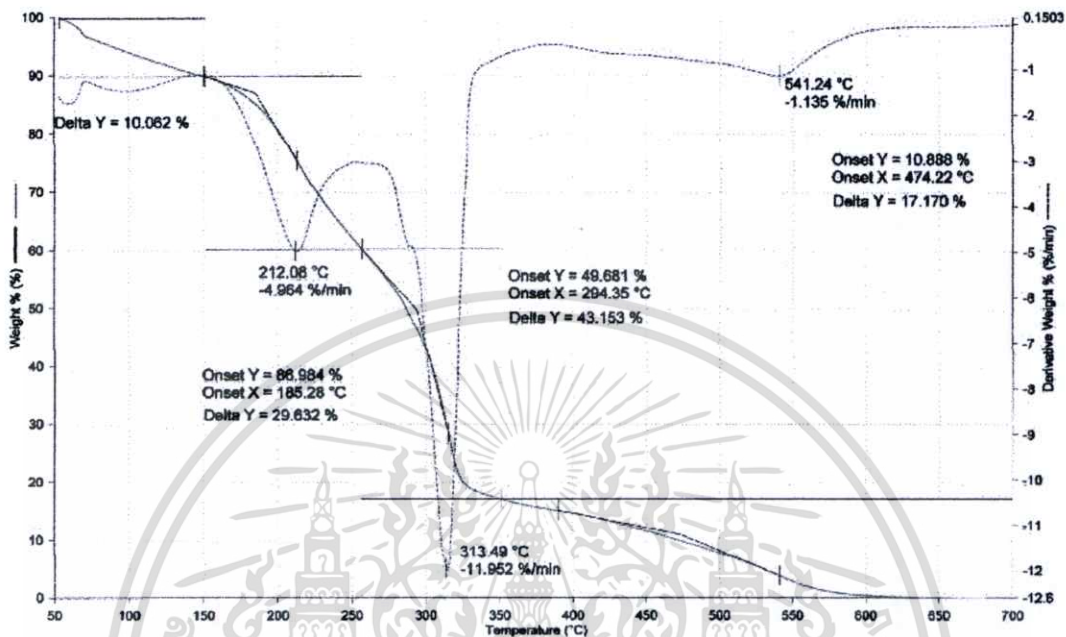
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล					
	แรงดึง (MPa)	ความ แข็งแรง ดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	การดึงยืด (mm)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด (%)	ความแข็ง กด (Shore A)
TPS+nylon5% 2mm	10.93±0.95	7.07±0.09	59.38±7.74	5.46±0.24	18.25±0.13	59.60±2.46
TPS+ nylon 10% 2mm	11.93±0.33	6.92±0.07	85.47±7.20	3.85±0.28	14.70±1.39	69.90±2.47
TPS+ nylon 15% 2mm	11.61±0.24	6.22±0.14	74.53±8.84	2.95±0.48	10.11±1.46	71.00±3.37
TPS+ nylon 5% 5mm	10.03±0.01	6.52±0.14	50.88±4.48	6.42±0.53	25.39±0.83	59.30±2.16
TPS+ nylon 10% 5mm	11.34±0.38	6.55±0.23	82.92±2.25	5.39±0.10	21.57±0.39	71.00±1.89
TPS+ nylon 15% 5mm	10.61±0.58	6.10±0.04	68.59±1.29	2.43±0.46	9.72±1.82	75.90±2.69
TPS+ nylon 5% 10mm	7.68±0.63	5.20±0.41	43.82±3.95	6.96±0.56	26.27±1.24	50.30±4.99
TPS+ nylon 10% 10mm	10.58±0.68	5.97±0.22	80.86±4.25	6.10±0.37	23.54±0.28	64.80±5.85
TPS+ nylon 15% 10mm	10.29±0.04	5.68±0.08	56.73±4.35	4.00±0.12	14.25±0.39	75.30±2.87

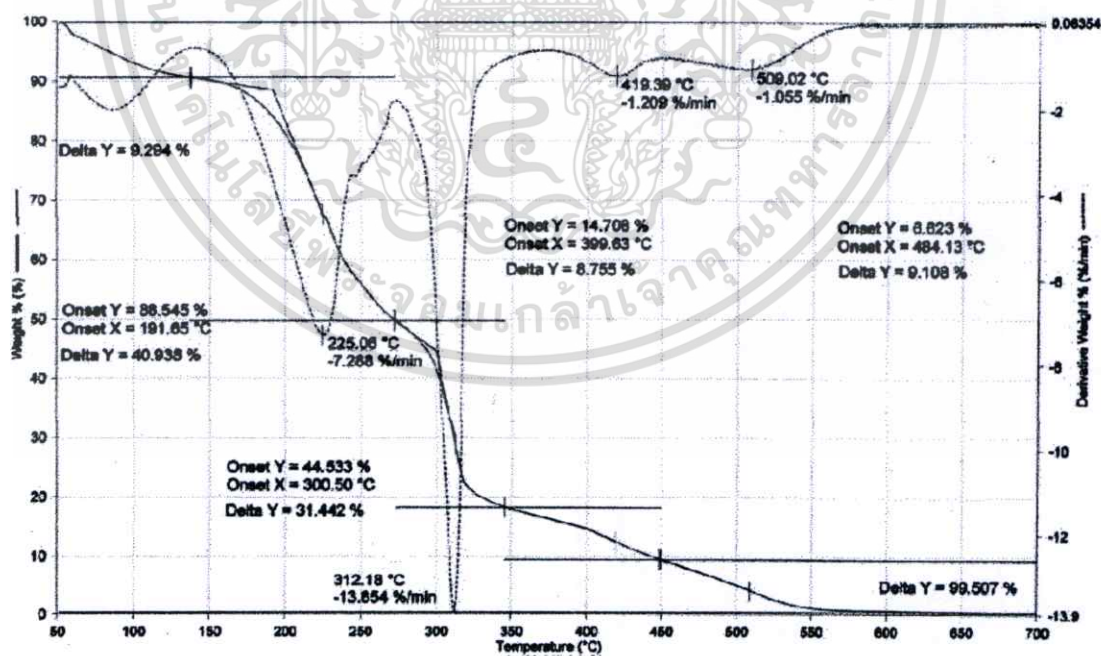
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ

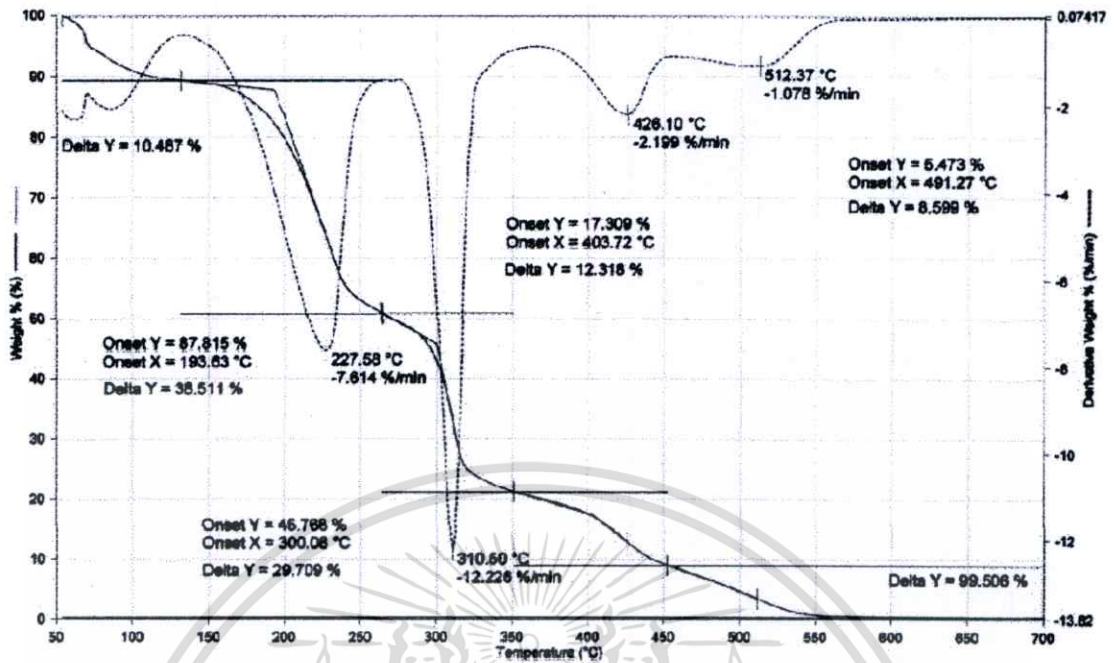


รูปที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ช

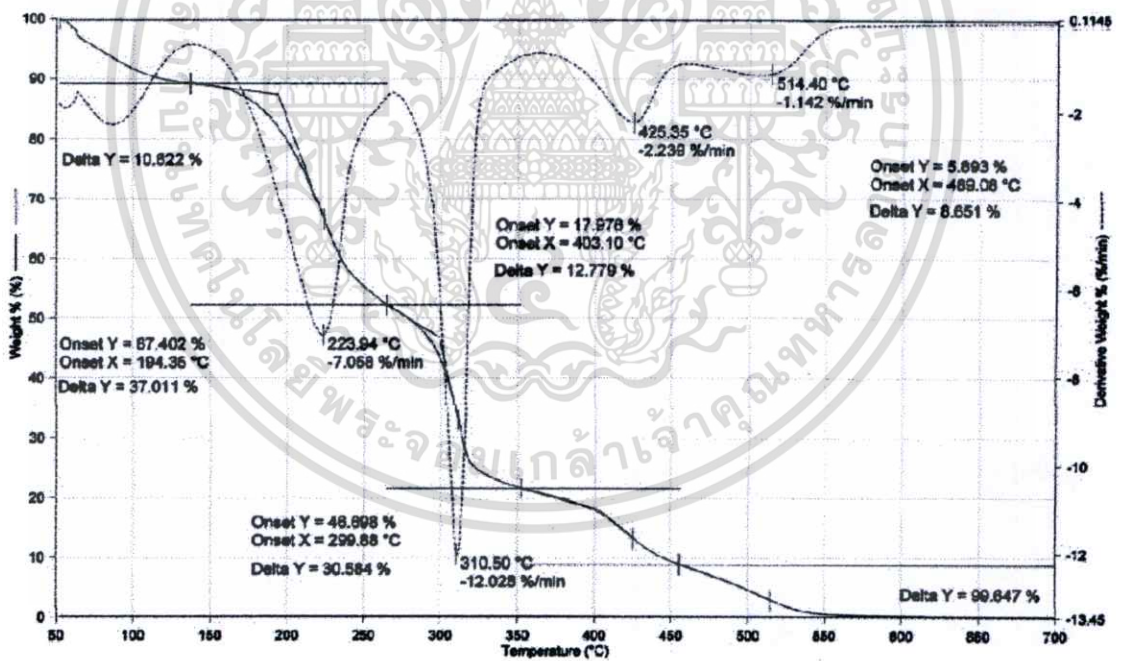


รูปที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชผสมเส้นใยฝ้าย 5% 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

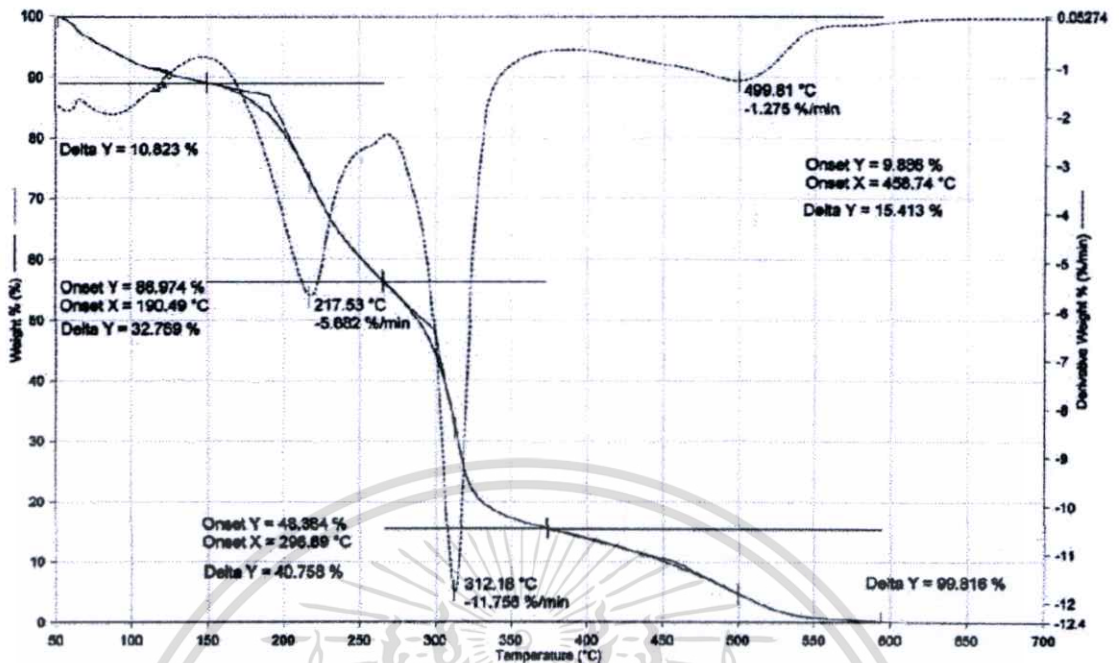


รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยฝ้าย 10% 2 mm

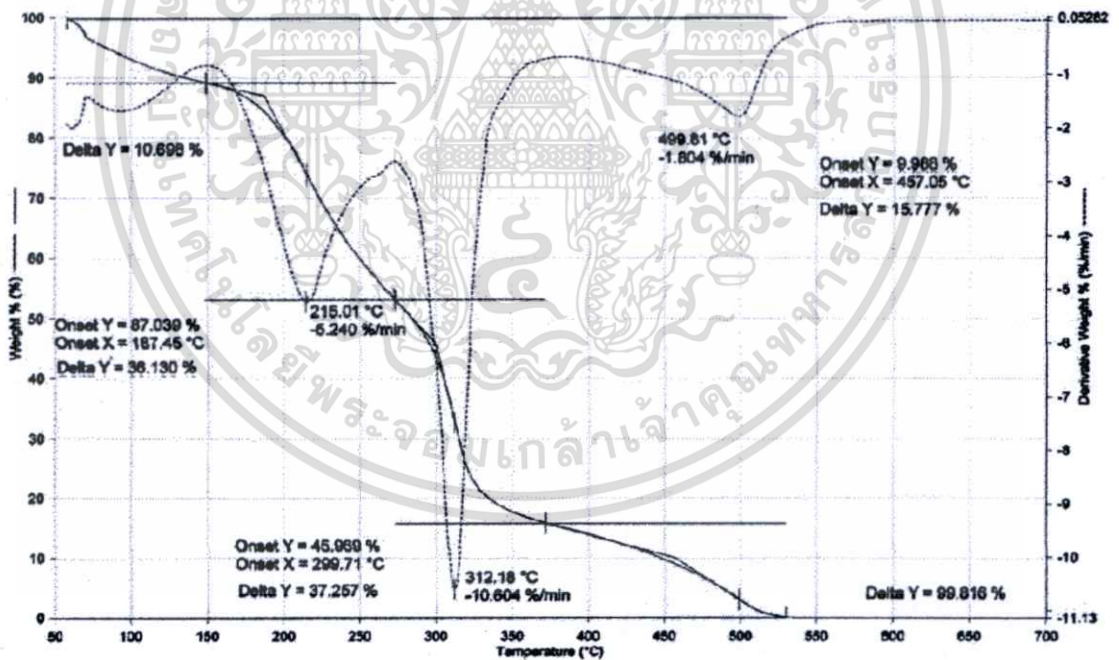


รูปที่ ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยฝ้าย 10% 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

