

การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน  
เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น

MODIFICATION OF THERMOPLASTIC FROM CASSAVA STARCH  
USING PECTIN PARTICLES REINFORCED WITH COTTON FIBERS  
AND KAPOK FIBERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-076

การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน  
เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น

MODIFICATION OF THERMOPLASTIC FROM CASSAVA STARCH  
USING PECTIN PARTICLES REINFORCED WITH COTTON FIBERS  
AND KAPOK FIBERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-014-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF THERMOPLASTIC FROM CASSAVA  
STARCH USING PECTIN PARTICLES REINFORCED WITH COTTON  
FIBERS AND KAPOK FIBERS



Vipawan Pitpisutkul

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-SC-M-014-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE





KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น”  
“MODIFICATION OF THERMOPLASTIC FROM CASSAVA STARCH USING PECTIN PARTICLES REINFORCED WITH COTTON FIBERS AND KAPOK FIBERS”

ชื่อนักศึกษา นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิ์กุล  
รหัสประจำตัว 56605042  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 21 ธันวาคม พ.ศ.2558 เวลา 09.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณะ 1 ชั้น 5

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิน ธนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ ๒๘ เดือน ๗ พ.ศ. ๕๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น	
นักศึกษา	นางสาววิภาวรรณ	พิตรพิศุทธิกุล
รหัสประจำตัว	56605042	
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์	
พ.ศ.	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ประชญาวารการ	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic starch, TPCS) ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมแบ่งกับ กลีเซอรอลเป็น 65:35 สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน (Pectin) เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) และเส้นใยนุ่น (Kapok fibers) ใน ปริมาณและความยาวต่าง ๆ นอกจากนี้มีการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของ TPCS ที่ปรับปรุง การผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลทำด้วยเครื่อง ผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ  $1741\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงการใส่เพคติน นอกจากนี้ยังพบว่าพีคที่ตำแหน่ง O-H Stretching และ O-H Bending เกิดการเคลื่อนที่ไปยัง ตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเติมเพคตินกับเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดี กับเทอร์โมพลาสติกสตาarch นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่ สูงขึ้นแต่ที่ความยาวเส้นใยที่สั้นกว่า สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกสูตร ในด้านแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส คือ เทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% และเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนัก ที่ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร สมบัติการดูดซับน้ำพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนัก มีสมบัติการดูดซับน้ำต่ำที่สุดและความยาวเส้นใยที่ต่างกัน พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิการสลายตัว ทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่พบอุณหภูมิ การสลายตัวทางความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเพคตินและเส้นใยนุ่น สำหรับความยาวของเส้นใยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างกันพบว่า ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า เทอร์โมพลาสติก  
สตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก ย่อยสลายได้เร็วที่สุด

**คำสำคัญ** :เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แป้งมันสำปะหลัง เพคติน เส้นใยฝ้าย เส้นใยขนุน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Modification of thermoplastic cassava starch using pectin particles reinforced with cotton fibers and kapok fibers
<b>Student</b>	Vipawan Pitpisutkul
<b>Student ID</b>	56605042
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer technology
<b>Year</b>	2558
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

### Abstract

This research was studied on properties of thermoplastic cassava starch (TPCS) using glycerol as a plasticizer at the ratio of starch:glycerol; 65:35. Properties of the TPCS were modified by different contents of pectin, cotton fibers and kapok fibers. In addition, different aspect ratios of the cotton and kapok fibers on properties of the modified TPCS polymers were studied. Cassava starch and glycerol were mixed using an internal mixer and, then, shaped by a compression molding machine. It was found from FT-IR spectra that the new wavenumber of  $1741\text{ cm}^{-1}$  were observed by the incorporation of the pectin into the TPCS matrix. In addition, the O-H stretching and O-H bending peak shifted to lower wavenumbers. Moreover, the contents of the fibers and different lengths of the fibers did not affected on IR spectrum For morphology, the result was illustrated that the pectin, cotton fibers and kapok fibers were well distributed and compatible with the TPCS matrix. Moreover, stress at maximum load and Young's modulus increased with the higher content but shorter length of the fibers. The highest maximum load, stress at maximum load and Young's modulus were obtained by the TPCS polymer reinforced by both 20% pectin and 15% kapok fibers at 2 mm of fiber length. The lowest water absorption was found in the TPCS polymer modified by 15% kapok fibers and the different of length fibers was not affected on adsorption properties. Thermal degradation temperature of the TPCS polymer modified by cotton fibers was found

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to increase but the decrease of the thermal degradation temperature was observed when the pectin particles and the kapok fibers were added into the TPCS matrix. Moreover, different fiber lengths did not affect on thermal stability, and the fastest degradation was observed in the TPCS polymer reinforced by the pectin.

**Keywords :** Thermoplastic starch, Cassava starch, Pectin, Cotton fibers, Kapok fibers



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆเกี่ยวกับโครงงานพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และกองทุนวิจัยสจล. ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนวิจัย ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่กฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งทางด้าน สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ชาวพอลิเมอร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะ และเป็นกำลังใจ และบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาตลอดจนสำเร็จสมบูรณ์

นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง .....	X
สารบัญรูป .....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	4
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	6
2.2 แป้ง.....	8
2.2.1 อะไมโลส.....	9
2.2.2 การอะไมโลเพคติน.....	11
2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	13
2.2.4 สมบัติของแป้ง.....	14
2.2.5 การเกิดเจลลาตินเซชัน.....	15
2.2.6 การคืนตัวของแป้งสุก.....	16
2.2.7 ความหนืด .....	17
2.3 แป้งมันสำปะหลัง .....	18
2.3.1 สมบัติโดยทั่วไปของแป้งมันสำปะหลัง.....	18
2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	20
2.3.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง .....	20
2.3.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	21
2.4 เพคติน .....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 โครงสร้างของเพคติน.....	22
2.4.2 การสกัดเพคติน.....	24
2.4.3 การแบ่งเพคตินตามค่า Degree of esterification.....	26
2.4.4 สมบัติทางเคมีเพคติน.....	27
2.4.5 สมบัติทางกายภาพของเพคติน.....	28
2.5 วัสดุประกอบ.....	29
2.5.1 ส่วนประกอบของวัสดุประกอบ.....	29
2.6 เส้นใย.....	31
2.6.1 ความหมายของเส้นใย.....	31
2.6.2 ประเภทของเส้นใย.....	31
2.6.3 สมบัติของเส้นใย.....	32
2.7 เส้นใยฝ้าย.....	33
2.7.1 สมบัติของฝ้าย.....	34
2.8 เส้นใยขนุน.....	34
2.8.1 สมบัติของขนุน.....	36
2.9 พลาสติกไซเซอร์.....	36
2.10 ก्लीเซอรอล.....	37
2.11 สารหล่อลื่น.....	39
2.11.1 สารหล่อลื่น แบ่งตามหน้าที่.....	39
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>46</b>
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 วิธีการทดลอง.....	49
3.4 วิธีการทดสอบ.....	53
3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	53
3.4.2 การดูดซับน้ำ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3	สัณฐานวิทยา .....	53
3.4.4	การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	54
3.4.5	การทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	55
3.4.6	การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	56
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>42</b>
4.1	การทดสอบหุ้มฟังก์ชัน .....	59
4.2	สัณฐานวิทยา.....	66
4.3	สมบัติเชิงกล.....	73
4.3.1	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วย เพคตินในปริมาณต่างๆ .....	73
4.3.2	การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น.....	75
4.3.3	การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	77
4.4	การดูดความชื้น.....	81
4.5	การย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	85
4.5.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการย่อยสลายหลังการฝังดิน.....	85
4.5.2	การศึกษาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	88
4.5.3	ศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยฝ้าย .....	90
4.5.4	ศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยนุ่น.....	92
4.6	การทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	94
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>102</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	102
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	104
	เอกสารอ้างอิง .....	105
	ภาคผนวก.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก.....	113
ภาคผนวก ข.....	117
ภาคผนวก ค.....	123
ภาคผนวก ง.....	132
ภาคผนวก จ.....	134



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน .....	8
2.2 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ .....	9
2.3 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ .....	10
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน.....	17
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	20
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย .....	34
2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น .....	35
2.8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี .....	38
2.9 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแมกนีเซียมสเตียเรต.....	34
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง .....	46
3.2 องค์ประกอบของเพคติน.....	46
3.3 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	47
3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้.....	54
4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูตรต่าง ๆ.....	43
4.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	65
4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	95
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	97
4.5 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะไมโลส.....	9
2.2 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์ .....	11
2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	14
2.4 การพองตัวของเม็ดแป้ง .....	14
2.5 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน .....	15
2.6 การคืนตัวของแป้ง .....	17
2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน.....	19
2.8 ของผนังเซลล์พืชและองค์ประกอบที่สำคัญในแต่ละชั้น .....	22
2.9 ลักษณะโครงสร้างของเพคตินโดยมีหมู่ Homogalacturonan.....	22
2.10 ตำแหน่งของการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	23
2.11 โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลเพคตินในหน่วยย่อย .....	23
2.12 ชนิดของเพคตินโดยแบ่งตามสารที่ใช้ในการสกัด.....	24
2.13 ลักษณะโครงสร้างของเพคตินที่ประกอบด้วย Smooth region และ Hairy region.....	26
2.14 ลักษณะของโครงสร้างของเพคตินที่มีหมู่เมธอกซิลต่ำ .....	27
2.15 การกระจายตัวของอนุภาคในเมทริกซ์ .....	30
2.16 การเสริมแรงด้วยเส้นใย .....	30
2.17 รูปร่างของวัสดุเสริมแรง.....	30
2.18 โครงสร้างของเส้นใยฝ้าย.....	30
2.19 โครงสร้างของเส้นใยขน.....	35
2.20 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	37
2.21 ปฏิกิริยา Saponification .....	38
3.1 แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน เสริมแรงด้วย เส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	51
3.2 แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยขนที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	52
3.3 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ .....	46
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุง ด้วยเพคตินปริมาณต่าง ๆ.....	59
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุง ด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยขนที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 มิลลิเมตร .....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ.....	62
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ.....	64
4.5 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน.....	66
4.6 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่ว.....	67
4.7 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินในปริมาณเท่ากัน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ .....	69
4.8 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินในปริมาณที่เท่ากัน เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ.....	71
4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินปริมาณต่าง ๆ.....	73
4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยถั่วที่ปริมาณต่าง ๆ.....	75
4.11 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ .....	77
4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วที่ปริมาณเส้นใย 15% โดยน้ำหนัก .....	79
4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่ว.....	81
4.14 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ .....	83
4.15 เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วย เพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ.....	84
4.16 ภาพชิ้นงาน 0 สัปดาห์ของการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์	86
4.17 ภาพชิ้นงาน 4 สัปดาห์ของการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม้ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วย เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	88
4.19 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ .....	90
4.20 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีการปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรง ด้วยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	93
4.21 TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใย ฝ้ายและเส้นใยนุ่น.....	96
4.22 TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	98
4.23 TG และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

พลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่งและมีแนวโน้มที่จะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบาและมีขอบข่ายการใช้งานได้กว้างกว่าวัสดุอื่นเช่น กระจก โลหะ และแก้ว ทำให้ปริมาณขยะซึ่งเกิดจากพลาสติกมีปริมาณมากขึ้นก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด จนเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหาภาวะโลกร้อนและปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิดส่วนใหญ่จะได้มาจากพืช เช่น เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) เคซีน (Casein) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) แป้ง (Starch) และโปรตีนจากถั่ว (soy protein) เป็นต้น ซึ่งแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพมากที่สุดเพราะหาได้ ง่าย มีปริมาณมากและราคาถูก เนื่องจากสามารถผลิตแป้งได้จากพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง เป็นต้น [1]

ข้อจำกัดของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ คือ สมบัติเชิงกลต่ำ และว่องไวต่อความชื้น เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลส่วนใหญ่ของแป้ง มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหลัก เมื่อนำไปใช้งานจริง จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งมีวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้การอย่างแพร่หลาย เช่น การตัดแปรโครงสร้างทางเคมี การผสมทางกายภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิเมอร์อื่นๆ หรือวัสดุเสริมแรงที่ผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิต

การปรับปรุงสมบัติอาจทำได้โดยนำพอลิเมอร์ชีวภาพตัวอื่นๆ เช่น เพคติน เส้นใยฝ้าย หรือเส้นใยขนุน ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เป็นโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงกลุ่มนี้ สามารถย่อยสลายได้หมดและมีความเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

เพคติน (Pectin) [2] เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) หรือพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารก่อเจล ในผลิตภัณฑ์แยม เยลลี่ เจลลี่ และสารเพิ่มความคงตัวของระบบคอลลอยด์ในเครื่องดื่มน้ำผลไม้และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) [3] เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยไม้ (Wood fibers) เส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) และเส้นใยนุ่น (Kapok fibers) เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่หาง่ายมักมีราคาถูก น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวเสริมแรง เนื่องจากมีความแข็งแรงและความหนาแน่นต่ำ ด้วยสมบัติพิเศษของทั้งสองเส้นใยคือมีความเป็นผลึกสูง และเส้นใยนุ่นมีสมบัติดูดซับน้ำมันได้ ทำให้สมบัติการดูดซับน้ำต่ำ ทำให้ลดจุดบดพร่องในชิ้นงานที่ทำจากแป้งได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเตรียมและปรับปรุงฟิล์มแป้งกล้วยด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย [4] โดยใช้วิธีการเทหล่อ (Solution casting) พบว่าการเติมเพคตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ย่ำต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้จากงานวิจัยของ วรวรรณ พัฒนสิน [5] ได้ศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน ไคโตซาน และ เส้นใยฝ้าย พบว่าที่ปริมาณเส้นใย 5% และปริมาณเพคตินที่เท่ากับไคโตซานให้สมบัติเชิงกลสูงสุด ที่ขนาดเส้นใย 2 มิลลิเมตร แต่ค่าความแข็งแรงยังต่ำกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ และความสามารถในการดูดซับน้ำสูง นอกจากนี้ยังมีรายงานการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและเส้นใยปอกระเจา พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสมบัติการดูดซับน้ำได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้เติมเส้นใย [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งมันสำปะหลังด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติ จากเพคติน เส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น ที่ปริมาณและขนาดของเส้นใยต่างๆ ซึ่งคาดว่าจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ดูดซับน้ำน้อยลง และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาρχโดยใช้เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นในปริมาณและความยาวต่าง ๆ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เพคติน ใน ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 5% 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนักและที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นและฝ้าย
- 1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่างๆ ที่ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก
- 1.3.3 ศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่างๆ ที่ 2 และ 5 มิลลิเมตร
- 1.3.4 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้
  - 1.3.3.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 1.3.3.2 ทดสอบการดูดความชื้น ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.3.3 ทดสอบสัณฐานวิทยา
- 1.3.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกล
- 1.3.3.5 ทดสอบสมบัติทางความร้อน
- 1.3.3.6 ทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ด้วยวิธีอัดขึ้นรูป (Compression molding)
- 1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วย เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ที่มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์
- 1.4.3 เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่ง โดยการนำมาแทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นไม้ เหล็ก เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูกและน้ำหนักเบา ทำให้มีการผลิตอย่างต่อเนื่องและปริมาณมาก ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่เป็นปัญหาหลักในปัจจุบัน ทำให้มนุษย์ต้องมีการค้นคว้าและวิจัยการผลิตวัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ เพื่อมาใช้แทนพลาสติกสังเคราะห์

#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic)

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) คือ พลาสติกที่ออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้ โดยทั่วไป สามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิวเนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆโดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิด

เป็นสารประกอบ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide , ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มี การเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ  $RO\cdot$  และ  $OH\cdot$  ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบน ตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลาย ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้ สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอมไฮโดรด์ พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของ พอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่าง ๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะอัลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือ เอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการ

แตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำเกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่ง หมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้นี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green Plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน [7]

#### 2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [8]

สำหรับคำว่า Biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก Biotic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สมีเทน และน้ำ

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

- ISO 472:1998 – Biodegradable plastics are plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions resulting in a loss of some properties that may vary as measured by standard test methods appropriate to the plastics and application in a period of time that determines its classification. The change in chemical structure results from the action of naturally occurring microorganisms  
 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของ จุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น
- BPS Japan (1994) – Biodegradable plastics are polymeric materials which are changed into lower molecular weight compounds where at least one step in the degradation process is through metabolism in the presence of naturally occurring organism. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ
- DIN FNK103.2 (1993) – A plastic materials is called biodegradable if all its organic compounds undergo a complete biodegradation process Environmental condition and rates of biodegradation are to be determined by standardized test methods. วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน
- CEN (1993) – A degradable material in which the degradation results from the action of microorganisms and ultimately materials is converted to water, carbon dioxide and/or methane and a new cell biomass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/ หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

## 2.2 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -Glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่ง ก้าน สาขามากมาย (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป) นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “ Intermediate material ” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน [9] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [10]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$  -1, 4 –Glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.1 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย [11]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส [12]

โดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลงปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [13]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น.น. แห่ง) Apparent	ปริมาณอะไมโลส (% น.น. แห่ง) Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
ถั่วเขียว	37.9	30.7

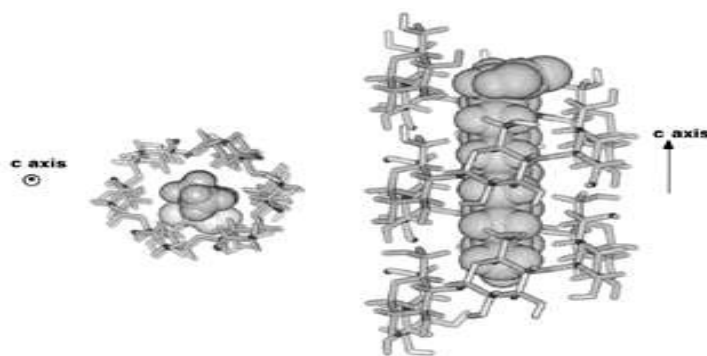
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ [14]

Property	Chestnut	Kuzu	Lily	Maize	Nagaimo yam
Iodine binding capacity (g 100 g <sup>-1</sup> )	19.9	20.0	20.0	20.0	19.9
[h] at 22.5 °C in M KOH (mg l <sup>-1</sup> )	242	228	312	169	
<i>beta</i> -amylolysis limit (%)	86	76	89	84	86
DP <sub>w</sub> (range)	440- 14900	480- 12300	360- 18900	390- 13100	800-20000
DP <sub>w</sub> (mean)	4020	3220	5010	2550	6300
DP <sub>a</sub> (mean)	1690	1540	2310	960	2000
DP <sub>w</sub> /DP <sub>a</sub>	2.38	2.09	2.17	2.66	3.15
CL	375	320	475	305	525
Chain number	4.6	4.8	4.9	3.1	3.8
Unbranched amylose (mol %)	66	47	61	52	71

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น Butanol, Fatty acid, Surfactant, Phenol และ Hydrocarbon (ดังรูปที่ 2.2) สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ [15] อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง (ตารางที่ 2.4) ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์ [16]

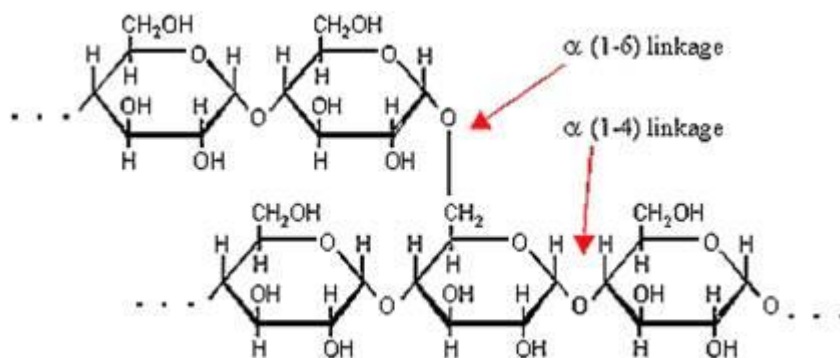
ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [17]

Chain length (glucose unit)	Number of helix turns	Color
12	2	None
12-15>	2	Brown
20-30	3-5	Red
35-40	6-7	Purple
>45	9	Blue

การตรวจสอบปริมาณอะไมโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและวัสดุที่ เกิด ขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น [17]

### 2.2.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ  $\alpha$ -1, 4-Glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ใน ช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6-Glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [18]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1, 6 Glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ 107 ถึง 109 คาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

### ไขมัน (Lipid)

ไขมันที่สกัดได้จากเม็ดแป้งอาจเป็นไขมันที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้งจริงๆ หรืออาจมาจากเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ และมาจับอยู่กับเม็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง แป้งจากเอนโดสเปิร์มของพวกธัญพืชจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีไลปิดเป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (Integral components) ในขณะที่เม็ดแป้งจากมันฝรั่ง เม็ดถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชไม่พบ Integral lipids ไลปิดที่จับอยู่กับเม็ดแป้งนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ไลปิดที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น จากเมมเบรนและสเฟียร์โรโซม ซึ่งจะจับอยู่กับเม็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยไลปิด พวกไตรกรีเซอไรด์ ไดเอซิลไกลโคไลปิด และฟอสโฟไลปิด ระหว่างการเจริญของเมล็ดข้าว จะเกิดการย่อยสลายไลปิดบางส่วนได้กรดไขมัน และโมโนเอซิลกรีเซอไรด์ในขณะสกัดแป้ง แม้ว่าเม็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กรดไขมันและโมโนเอซิลไลปิดเหล่านี้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเม็ดแป้งได้ จึงเรียกไลปิดส่วนนี้ว่า “Starch surface lipids”. [19]

### โปรตีน (Protein)

โปรตีนที่สกัดได้จากเม็ดแป้งก็แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกันคือ เป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิวของเม็ดแป้ง (Surface protein) ซึ่งสกัดออกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ และโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (Integral protein) ซึ่งการสกัดต้องใช้อุณหภูมิใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ มันฝรั่งและมันสำปะหลังมีโปรตีนในปริมาณที่ต่ำ (0.1% w/w หรือ

น้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 0.3-0.5% (w/w) โปรตีนที่อยู่ในแป้งจะเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดกลิ่นรสและการเกิดฟองในแป้ง [19]

### ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืชมักพบในรูปของฟอสโฟลิปิด (Lysophospholipid) ในขณะที่แป้งจากรากและหัวมักมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำและอยู่ในรูปของฟอสเฟต แป้งมันฝรั่งเป็นแป้งจากหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) สูง โดยหมู่ฟอสเฟตทำให้แป้งมีคุณสมบัติเป็น Polyelectrolyte ทำให้เม็ดแป้งกระจายตัวในน้ำและพองตัวได้ดี เนื่องจากโมเลกุลแป้งปลักกันเอง [19]

### เถ้าและสารอนินทรีย์อื่นๆ (Ash & inorganic components)

สารอนินทรีย์อื่นๆ ในแป้ง เช่น  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  และ  $\text{Zn}^+$  พบในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของสารเหล่านี้หาได้จากสิ่งที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิเฉพาะ แป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตในรูปของเกลือที่มีอยู่ในมันฝรั่งเองหรือได้จากกระบวนการล้างน้ำ ปริมาณเถ้าของแป้งมันฝรั่งเท่ากับปริมาณหมู่ฟอสเฟต ปริมาณเถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืชคือปริมาณฟอสโฟลิปิด ปริมาณเถ้าของแป้งที่ใช้ในทางการค้าโดยทั่วไปคือ สารประกอบโลหะของโซเดียม โพตัสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม [19]

### ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity; RH) ของอากาศขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้น 10-20% (w/w) [19]

### 2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ [19]

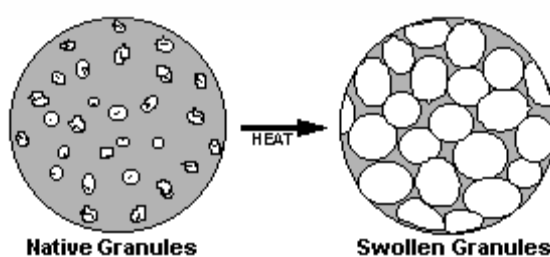
แป้งเป็นพืชในธรรมชาติจะพบในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งแป้งที่ทำ

เพาะปลูก โดยเม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน จะเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวหอนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ [20]

## 2.2.4 สมบัติของแป้ง

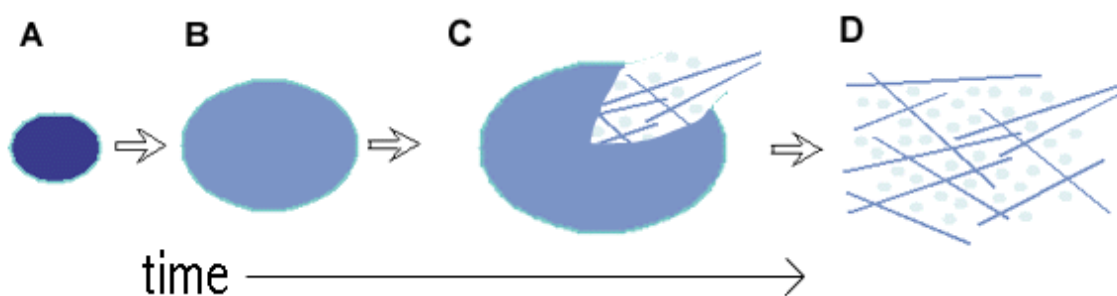
### การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (Intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน Crystallite เริ่มคลาย ความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.4) โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัว ออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น (รูปที่ 2.5) [21]



รูปที่ 2.4 การพองตัวของเม็ดแป้ง [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [21]

## 2.2.5 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

### กลไกการเกิดเจลาตินในเซชัน

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาธิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมี เส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% [22] และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในส่วนที่เป็น Crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 องศาเซลเซียสหรือใช้สารเคมีเช่นให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส แก่แป้งสาธิตจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน Crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาตินในเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน Crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาตินในซีไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาตินในซีได้ก่อนขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

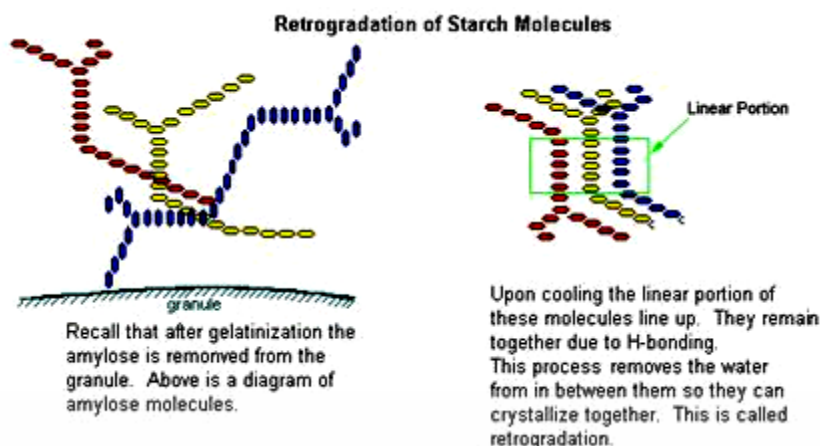
ได้พร้อม ๆ กัน แบ่งอาจเกิดเจลาตินไนซ์ได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยการละลายใน Solvent เช่น Alkali, Liquid ammonia, DMSO, q. CaCl<sub>2</sub> [23]

### ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อ Crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ Double helical region เกิด Break up ของโครงสร้างผลึก Side chain ของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูก Hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด Stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิด Hydration ต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของ โมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ Granule แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย

### 2.2.6 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิต่ำลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกัน ด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 2.6) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจาก ลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้น้ำ แป้ง ถ้า น้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้า น้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม [24]



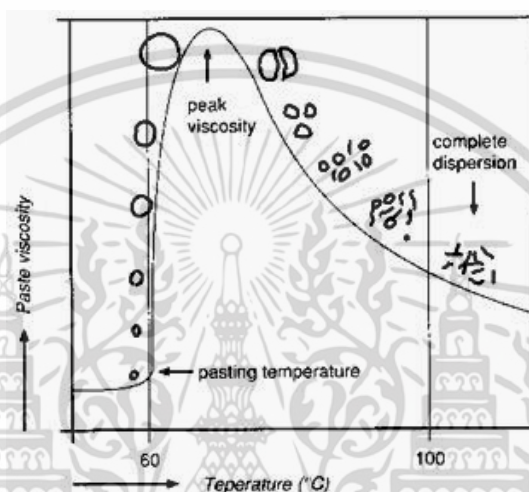
รูปที่ 2.6 การคืนตัวของแป้ง [25]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น Matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะก่ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท Waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสูงด้วยโมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian Movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน [26]

### 2.2.7 ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.7) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้ อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืด

เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting Temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มขึ้นความหนืดจะ เริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [28]

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือ การคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ Shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ชนิดของแป้ง [29]

## 2.3 แป้งมันสำปะหลัง

### 2.3.1 สมบัติโดยทั่วไปของมันสำปะหลัง

ชื่อสามัญ Cassava, Bitter Cassava, Manioc, Sweet Potato Tree, Tapioca plant, Yuca

ชื่อวิทยาศาสตร์ Manihot esculenta (L.) Crantz .