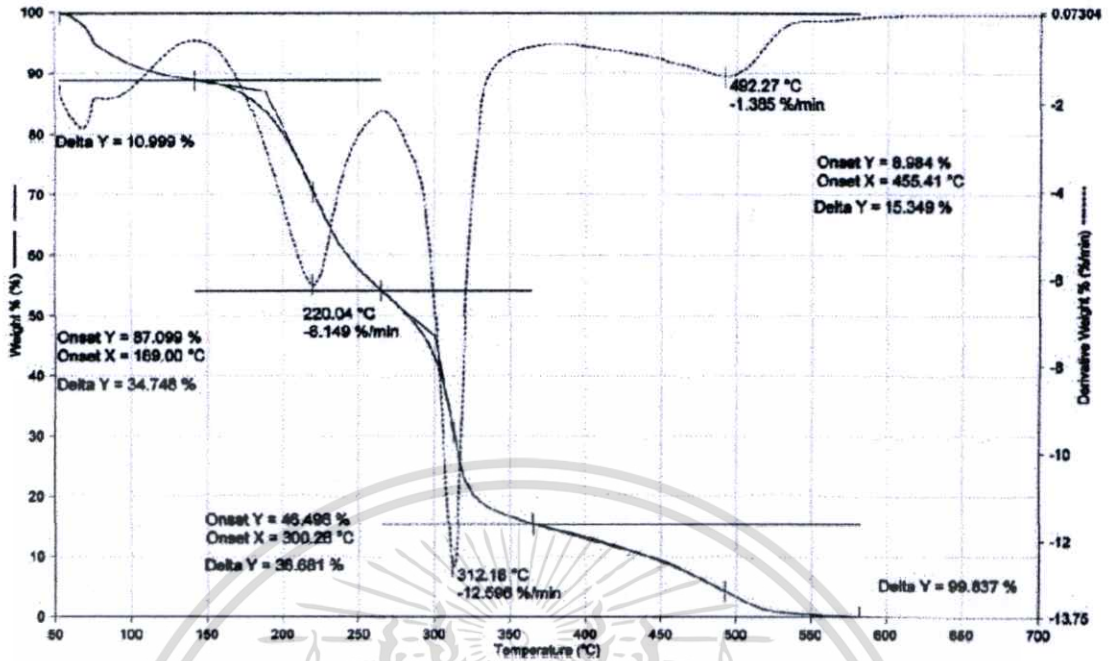


รูปที่ ค.5 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ผสมเส้นใยคาร์บอน 5% 10 mm

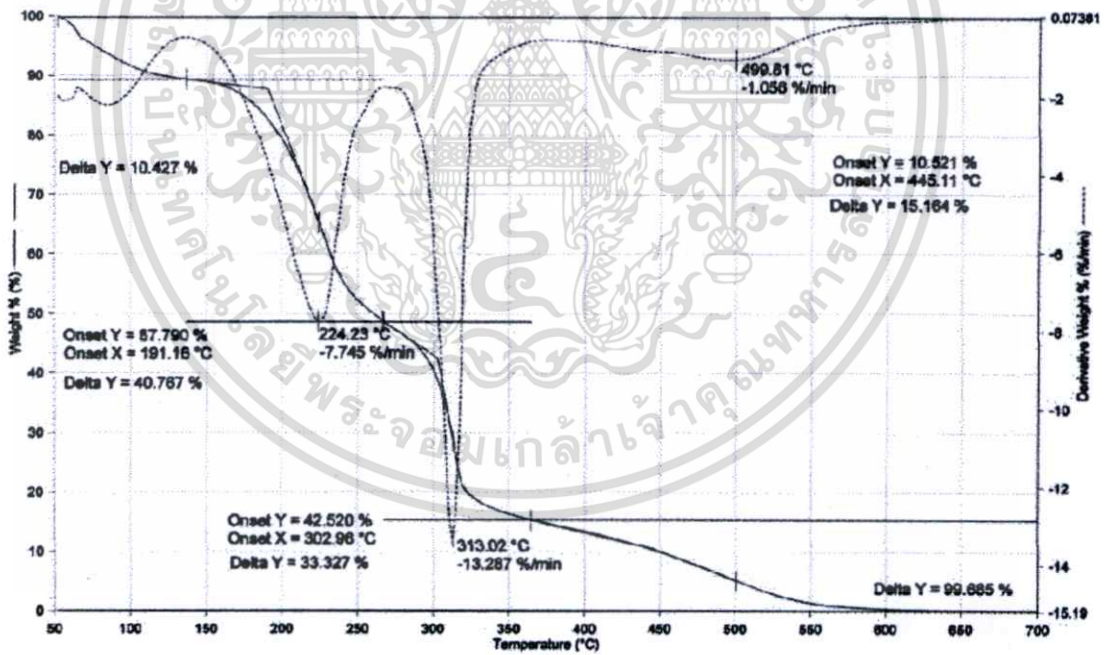


รูปที่ ค.6 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ผสมเส้นใยคาร์บอน 10% 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

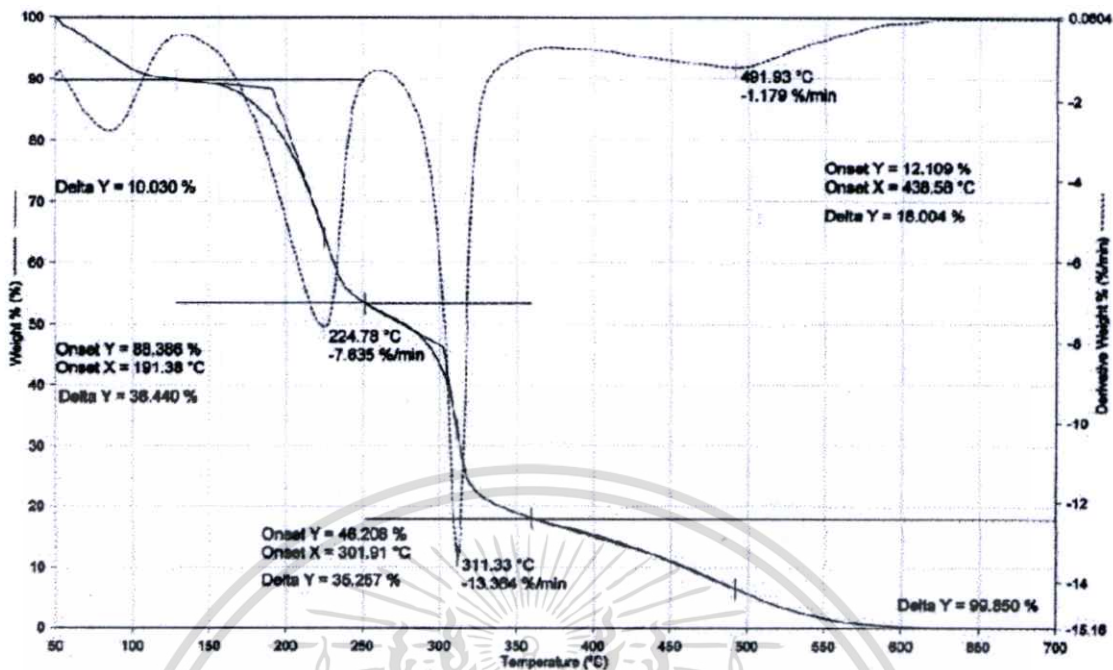


รูปที่ ค.7 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ผสมเส้นใยคาร์บอน 10% 10 mm