ชื่อภาษาอังกฤษ Tapioca starch, Cassava starch, Monioic starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากหัวของมันสำปะหลังมีแป้งในปริมาณมากแต่มีสารอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ในปริมาณต่ำ จึงเป็นแหล่งแป้งบริสุทธิ์ชั้นเลิศ ที่สามารถสกัดออกมาได้ง่ายและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ได้อย่างหลากหลาย คุณสมบัติที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลังคือ แป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวแป้งเปียกใสและมีความหนืดสูง ด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสะดวกและพร้อมที่จะนำไปใช้ผสมกับสารแต่งกลิ่นรสและสารแต่งสี นอกจากนี้มันสำปะหลัง ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอีกมากมาย เช่น ผงชูรส สารให้ความหวานและแอลกอฮอล์ เป็นต้น

มันสำปะหลัง มีถิ่นกำเนิดในแถบที่ลุ่มเขตร้อน มีหลักฐานแสดงว่ามีการเพาะปลูกกันในประเทศโคลัมเบียและเวเนซุเอลามานานกว่า 3,000-7,000 ปีแล้ว โดยมีการสันนิษฐานว่าแหล่งกำเนิดของมันสำปะหลังน่าจะมาจาก 4 แหล่งด้วยกัน คือ แถบประเทศกัวเตมาลาและเม็กซิโก, ทิศตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้, ทางทิศตะวันออกของประเทศโบลิเวียและทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของอาร์เจนตินา, หรือทางทิศตะวันออกของบราซิล [30]

#### ลักษณะของต้นมันสำปะหลัง

- **ต้นมันสำปะหลัง** จัดเป็นไม้พุ่ม มีลำต้นตั้งตรง เป็นไม้เนื้อแข็งที่มีความสูงของลำต้นประมาณ 1-5 เมตร มีการแตกกิ่ง กิ่งที่แตกจากลำต้นหลักเรียกว่า “กิ่งชุดแรก” ส่วนกิ่งที่แตกจากกิ่งชุดแรกเรียกว่า “กิ่งชุดที่สอง” ต้นมันสำปะหลังจะแตกกิ่งเป็นแบบ 2 กิ่ง หรือ 3 กิ่ง ตามลำต้น จะเห็นรอยก้านใบที่หลุดร่วงไปเรียกว่า “รอยแผลใบ” และในระหว่างแผลใบจะเรียกว่า “ความยาวของซัน” ส่วนที่อยู่เหนือรอยแผลใบมีตา ทุกส่วนของต้นเมื่อนำมาสับจะมีน้ำยางสีขาวไหลออกมา และรากสะสมอาหารเป็นแห่งหนายู่ใต้ดิน มีประมาณ 5-10 รากต่อต้น
- **รากมันสำปะหลัง** (หัวมันสำปะหลัง) ระบบรากเป็นแบบรากฝอย รากจะเกิดจากข้อของลำต้นที่ใช้ปลูกและขยายใหญ่เป็นหัว โดยหัวมันสำปะหลังเมื่อนำมาตัดตามขวางจะมีส่วนประกอบดังนี้ คือ เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นใน และส่วนสะสมแป้งหรือที่เรียกว่าไส้กลาง

#### สรรพคุณของมันสำปะหลัง

1. ส่วนของรากหรือหัวมันสำปะหลังเมื่อนำมาใช้ปรุงเป็นอาหาร จะสามารถช่วยลดคอเลสเตอรอลได้ (ราก)
2. ใบอ่อนนำมาต้มให้สุกใช้รับประทาน ช่วยแก้โรคขาดวิตามินบี1 (ใบ)

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [31]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.0
ไขมัน	0.1
โปรตีน	0.1
เถ้า	0.2
ฟอสฟอรัส	0.01

### 2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โพราไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลสและอะไมโลเพคติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกันแบ่งได้ 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลส บางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอก ของอะไมโลเพคตินและยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สองโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลเพคตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวง่าย [32-33]

### 2.3.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

1. นำมันสำปะหลังสดที่ซื้อเข้าเครื่องชั่งน้ำหนักวัดเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่มีในหัวมัน
2. การทำความสะอาดและจัดเตรียมหัวมัน เริ่มตั้งแต่ นำหัวมันสดเข้าสู่เครื่องร่อนจากนั้นลำเลียงเข้าสู่เครื่องล้าง เพื่อทำความสะอาดหัวมันแล้วจึงนำเข้าสู่เครื่องสับ และชุดเปลือกเพื่อให้หัวมันมีขนาดเล็กลงและแยกเอาเปลือกออกแล้วนำเข้าสู่เครื่องบด
3. เมื่อบดเสร็จแล้ว จะส่งเข้าเครื่องสกัด (Extractor) แยกเอากากและน้ำแป้งออกจากกัน กากน้ำมันนี้จะถูกนำไปตากแดดให้แห้งเพื่อเป็นส่วนประกอบของอาหารสัตว์ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch)

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายมีมากในธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้น มีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ใน Polyolefin ต่อมา มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการบวนการอัดรีดกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายกับ Low density polyethylene โดยทั่วไปเราไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูป Thermoplastic ทั่วไป เพราะแป้งจะไม่เกิดการไหลขึ้น เมื่อเราให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็น Thermoplastic starch จำเป็นต้องเติม Plasticizer เช่น Glycerol, Ethanolamine, Formamide และซอบิทอลลงไป ซึ่งภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียสและได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอจะทำให้แป้งสามารถหลอม และไหลได้สามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ ได้เช่น Single screw extrusion, Twin screw extrusion และ Compression molding [34]

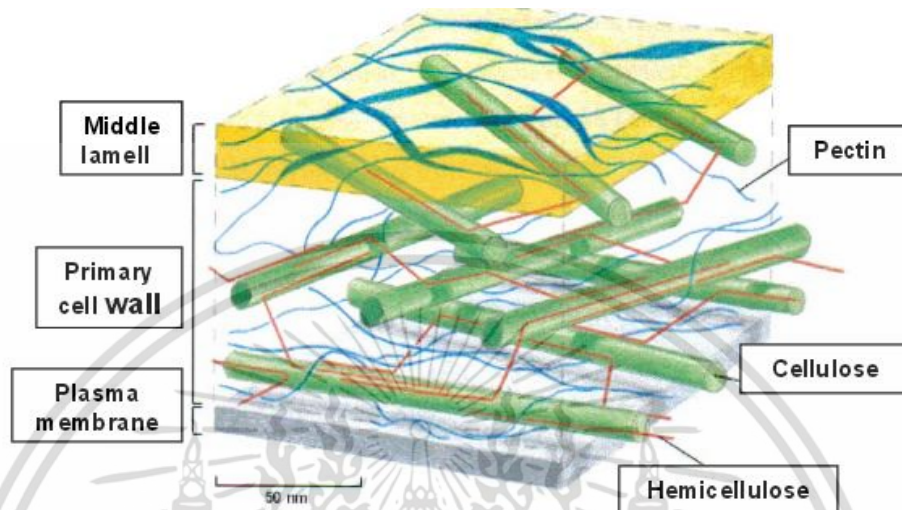
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้ แต่เมื่อเติมสารเติมแต่ง คือ พลาสติกไซเซอร์ ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เป็นอิสระได้มากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ ซึ่งพลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้เรียกว่า Thermoplastic Starch [35]

## 2.4 เพคติน (Pectin)

เพคตินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่พบในพืช จัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับแป้งและเซลลูโลส ค้นพบในศตวรรษที่ 18 ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล ผู้ที่ตั้งชื่อและริเริ่ม ศึกษากรรมวิธีการสกัดเพคติน คือ Braconnot ในปี ค.ศ. 1825 เพคตินมาจากภาษากรีก แปลว่าตัวประสานหรือตัวทำให้แข็ง (Congeal or solidity) ในทางการค้าจะสกัดเพคตินจากเปลือกผลไม้ตระกูลส้ม และกากแอปเปิ้ล การสกัดเพคตินทางการค้าเริ่มขึ้นในศตวรรษที่ 20 และพัฒนาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน สารประกอบเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์ และเป็นสารที่สำคัญในบริเวณชั้น Middle lamella ที่ยึดเหนี่ยวเซลล์เข้าด้วยกัน (ดูรูปที่ 2.8) โดยจับกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และไกลโคโปรตีนของผนังเซลล์พืช โดยเฉพาะบริเวณที่มีเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ต้นอ่อน ใบ และผลไม้ การสกัดเพคตินนั้นจะใช้วิธีการสกัดด้วยกรดแล้วตกตะกอนด้วยเอทิลหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

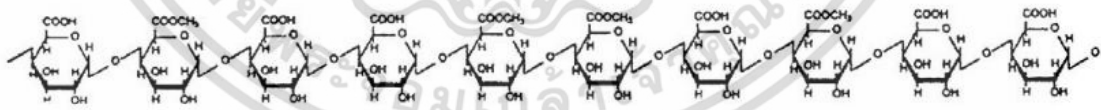
เมทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำให้แห้ง บดให้เป็นผงโดยให้ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 เก็บไว้ในถุงที่สามารถกันความชื้นได้ และควรเก็บรักษาไว้ที่เย็น และแห้งด้วย [36]



รูปที่ 2.8 ชั้นของผนังเซลล์พืชและองค์ประกอบที่สำคัญในแต่ละชั้น [36]

#### 2.4.1 โครงสร้างของเพคติน

เพคตินในทางการค้า มีองค์ประกอบหลักเป็นสารพอลิเมอร์ของหมู่กาแลคทูโรนิกที่ต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha(1-4)$  galacturonic acid ดังรูปที่ 2.9 โดยโมเลกุลของเพคตินประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิกที่เชื่อมต่อกันประมาณ 200-1000 หน่วยส่วนใหญ่เพคตินจะถูกเอสเทอร์ไฟต์ หรือแทนที่ด้วยหมู่เมทอกซิล โดยใช้สารเอทิลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ในการเอสเทอร์ไฟต์ แต่ในทางธรรมชาติเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ที่มีอยู่ในเซลล์พืช หรือเอนไซม์จากเชื้อยีสต์และเชื้อรา

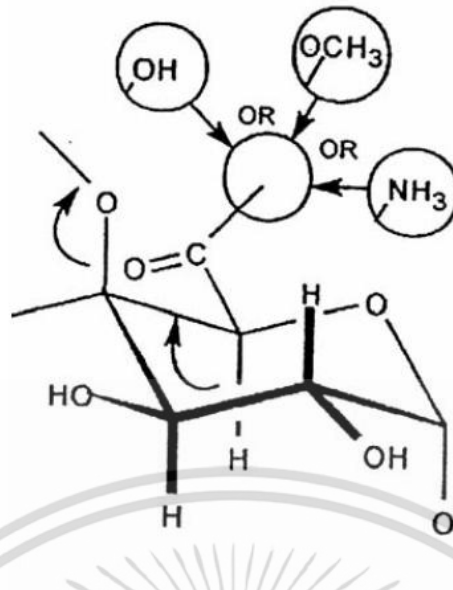


รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของเพคตินโดยมีหมู่ Homogalacturonan มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว [36]

เพคตินทางการค้าจะมีปริมาณหมู่กาแลคทูโรนิกประมาณ 75% โดยมีการแทนที่ด้วยหมู่เอสเทอร์ระหว่าง 30-80% ทั้งนี้ต้องควบคุมการเกิดเอสเทอร์ไฟต์ในเพคติน เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพ และรีโอโลยีตามที่ต้องการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หากหมู่ -OCH<sub>3</sub> ในตำแหน่งที่ C-6 ถูกแทนที่ด้วยหมู่เอไมด์ (-NH<sub>2</sub>) ซึ่งอาจถูกแทนที่ได้สูงสุดถึง 80% เพคตินที่ได้จะเรียกว่าเอมิเตดเพคติน (amidated pectin) ดังรูปที่ 2.10 แสดงตำแหน่งของการเกิดเอสเทอร์ไฟเคชัน และ

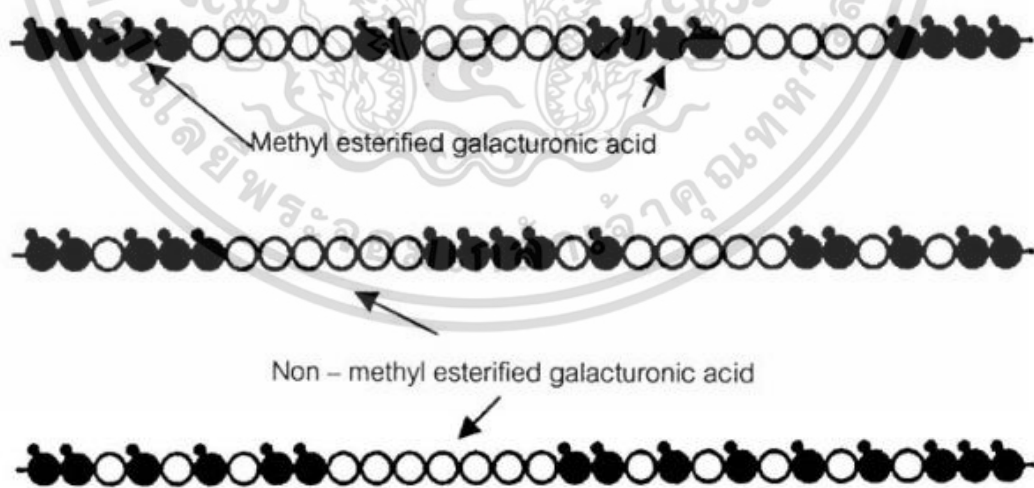
ตำแหน่งของเอไมด์ในโมเลกุลของกรดกาแลคทูโรนิก [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน [36]

ปริมาณการถูกเอสเทอร์ไฟต์ของหมู่กาแลคทูโรนิกในโมเลกุลของเพคตินนั้น เกิดขึ้นได้หลายระดับ ตัวอย่างเช่น เพคตินที่มีค่า DE 50% คือเพคตินที่มีหมู่เมทิลในโมเลกุลของกาแลคทูโรนิกที่เป็นโครงสร้าง 50% ของจำนวนทั้งหมด ดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ยังพบว่า แม้เพคตินที่มีค่า DE เท่ากันแต่อาจมีการจัดเรียงตัวแตกต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการสกัด และเวลาในการเอสเทอร์ไฟต์ชนิดของพืช และตำแหน่งของเซลล์ที่นำมาสกัดจะทำให้เพคตินที่ได้มีคุณสมบัติต่างกัน [36]

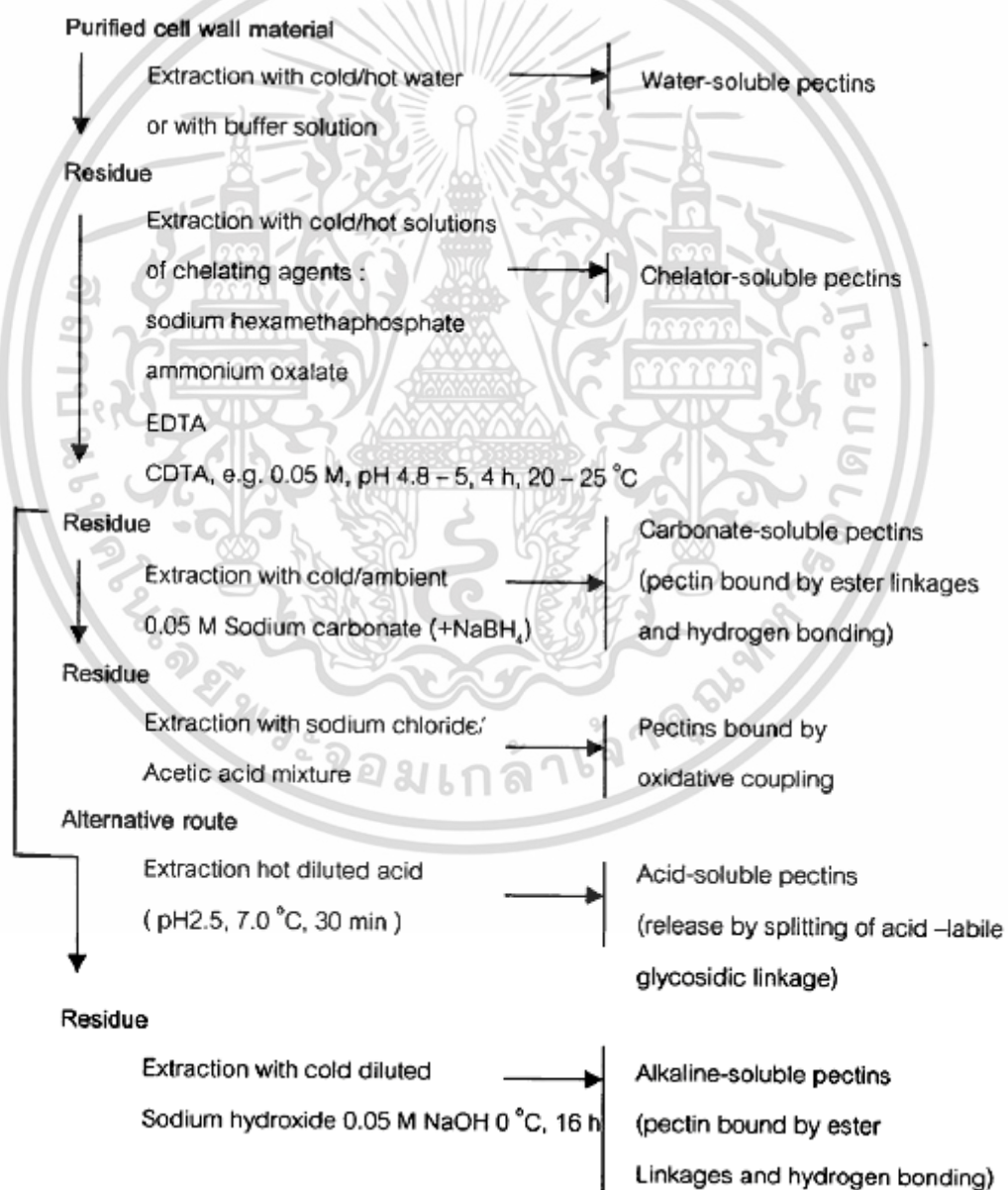


รูปที่ 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลเพคตินในหน่วยย่อย ที่มีค่า DE 50% (โดยให้วงกลมสีดำแทนหมู่กาแลคทูโรนิกที่ถูกเอสเทอร์ไฟต์ และวงกลมสีขาวแทนหมู่กาแลคทูโรนิกที่ไม่ถูกเอสเทอร์ไฟต์) [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 การสกัดเพคติน

ในการสกัดเพคตินสามารถใช้สารในการสกัดได้เพคตินเป็นกลุ่มต่างๆ ดังรูปที่ 2.12 เซลล์พืชที่ผ่านการล้างสิ่งเจือปนออกแล้ว นำมาสกัดด้วยน้ำร้อนหรือเย็น หรือสารละลายบัฟเฟอร์ เรียกเพคติน กลุ่มนี้ว่า เพคตินที่ละลายน้ำได้ (Water soluble pectin) นำกามาสกัดต่อด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (Chelating agents) ที่ร้อนหรือเย็น เช่น Ammonium oxalate, EDTA, Sodium hexamethaphosphate เรียกเพคตินกลุ่มนี้ว่า Chelatorsolublepectins แล้วนำกามาสกัดต่อด้วย 0.05 M Sodium carbonate สกัดที่อุณหภูมิที่เย็นหรืออุณหภูมิห้อง เพคตินที่ได้เรียกว่า Carbonate-soluble pectins จากนั้นนำกามาสกัดต่อด้วย Sodiumchloride หรือ Acetic acid mixture เพคตินที่ได้เรียกว่า Pectins bound by oxidative coupling



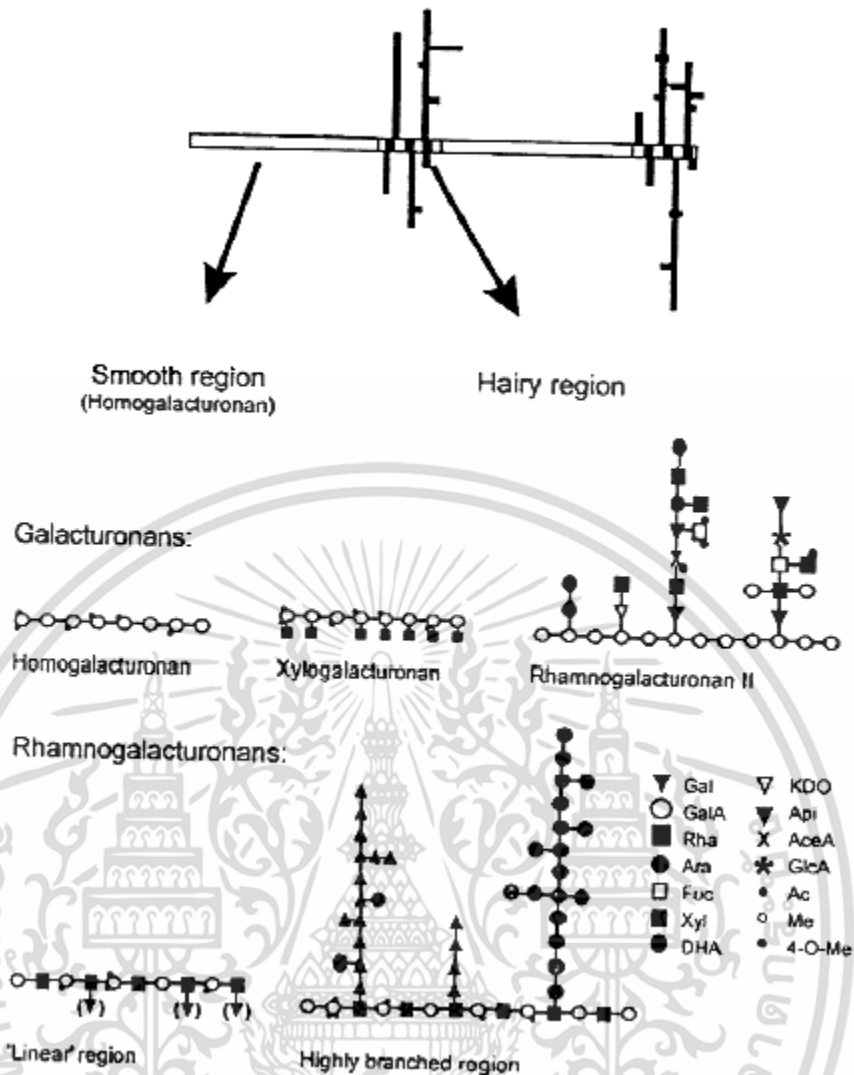
รูปที่ 2.12 ชนิดของเพคตินโดยแบ่งตามสารที่ใช้ในการสกัด [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีทางเลือกในการใช้สารเคมีสกัดเพคติน คือหลังจากการสกัดเพคตินกลุ่มที่ละลายได้ในสารละลาย Chelating agents แล้ว นำกากมาสกัดด้วยกรดที่อุณหภูมิสูง เพคตินที่ได้เรียกว่า Acid-solublepectins จากนั้นนำกากมาสกัดด้วย NaOH ที่อุณหภูมิที่เย็น 0 องศาเซลเซียส เพคตินที่ได้เรียกว่า Alkaline-solublepectins สารประกอบเพคตินนั้นประกอบด้วยน้ำตาลจำนวนมาก แต่ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอนว่าน้ำตาลนั้นเกาะในตำแหน่งใดของโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตามหากสกัดเพคตินจากพืชด้วยความระมัดระวัง มีการควบคุมการทำงานของเอนไซม์ พบว่าเพคตินที่สกัดได้จะมีโครงสร้างแบบ Block structure