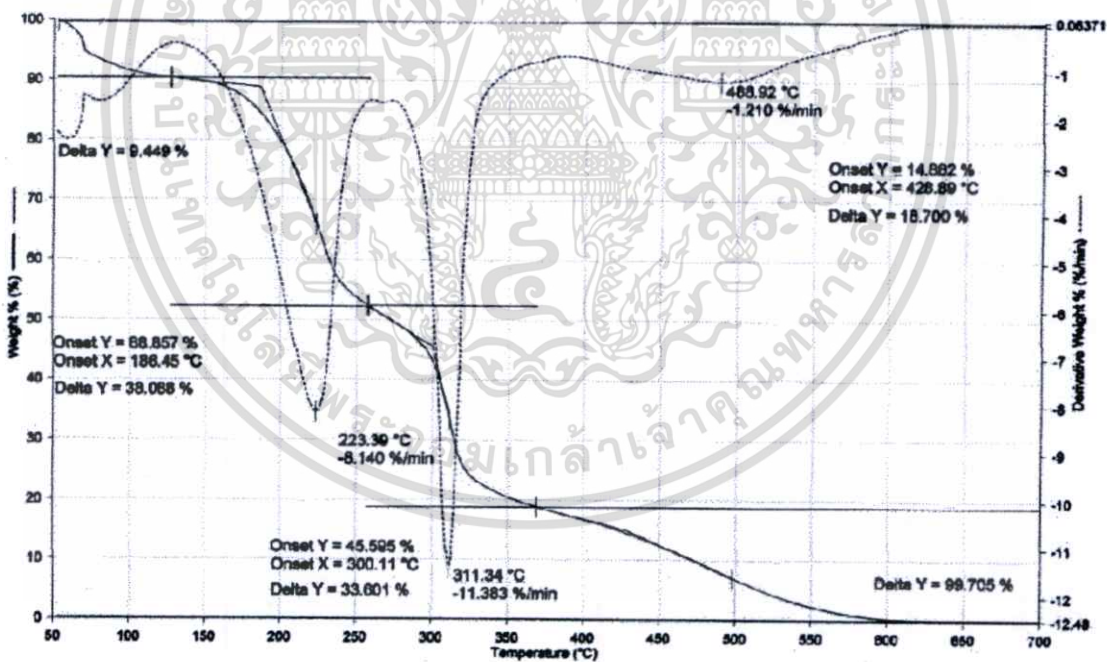


รูปที่ ค.8 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ผสมเส้นใยไหม 5% 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

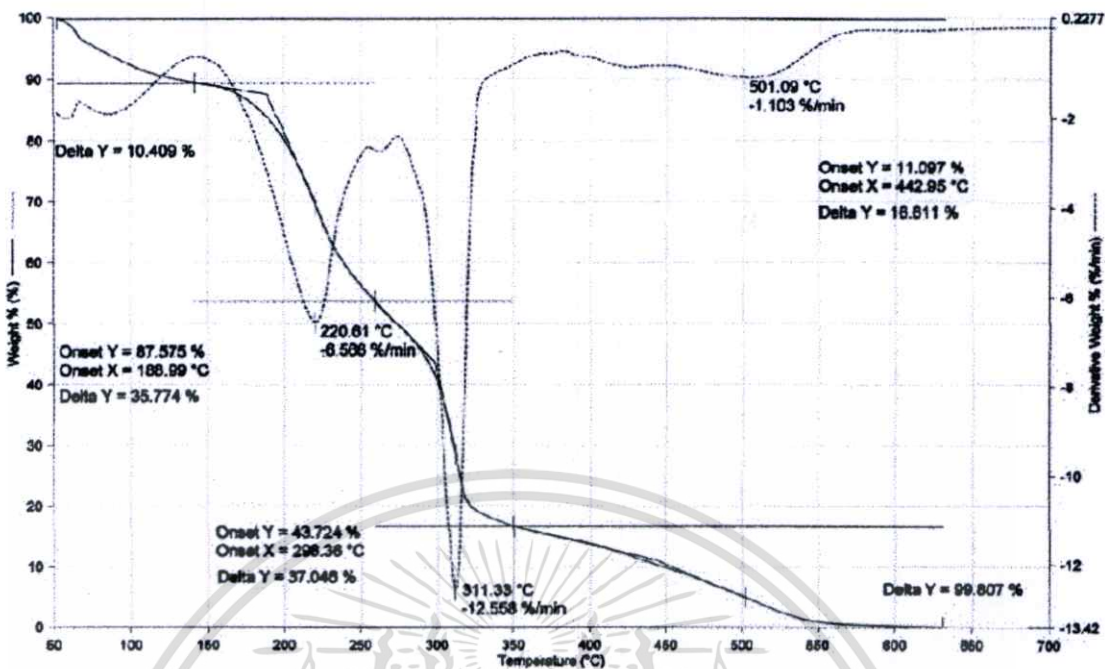


รูปที่ ค.9 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตา์รผสมเส้นใยไหม 10% 2 mm

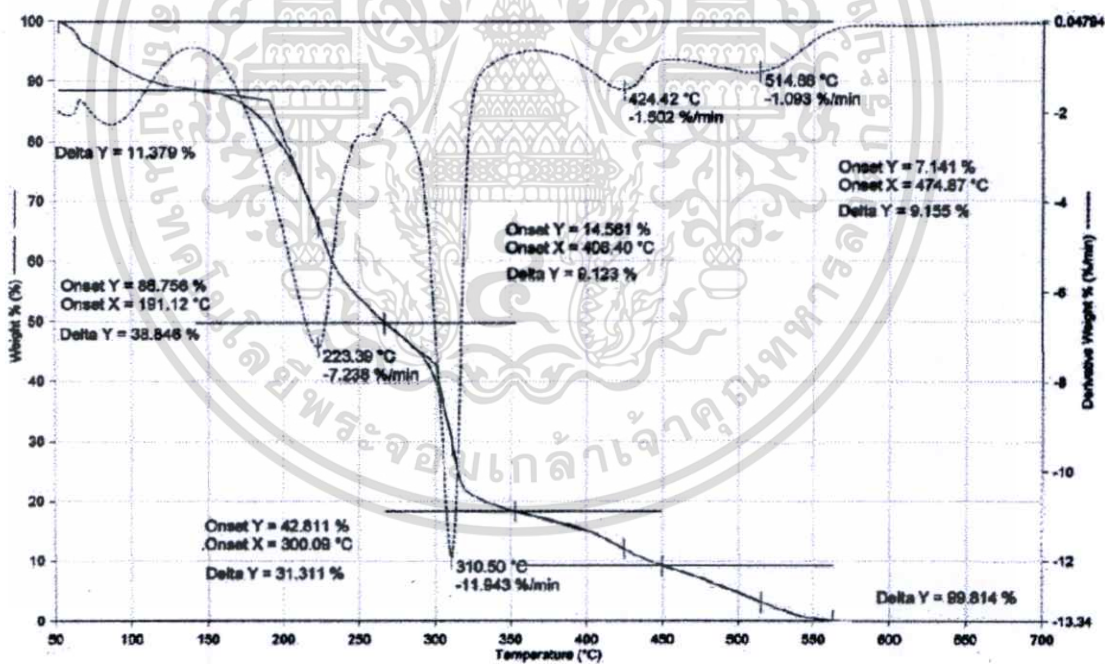


รูปที่ ค.10 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตา์รผสมเส้นใยไหม 10% 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

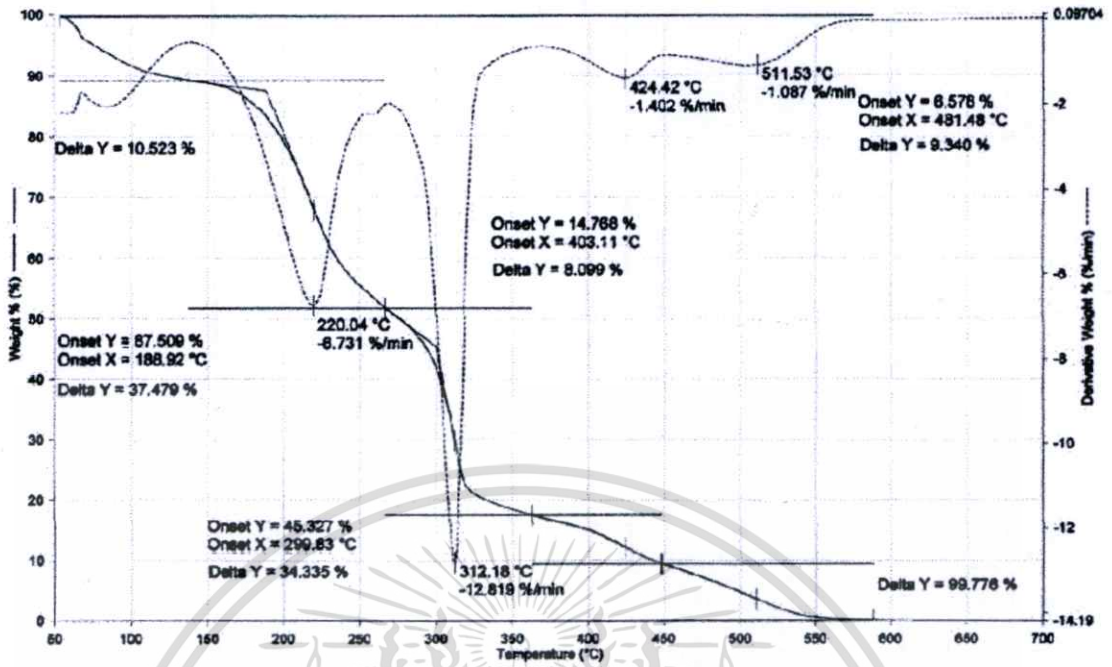


รูปที่ ค.11 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 5% 10 mm

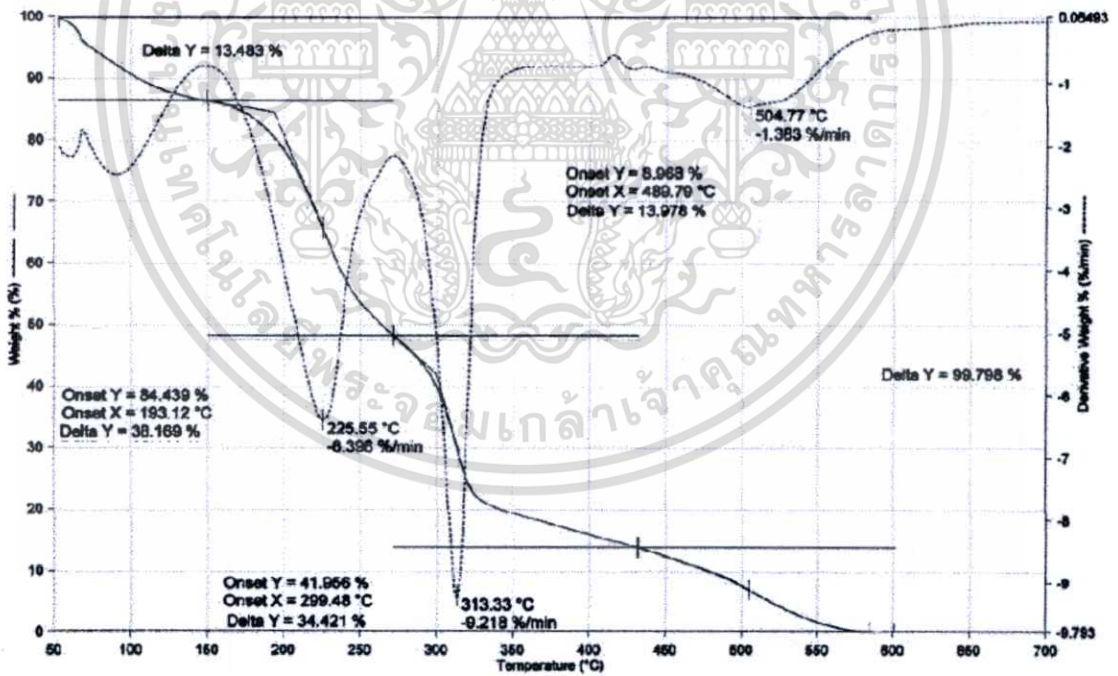


รูปที่ ค.12 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

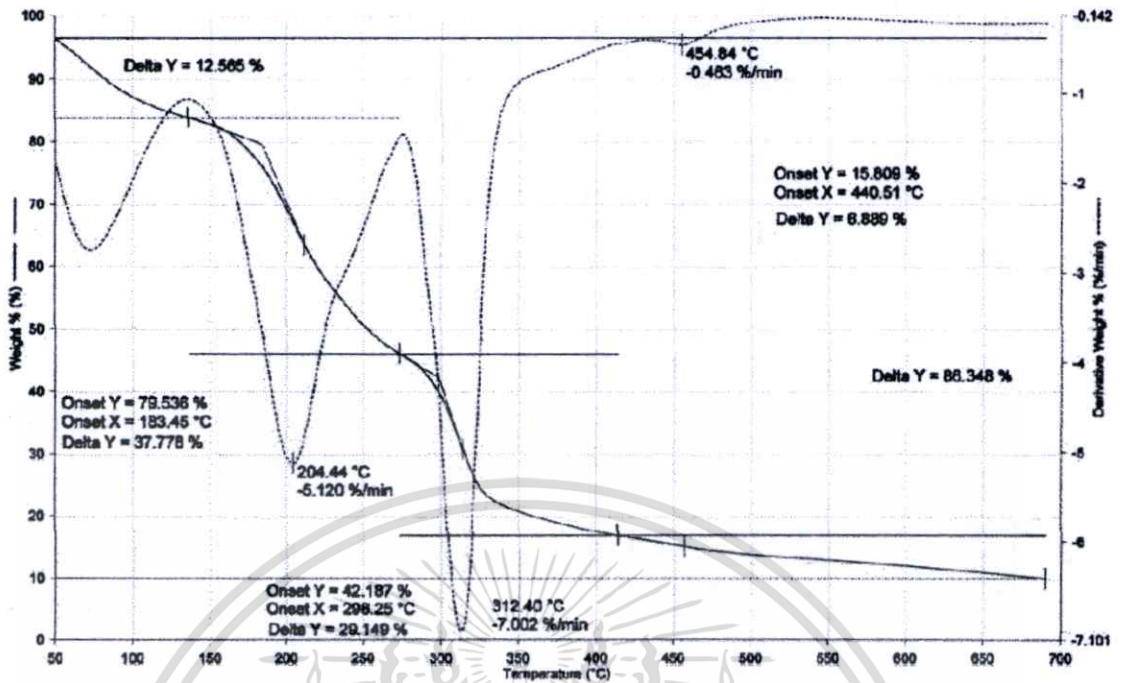


รูปที่ ค.13 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% 10 mm

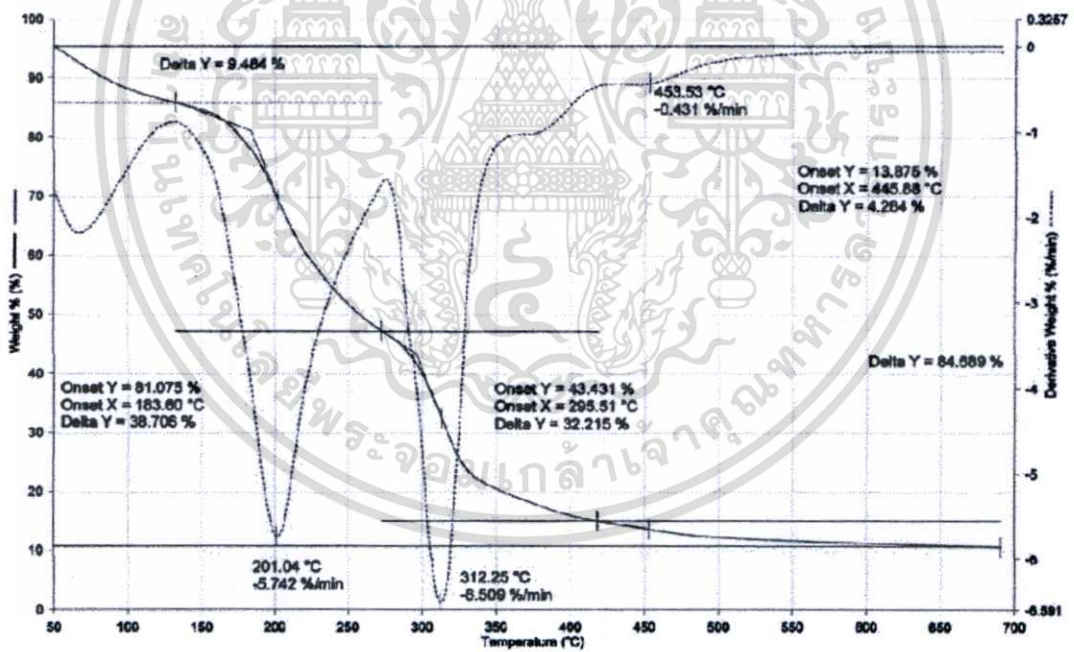


รูปที่ ค.14 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไนลอน 5% 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.15 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไพลอน 10% 2 mm



รูปที่ ค.16 TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยไพลอน 10% 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

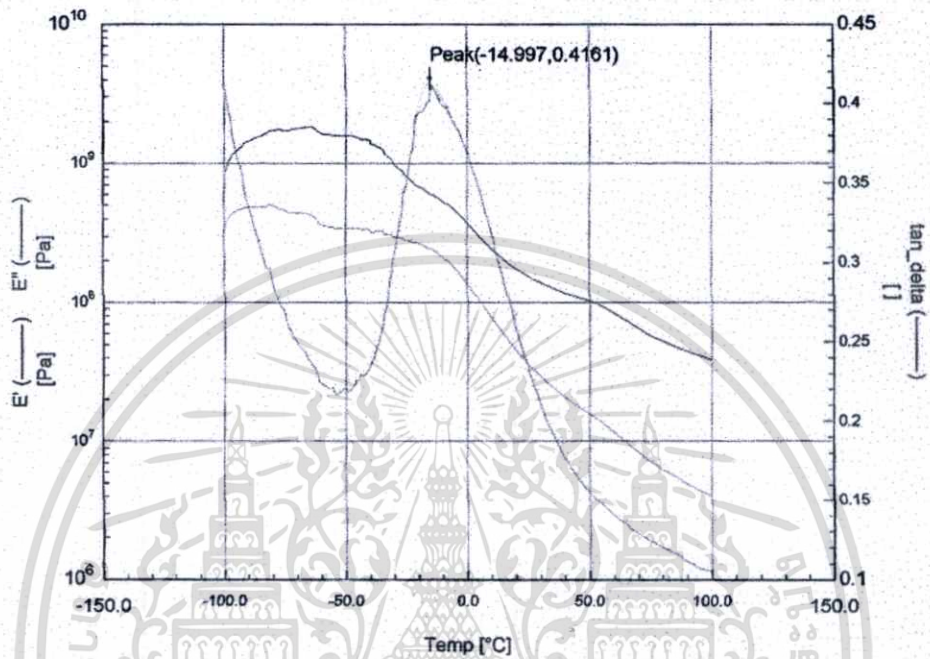
การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์และเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ

Ex เวลา (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง (%)								
	TPS	TPS +cotton	TPS +cotton	TPS +cotton	TPS +palmyra	TPS +palmyra	TPS +palmyra	TPS +silk	TPS +silk
		5%10mm	10%2mm	10%10mm	5%10mm	10%2mm	10%10mm	5%10mm	10%2mm
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	102.84	91.89	83.94	81.91	95.38	86.09	97.43	92.79	84.57
2	119.4	101.18	92.51	92.2	113.45	104.14	108.99	106.58	85.19
3	112.3	96.45	94.5	94.8	111.04	112.78	107.16	105.80	86.11
4	91.17	93.58	84.1	93.26	88.96	109.21	106.42	101.72	83.02
5	79.02	89.53	76.76	87.83	69.88	94.74	92.11	80.88	66.05
6	61.67	73.99	68.96	77.78	61.85	77.82	75.05	64.26	59.57