โครงสร้างของเพคตินที่สกัดด้วยกรดเจือจางจะมีความแตกต่างกัน คือ 5-10% ของกรดกาแลคทูโรนิกจะประกอบด้วยน้ำตาล เช่น กาแลคโทส กลูโคส แรมโนส อะราบิโนส และไซโลสซึ่งอาจจะเชื่อมกับกาแลคทูโรนิตซึ่งเป็นโครงสร้างสายหลักของเพคติน บางครั้งน้ำตาลแรมโนสอาจเป็นส่วนหนึ่งของ Polysaccharide จำพวก Glucan และ Xyloglucans ซึ่งถ้ามีสารเหล่านี้ในเพคตินเจลที่ได้จะมีคุณภาพไม่ดี

เพคตินที่สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้ม แอปเปิ้ล เชอร์รี่ สตรอเบอร์รี่ แครอท ฟักทอง หัวบีท มันฝรั่ง หัวหอม และกะหล่ำปลีส่วนใหญ่แล้วจะมีส่วนประกอบของน้ำตาลเหมือนกัน (Rolin and De Vries, 1990) น้ำตาลที่พบในเพคตินส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มแรมโนกาแลคทูโรนิก โดยบริเวณที่พบน้ำตาลประเภทนี้มากจะมักถูกเรียกว่า Hairy region ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลกลุ่มแรมโนกาแลคทูโรนิกจะมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เชื่อมต่อกับกรดกาแลคทูโรนิก ดังรูปที่ 2.13 แต่ถ้าเป็นน้ำตาลกาแลคทูโรนิกมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวจะเรียกส่วนนี้ว่า Smooth regions ทั้งนี้ปริมาณของ Smooth regions หรือ Hairy regions นั้นจะขึ้นอยู่กับเพคตินว่าสกัดมาจากส่วนใดของพืช และกรรมวิธีในการสกัดเพคตินด้วย



รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของเพคตินที่ประกอบด้วย Smooth region และ Hairy region [36]

#### 2.4.3 .การแบ่งเพคตินตามค่า Degree of esterification (%DE)

การแบ่งเพคตินตามค่า %DE สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มดังนี้

1. เพคตินกลุ่มที่มีเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin) เป็นสารเพคตินที่มีค่า %DE ไม่ต่ำกว่า 50% ในทางการค้าจะมีค่า %DE อยู่ในช่วง 55-75 การเกิดเจลของเพคตินชนิดนี้จะต้องมีองค์ประกอบที่เหมาะสมคือ มีปริมาณน้ำตาล 55-65% ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 2.9-3.1 ซึ่งเป็นสภาวะปกติที่ใช้ในแฮมทั่วไป (Rolin and De Vries., 1990; Oakenfull, 1991) เพคตินเมทอกซิลสูง สามารถแบ่งตามระยะเวลาของการเกิดเจลได้ 6 ชนิด คือ

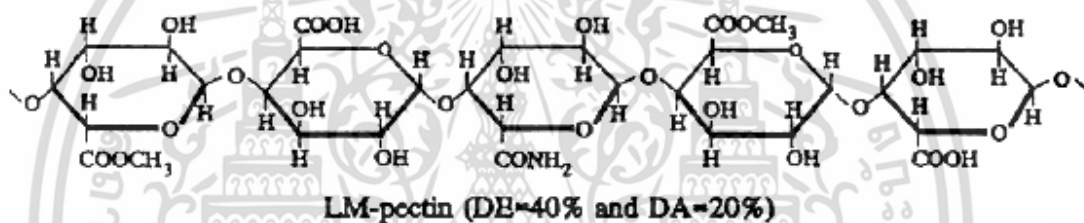
- Ultra rapid set pectin มีค่า DE 82%
- Extra rapid set pectin มีค่า DE 76%
- Rapid set pectin มีค่า DE 72%
- Medium rapid set pectin มีค่า DE 65-69%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Extra slow set pectin มีค่า DE 55-59%

2. เพคตินกลุ่มที่มีเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin) เป็นสารเพคตินที่มีค่า DE ต่ำกว่า 50% ส่วนใหญ่จะมีค่า DE อยู่ในช่วง 20-50% ในทางการค้าจะมีค่า DE อยู่ในช่วง 20-40% เพคตินชนิดนี้สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยต้องมีไอออนของโลหะบางชนิดช่วยในการเกิดเจล เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  โดยใช้ปริมาณน้ำตาลเพียงเล็กน้อย หรือไม่ใช้เลย (Axelos and Thibault, 1991) และสามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเป็นกรด-ต่างระหว่าง 3.0-4.5 ในการผลิตเพคตินกลุ่มนี้จะต้องมีการดีเอสเทอร์ไฟต์ โดยใช้เอทิลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ หรือต่าง ถ้าใช้สารแอมโมเนียมร่วมกับต่างในการดีเอสเทอร์ไฟต์ เพคตินที่ได้เรียกว่า Amidated low methoxyl pectin.

เพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำโดยทั่วไป ได้จากการดีเอสเทอร์ไฟต์โดยใช้เอทิล หรือเมทิลแอลกอฮอล์หรือต่าง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลมาแทนที่หมู่เมทอกซิล ได้เพคตินที่มีค่า DE ต่ำกว่า 50% [36]



รูปที่ 2.14 ลักษณะของโครงสร้างของเพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำ [36]

#### 2.4.4 สมบัติทางเคมีเพคติน

##### 1. การเกิดเจลของเพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลสูง

ในการเกิดเจลของเพคตินได้จะต้องมีปริมาณน้ำตาล และกรดที่เหมาะสมเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่เพคตินจะถูกดึงน้ำออก มีผลทำให้เพคตินมีประจุลบ จึงทำให้ลดแรงระหว่างสายโซ่ (Chain-chain interaction) สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจลนั้นมีหลายปัจจัย ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลสูงๆ พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างจะเพิ่มมากขึ้น โดยน้ำตาลจะมีผลต่ออัตราการเกิดเจล โดยพบว่าหากใช้กลูโคสหรือไซรัปแทนน้ำตาลจะมีผลทำให้ Gel strength ลดลง แต่ต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลเพิ่มมากขึ้น ในการใช้น้ำตาลฟรุกโตสแทนน้ำตาล จะมีผลต่อ Gel strength น้อย แต่จะมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิในการเกิดเจล

## 2. การเกิดเจลของเพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำ

ในการเกิดเจลของเพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำนั้นขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณ  $\text{Ca}^{2+}$  ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของน้ำตาล ปริมาณของเพคติน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเกิดเจล และค่า Gel strength ที่ต้องการ ในการเตรียมเจลมาตรฐานต้องประกอบด้วยความเป็นกรด-ด่าง 3.0 ปริมาณน้ำตาล 30% โดยให้มีเพคติน 1% และสารประกอบแคลเซียม โดยเพคตินชนิดนี้จะไม่สามารถเกิดเจลได้หากมีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอ แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณของแคลเซียม ค่า Gel strength ก็จะมีเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลก็จะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติ และจุดเดือดจะเพิ่มมากขึ้นตาม Gel strength ที่เพิ่มขึ้น [36]

### 2.4.5 สมบัติทางกายภาพของเพคติน

#### 1. สมบัติการละลายของเพคติน

เพคตินสามารถละลายในน้ำเย็น และทำให้เกิดความข้นหนืดได้เช่นเดียวกับกัมส์ชนิดอื่นๆ แต่ผงเพคตินจับกันเป็นก้อนได้ง่ายมีผลทำให้ละลายได้ช้า และยาก เพคตินจะสามารถละลายได้ดีในน้ำอุ่น หรือน้ำที่มีอุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส แล้วทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วจากต่ำไปหาสูงสุด ต้องระวังไม่ให้เพคตินจับกันเป็นก้อนเพราะจะทำให้ละลายได้ยาก อีกวิธีที่ละลายเพคตินได้ดีนั้นจะต้องผสมเพคตินกับน้ำตาลโดยอัตราส่วนของเพคติน 1 ส่วนกับน้ำตาล 5 ส่วน หรือกับสารละลายอื่นๆ เช่น สารละลายน้ำตาล ความเข้มข้น 65% หรือแอลกอฮอล์เพื่อทำให้เพคตินเปียก ถ้าไม่ได้ผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ต้มประมาณ 1 นาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการละลายได้หมด การตรวจดูว่ามีการละลายเกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่ สามารถทำได้โดยการดูฟิล์มของสารละลายบนไม้พาย หรือใบมีดที่สะอาดจะต้องใสไม่มีส่วนคล้ายเม็ดทรายอยู่

#### 2. ความหนืดของเพคติน

ความหนืดของเพคตินนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเพคติน ปริมาณแคลเซียม ปริมาณความเป็นกรด-ด่าง ชนิดของเพคติน และขนาดของมวลโมเลกุล

3. ความเข้มข้นของเพคติน สารละลายเพคตินเจือจางจะให้ไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) ถ้าสารละลายเพคตินมีความเข้มข้นมากกว่า 1% สารละลายเพคตินจะมีคุณสมบัติเป็น Pseudoplastic solution.

4. ความเป็นกรด-ด่าง ถ้าเพิ่มความเป็นกรดต่าง พบว่าความหนืดของสารละลายเพคตินจะเพิ่มขึ้นด้วยถ้าความเป็นกรดต่างลดลงเป็น 2.5-5.5 สารละลายเพคตินจะอยู่ในรูปของ Thixotropic solution สารละลายที่มีประจุ +1 จะลดความหนืดของสารละลายเพคติน เพราะลดแรงดึงดูดระหว่างประจุ

5. มวลโมเลกุล เพคตินที่มีมวลโมเลกุลสูง จะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้นด้วย การหาน้ำหนักโมเลกุลของเพคตินสามารถทำนายได้โดยการหาค่า Intrinsic viscosity ในทางตรงกันข้ามเมื่อเจือจางสารละลาย และไม่มีแคลเซียม สารละลายจะมีความหนืดลดลง การเตรียมสารละลาย

เพคตินให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างกันนั้น สามารถทำได้โดยผสมเพคตินชนิดต่างๆ หรือผสมเพคตินให้มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

6. ปริมาณของ  $\text{Ca}^{2+}$  เพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลสูงไม่ต้องการแคลเซียมในการเกิดเจลแต่เพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล แต่สามารถแบ่งเพคตินออกตามความไวต่อ  $\text{Ca}^{2+}$  ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เกิดเจลได้ช้า เนื่องจากความไวต่อแคลเซียมต่ำ และกลุ่มที่เกิดเจลได้เร็ว มีความไวต่อแคลเซียมสูง กลุ่มหลังนี้หากเพิ่มปริมาณแคลเซียมความหนืดของสารละลายเพคตินก็จะสูงขึ้นด้วย [36]

## 2.5 วัสดุประกอบ (Composite Materials)

การพัฒนาด้านวัสดุประกอบหรือวัสดุผสมทำให้เกิดความหลากหลายในการรวมวัสดุเข้าด้วยกันมากขึ้น อาจอธิบายอย่างง่ายว่า วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส โดยแต่ละเฟสนำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของมันเองเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีมากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้น จากหลักการผสมเหล่านี้ทำให้สามารถรวมสมบัติต่างๆ ที่ดีเข้าด้วยกันโดยการนำวัสดุที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นมา รวมกันและส่งผลให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติหลากหลายมาก

ในการออกแบบวัสดุผสม นักวิทยาศาสตร์ ได้ผสมโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ต่างๆ เพื่อผลิตวัสดุพิเศษใหม่ๆ ออกมา วัสดุผสมส่วนใหญ่ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อปรับปรุงสมบัติและคุณลักษณะทางกลโดยรวมเช่น โมดูลัสความยืดหยุ่น ความแกร่ง ความแข็งแรง เป็นต้น

### ความหมายของวัสดุประกอบ

เป็นวัสดุผสมตั้งแต่ 2 กลุ่มวัสดุหลักขึ้นไป โดยที่วัสดุผสมจะต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นหลัก (Matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจายเรียกเฟสที่กระจายหรือตัวเสริมแรง (Dispersed phase or Reinforcement) แทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลัก

### 2.5.1 ส่วนประกอบของวัสดุประกอบ

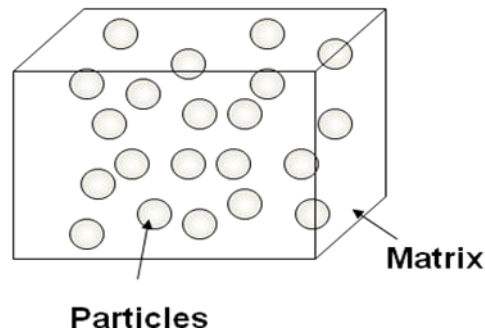
1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) ซึ่งส่วนนี้จะป็นองค์ประกอบหลักเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เมตริกซ์ที่นิยมใช้ คือ พอลิเมอร์ โลหะ ฯลฯ

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) เป็นส่วนที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง ( Discontinuous phase ) ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่นอนุภาคเล็ก ๆ หรือเส้นใยก็ได้วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้ได้แก่ เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

**แบ่งตามลักษณะเสริมแรง ได้ 3 ลักษณะ**

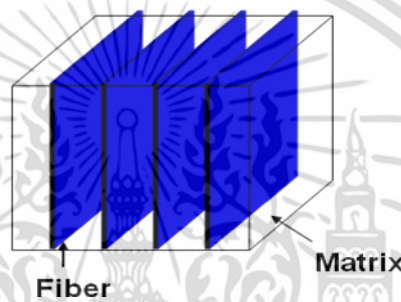
1. Particle-Reinforced Composite เสริมแรงด้วยอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของอนุภาคในเมทริกซ์ [37]

## 2. Fibrous Composite เสริมแรงด้วยเส้นใย



รูปที่ 2.16 การเสริมแรงด้วยเส้นใย [37]

## 3. Other Composite Structures เสริมแรงด้วยโครงสร้าง

วัสดุเสริมสามารถมีได้หลายรูปร่าง และหลายขนาด เช่น



รูปที่ 2.17 รูปร่างของวัสดุเสริมแรง [37]

วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composites)

เป็นการเสริมด้วยวัสดุที่มีค่าสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect ratio,  $L/D$ ) สูง อาจจะเป็นเส้น หรือ แถบ ก็ได้ คุณสมบัติของวัสดุรวมที่ได้ จะขึ้นกับหลายปัจจัย ดังนี้

1. ปริมาณของใยเสริม
2. ตัวประสานระหว่างใยเสริม
3. ชนิดของ Matrix ที่ใช้
4. การกระจายตัวของ วัสดุเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เส้นใย (Fibers)

ตามนิยามแล้ว เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าได้ และต้องเป็นองค์ประกอบที่เล็กที่สุดของผ้า ไม่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก

### 2.6.1 ความหมายของเส้นใย

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่ เป็น เซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่ง โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัว กันเป็นเส้นใยขึ้น [37]

### 2.6.2 ประเภทของเส้นใย

1. เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

1.1 เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จาก ส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น ศรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

1.2 เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้า สัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

1.3 เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้น ใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท

2.1 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่นไม่เป็น อันตรายต่อผิวหนัง สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

2.2 เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมใน

มอนอเมอร์ของ เอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งแรงสูง เป็นเอกลักษณ์ที่ทนต่อการเสียดสีและการขีดข่วนได้ดี เมื่อนำไปใช้เป็นประจำจะเกิดการสึกกร่อน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาหลาม ( $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอนใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

2.3 เส้นใยอะคริลิก เช่น ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านนม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรม เป็นต้น

2.4 เซลลูโลสแอซีเตต เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตต เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอส เรยอง แบลมเบอร์ก เรยอง เป็นต้น

### 2.6.3 สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ

1. มีความแข็งแรง และทนทาน (Strength and durability)
2. สามารถปั่นได้
3. มีความสามารถในการดูดซับดี

โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้นการทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ ได้และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทใดถูกต้องตามความต้องการ ที่จะนำไปใช้งาน [37]

## 2.7 เส้นใยฝ้าย (Cotton fibers)

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Gossypium hirsutum* L.

การจำแนกทางพฤกษศาสตร์

Class Angiospermae

Subclass Dicotyledonae

Family Malvaceae

Genus *Gossypium*

Species *hirsutum*

### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

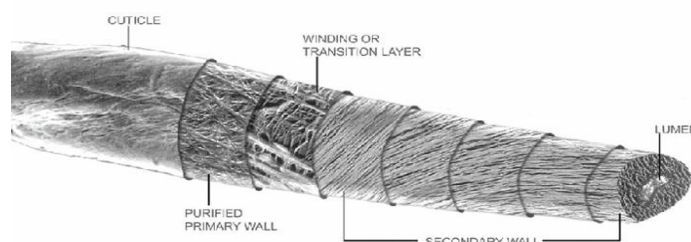
ฝ้ายมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Gossypium* spp. อยู่ในตระกูล Malvaceae มีระบบรากแบบ ร่างแห มีรากแก้วและมีรากแขนงออกรากรากแก้ว

ลำต้น : ประกอบด้วยข้อและปล้อง สูงประมาณ 60–160 ซม. เป็นพืชหลายฤดู แต่มักปลูกเป็นพืช ฤดูเดียว

ใบ : ออกตามข้อของลำต้น ใบมี 3–5 แฉก แผ่นใบบางและมีขนปกคลุม ก้านใบยาวเท่ากับ ความกว้างของใบ

ดอก : ออกในลักษณะสลับบนกิ่ง ดอกกว้างประมาณ 3 นิ้ว มีกลีบเลี้ยงค่อนข้างใหญ่ที่ฐานดอก 3 กลีบ ซึ่งห่อหุ้มดอกอ่อนเอาไว้ กลีบดอกฝ้ายมี 5 กลีบ อาจมีสีขาวหรือสีเหลือง และจะเปลี่ยนเป็นสี ม่วงหลังจากดอกบานได้ประมาณ 2–3 วัน

ผล : ฝ้ายหรือที่เรียกว่าสมอฝ้าย (Ball) มีลักษณะกลมรี ภายในแบ่งออกเป็น 3–5 ส่วน ยาว ประมาณ 4–5 ซม. สมอฝ้ายจะปริออกเมื่อแก่ และดันเมล็ดซึ่งห่อหุ้มด้วยปุยเส้นใยยาว (Lint) และ เส้นใยสั้น (Fuzz fibers) [38]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของเส้นใยฝ้าย [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [39]

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (%)
Cellulose	85-90
Hemicellulose	5.7
Lignin	-
Pectin	0-1
Moisture content	7.85-8.5
Waxes	0.6

### 2.7.1 สมบัติของฝ้าย

เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช คือดอกฝ้าย ส่วนประกอบของเส้นใย คือ เซลลูโลส เส้นใยฝ้ายมีลักษณะคงทน ซึมซับน้ำได้ดี เส้นใยฝ้ายทนต่อสภาวะต่างได้ดี เส้นใยไม่เปื่อยหรือไม่ละลายในต่างที่เข้มข้นและเจือจางทุกชนิด แต่จะละลายในกรดเข้มข้น และเปื่อยลงได้เร็วในกรดอ่อน [40, 41]

## 2.8 เส้นใยนุ่น (Kapok fibers)

### ลักษณะทั่วไป

นุ่นเป็นพืชเส้นใยชนิดหนึ่งเส้นใยที่ได้จากผลหรือฝักมีน้ำหนักรวมเบาอ่อนนุ่มใช้ในอุตสาหกรรมทำเบาะ ที่นอน วัสดุกันกระแทก เป็นฉนวนกันความร้อน ปุยนุ่นไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน จึงใช้เป็นส่วนประกอบของขบวนการเปิดใช้ปูนั่งเรือบรรทุกน้ำมัน ถังน้ำมันเครื่องบิน เสื้อชูชีพ น้ำมันในเมล็ดใช้ผสมน้ำมันพืชเพื่อใช้บริโภค ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น ใช้ทำสบู่ กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันใช้เป็นอาหารสัตว์ ใส่นุ่น แขนนุ่น และลำต้นใช้เพาะเห็ดได้ดี นุ่นมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา

### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

นุ่น (Kapok) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ceiba pentandra* Gaerth. อยู่ในตระกูล Bombaceae

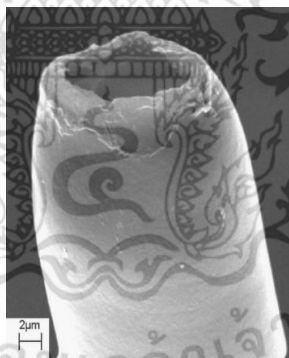
- ลักษณะของลำต้น มีลักษณะสูงใหญ่ ลำต้นกลมผิวเรียบ แตกกิ่งรอบลำต้นมักจะขนานกับพื้นดิน
- ลักษณะของใบมีลักษณะเป็นแฉกประมาณ 5-8 แฉกรูปหอกหยักลึก 6-10 ซม. ใบนุ่นจะร่วงเมื่อนุ่นเริ่มออกดอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะของดอก ดอกออกเป็นกระจุก มีสีขาวหรือขาวปนเหลืองเป็นดอกสมบูรณ์เพศ ดอกบานเต็มที่ขนาดกว้างประมาณ 5 ซม. และยาวประมาณ 5 ซม. กลีบดอกมี 5 กลีบ ดอกนูนจะบานในตอนเย็นและบานถึงตอนเช้าผลหรือฝัก มีความยาวตั้งแต่ 8–50 ซม. หัวท้ายเรียวแหลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5–10 ซม. ผลอ่อนมีสีเขียวเมื่อแก่เต็มที่เปลือกมักจะแตกออกเห็นเส้นใยสีขาวหรือขาวอมเหลืองเมล็ดมีลักษณะกลม สีน้ำตาลหรือดำ [42]

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น [43]

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (%)
Cellulose	53.4
Hemicellulose	29.6
Lignin	20.7
Waxes	5.3
Ash	0.5



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของเส้นใยนุ่น [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1 สมบัติของนุ่น

ปุยนุ่นมีคุณสมบัติอ่อนนุ่มและเบาพิเศษกว่าพืชเส้นใยอื่นๆ คือ ไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน สามารถรับน้ำหนักได้ 30 เท่าตัวในน้ำทะเล จึงใช้ยึดทำเป็นเสื้อชูชีพ ทำให้ผู้สวมลอยตัวอยู่ในน้ำได้ ทางยุทธปัจจัยใช้ทำชนวนระเบิด เพราะมีคุณสมบัติไวไฟเผาไหม้ได้เร็วมาก ทำวัสดุกันกระเทือน ยัดหมอน ที่นอนเครื่องใช้ต่าง ๆ ใส่ในฝักที่ปั่นเอาเมล็ดและปุยนุ่นออกแล้ว ก็เป็นวัสดุที่มีเซลลูโลส สำหรับใช้เพาะเห็ด เปลือกใช้ทำเชื้อเพลิง [45]

## 2.9 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากโดยทำการเติมลงไปเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พลาสติก เช่น Di-iso-octylphthalate (DIOP), Dioctyl phthalate (DOP) เป็นต้น โดยพลาสติไซเซอร์จะเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้แรง Van der Waal ลดลง พลาสติกที่แข็งเปราะ สามารถทำให้อ่อนตัวเหนียวและยืดหยุ่น เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความร้อน เพื่อต้านทานต่อการสึกหรอ และสามารถเติมฟิลเลอร์ (Filler) ปริมาณมากขึ้นได้โดยเติมพลาสติไซเซอร์ พลาสติกที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า Plastic plastisized เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพีวีซี ที่เราใช้กันอยู่ทุกวันนี้ล้วนแต่เป็น พีวีซี พลาสติไซส์ทั้งสิ้นในการเลือกใช้พลาสติไซเซอร์นั้น ควรจะต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์กับตัวพลาสติไซเซอร์ด้วย นอกจากนี้ยังไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องราคา เสถียรภาพ และการคงอยู่ของ พลาสติไซเซอร์ด้วย ซึ่งหมายถึงพลาสติไซเซอร์บางชนิดจะระเหยออกมาเมื่อสัมผัสความร้อน สารเคมี หรือ ตัวทำละลายบางชนิดได้ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอีกหลายชนิดที่ทำหน้าที่พลาสติไซเซอร์ในแข็ง เช่น กลีเซอรอล ยูเรีย พอร์มาไมด์ ซอบิทอล และกลูโคส เป็นต้น

พลาสติไซเซชัน (Plasticization) คือ กระบวนการหรือกรรมวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์นั้นมีการไหลแบบพลาสติก (Plastic Flow)หรือกระบวนการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ซึ่งได้จากการที่เราเติมพลาสติไซเซอร์ลงในสารผสมของพอลิเมอร์ โดยพลาสติไซเซอร์แบ่งได้เป็น พลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) และ พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal Plasticizer) เป็น Copolymerization ที่ได้จากการนำ Monomer ที่มี Homopolymer มา Copolymerize กับ Monomer ซึ่ง Homopolymer ของมันมีค่า

Tg ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีส่วนที่แข็งและอ่อนอยู่รวมกัน ไม่สามารถแยกออกจากกันโดยการสกัดออก (Extraction)

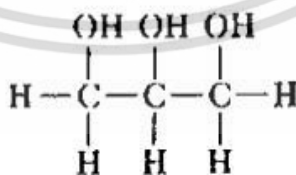
พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External Plasticizer) เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. พลาสติกไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer) เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิผสมกับพอลิเมอร์แล้วจะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี และไม่ซึมออกมาจากพอลิเมอร์

2. พลาสติกไซเซอร์เสริมหรือพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิผสมกับพอลิเมอร์แล้วจะมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกแท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์ด้วย [46]