7	54.73	56.42	57.8	71.99	46.39	68.42	73.39	51.57	57.41
8	28.39	35.98	43.43	59.22	20.48	45.11	57.43	27.74	44.75
9	12.15	16.22	25.84	40.66	-8.03	27.07	39.08	10.34	24.69
10	-0.47	-1.69	9.79	28.49	-19.48	14.85	26.61	-0.16	12.04
11	-8.36	-10.14	1.22	19.74	-25.3	9.59	20.18	-7.05	5.09
12	-23.82	-29.73	-17.74	4.49	-31.33	-0.75	6.24	-18.18	-9.41
13	-32.97	-39.86	-28.59	-6.38	-34.54	-8.27	-3.67	-26.65	-18.06
14	-38.64	-45.44	-36.54	-17.26	-37.15	-16.17	-13.03	-34.48	-23.77
15	-44.01	-50	-42.2	-28.01	-40.36	-23.5	-22.57	-38.56	-30.71
16	-46.85	-52.2	-46.18	-35.82	-43.37	-30.08	-29.54	-41.07	-34.57
17	-47.95	-52.87	-48.78	-41.61	-44.18	-34.02	-35.6	-41.85	-39.66
18	-53.31	-53.72	-49.54	-45.27	-44.78	-35.71	-39.08	-42.01	-42.13
19	-63.56	-55.07	-50.46	-47.16	-45.98	-36.84	-41.83	-43.26	-45.37
20	-72.24	-57.43	-51.83	-50.12	-47.99	-40.41	-44.22	-45.77	-48.46
21	-72.87	-59.29	-52.45	-50.95	-49.4	-41.17	-44.77	-47.49	-49.38
22	-73.5	-60.81	-53.06	-53.31	-51.81	-47.18	-46.61	-49.37	-50.77
23	-86.91	-63.01	-55.35	-54.85	-54.42	-68.23	-50.64	-50.94	-63.12
24	-94.95	-66.22	-57.65	-57.33	-58.63	-74.06	-66.79	-53.61	-66.36
25	-96.21	-67.06	-59.63	-58.16	-61.65	-76.13	-67.52	-58.46	-67.13
26	-	-68.58	-62.84	-59.22	-61.85	-77.07	-69.91	-59.56	-67.44
27	-	-72.13	-65.44	-60.52	-62.05	-79.32	-71.74	-63.32	-67.59
28	-	-73.65	-66.67	-61.94	-62.25	-81.58	-73.58	-64.42	-67.75
29	-	-75.51	-67.28	-62.77	-62.65	-85.53	-75.05	-66.93	-67.90
30	-	-79.56	-72.02	-63.95	-75.5	-90.6	-81.28	-68.34	-72.84