## 2.10 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอลเป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสมบัติทางเคมีคล้ายแอลกอฮอล์ H ในหมู่ (OH) มีสมบัติเป็นกรดที่อ่อนมากๆ กลีเซอรอลมีสมบัติเป็นของเหลวหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีที่อุณหภูมิปกติ กลีเซอรอลใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางที่ให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวเรียกว่า มอยส์เจอร์ไรเซอร์ โดยส่วนมากกลีเซอรอลจะมาจากผลพลอยได้ในการผลิตสบู่และกรดไขมันโดยมีกรดหรือเบสเจือจางเป็นตัวเร่งหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยา Saponification



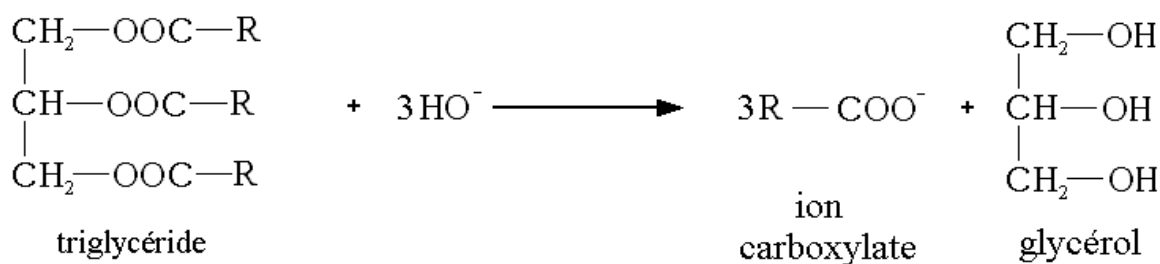
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของกลีเซอรอล [47]

ชื่อทางเคมี IUPAC 1,2,3-Propanetriol ; 1,2,3-Trihydroxypropane

ชื่อเคมีทั่วไป Glycerol, Glycerine

สูตรโมเลกุล  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยา Saponification [48]

สรุปหน้าที่สำคัญของพลาสติกไซเซออร์ ได้แก่

1. ลดความหนืด ทำตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่นลดแรง Van der waals ระหว่างโซ่พอลิเมอร์ แต่แตกต่างจากตัวทำละลาย ตรงที่ว่าต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์พลาสติกและยางระหว่างการใช้งาน

2. ต้องทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวให้ดัดโค้งง่าย โดยลดค่า Tg ของพอลิเมอร์ทำให้สภาพดัดโค้งหยุ่นตัวเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นทำให้การต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ลดลงแต่ความยาว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น รวมทั้งสมบัติความแข็งแรงกระแทกดีขึ้นด้วย [49]

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี [50]

คุณสมบัติ	ลักษณะ
สถานะ	ของเหลว
สี	ใสคล้ายน้ำมัน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	92.90
จุดเดือด	290
จุดหลอมเหลว (°C)	18
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	1.26
ความหนืด (mPa.sec)	1400
ความดันไอ (มม.ปรอท)	0.0025
ความหนาแน่นไอสัมพัทธ์ (อากาศ = 1)	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 สารหล่อลื่น ( Lubricant )

Magnesium stearate อาจเรียกว่า Octadecanoic acid หรือเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) มีลักษณะเป็นผงสีขาวเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรทางเคมีคือ  $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$  ซึ่งเป็นเกลือของกรดสเตียริก (Stearic acid) กับแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) แมกนีเซียมสเตียเรต มีจุดหลอมเหลวที่ 88.5 องศาเซลเซียส ละลายในน้ำได้น้อยมาก ที่ได้รับการพิจารณาโดย FDA's Subcommittee ว่าปลอดภัยสำหรับมนุษย์ จึงจัดเป็นสารในกลุ่ม GRAS (Generally recognized as safe) ปริมาณการบริโภค ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน [51]

### 2.11.1 สารหล่อลื่น สามารถแบ่งตามหน้าที่ได้ 3 ประเภท

1. น้ำมันหล่อลื่นที่แท้จริง (True lubricants)
    - มีหน้าที่ ลดแรงเสียดทานระหว่างตัวพอลิเมอร์กับผนังแม่พิมพ์หรือผนังโลหะลดการสึกหรอที่ผนังโลหะหรือส่วนของดายระหว่างฉีดขึ้นรูป (Dies)
  2. หน้าที่ป้องกันการเหนียวติด
    - ป้องกันการเกิด Punch faces หรือเป็นสารหล่อลื่น โดยมันจะไปป้องกันการเหนียวติดระหว่างผนังของเครื่องกับชิ้นงาน ขณะปลดชิ้นงาน
  3. หน้าที่ลดแรงเสียดทาน (Glidant)
    - เพิ่มความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์โดยการลดแรงเสียดทานภายใน
- สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ดี**
- ความแข็งแรงเฉือนต่ำ ลดแรงเสียดทานระหว่างสารผสมกับเครื่องผสม
  - สร้างชั้นเคลือบพื้นผิวที่คงทน ไม่หลุดลอกง่ายระหว่างผสม
  - ไม่อันตราย
  - เป็นสารเคมีเฉื่อย
  - ไม่มีผลต่อตัวแปรในกระบวนการ

น้ำมันหล่อลื่นมี 2 ประเภทหลักๆ คือ

Hydrophilic เป็นสารหล่อลื่นที่ไม่ดี ซึ่งชอบน้ำ ทำให้ไม่มีสมบัติป้องกันการยึดติดและลดแรงเสียดทาน Hydrophobic สารหล่อลื่นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ สารหล่อลื่นที่ไม่ชอบน้ำ เป็นสารหล่อลื่นที่ดีโดยทั่วไปและมักจะมีประสิทธิภาพในระดับความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติต้านแรงเสียดทานและ ป้องกันการยึดติด ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงมีการใช้มากขึ้นกว่าสารหล่อลื่นที่ชอบน้ำ [51]

ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแมกนิเซียมสเตียเรต [51]

ลักษณะ	ปริมาณ
สูตรโมเลกุล	$Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$
มวลโมเลกุล	591.27 g/mol
ทางกายภาพ	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	1.026 g/cm <sup>3</sup>
กลิ่น	กลิ่นเบาบาง
การละลายในน้ำ	0.003 g/100 mL (15 °C) 0.004 g/100 mL (25 °C) 0.008 g/100 mL (50 °C)
ความสามารถในการละลาย	ไม่สามารถละลายในอีเทอร์และแอลกอฮอล์ ละลายในเบนซีนเล็กน้อย
จุดหลอมเหลว	88.5 °C (191.3 °F; 361.6 K)

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปณิตดา พวงเกษม [52] ศึกษาฟิล์มบริโกลที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังและทดสอบสมบัติพบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ที่มีสมบัติที่เหมาะสมนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากการเตรียมน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไซเซอร์ แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร มีค่าการต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร การดึงยืดร้อยละ 10.13 ค่าการซึมผ่านของออกซิเจน 6 มิลลิเมตรต่อตารางเมตร สามารถต้านทานน้ำมันได้ 120 วัน ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ [53] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง (TPS) โดยนำแป้งและกลีเซอรอลผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิคการอัดเข้าแม่พิมพ์ ในการทดลองได้ใช้แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ผสมกับกลีเซอรอลที่อัตราส่วนกลีเซอรอล 15%, 20%, 25% และ 30% w/w รวมถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS ด้วยการเติมผงแคลบ 1% และ 3% w/w ผลการทดลองพบว่า TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล 15% w/w มีค่า Tensile strength มากที่สุด และการเติมผงแคลบขนาด 0.038-0.015 มม. ปริมาณ 1% w/w ทำให้ TPS มี Tensile strength และ Impact strength สูงขึ้น

**เกศศิณี ตระกูลทิวากร และคณะ [54]** ผลิตแป้งฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง คือ นำแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ผสมกับกลีเซอรอล หรือกลีเซอรอล โมโนสเตียเรต ร้อยละ 0.2, 5 และ 10 โดยใช้เครื่องอัดรีดในการผสม จากการปรับปรุงด้วยปริมาณ กลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะเรียบขึ้น แต่ทนทานต่อการกระแทกเมื่อพับลดลง การผสมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ในปริมาณต่างกัน ไม่ส่งผลต่อความ เรียบของฟิล์ม และจากการผสมแป้งกับกลีเซอรอล มีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นพอใช้ และฟิล์มจากแป้งข้าว เจ้ายังมีความเปราะบางกว่าฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง

**ภูริสา ทศวิล และคณะ [55]** ศึกษาสมบัติของฟิล์มประกอบของแป้งข้าวเจ้าและเพคติน ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3) พบว่า ฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้ามีการต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีการดึงยืดที่สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.58 MPa และ ร้อยละ 45.40 ตามลำดับ และฟิล์มที่ปรับปรุงด้วย เพคตินทั้ง 3 ความเข้มข้นมีการต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของเพคตินที่มากขึ้น โดยมี ค่าระหว่าง 10.25 – 38.56 MPa ส่วนการดึงยืดของฟิล์ม ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติและการซึม ผ่านของไอน้ำและการละลายน้ำของฟิล์มประกอบลดลง เมื่อความเข้มข้นของเพคตินเพิ่มสูงขึ้น และ ฟิล์มประกอบจากแป้งข้าวเจ้าผสมเพคติน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีการซึมผ่านของไอน้ำและการ ละลายน้ำของฟิล์มต่ำที่สุดเท่ากับ 59.2 กรัมต่อตารางเมตร และร้อยละ 40.77 ตามลำดับ

**ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ และคณะ [4]** ศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วยด้วยเพคตินและเส้นใย ฝ้าย โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ เมื่อใส่สารละลายเพคตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้ฟิล์มแป้งกล้วยมี ความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่วนสมบัติการดูดซับน้ำฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพคติน 50% มีการดูดซับน้ำมาก ที่สุด สำหรับสัณฐานวิทยา พบว่ามีความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกล้วยกับสารละลายเพคติน และจาก การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า การปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ส่งผลให้พีคที่ตำแหน่ง O-H stretching เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง นอกจากนี้สำหรับสมบัติด้านการซึมผ่าน ของไอน้ำพบว่า ฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเพคติน 50% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงสุด และจากการศึกษา

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มแบ่งกล้วยพบว่า เมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น ส่วนสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าฟิล์มจากแบ่งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10% มีแนวโน้มย่อยสลายช้าที่สุด

**วรวรรณ พัฒนสิน [5]** ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษาโครงผลึกเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย พบว่า มีแนวโน้มความเป็นผลึกมากขึ้น แต่การเติมไคโตซานและเส้นใยฝ้ายพบว่า ให้การดูดความชื้นน้อยลง สำหรับสัณฐานวิทยา พบว่า เพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้ายไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ TPS แต่มีการกระจายตัวที่ดี จากสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเติมเพคตินกับเส้นใยฝ้าย ให้ความแข็งแรงมากกว่า ไคโตซานกับเส้นใยฝ้าย การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน เพคติน และเส้นใยฝ้าย ทุกสูตรให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าสูตรที่มีเพคตินผสมสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าสูตรที่มีไคโตซานผสม

**M. L. Fishman และคณะ [56]** ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่รับประทานได้และย่อยสลายได้จากแป้งผสมเพคตินโดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในการทดลองผสมเพคตินและเม็ดแป้งที่มีอะไมโลสสูง และกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ โดยทำการขึ้นรูปเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลทางความร้อนด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) ซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำในระหว่างการอัดรีดซึ่งใช้ในการควบคุมการเกิดเจลาทีไนซ์ของแป้งได้ และข้อมูลจากเทคนิค DMTA พบว่าปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอัดรีด ส่งผลถึงการเกิดเจลาทีไนซ์ของแป้ง ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งผสมเพคติน และพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีค่า  $-50$  องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิห้อง ฟิล์มสามารถดึงยึดได้

**Y. Lu และคณะ [57]** ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลคอมโพสิตจากแป้งข้าวสาลีที่ผสมเส้นใยป่าน โดยใช้ความยาว  $538.0 \pm 125.3$  นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $85.4 \pm 25.3$  นาโนเมตร เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยใช้ปริมาณเส้นใยที่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยมากขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่ด้านบนเมทริกซ์ของแป้ง อีกทั้งเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น ทำให้คอมโพสิตมีการดูดซับความชื้นได้น้อยลง จึงกล่าวได้ว่าการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้เส้นใยป่านทำให้โครงสร้างของคอมโพสิตมีลักษณะเป็นโครงร่างสามมิติ และมีแรงกระทำระหว่างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้ง

L. Dobircan และคณะ [58] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวสาลีที่มีโปรตีนสูง เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายความยาวระดับนาโนเมตรถึงมิลลิเมตร โดยทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ปริมาณเส้นใยฝ้ายที่ใช้ คือ 0, 5, 7, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมก่อนทำการอัดรีดด้วยเครื่องรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเส้นใยมากขึ้นทำให้ค่าการดึงยึดได้น้อยลง และที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (Flax) พบว่าแนวโน้มของสมบัติเชิงกลเป็นไปในแนวเดียวกันแต่ค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยึดสูงกว่าการใช้เส้นใยฝ้าย ที่ขึ้นรูปโดยใช้สภาวะการอัดรีดที่อุณหภูมิและความดันต่างกัน และภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวที่ดี ของเส้นใยบนเมทริกซ์ แต่เมื่อใส่เส้นใยที่มากเกินไป พบว่าเส้นใยเริ่มจับตัวเป็นก้อน จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยลงไปไม่ได้ผลต่อความเป็นผลึกของคอมโพสิตที่ได้ สำหรับสมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าการเติมเส้นใยไม่ส่งผลให้สมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลง

Prachayawarakorn และคณะ [6] ผลของเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยงุ่นที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยอัตราส่วนต่อน้ำหนักที่ใช้ระหว่างแป้งกับกลีเซอรอล คือ 65:35 แล้วนำไปขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูป (Compression molding) เป็นคอมโพสิต และศึกษาสมบัติต่าง การศึกษาหุ้่งกั้ชั้นพบว่า เกิดการย้ายตำแหน่งของเลขคลื่นลดลง แสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจน การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งเส้นใยงุ่นและเส้นใยปอแก้ว การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำพบว่า ดูดซับน้ำได้ลดลงเมื่อเทียบกับไม่ได้เติมเส้นใย แต่เส้นใยงุ่นดูดซับน้ำได้มากกว่าเส้นใยปอกระเจา และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยงุ่นทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง

A, Ishak. และคณะ [59] การศึกษาประสิทธิภาพและการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพของแป้งมันสำปะหลังด้วยเส้นใยปอแก้วที่ผ่านการดัดแปรต่างชนิดกัน เส้นใยปอแก้วที่ผ่านการดัดแปรด้วย

สารละลายอัลคาไลน์แล้วนำไปทำไฮโดรไลซิสด้วยกรด มาเตรียมขึ้นรูปโดยผสมกับแป้งมันสำปะหลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีเทหล่อ (Casting Solution) โดยใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยทำการศึกษาผลของสารตัวเติม ที่เป็นตัวเสริมแรงอย่างเส้นใยปอแก้ว ในปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพบว่าที่ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ทำให้เพิ่มค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้เติมเส้นใย แต่ที่ 6% พบว่าให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่ดีที่สุด คือ 8.6 MPa ซึ่งแสดงถึงการส่งผ่านแรงได้ดี และมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย โดยผลสัมพันธ์กับค่า L/D ratio ที่สูง และประสิทธิภาพของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นใยปอแก้ว มีความเข้ากันได้กับแป้งมันสำปะหลัง และประพฤติตัวเป็นส่วนเสริมแรงที่ดีบนเมทริกซ์ที่เป็นแป้ง และพบว่าเส้นใยปอแก้วมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นหลังจากการตัดแปรร ซึ่งพิจารณาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

C.M.O. Muller และคณะ [60] ได้ศึกษาผลกระทบของเส้นใยเซลลูโลสที่มีต่อฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยที่มีความยาว 1.2 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ใช้ปริมาณเส้นใย 0.1, 0.3 และ 0.5 ต่อแป้ง 1 กรัม กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อยับยั้งการคืนรูปของแป้ง และใส่แก้วร้อมเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของเส้นใย ผลการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดี ในแป้งมันสำปะหลังและผลกระทบของเส้นใยฝ้ายที่มีผลต่อสมบัติฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง คือ ช่วง 2-3 นาที่ขึ้นไป ความชื้นสัมพัทธ์ 0-33, 33-64 และ 64-90 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การละลายน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 64-90 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การละลายน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 33-64 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด ค่าการซึมผ่านน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนผสมเส้นใยที่ความชื้นสัมพัทธ์ 64-90 เปอร์เซ็นต์มีค่าสูงสุด และปริมาณเส้นใย 50% มีค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การดิ่งยัดต่ำสุด และมีความอดุลสูงสุด

E.D. Teixeira. และคณะ [61] ได้ศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยนาโนไฟบริลจากเซลลูโลสมันสำปะหลัง (Cellulose Cassava Bagasse Nanofibrils, CBN) โครงสร้างสัญญาณวิทยาของอนุภาคนาโนที่ได้นั้นสามารถตรวจสอบได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) Atomic Force Microscopy (AFM) ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น น้ำตาล สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Thermogravimetric Analysis (TGA) และ X-ray Diffraction (XRD) ผลจากการทดลองแสดงถึงลักษณะทางกายภาพของนาโนไฟบริล พบว่ามีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำและมีความหนา 2-11 นาโนเมตร ความยาว 360-1700 นาโนเมตร นาโน

ไฟบริลนี้ถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงในพลาสติกไซเซอร์ และการรวมตัวกันของ CBN ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาบิลซ่งผลให้สมบัติความชอบน้ำลดลง โดยเฉพาะเทอร์โมพลาสติกสตาบิลซ่งที่ใช้  
กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมี

1. แปะมันสำปะหลัง ตราปลามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น องค์กรประกอบทางเคมีของแปะมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแปะมันสำปะหลัง [31]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.0
ไขมัน	0.1
โปรตีน	0.1
เถ้า	0.2
ฟอสฟอรัส	0.01

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3. เพคตินชนิดผง (Food grade) จาก บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด โดยมีองค์ประกอบดัง

ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเพคติน [62]

รายละเอียด	ผลวิเคราะห์
Stability Index units	141
Degree of Esterification (%)	72
Loss on drying (%)	8
pH in a 1% solution units	3.6
Particle size on 60 mesh (250 micron) (%)	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เส้นใยฝ้าย

5. เส้นใยนุ่น

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น

ชนิดของเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ( $\mu\text{m}$ )	ความยาว (L) (mm)	L/D ratio
เส้นใยฝ้าย	18.34 $\pm$ 1.62	2.06 $\pm$ 0.24	112/1
	15.14 $\pm$ 2.90	5.08 $\pm$ .25	335/1
เส้นใยนุ่น	21.75 $\pm$ 4.50	2.08 $\pm$ 0.22	95/1
	25.16 $\pm$ 4.24	5.21 $\pm$ 0.32	207/1

6. แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) เกรดการค้า จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) BRABENDER รุ่น MX500-D75L90, CHAREON
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP 20
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) LEO รุ่น JSM-5410 LV; JEOL
4. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น PYRIS Diamond, PERKINELMER
5. เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine) LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K
6. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) รุ่น SPECTRUM GX, PERKIN ELMER
7. เครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม (4 ตำแหน่ง)
8. ถังมือกันความร้อน
9. เกรียง
10. ตู้อบ
11. เวอร์เนีย
12. ไมโครมิเตอร์
13. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS)

1. ชั่งน้ำหนักแป้งและกลีเซอรอลในอัตราส่วน 65 : 35 คือ สูตรที่มีการขึ้นรูปเหมาะสมที่สุด นำมาผสมในภาชนะให้เข้ากัน [5]
2. เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง หลังจากนั้น นำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกต ลักษณะทางกายภาพของของผสม

#### ตอนที่ 2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS)

1. นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้ววางแผ่นใสพร้อมทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) บนแม่พิมพ์
2. ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำแม่พิมพ์ไปใส่เครื่องอัดขึ้นรูป และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที และใช้แมกนีเซียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น 2% โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง
3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่อไป

#### ตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ

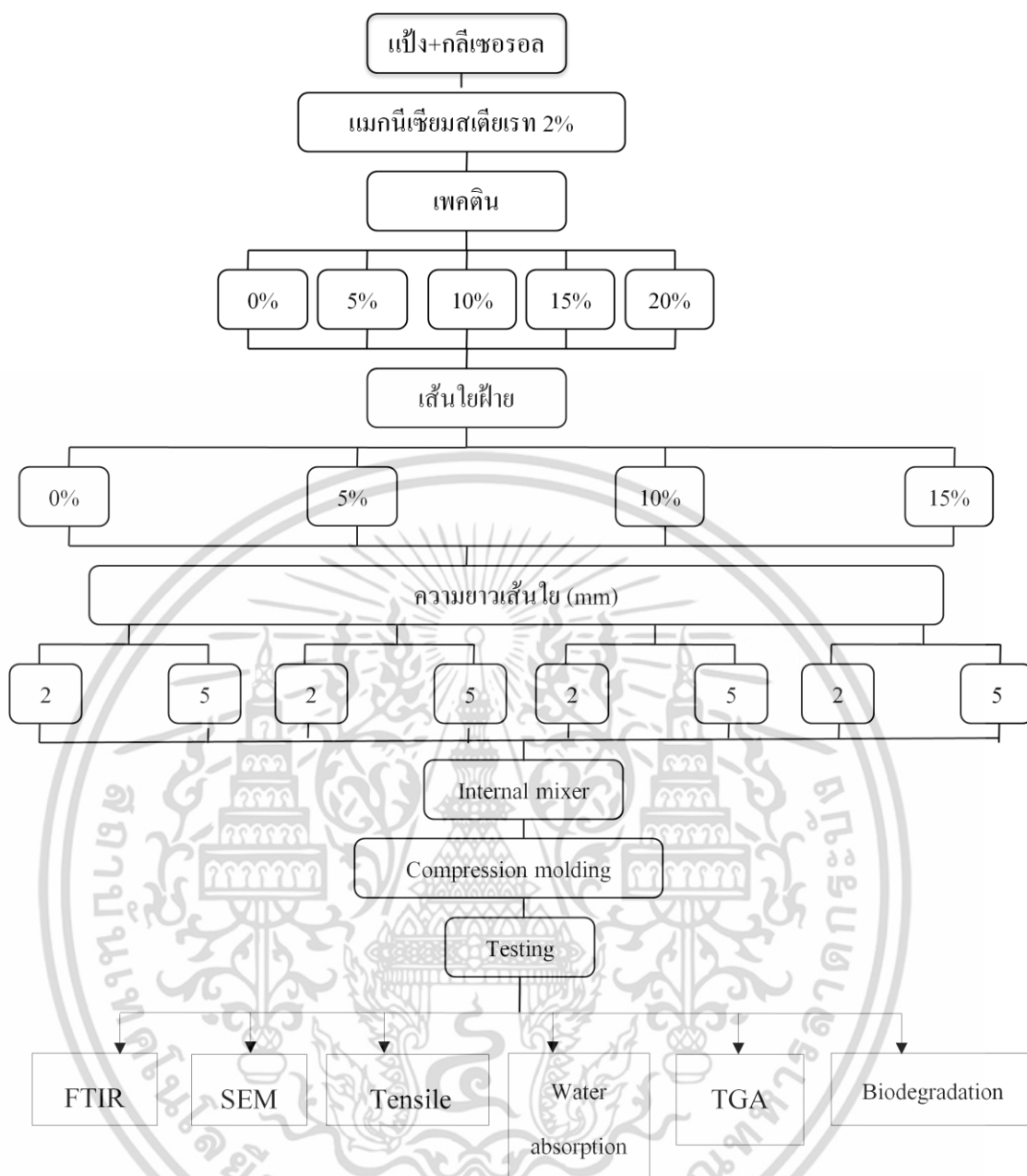
1. ปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่เตรียมได้ในตอนที่ 1 มาปรับปรุงด้วยเพคติน 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก เลือกสูตรที่เหมาะสม มาปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของความยาวเส้นใย 2 และ 5 มิลลิเมตร
2. จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ต่อไป

**ตอนที่ 4** การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินและเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

1. ปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่เตรียมได้ในตอนที่ 1 มาปรับปรุงด้วยเพคติน 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก เลือกสูตรที่เหมาะสม มาปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของความยาวเส้นใยที่ 2 และ 5 มิลลิเมตร
2. จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ต่อไป

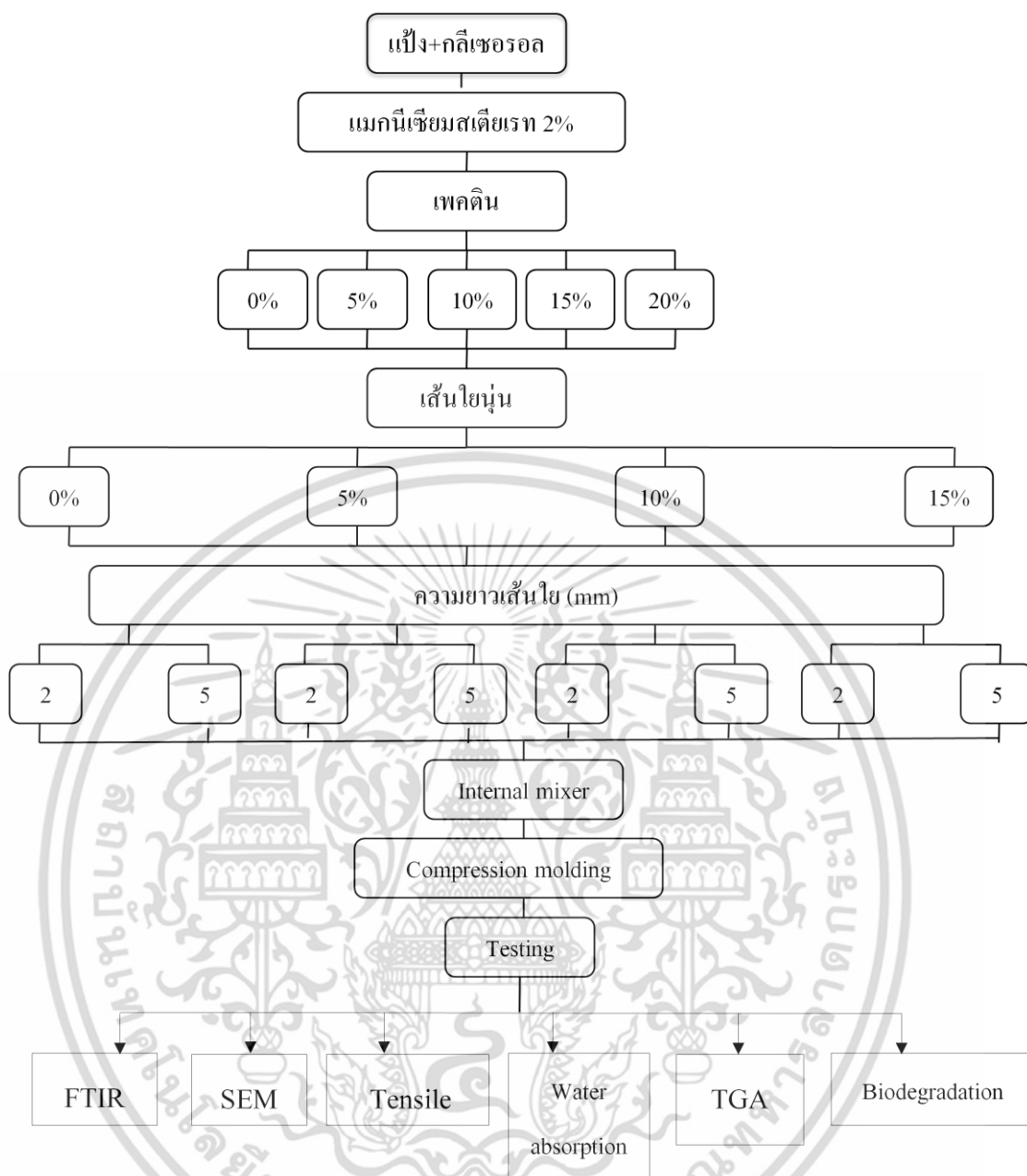


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Infrared Spectroscopy)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำพอลิเมอร์ผสมไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^{-4}$  kg/cm<sup>2</sup> นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของพอลิเมอร์

#### 3.4.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 นำพอลิเมอร์ผสมตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปขึ้นงานวางในภาชนะปิดโดยอิมมิดีในบรรยากาศความชื้นสัมพัทธ์ 100% RH เป็นเวลา 30 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W_a(\%) = (W_e - W_0) / W_0 \times 100$$

เมื่อ  $W_a$  คือ เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมหลังการดูดซับน้ำ

$W_0$  คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมก่อนการดูดซับน้ำ

#### 3.4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

##### 1 เครื่องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

ใช้ในการหา Aspect ratio ของเส้นใยแต่ละชนิด โดยนำเส้นใยที่ตัดได้มาส่องเพื่อหาความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใย โดยทำการวัดทั้งสิ้น 30 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดของเส้นใย

##### 2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษถึงการกระจาย

ตัวของเส้นใยในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และรอยต่อระหว่างภูมิภาคของเส้นใยและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เตรียมได้ [63]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความเค้นที่จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Elongation at maximum load)	ASTM D 638	mm
ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

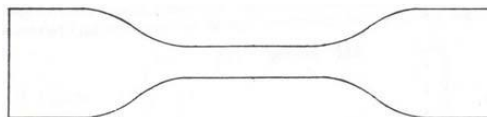
ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล(Universal testing machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม NEXYGEN ซึ่ในงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 15 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 1 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [63]

ค่าความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความเค้น (Stress)} = F/A$$

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Strain)} = [(L-L_0)/L_0] * 100$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

#### 3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA)

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (Maximum degradation temperature) ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ที่ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม Derivative thermogram ได้เป็น DTG

### 3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation)

นำชิ้นงานรูปดัมเบลล์มาฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% ทำการฝังดินทั้งสิ้นเป็นระยะเวลา 2-4 สัปดาห์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ฝังดินไปทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการย่อยสลายของชิ้นงาน [64]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยงุ่นในปริมาณต่าง ๆ โดย L/D ratio แตกต่างกัน (ภาคผนวก ก) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกลหุ้มฟังก์ชัน สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายโดยการฝังดิน สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูตรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1 จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูตรต่าง ๆ

สัญลักษณ์	คำอธิบายสัญลักษณ์
TPCS	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุง
TPCS5P	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 5% โดยน้ำหนัก
TPCS10P	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% โดยน้ำหนัก
TPCS15P	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 15% โดยน้ำหนัก
TPCS20P	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก
TPCS20P5C-2	เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร

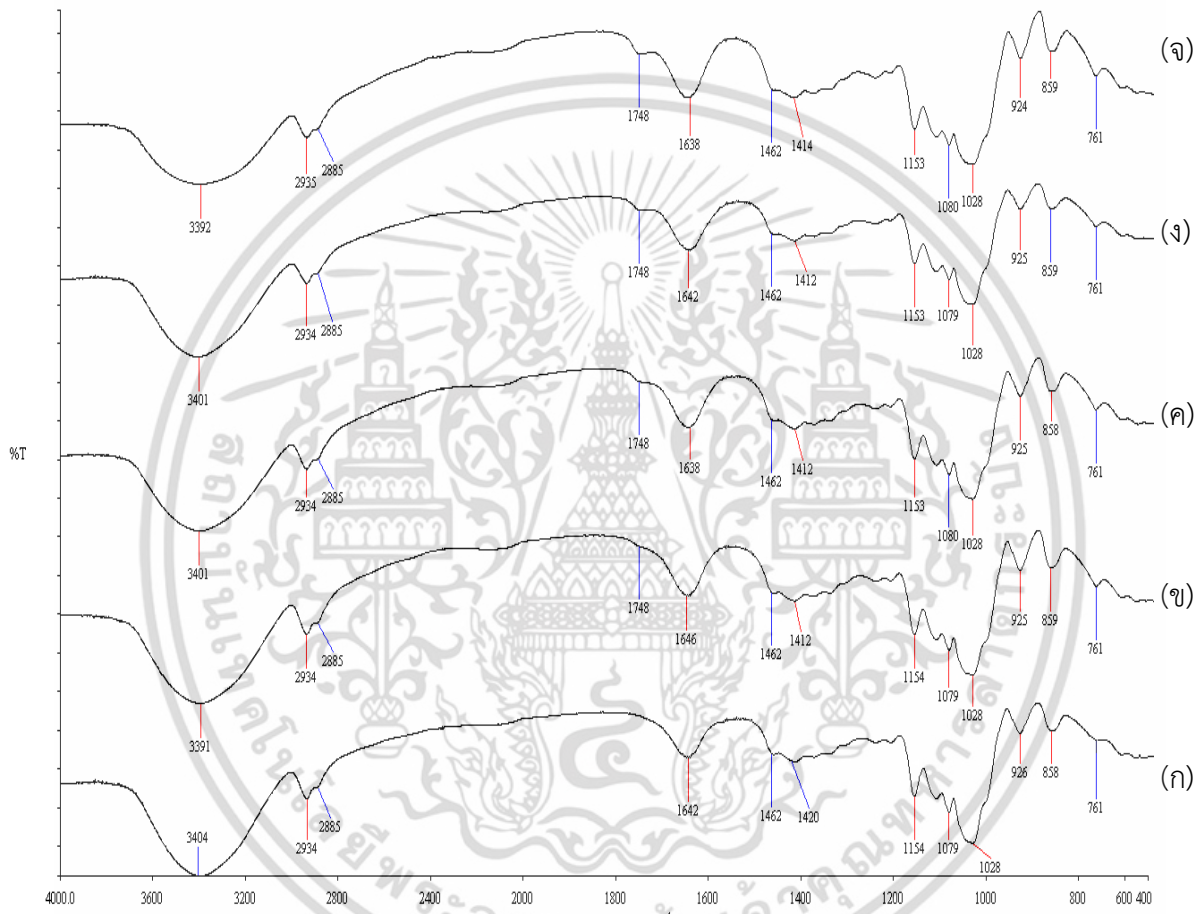
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	คำอธิบายสัญลักษณ์
TPCS20P10C-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS20P15C-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS20P15C-5	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนักความยาว 5 มิลลิเมตร
TPCS20P5K-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น 5% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS20P10K-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น 10% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS20P15K-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS20P15K-5	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20 % โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนักความยาว 5 มิลลิเมตร
TPCS15C-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร
TPCS15K-2	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนักความยาว 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังทำได้โดยใช้เครื่อง FT-IR (Fourier transforms infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินปริมาณต่าง ๆ (ก) TPCS (ข) TPCS5P (ค) TPCS10P (ง) TPCS15P และ (จ) TPCS20P

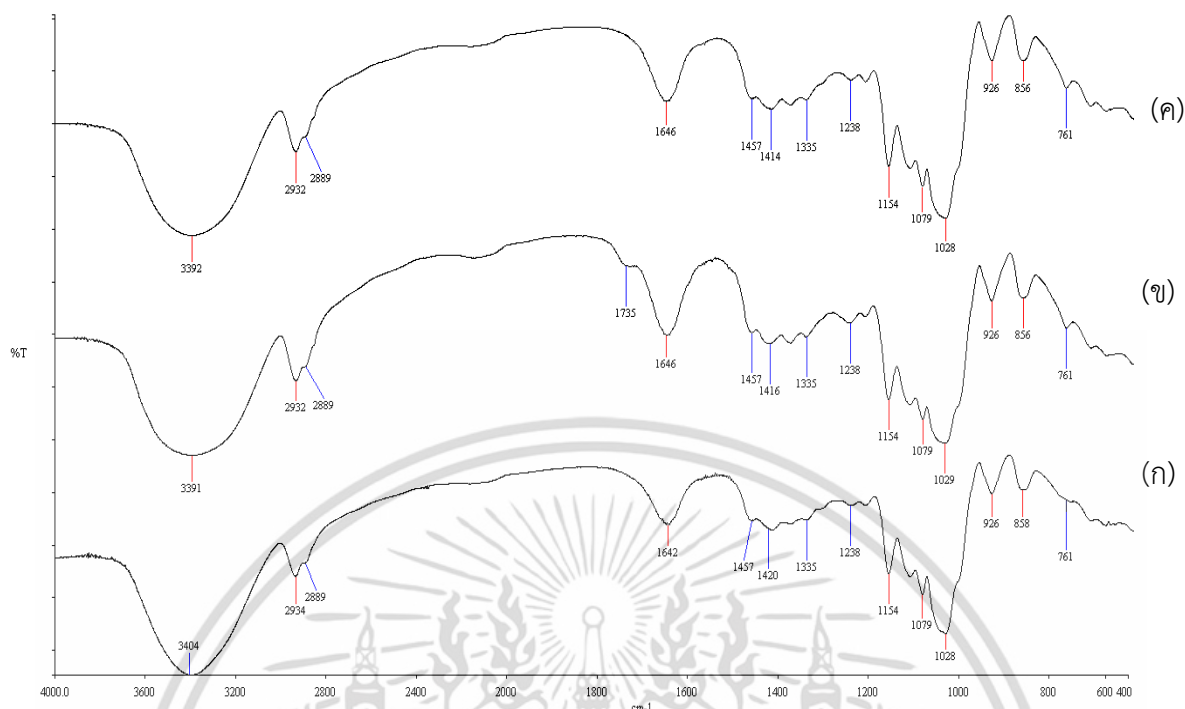
จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ TPCS, TPCS5P, TPCS10P, TPCS15P และ TPCS20P พบพีคช่วง  $3500-3250\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอล พีคช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ/หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง พีคช่วง  $1642\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นของ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่

ในแป้ง พีคที่  $1420\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending ของแป้ง พีคช่วง  $1300-1000$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขอสงวนสิทธิ์ในค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง พืชช่วง  $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง และพืชช่วง  $800\text{-}850\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-H bending [65-66]

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน พบพีกที่ตำแหน่ง  $3404\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และพีกที่ตำแหน่ง  $1420\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งกับเพคติน ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A. Pawlak and M. Mucha [67] และ K. Aoi et al [68] และพบพีกใหม่เกิดขึ้นที่  $1748\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching โดยมีความเข้มพีกเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เพคตินที่เพิ่มขึ้น (5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก) แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ในโครงสร้างของเพคติน [69]

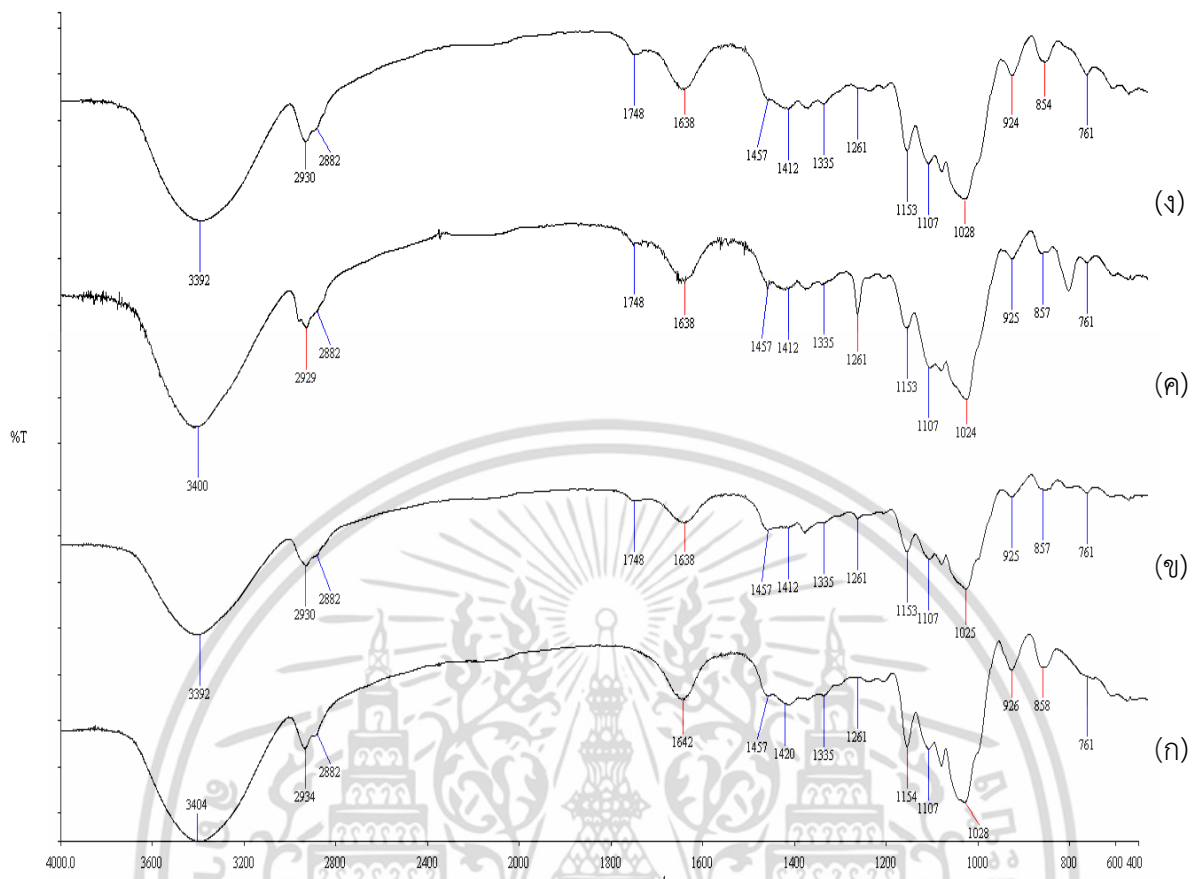
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.2** อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 มิลลิเมตร (ก) TPCS (ข) TPCS15K-2 (ค) TPCS15C-2

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ TPCS (รูปที่ 4.2 (ก)) และ TPCS15C-2 (รูปที่ 4.2 (ค)) พบว่า เมื่อเติมเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก จะพบพีคที่มีลักษณะคล้ายกับพีคของแป้ง จากสเปกตรัมของเส้นใยฝ้ายพบพีคที่  $761\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ  $\text{CH}_2$  rocking มีความเข้มพีคเพิ่มขึ้นและ นอกจากนี้ยังพบว่าพีค  $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นของ O-H stretching และ  $1420\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการสั่นแบบ O-H bending มีการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นที่ลดลงแสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและเส้นใยทั้งสอง ทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ [67-68]

เมื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างระหว่าง TPCS (รูปที่ 4.2 (ก)) และ TPCS15K-2 (รูปที่ 4.2 (ข)) พบพีคที่คล้ายกันเช่นเดียวกับเส้นใยฝ้าย โดยพีคที่แสดงการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending มีการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลงคล้ายกับรูปที่ 4.2 (ข) แสดงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแป้งและเส้นใยถั่ว นอกจากนี้ยังพบพีคใหม่ที่  $1737\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยถั่ว [70-71]



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ (ก) TPCS (ข) TPCS20P5C-2 (ค) TPCS20P15C-2 และ (ง) TPCS20P15C-5

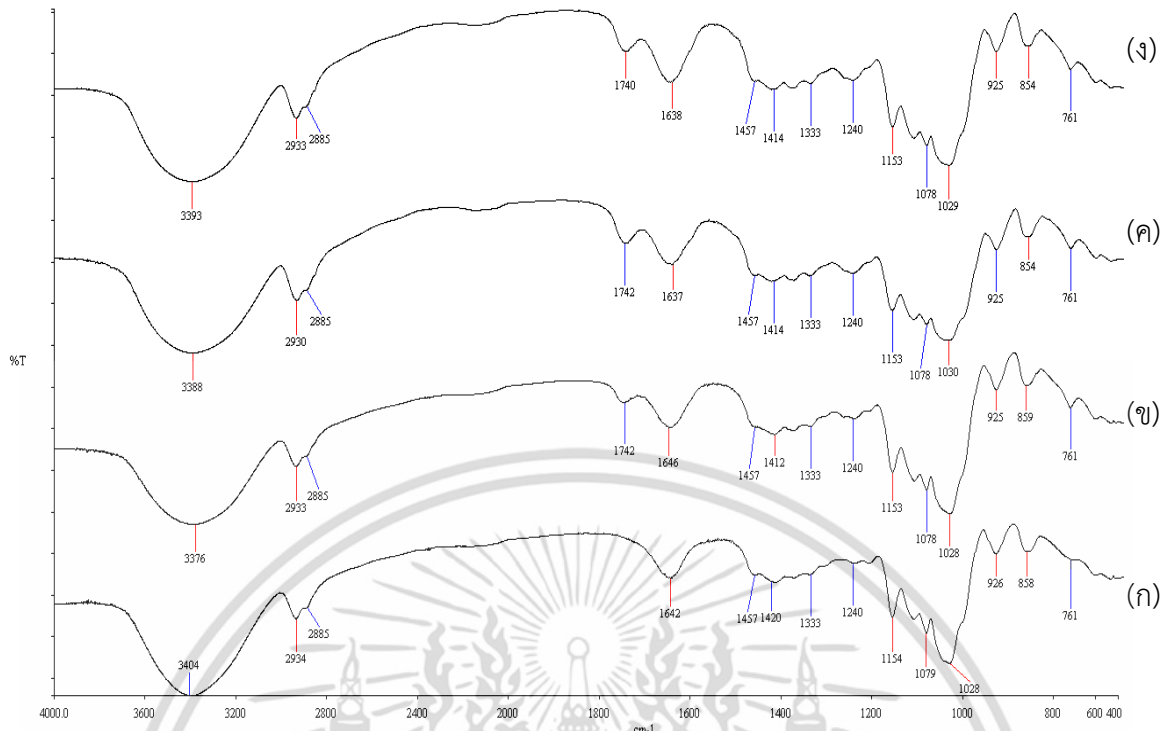
จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ TPCS, TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 พบว่าการเติมเพคติน เส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างกันลงไป ทำให้พีกที่  $3404\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง และพีก  $1420\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวรวรรณ พัฒนสิน [5] ที่ศึกษาผลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย พบพีกเกิดการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบพีกที่  $1741\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิก ในโครงสร้างทางเคมีของเพคติน และรูปที่ 4.3 (ข) และ (ง) การศึกษาปริมาณของเส้นใยฝ้าย 5% และ 15% โดยน้ำหนัก พบพีกที่  $761\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ  $\text{CH}_2$  rocking ของเส้นใยฝ้าย มีความเข้มพีกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปริมาณและความยาวของเส้นใยฝ้าย พบว่า ไม่มีผลต่ออินพราเรตสเปกตรัม  
ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวัลลดา หวานเสนาะ [76]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ (ก) TPCS (ข) TPCS20P5K-2 (ค) TPCS20P15K-2 และ TPCS20P15K-5

จากรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ TPCS, TPCS20P5K-2, TPCS20P15K-2, TPCS20P15K-5 พบว่าการเติมเพคตินและเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ ลงไป ทำให้พีคที่  $3404\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง และพีคที่  $1420\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้ง เพคติน และเส้นใยุ่น

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเติมเพคตินและเส้นใยุ่น พบพีค  $1741\text{ cm}^{-1}$  และรูปที่ 4.4 (ข) และ (ง) การศึกษาปริมาณของเส้นใยุ่น 5% และ 15% โดยน้ำหนัก พบพีคที่  $1741\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มพีคเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยุ่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยุ่นมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเฮมิเซลลูโลสมากกว่าในเส้นใยฝ้าย (ตารางที่ 4.2) โดยโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) และหมู่เอสเทอร์เป็นหมู่ฟังก์ชัน ส่งผลให้พีคของการสั่นแบบ C=O stretching มีความเข้มพีคเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และจากรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) เมื่อศึกษาความยาวของเส้นใยุ่นที่มีความยาว 2 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร พบว่า ความยาวของเส้นใยุ่นไม่มีผลต่ออินฟราเรดสเปกตรัม

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น [39, 43]

องค์ประกอบทางเคมี	เส้นใยฝ้าย	เส้นใยนุ่น
Cellulose	85-90	53.4
Hemicellulose	5.7	29.63
Lignin	0-1	20.73
Waxes	0.6	5.31

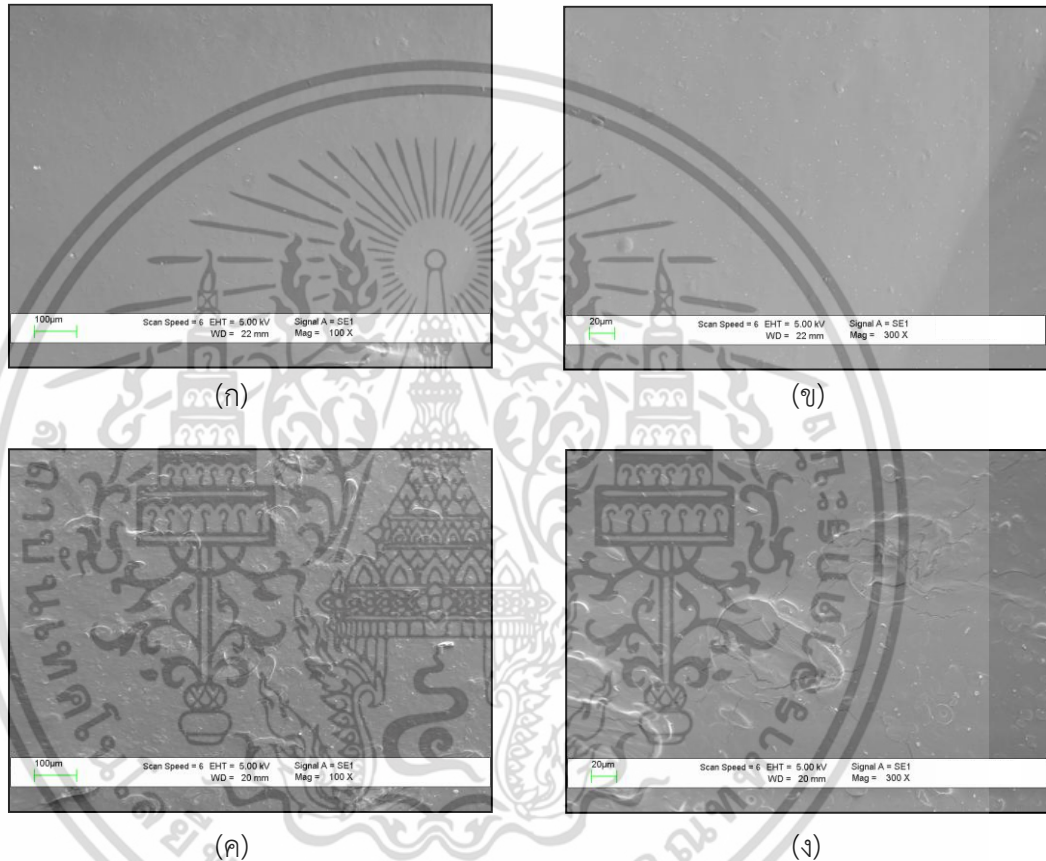
จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิค FT-IR ของ TPCS, TPCS20P5K-2, TPCS20P15K-2, TPCS20P15K-5 จากสเปกตรัมของ ร้อยละการส่งผ่านแสงทุกสูตรมีลักษณะคล้ายคลึงกันกล่าวคือ พบพีคที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน [6] ที่ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและเส้นใยนุ่น

## 4.2 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า

100 เท่า

300 เท่า

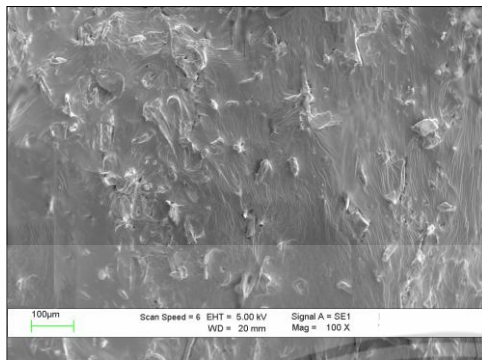


รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก)-(ข) TPCS (ค)-(ง) TPCS20P

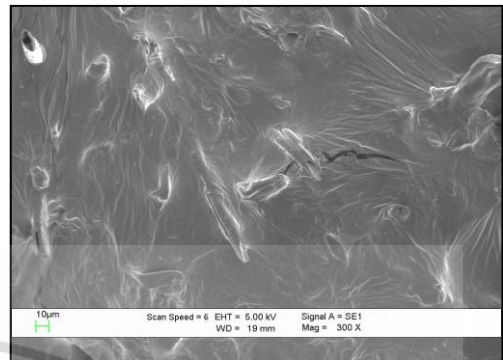
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 เท่า