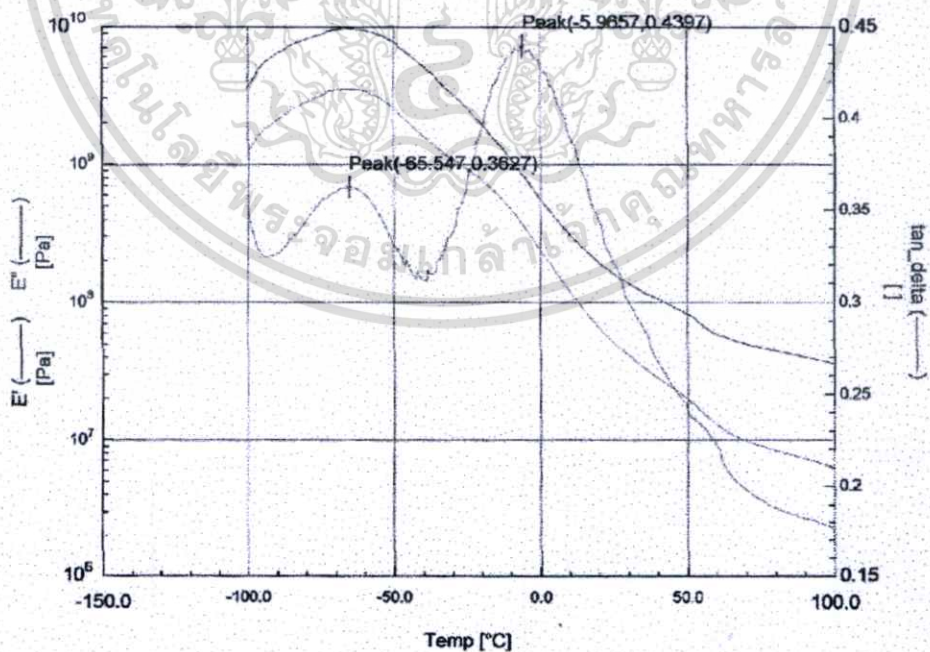
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมเส้นใยต่าง ๆ

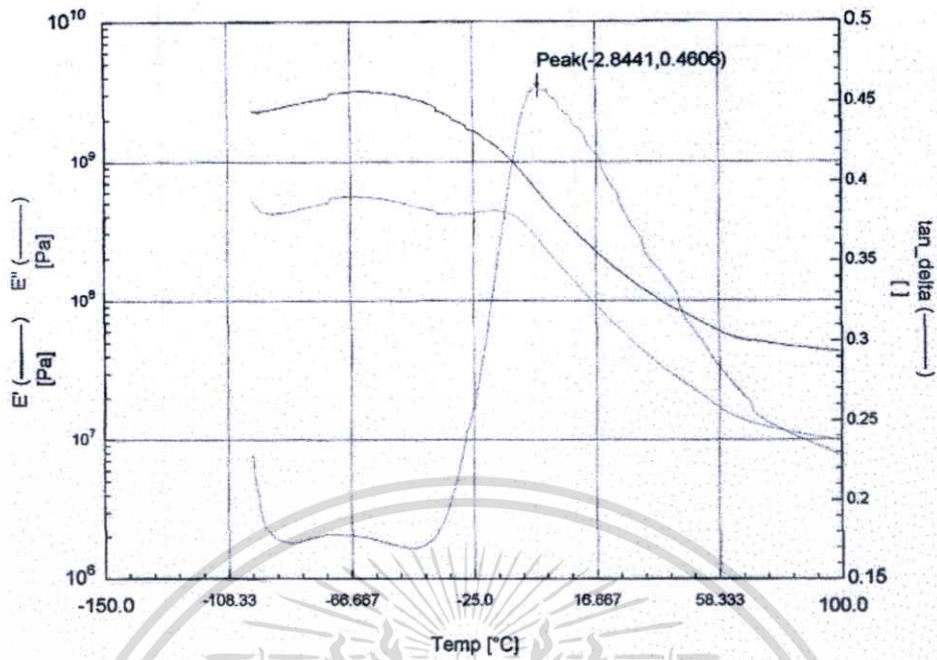


รูปที่ จ.1 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ช

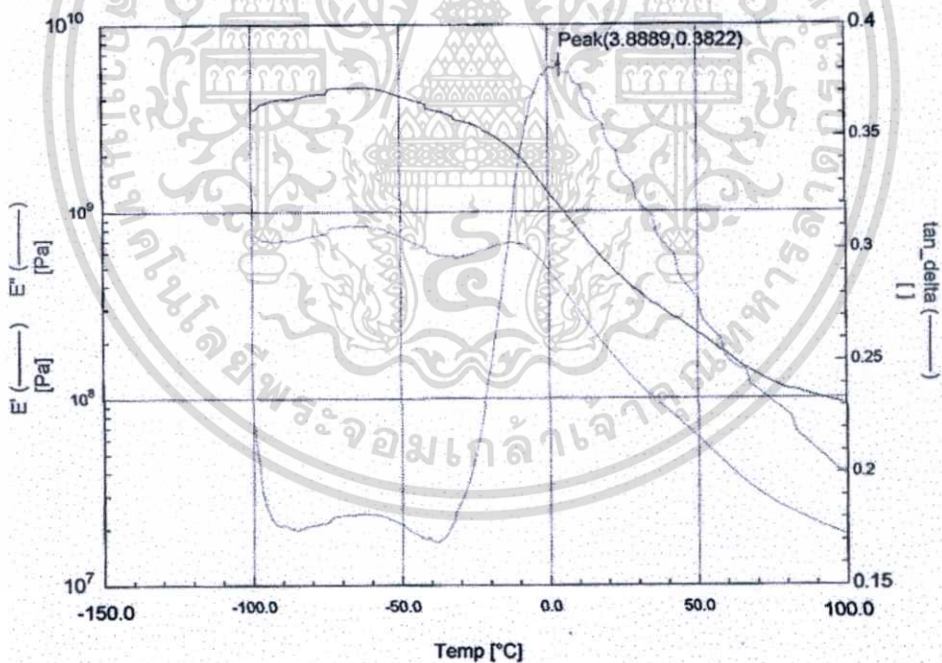


รูปที่ จ.2 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้าย 10% 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

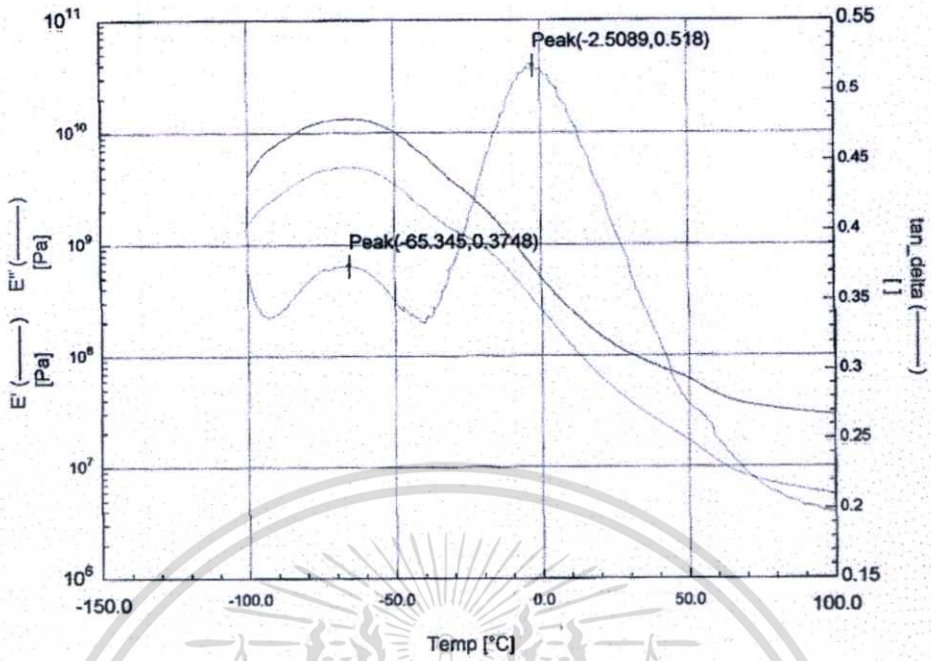


รูปที่ 3.3 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกเสริมใยคาร์บอนที่ผสมเส้นใยคาร์บอน 10% 2 mm

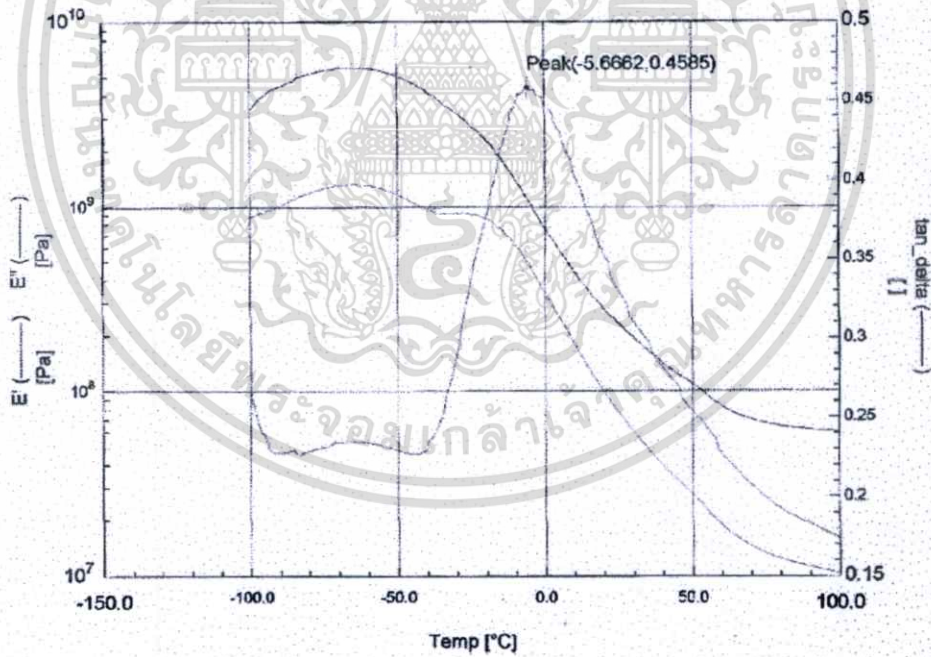


รูปที่ 3.4 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกเสริมใยคาร์บอนที่ผสมเส้นใยใหม่ 10% 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.5 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 10% 2 mm

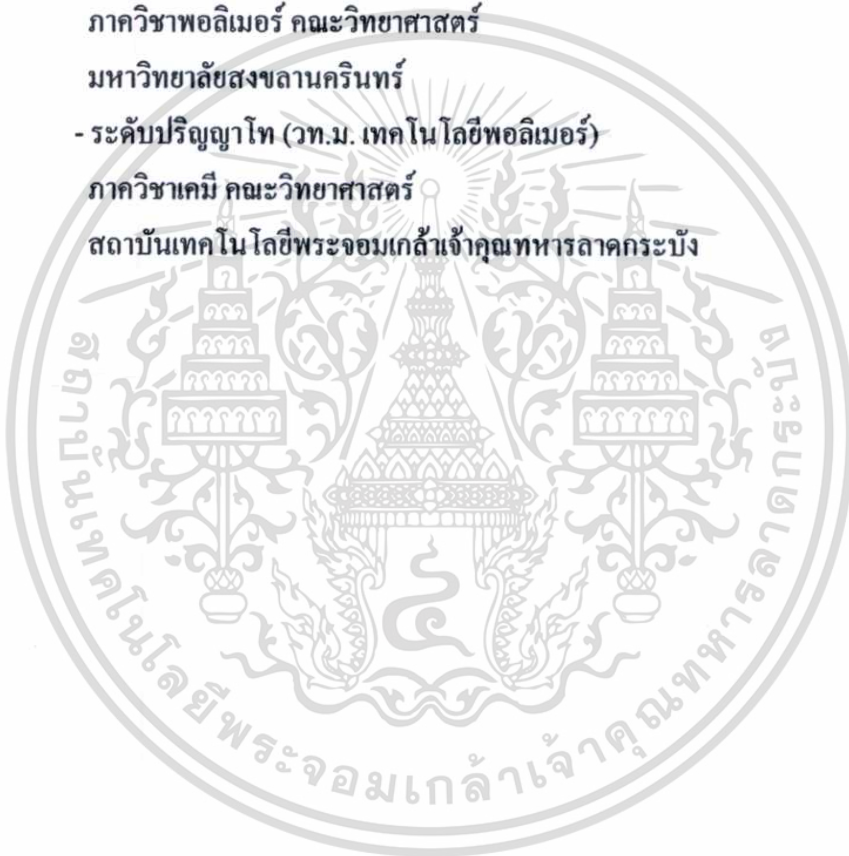


รูปที่ จ.6 สมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยไพลอน 10% 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ	วัลลดา หวานเสนาะ
วันเกิด	5 พฤศจิกายน 2528
ภูมิลำเนา	ชลบุรี
ที่อยู่	76/2 ม. 1 ต. บางเสร่ อ. สัตหีบ จ. ชลบุรี 20250
การศึกษา	- ระดับมัธยม โรงเรียนโพธิสัมพันธ์พิทยาคาร - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) ภาควิชาพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ - ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้