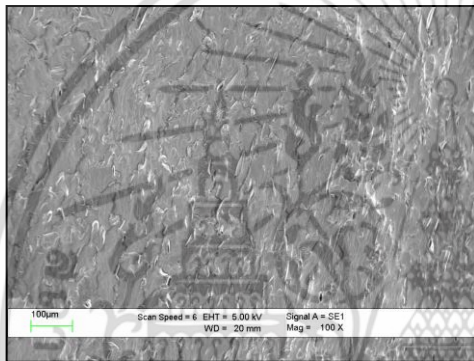
300 เท่า



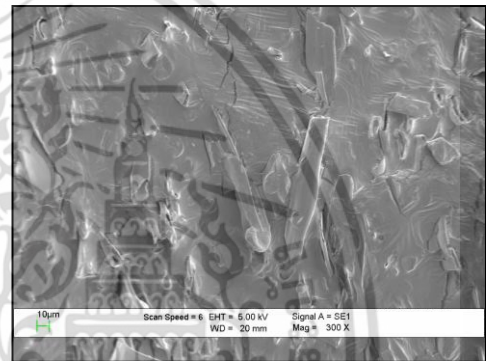
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

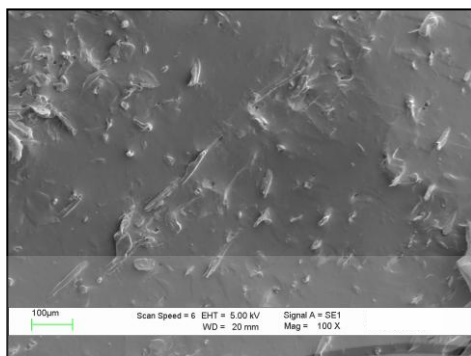
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่นที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก)-(ข) TPCS15C-2 และ (ค)-(ง) TPCS15K-2

จากรูปที่ 4.5 (ก)-(ข) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ และรูปที่ 4.5. (ค)-(ง) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS20P ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคเพคตินที่ตีในเมทริกซ์ของแป้ง โดยไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้ง นอกจากนี้พบอนุภาคเพคตินฝังตัวในเมทริกซ์ของแป้งและไม่มีรอยต่อที่เป็นช่องว่างระหว่างวัฏภาคและมีเมทริกซ์ของแป้งปกคลุมที่พื้นผิวของเพคติน (Surface wetting) แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคได้ดี เนื่องจากเพคตินและแป้ง มีองค์ประกอบเป็นพอลิแซคคาไรด์ โดยเพคตินจะมีโครงสร้างทางเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลิกซึ่งแสดงความมีขั้ว ทำให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FT-IR รูปที่ 4.1 โดยพิกที่ตำแหน่ง  $3404 \text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้ง และพิก  $1414 \text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H bending เกิดการเคลื่อน ไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงอันตรกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงและเพคติน สอดคล้องกับงานวิจัยของวรวรรณ พัฒนสิน [5] พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณของเพคตินในปริมาณต่าง ๆ ให้การกระจายตัวที่ดี และพบส่วนของอนุภาคเพคตินฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของแป้ง โดยไม่พบรอยต่อระหว่างอนุภาคเพคตินและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

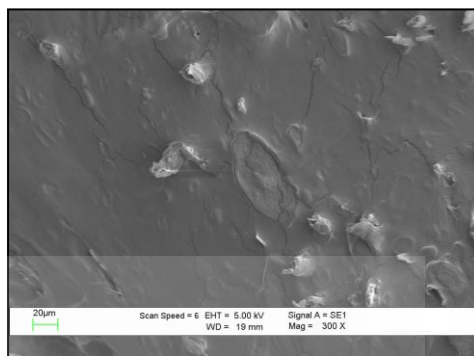
จากรูปที่ 4.6 (ก)-(ข) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS15C-2 และรูปที่ 4.6 (ค)-(ง) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS15K-2 ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า พบว่าทั้งเส้นใยฝ้ายและเส้นใยขนุนมีการกระจายตัวที่ดีและมีการฝังอยู่ในเมทริกซ์ของแป้ง และไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทริกซ์ของแป้ง นอกจากนี้พบเส้นใยทั้งสองฝังตัวในเมทริกซ์ของแป้งและไม่มียูนิทที่เป็นช่องว่างระหว่างภูมิภาค แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างภูมิภาคได้ดี เนื่องจากเส้นใยทั้งสองมีโครงสร้างเป็นเซลลูโลส โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันหลัก ซึ่งมีความมีขั้วเช่นเดียวกับแป้ง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยขนุน 15% โดยน้ำหนัก พบว่า เส้นใยขนุนมีปริมาณเส้นใยมากกว่าเส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยขนุนมีความหนาแน่นของเส้นใยต่ำกว่าเส้นใยฝ้าย ทำให้ปริมาณเส้นใยต่อน้ำหนักมีมากกว่า [72-73] นอกจากนี้ที่ กำลังขยาย 300 เท่าจะเห็นลักษณะของเส้นใยขนุนต่างจากเส้นใยฝ้าย ในส่วนของท่อน้ำเลี้ยงของเส้นใย (Lumen) [74-75] โดยเส้นใยขนุนจะมีลักษณะของท่อน้ำเลี้ยงของเส้นใยกว้างกว่าและเห็นชัดกว่าในเส้นใยฝ้าย

100 เท่า



(ก)

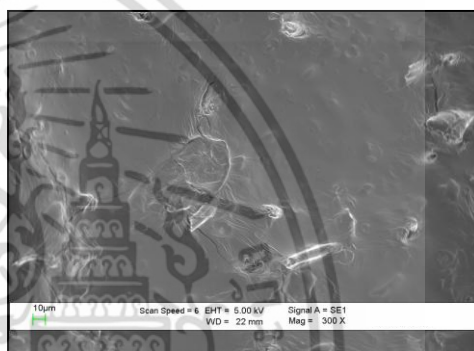
300 เท่า



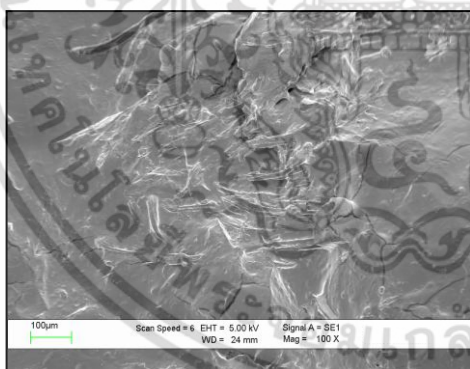
(ข)



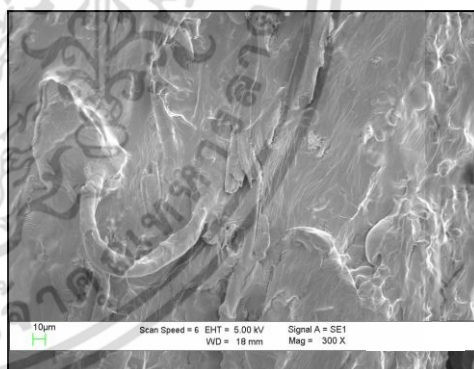
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินในปริมาณเท่ากัน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก)-(ข) TPCS20P5C-2 (ค)-(ง) TPCS20P15C-2 และ (จ)-(ฉ) TPCS20P15C-5

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ง) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS20P5C-2 และ TPCS20P15C-2 เมื่อเติมเพคตินและเส้นใยฝ้าย พบว่าไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากการเติมเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 5% และ 15% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า แสดงการกระจายตัวของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยได้ดีในเมทริกซ์ของแป้ง เช่นเดียวกับกับเพคติน และที่กำลังขยาย 300 เท่า แสดงการยึดเกาะกันระหว่างภูมิภาคได้ดี โดยสังเกตจากการไม่มีรอยต่อระหว่างภูมิภาคและเห็นส่วนของเมทริกซ์ของแป้งเปียกบนพื้นผิวของเส้นใยฝ้าย (Surface wetting)

เมื่อพิจารณาจากปริมาณของเส้นใยฝ้ายจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยฝ้ายเพิ่มขึ้น เส้นใยสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของแป้ง โดยไม่เกิดการแยกภูมิภาคของเส้นใย

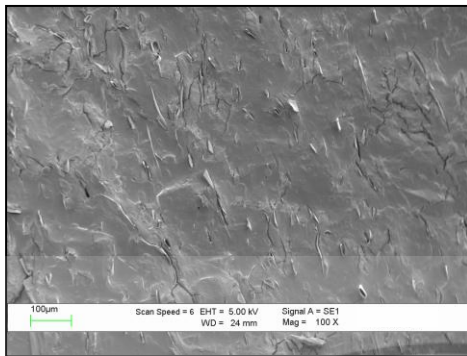
จากรูปที่ 4.7 (จ)-(ฉ) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS20P15C-5 เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณของเส้นใย 15% โดยน้ำหนักเท่ากัน พบว่า ให้การกระจายตัวไม่ดี เกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างเส้นใย แต่ที่เส้นใยสั้นมีการกระจายตัวของเส้นใยที่ดี



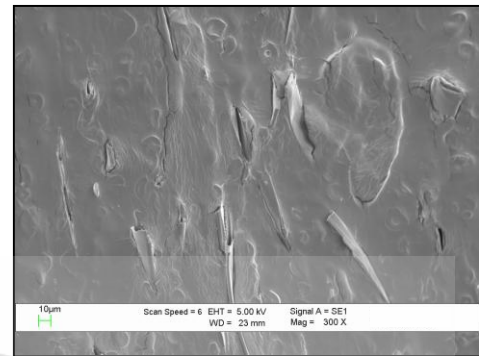
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 เท่า

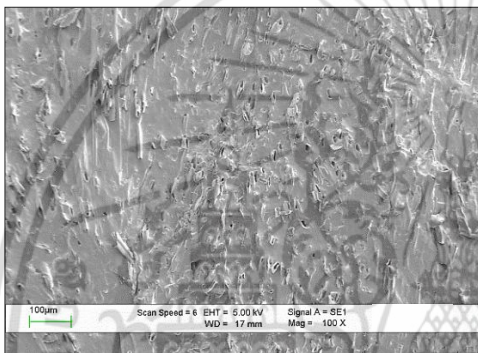
300 เท่า



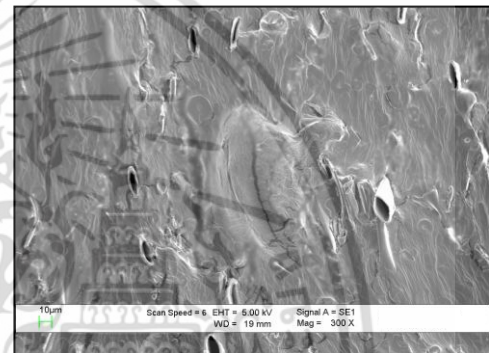
(ก)



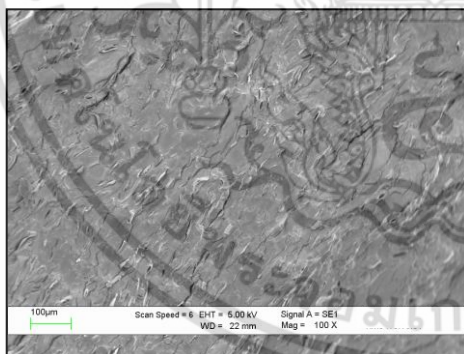
(ข)



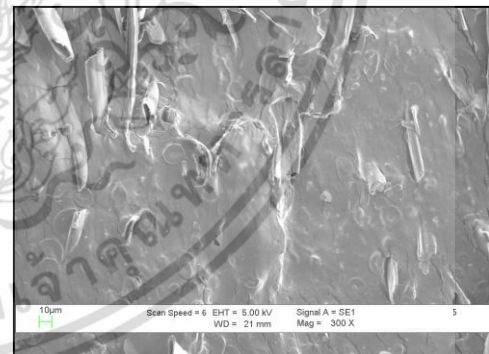
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินในปริมาณที่เท่ากัน เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก)-(ข) TPCS20P5K-2 (ค)-(ง) TPCS20P15K-2 และ (จ)-(ฉ) TPCS20P15K-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 (ก)-(ง) เป็นสัณฐานวิทยาของ TPCS20P5K-2 และ TPCS20P15K-2 เมื่อเติม เพคตินและเส้นใยนุ่น พบว่าไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยเห็นอนุภาค เพคตินกระจายตัวแยกกับเส้นใยนุ่น เมื่อเติมเส้นใยนุ่นที่ปริมาณ 5% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่า เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดี และพบอนุภาคของเพคตินและเส้นใยนุ่นฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของแป้ง เนื่องจากแป้ง เพคติน และเส้นใยนุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน ทำให้แป้งเกาะอยู่บนพื้นผิวของ เพคตินและเส้นใยนุ่น ซึ่งแสดงความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุ

เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยนุ่นจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยนุ่น เพิ่มขึ้น เส้นใยสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของแป้งได้ดี โดยไม่เกิดการแยกวัสดุของเส้นใย เกิดขึ้น

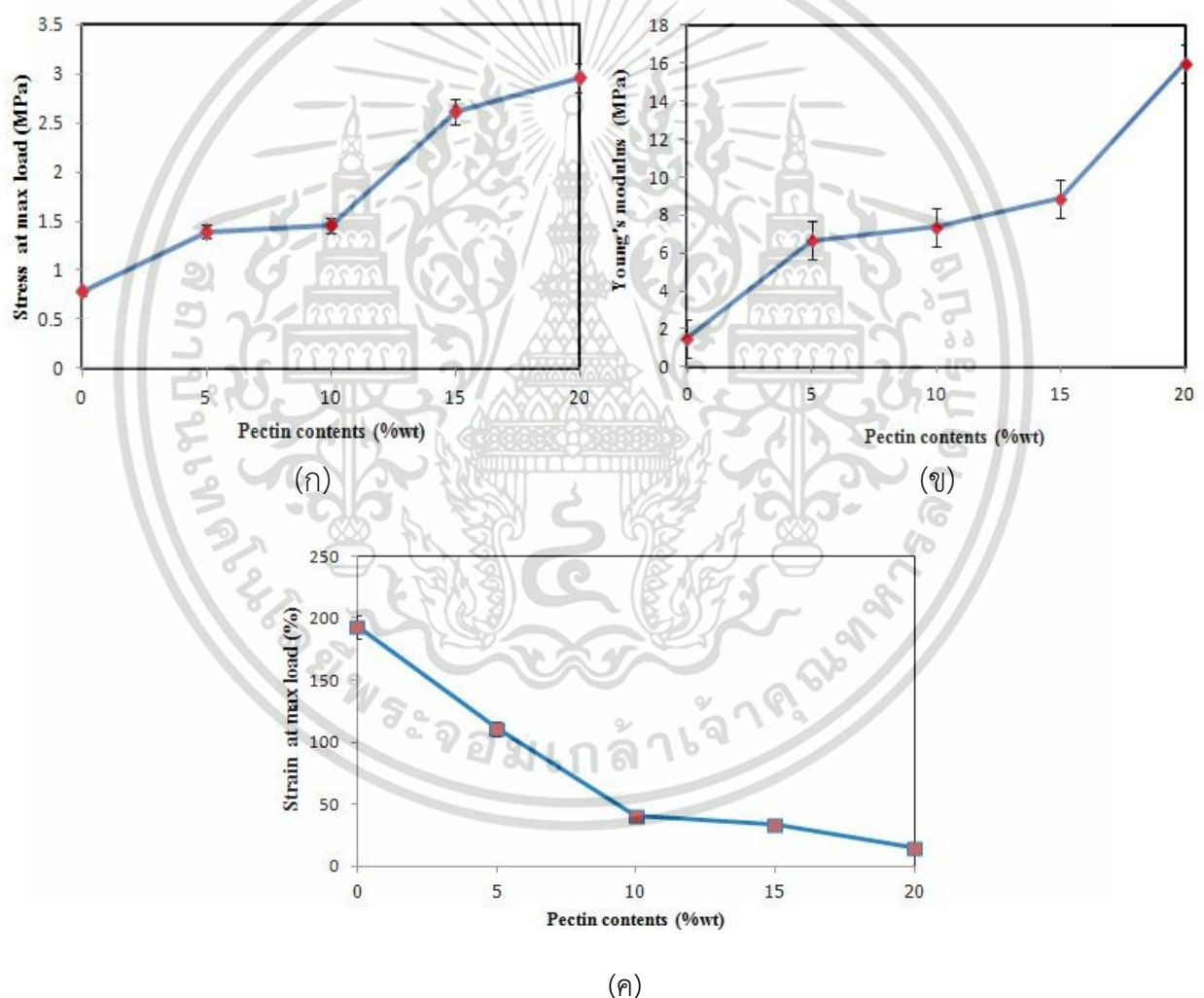
จากรูปที่ 4.8 (ก)-(ข) แสดงสัณฐานวิทยาของ TPCS20P15K-2 และ (จ)-(ฉ) แสดง สัณฐานวิทยาของ TPCS20P15K-5 เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน คือ 15% โดยน้ำหนัก พบลักษณะของเส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดีและมีส่วนของแป้งปกคลุมอยู่บน พื้นผิวของเส้นใย แสดงถึงความเข้ากันได้ดี

### 4.3 สมบัติเชิงกล

ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.3.1 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเพคตินที่ปริมาณต่างๆ

การทดสอบสมบัติเชิงกลของ TPCS, TPCS5P, TPCS10P, TPCS15P และ TPCS20P ให้ผลการทดลองดังนี้



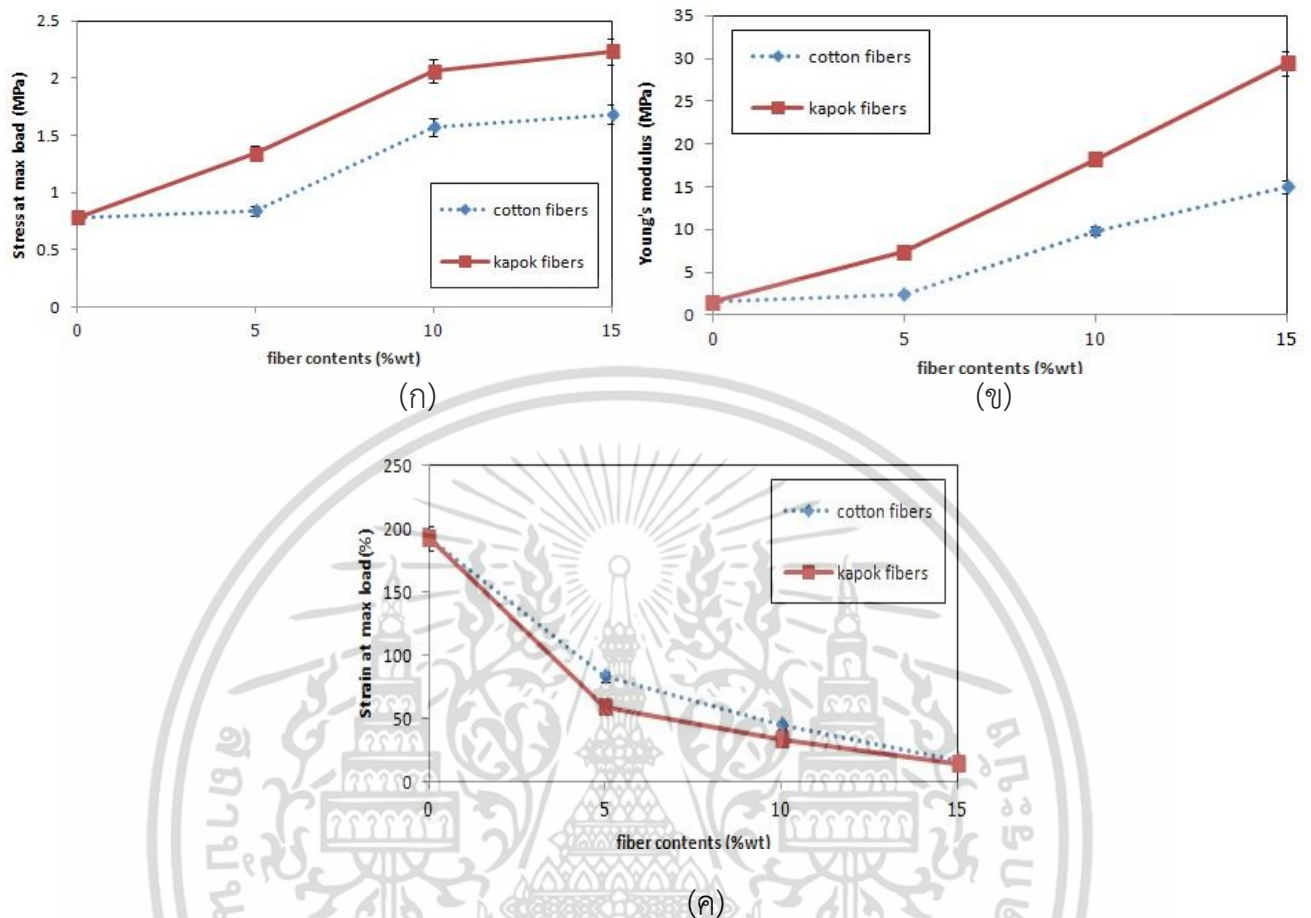
รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินปริมาณต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของ TPCS, TPCS5P, TPCS10P, TPCS15P และ TPC20P จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.9 (ก)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.9 (ข)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเพคตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเพคตินเป็นสารเพิ่มความหนืดและสารก่อเจล [71] เมื่อนำไปปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถเพิ่มความแข็งแรงและการรับแรงได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ และเพคตินมีความสามารถในการเข้ากันกับแป้งได้ดี เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นพอลิแซ็กคาไรด์และมีความเป็นขี้วเหมือนกัน โดยแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลและเพคตินมีหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างวัฏภาคได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ FT-IR (รูปที่ 4.1) มีการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลงและสอดคล้องกับผลทดสอบทางสัณฐานวิทยา พบว่าอนุภาคของเพคตินกระจายตัวแทรกอยู่ในวัฏภาคของแป้ง และไม่พบช่องว่างระหว่างรอยต่อของวัฏภาค (รูปที่ 4.5 (ค)-(ง)) แสดงถึงการยึดเกาะกันที่ดี ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยสูตรของ TPCS20P ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีที่สุด และนำไปเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่นในหัวข้อที่ 4.3.3 ต่อไป

จากรูปที่ 4.9 (ค) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงสูงสุด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเพคตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเพคตินเป็นสารก่อเจล ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวรวรรณ พัฒนสิน [5] พบว่าเมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดความเข้ากันได้ดีระหว่างวัฏภาคของเพคตินและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งมีความมีขี้วเหมือนกัน ทำให้สามารถเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งมากขึ้น การยึดตัวของชิ้นงานจึงลดลง

#### 4.3.2 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น



รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่นที่ปริมาณต่าง ๆ และความยาว 2 มิลลิเมตร

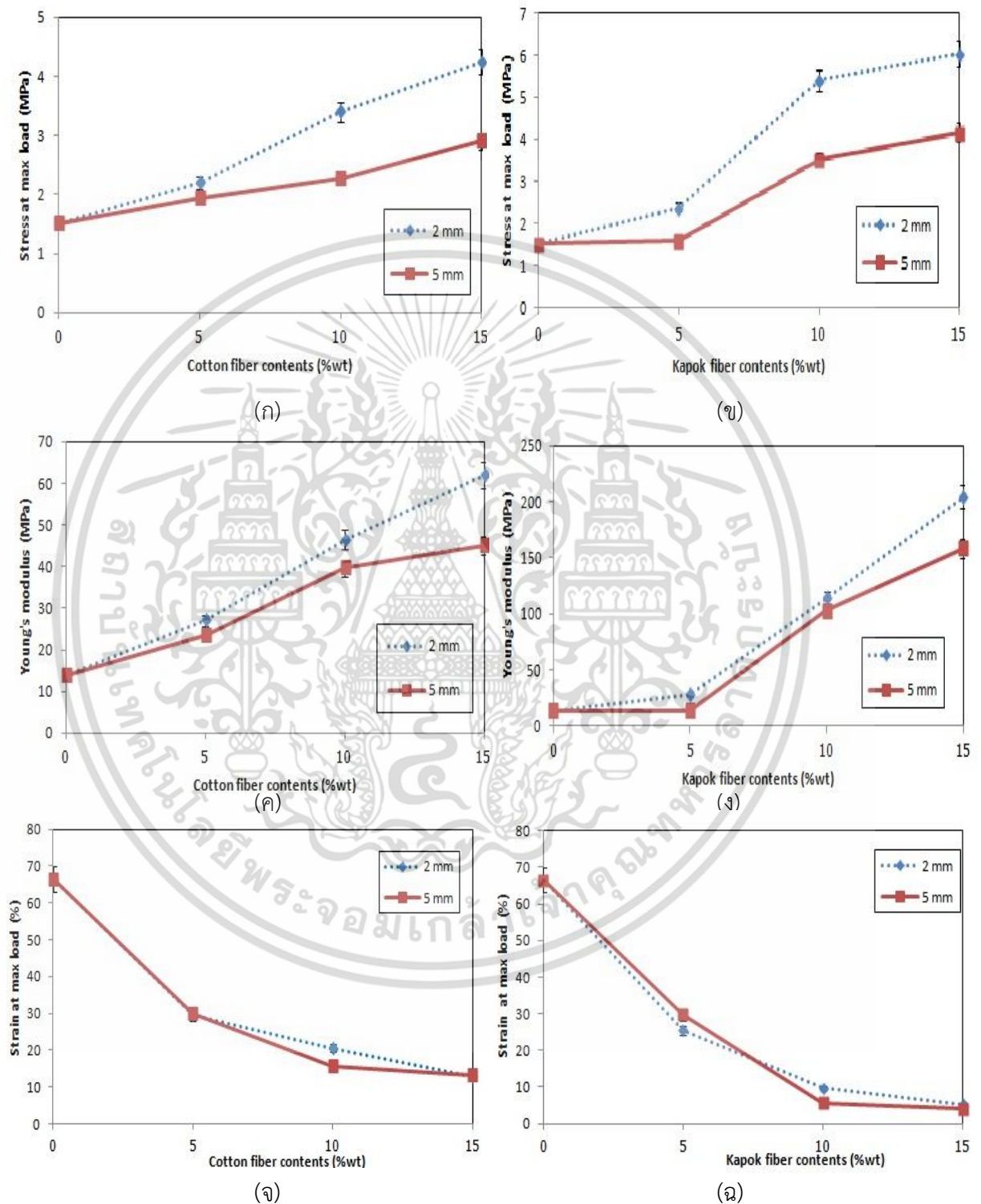
จากรูปที่ 4.10 แสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS, TPCS5C-2, TPCS10C-2, TPCS15C-2, TPCS5K-2, TPCS10K-2 และ TPCS15K-2 โดยมีค่า L/D ratio ของเส้นใยฝ้ายที่ความยาวเส้นใย 2 และ 5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 112/1 และ 335/1 และเส้นใยนุ่นมีค่าเท่ากับ 95/1 และ 207/1 (ภาคผนวก ก) พบว่าความแข็งแรงดึง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.10 (ก)) และมอดูลัส (รูปที่ 4.10 (ข)) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใย 15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากทั้งเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ต่างมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ เซลลูโลส ซึ่งมีความเป็นผลึก [76] โดยแสดงถึงความแข็งแรงของเส้นใย และมอดูลัสของเส้นใยสูงกว่าเมทริกซ์ [77] โดยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นสามารถเสริมแรงให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR (รูปที่ 4.2 (ข) และ (ค)) เมื่อพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของเส้นใย พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.10 (ก)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.10 (ข)) ของเส้นใยุ่นมีค่าสูงกว่าเส้นใยฝ้ายทุกปริมาณเส้นใย แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่นให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเส้นใยฝ้าย อธิบายได้จากค่าความหนาแน่นของเส้นใยทั้งสองชนิด พบว่าเส้นใยุ่นมีค่าความหนาแน่น  $0.384 \text{ g.cm}^{-3}$  และเส้นใยฝ้ายมีความหนาแน่น  $1.5-1.6 \text{ g.cm}^{-3}$  ทำให้เส้นใยุ่นมีปริมาณเส้นใยต่อน้ำหนักมากกว่าเส้นใยฝ้าย [72-73] การเสริมแรงที่ได้จึงเกิดขึ้นได้มากกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งแรงกว่า สังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.10 (ค)) ในเส้นใยุ่นมีค่าต่ำกว่าเส้นใยฝ้าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภารัตน์ชัยวัฒน์โยธิน [6] พบว่าการเติมเส้นใยุ่นทำให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่า และค่าการดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มต่ำกว่าเส้นใยปอ

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่น พบว่า มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีลักษณะบิดเป็นเกลียวที่แข็งแรงรวมทั้งมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง [43] โดยในเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่นมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ต่างกัน ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของพอลิแซคไครด์ซึ่งมีความมีขั้วและความสามารถเข้ากันกับแป้งแต่พบในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.6 (ก)-(ง)) พบว่า ไม่พบรอยแยกระหว่างวัฏภาคแป้งและเส้นใยทั้งสอง นอกจากนี้องค์ประกอบของแว็กซ์ (ตารางที่ 4.2) ในเส้นใยุ่นมีปริมาณมากกว่าเส้นใยฝ้าย โดยแว็กซ์มีสมบัติเป็น Hydrophobic หรือความไม่ชอบน้ำ [78] ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าเส้นใยฝ้าย โดยความชื้นหรือน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลให้ TPCS15K-2 มีการดึงยืดของชิ้นงานน้อยกว่าและความแข็งแรงมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้การเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นให้สมบัติเชิงกลดีกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย

### 4.3.3 การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยงุ่น



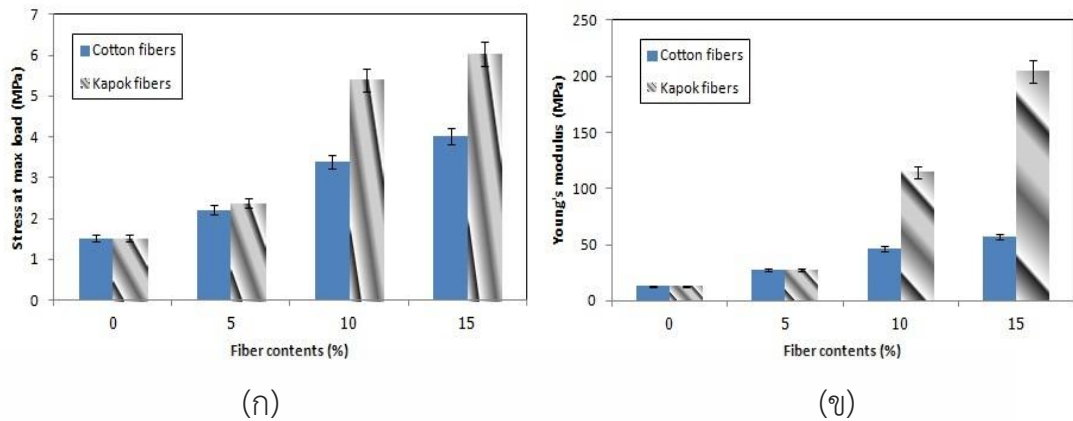
รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยงุ่นที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า TPCS20P ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด และนำมาเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิดกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติโดยศึกษาผลของปริมาณเส้นใยและความยาวเส้นใยที่ต่างกัน จากรูปที่ 4.11 (ก)-(ง) เมื่อศึกษาปริมาณเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น พบค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยฝ้ายที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยทั้งสองมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์และสามารถทนแรงดึงตามแนวเส้นใยได้ดี

จากรูปที่ 4.11 (จ)-(ฉ) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความเป็นผลึกและความสามารถในการยึดตัวต่ำของทั้งสองเส้นใย [72-73] รวมทั้งมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันกับแป้ง ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างแป้งและเส้นใย ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกันที่ตีระหว่างวัฏภาค ดังนั้นจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง

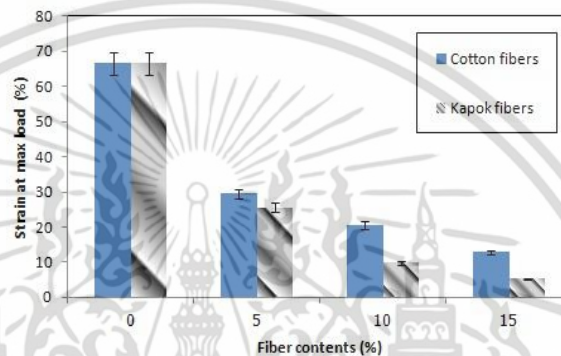
เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยที่ต่างกันทั้งเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.11 (ก)-(ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.11 (ค)-(ง)) ที่ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าความยาวเส้นใยฝ้าย 5 มิลลิเมตร เนื่องจากเส้นใยสั้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า เกิดการกระจายตัวของเส้นใยได้ดี ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงและรับแรงได้อย่างต่อเนื่อง แต่ที่ความยาวเส้นใย 5 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี สอดคล้องกับผลสัมฤทธิ์ (รูปที่ 4.8 (ฉ)) ส่งผลให้การส่งผ่านแรงไม่ดี สมบัติเชิงกลจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวัลลดา หวานเสนาะ [76] ดังนั้นจากการศึกษาปริมาณและความยาวต่าง ๆ ของเส้นใย พบว่า สูตรของ TPCS20P15K-2 ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด

ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่ปริมาณเส้นใย 15% โดยน้ำหนัก และความยาว 2 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดของทั้งสองเส้นใย



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่ปริมาณเส้นใย 15% โดยน้ำหนักและที่ความยาว 2 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเส้นใยที่ปริมาณและความยาวเส้นใยเท่ากัน จากรูปที่ 4.12 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่ปริมาณ 0%, 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ความยาว 2 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัส มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.12 (ค)) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ผลของสมบัติเชิงกลยังสอดคล้องกับผลของ FT-IR (รูปที่ 4.3 และ 4.4) และ สันฐานวิทยา (รูปที่ 4.11 และ 4.12 (ค-ง)) ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยสูตร TPCS20P15K-2 ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด เนื่องจากค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสให้ค่ามากกว่าสูตรของ TPCS20P15C-2 และให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

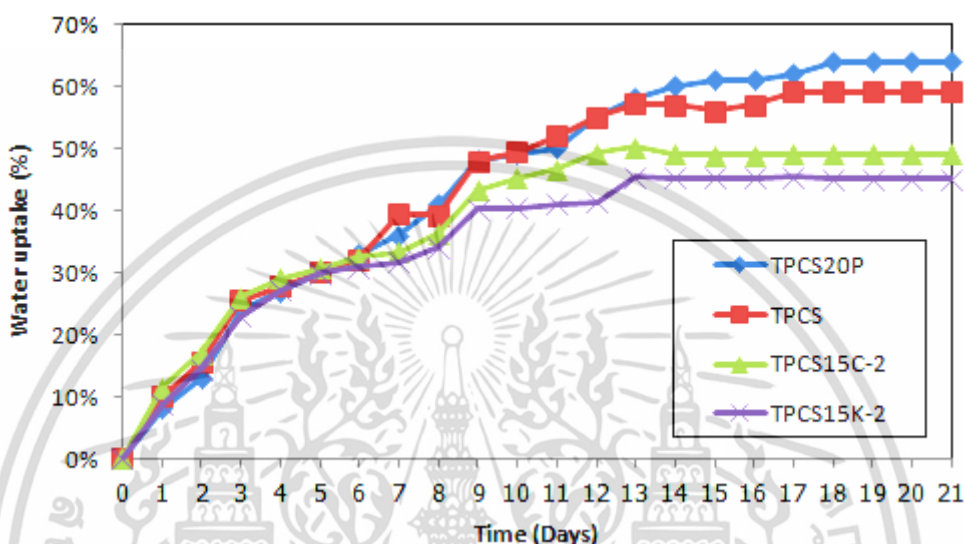
ดึงสูงสุดและมอดูลัสมีค่าเท่ากับ 6.03 MPa และ 204.34 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS  
ที่ให้ค่า 0.78 MPa และ 1.49 MPa ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การดูดซับความชื้น

ศึกษาการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงด้วย เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น TPCS, TPCS20P, TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100% แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ในระยะเวลา 21 วันของ TPCS, TPCS20P, TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 พบว่าในช่วง 8 วันแรกขึ้นงาน มีการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปการดูดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งอิ่มตัว และเริ่มมีราขึ้นในวันที่ 21 ของการทดลอง โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPCS20P มีค่าสูงสุด เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแป้งและมีหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีความมีขั้วและว่องไวต่อความชื้นมากกว่าแป้ง ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำและสามารถกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างได้ ซึ่งแสดงลักษณะเป็นเจลเกิดขึ้น [71] และสูตรของ TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและไม่ได้ปรับปรุง เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ซึ่งมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ความชื้นไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของเส้นใย จากผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของวรวรรณ พัฒนสิน [5] และสุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน [6] โดยพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงด้วย

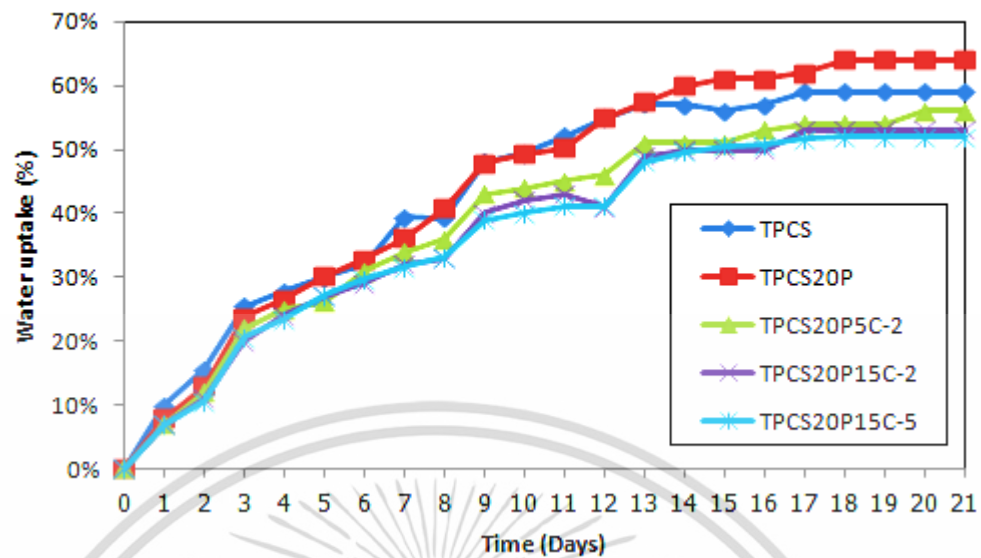
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ปรับปรุง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของเส้นใย พบว่า TPCS15K-2 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่า TPCS15C-2 เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 จากองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยทั้งสอง พบว่าในเส้นใยนุ่นมีองค์ประกอบของแวกซ์มากกว่าเส้นใยฝ้าย ซึ่งแวกซ์ในเส้นใยนุ่นมีสมบัติเป็น Hydrophobic หรือความไม่ชอบน้ำ และดูดซับน้ำมันได้ดี [78] ดังนั้นสูตร TPCS15K-2 ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำสุด

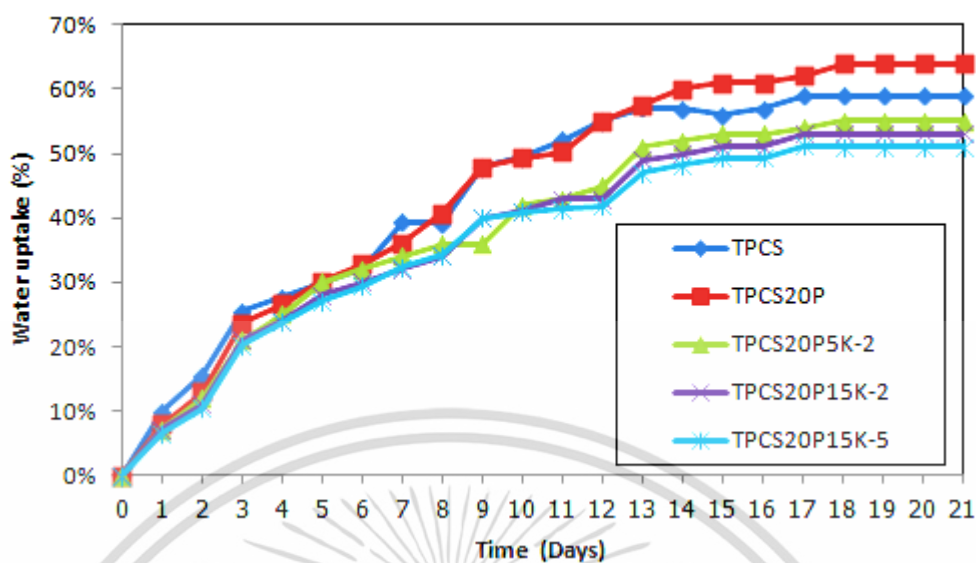


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ของ TPCS, TPCS20P, TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 พบว่า TPCS20P มีเปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นสูงสุด เนื่องจากโครงสร้างของเพคตินมีลักษณะคล้ายกันกับแป้ง และมีความมีขี้ว สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ [5] เมื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยฝ้ายพบว่า ปริมาณเส้นใยฝ้ายจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนัก สามารถดูดซับความชื้นได้น้อยลง เพราะเส้นใยฝ้ายมีสภาพขี้วที่น้อยกว่าแป้ง [79-80] โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ X. Ma et al. [81] และ M.G. Martins et al. [82] เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกันพบว่า ความยาวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นและให้เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ของ TPCS, TPCS20P, TPCS20P5K-2, TPCS20P15K-2 และ TPCS20P15K-5 พบว่า TPCS20P มีเปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นสูงสุด เนื่องจากมีสมบัติชอบน้ำ เมื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยนุ่นพบว่า ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากเซลลูโลสแสดงความเป็นผลึก จากตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย พบว่าเส้นใยนุ่นมีองค์ประกอบของแวกซ์ โดยแวกซ์มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแวกซ์เพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นลดลง และศึกษาความยาวของเส้นใยนุ่นที่ต่างกันพบว่า ความยาวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นและให้เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นใกล้เคียงกัน

จากงานวิจัยนี้พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่นปริมาณ 15% โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินปริมาณ 20% โดยน้ำหนักให้ค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด ตามลำดับ

#### 4.5 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ควบคุมความชื้นของดินคงที่ในช่วง 5-7 % เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังฝังดิน ที่ระยะเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์

##### 4.5.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการย่อยสลายหลังการฝังดิน

การศึกษาลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุง มีการบวมตัวของชิ้นงานเกิดขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดความชื้นจากดิน และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการปรับปรุงด้วยเพคติน มีการบวมตัวมากที่สุด เนื่องจากเพคตินมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ ส่งผลให้มีการย่อยสลายง่ายที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณการดูดซับความชื้น พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการปรับปรุงด้วยเพคตินให้ปริมาณการดูดซับความชื้นสูงสุด



รูปที่ 4.16 ภาพชิ้นงาน 0 สัปดาห์ของการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากกล้องดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

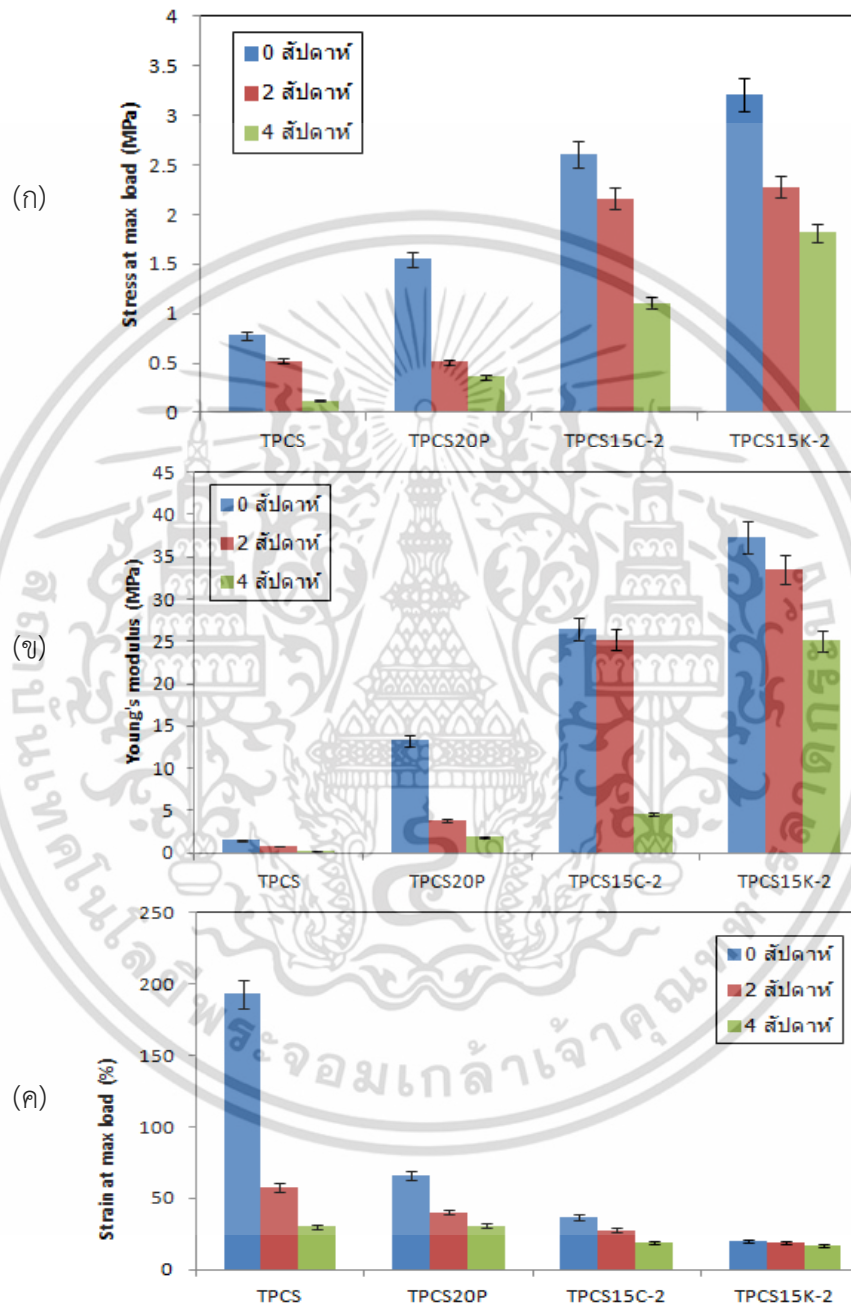


รูปที่ 4.17 ภาพชิ้นงาน 4 สัปดาห์ของการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากกล้องดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการย่อยสลายโดยการฝังดิน

##### 4.5.2.1 ศึกษาผลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยขนุน



**รูปที่ 4.18** สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยขนุน (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัสและ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

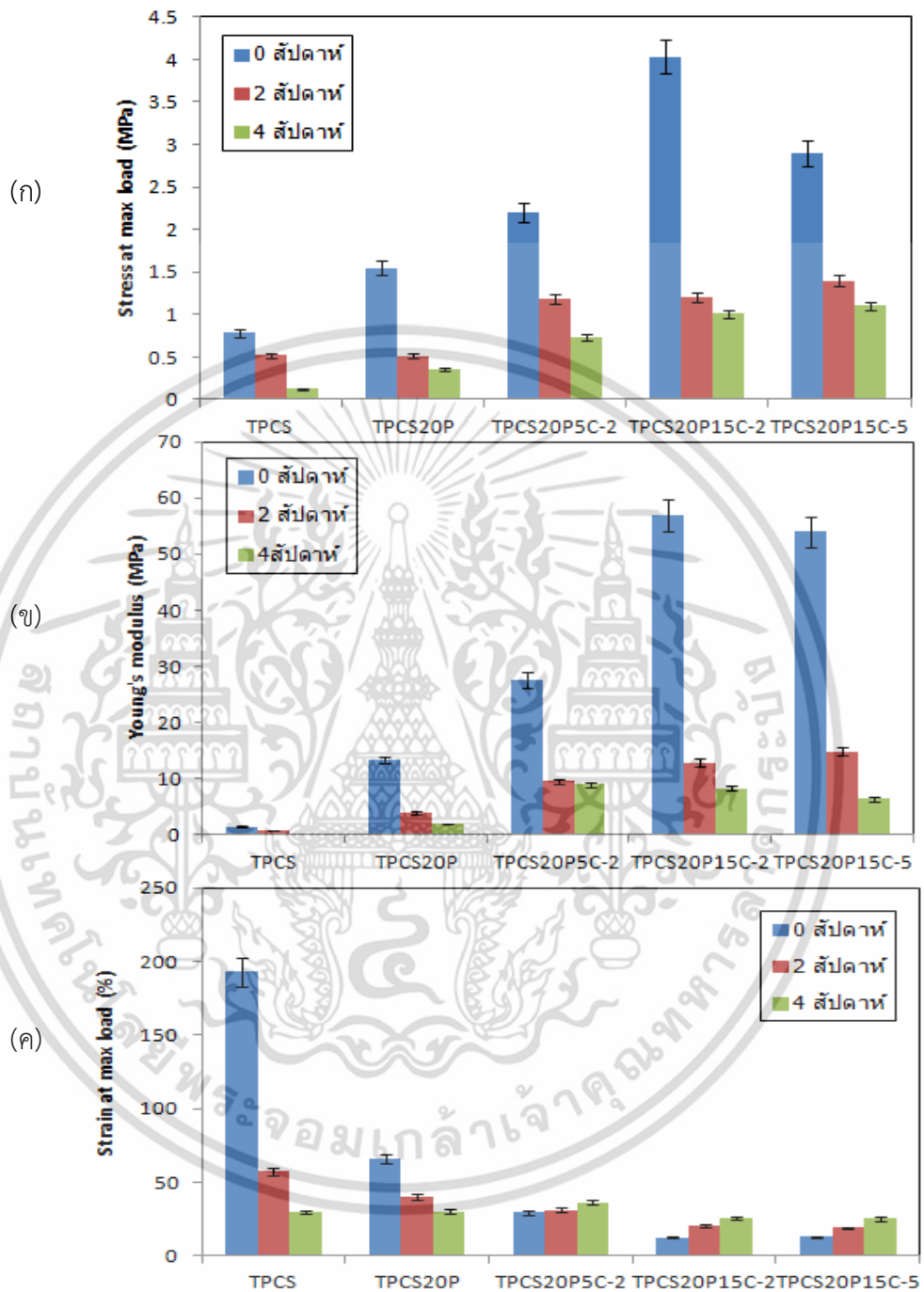
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 (ก)-(ข) แสดงค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสของ TPCS, TPCS20P, TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 พบว่าหลังฝังดินค่าต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน เนื่องจากในดินมีความชื้น เทอร์โมพลาสติกสตาโรลสามารถดูดซับความชื้นจากดิน เพราะเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีส่วนประกอบของแป้ง ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้ชิ้นงานมีสมบัติ Hydrophilic หรือความชอบน้ำ ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีลักษณะบวมพอง ง่ายต่อการฉีกขาด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสมีค่าลดลงตามจำนวนสัปดาห์ที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.18 (ค) แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของ TPCS, TPCS20P, TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 พบว่ามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความมีชื้นของแป้ง เมื่อผ่านการฝังดิน ชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นจากดินเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานอ่อนตัวและนิ่ม โดยสูตรที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่นให้สมบัติเชิงกลหลังฝังดินมากกว่าสูตรที่ไม่ได้ปรับปรุง เนื่องจากวิฤภาคของเส้นใยช่วยในการยึดเกาะส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งไว้ และเส้นใยมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส มีความเป็นผลึก ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำกว่าแป้ง นอกจากนี้สูตร TPCS20P ให้สมบัติเชิงกลหลังฝังดินต่ำกว่าสูตรที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยทั้งสอง เนื่องจากเพคตินมีความมีชื้นสูงกว่าแป้ง ทำให้ดูดซับความชื้นได้มาก ส่งผลให้ชิ้นงานบวมตัวและขาดง่าย

เมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใย พบว่าสูตร TPCS15C-2 ให้การย่อยสลายง่ายกว่าสูตรของ TPCS15K-2 โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสมีค่าลดลงอย่างชัดเจนตามจำนวนสัปดาห์ที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.2 เมื่อศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีในเส้นใย พบว่าเส้นใยุ่นมีส่วนของแวกซ์มากกว่า ซึ่งมีสมบัติ Hydrophobic หรือความไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่น ดูดซับความชื้นในดินได้ต่ำกว่าเส้นใยฝ้าย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้น (รูปที่ 4.13) ซึ่งพบว่า TPCS15K-2 ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่า TPCS15C-2 จึงทำให้ TPCS15K-2 ย่อยสลายได้ยากกว่า

## 4.5.3 ศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 4.19 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่าง ๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัสและ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

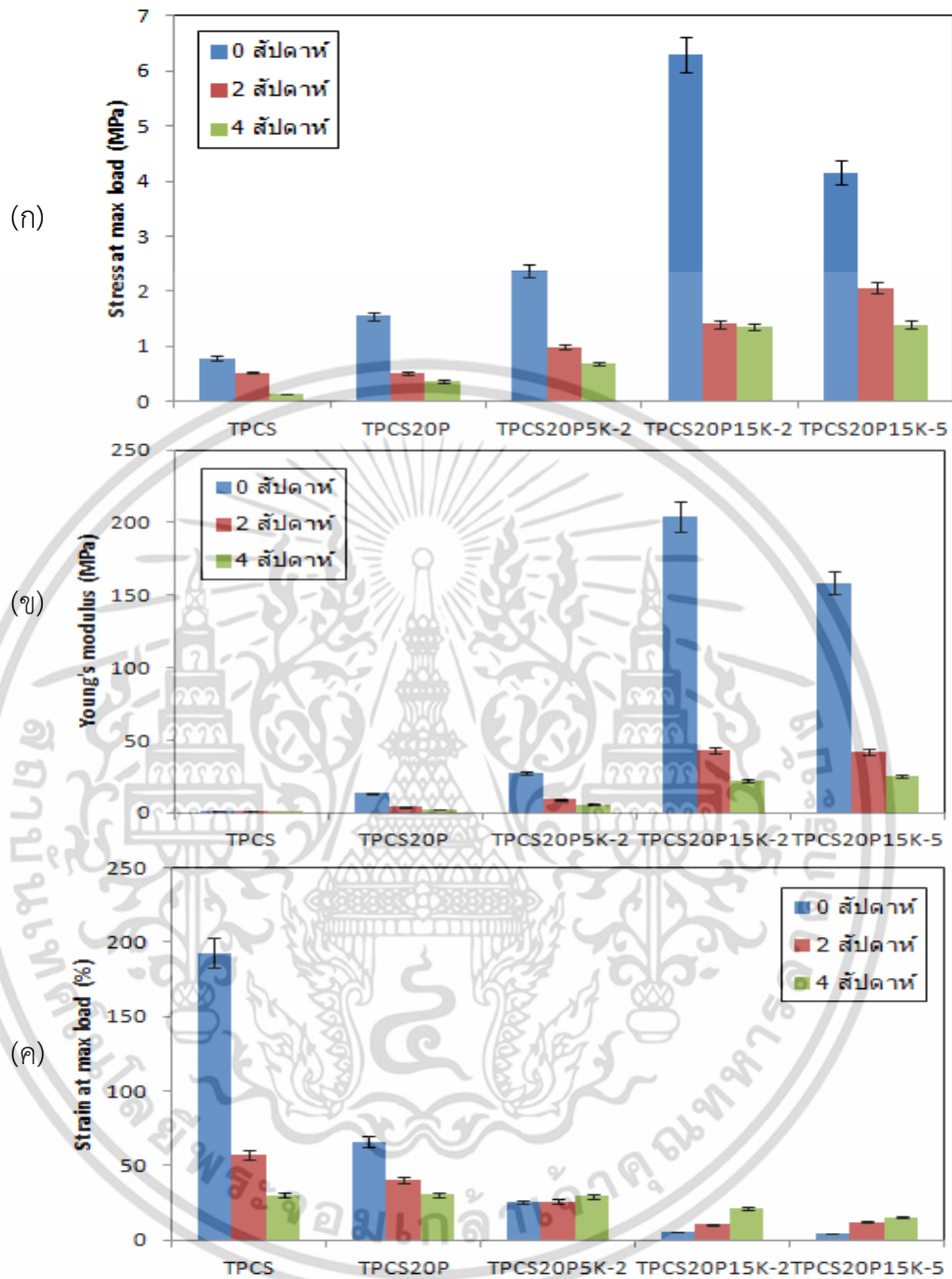
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 (ก)-(ข) แสดงค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสของ TPCS, TPCS20P, TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 พบว่าหลังฝังดินมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานมีองค์ประกอบของแป้ง ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้ ทำให้ชิ้นงานนิ่ม และอ่อนตัวมากขึ้น

จากรูปที่ 4.19 (ค) แสดงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของ TPCS และ TPCS20P มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากชิ้นงานมีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งและเพคติน ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้ง่ายกว่า นอกจากนี้สูตรของ TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 ให้ค่าการดึงยึดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากก่อนฝังดินชิ้นงานมีลักษณะแข็ง ไม่ยืดหยุ่น และมีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ ทำให้เมื่อนำไปฝังดิน ชิ้นงานจะดูดความชื้นจากดิน ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และชิ้นงานมีความอ่อนตัว จึงมีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มขึ้น

เมื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยฝ้ายพบว่า ที่ปริมาณเส้นใย 5% โดยน้ำหนัก มีการย่อยสลายที่ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยมีผลึกมากกว่าสามารถย่อยสลายได้ยากกว่าแป้ง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้การย่อยสลายยากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ที่ปริมาณเส้นใยมากให้ค่าต่ำกว่า เพราะเส้นใยมีขั้วต่ำกว่าแป้ง [79-80] ทำให้ดูดซับความชื้นได้น้อยกว่า เมื่อศึกษาความยาวของเส้นใยฝ้ายพบว่า ที่ความยาว 2 และ 5 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลหลังฝังดินใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความยาวของเส้นใยฝ้ายไม่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลายของชิ้นงานอย่างชัดเจน

4.5.4 ศึกษาผลของปริมาณและความยาวของเส้นใยุ่น



รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัสและ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 (ก)-(ข) ของ TPCS, TPCS20P, TPCS20P5K-2, TPCS20P15K-2 และ TPCS20P15K-5 พบว่าหลังฝังดินมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน เนื่องจากส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมเซอร์มีการดูดซับความชื้นในดิน ความชื้นหรือน้ำ มีสมบัติเป็นพลาสติกไฮเซออร์ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของแบ่งเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

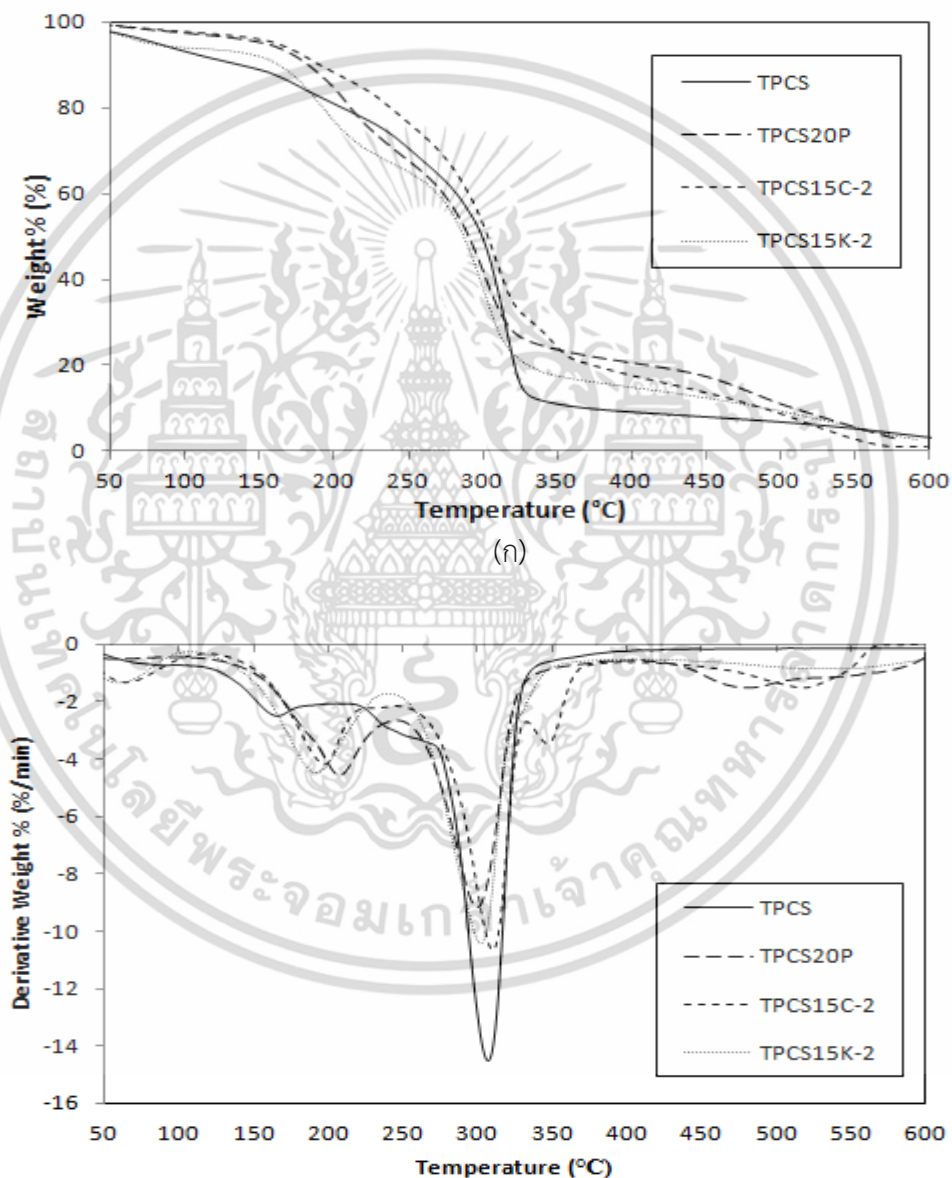
รูปที่ 4.20 (ค) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของ TPCS20P5C-2, TPCS20P15K-2 และ TPCS20P15K-5 เนื่องจากชิ้นงานมีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูงกว่า TPCS และการดึงยืดจึงต่ำ เมื่อฝังดินทำให้มีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจึงมีการดึงยืดเพิ่มขึ้น

เมื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายยากกว่า และการศึกษาความยาวของเส้นใยพบว่า ที่ความยาว 2 และ 5 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความยาวของเส้นใยไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานอย่างชัดเจน

จากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น และเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินตามมา ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะอ่อนตัว ฉีกขาดง่าย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดซับความชื้น (หัวข้อ 4.4) กล่าวคือเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นการดูดซับความชื้นมีค่าลดลง ทำให้ชิ้นงานที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบย่อยสลายยากกว่า แต่เมื่อปรับปรุงด้วยเพคติน พบว่าการดูดซับความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ TPCS20P มีความสามารถในการย่อยสลายง่ายกว่า และ TPCS15K-2 มีความสามารถในการย่อยสลายยากกว่า

#### 4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (Decomposition temperature,  $T_d$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่างๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22-4.23



(ข)

รูปที่ 4.21 (ก) TG และ (ข) DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)					% น้ำหนักที่หายไป (แ่ง)
	ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2 (แ่ง)	ช่วงที่ 3		
	(กลีเซอรอล) + (เพคติน)			เส้นใยนุ่น	เส้นใยฝ้าย	
TPCS	166.2	-	307.5	-	-	72.3
TPCS20P	207.9		300.5	-	-	47.0
TPCS15C-2	194.5	-	312.7	-	344.5	35.52
TPCS15K-2	191.6	-	302.0	334.7	-	45.7

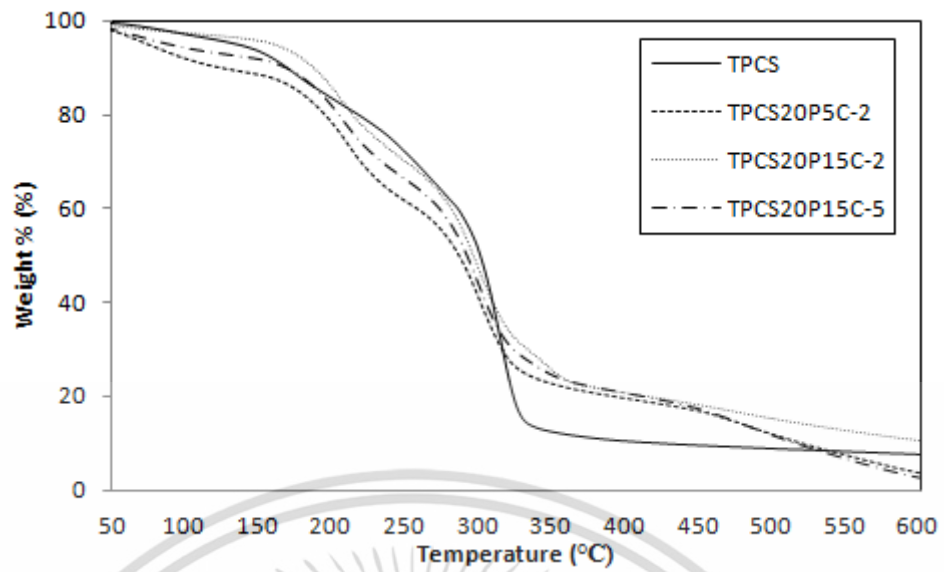
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.12 เป็นสูตรของ TPCS พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 166.2 องศาเซลเซียสและช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 307.5 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลและแ่ง [81, 83] ตามลำดับ และสูตรของ TPCS20P พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 207.9 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของกลีเซอรอลและเพคติน ซึ่งเพคตินมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 200 องศาเซลเซียส [5] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของแ่งที่อุณหภูมิ 300.5 องศาเซลเซียส [6] สำหรับ TPCS15C-2 และ TPCS15K-2 พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงสุดท้ายเป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นมีอุณหภูมิของการสลายตัวที่ 344.5 และ 334.7 องศาเซลเซียสตามลำดับ [6, 85] และจากการเปรียบเทียบการสลายตัวของแ่งแต่ละสูตรพบ TPCS20P และ TPCS15K-2 มีอุณหภูมิการสลายตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS เนื่องจากการเติมเพคติน ลงไปในเมทริกซ์แ่ง อนุภาคของเพคตินอาจเข้าไปขัดขวางการเกิดผลึกของเมทริกซ์แ่ง นอกจากนี้เพคตินยังมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าแ่ง จึงทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำลงและในสูตรที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

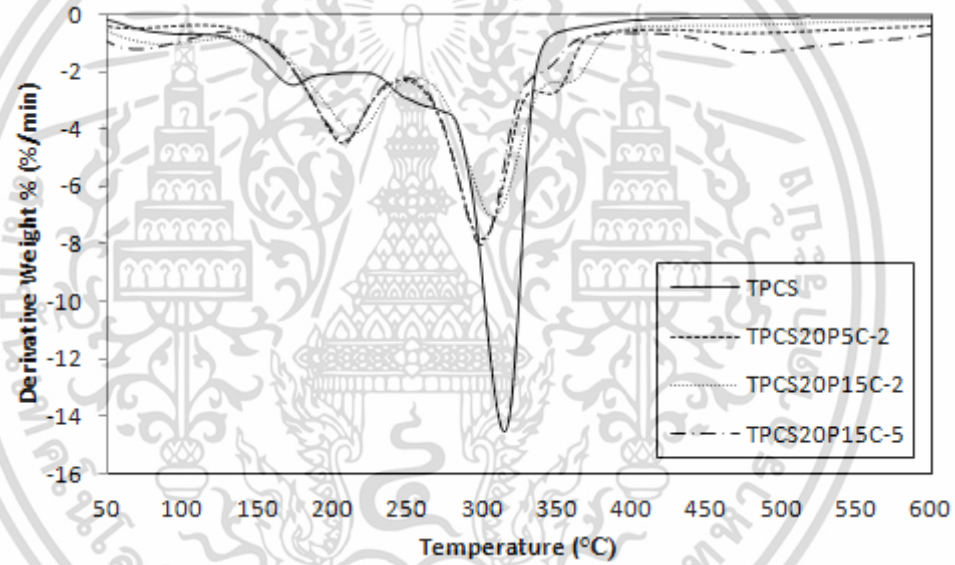
คาดว่าเกิดจากความเป็น Hydrophobic ของเส้นใยนุ่น [78] จึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง นอกจากนี้ TPCS15C มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า TPCS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยจากคณะผู้วิจัย หลายกลุ่ม [4-5, 58, 76, 80-81, 85] นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของ TPCS15C-2, TPCS15K-2 และ TPCS20P เมื่อเปรียบเทียบกับ TPCS มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการเติมเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นส่งผลให้ TPCS มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น [5-6]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 (ก) TG และ (ข) DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )				% น้ำหนักที่หายไป (แปปง)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล) + (เพคติน)		ช่วงที่ 2 (แปปง)	ช่วงที่ 3 เส้นใยฝ้าย	
TPCS	166.2	-	307.5	-	72.3
TPCS20P5C-2	206.9		299.8	344.6	40.5
TPCS20P15C-2	200.8		303.5	352.1	37.3
TPCS20P15C-5	207.9		299.2	347.6	40.3

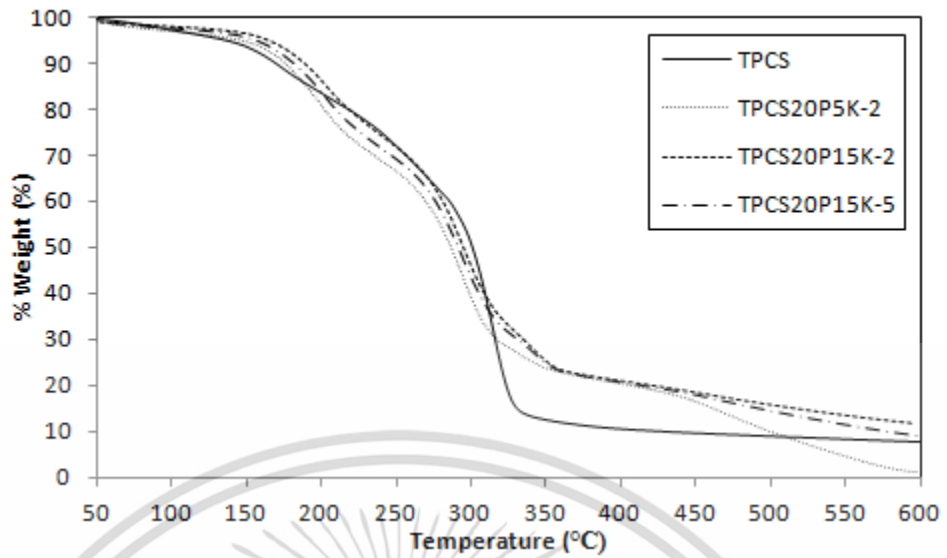
จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ เปรียบเทียบกับสูตรของ TPCS พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของกลีเซอรอลและเพคติน ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของแปปงสำหรับสัปปะหลัง ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของเส้นใยฝ้าย โดยช่วงสุดท้ายมีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 344.6-352.1 องศาเซลเซียส [85] และเมื่อศึกษาถึงอุณหภูมิการสลายตัวของ TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติมปริมาณของเพคติน 20% โดยน้ำหนักซึ่งมากกว่าปริมาณของเส้นใย 15% โดยน้ำหนัก ทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเพคตินที่มากกว่า จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 15% โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้น [85] เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าแปปง จึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อศึกษาถึงความยาวของเส้นใยฝ้ายระหว่างสูตรของ TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มไม่ต่างกัน ซึ่งแสดงว่าความยาวของเส้นใยฝ้ายไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของวัลลดา หวานเสนาะ [76] พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ความเอกลสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

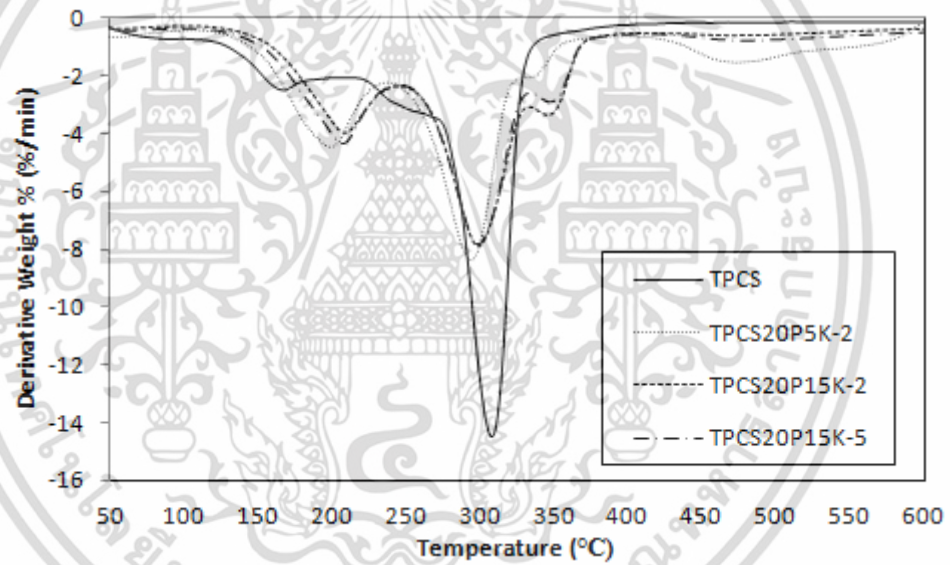
ยาว 2 และ 10 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มไม่ต่างกัน นอกจากนี้พบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลีซมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร TPCS แสดงให้เห็นว่าการเติม เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลีซมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 (ก) TG และ (ข) DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)				
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล) + (เพคติน)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยนุ่น)	% น้ำหนักที่ หายไป (แป้ง)	
TPCS	166.2	-	307.5	-	72.3
TPCS20P5K-2	199.4	294.2	345.9		41.6
TPCS20P15K-2	208.5	299.2	339.1		41.0
TPCS20P15K-5	207.4	297.6	347.6		41.0

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.14 สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินและเส้นใยนุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ เปรียบเทียบกับสูตรของ TPCS พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของเส้นใยนุ่น โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 339.1-347.6 องศาเซลเซียส [6] และเมื่อศึกษาถึงอุณหภูมิการสลายตัวของ TPCS20P5C-2, TPCS20P15C-2 และ TPCS20P15C-5 พบว่ามีแนวโน้มต่ำลง เนื่องจากสมบัติ Hydrophobic ของเส้นใยนุ่น เมื่อพิจารณาผลของความยาวของเส้นใยที่ต่างกัน พบว่าให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความยาวของเส้นใยนุ่นจึงไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนอย่างชัดเจน และยังพบว่าการเติมเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ลดลง ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีลิเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปขึ้นงานโดยวิธีการกดอัด ขึ้นรูปทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิคที่ปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก และเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วที่ปริมาณของเส้นใย 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก และความยาวของเส้นใยต่างๆ ได้แก่ 2 และ 5 มิลลิเมตร โดยค่า L/D ratio ของเส้นใยฝ้ายเท่ากับ 112/1 และ 335/1 และเส้นใยถั่ว เท่ากับ 95/1 และ 207/1 ตามลำดับ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคและเส้นใยถั่ว พบพีกใหม่ที่ตำแหน่งประมาณ  $1741\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching มีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยถั่วที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายพบพีกที่ตำแหน่งใหม่ประมาณ  $760\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบ  $\text{CH}_2$  rocking นอกจากนี้การปรับปรุงด้วยเทคนิคเส้นใยถั่วและเส้นใยฝ้าย พบว่าพีกที่ตำแหน่งของ O-H stretching และ O-H bending มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง

2. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเทคนิค เส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ TPCS แต่มีการกระจายตัวที่ดี และไม่พบรอยต่อระหว่างวัฏภาค เมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วที่ปริมาณและความยาวต่างๆ พบว่าเส้นใยทั้งสองมีการกระจายตัวที่ดีบนเมทริกซ์ของแป้ง และมีความเข้ากันได้ดีระหว่างวัฏภาคกับวัฏภาคของแป้ง นอกจากนี้ที่ความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นต่างกัน พบว่า เส้นใยยาวมีแนวโน้มเกาะกลุ่ม รวมตัวกันมากกว่าเส้นใยสั้น

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า TPCS20P15K-2 สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่ปรับปรุงสมบัติซึ่งให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำสุด และเมื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยและความยาวของเส้นใย พบว่าที่ปริมาณเส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่ว 15% โดยน้ำหนัก และที่ความยาวของเส้นใย 2 มิลลิเมตร ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

4. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าการเติมเพคตินทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น แต่การใส่เส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่ว มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการดูดซับความชื้นน้อยลง เมื่อศึกษาชนิดของเส้นใยพบว่า TPCS15K-2 ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำสุด จากการศึกษาปริมาณและความยาวของเส้นใยทั้งสอง พบว่า ปริมาณเส้นใย 15% โดยน้ำหนัก ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นต่ำกว่าปริมาณเส้นใย 5% โดยน้ำหนัก และพบว่าความยาวของเส้นใย ไม่มีผลต่อสมบัติการดูดซับความชื้น

5. จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีแนวโน้มการย่อยสลายง่ายกว่า และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยถั่วมีแนวโน้มการย่อยสลายยากกว่า

6. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าการใส่เพคตินและเส้นใยถั่วมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่ำลง การเติมเส้นใยฝ้ายทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรล มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น และพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงทุกสูตรมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

7. จากงานวิจัยนี้ พบว่า TPCS ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 20% โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว 15% โดยน้ำหนักที่ความยาวเส้นใยถั่ว 2 มิลลิเมตร ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้โดย

1. เพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของเส้นใย โดยการเคลือบสารหล่อลื่น เช่น Stearic acid เป็นต้น ในปริมาณต่ำๆ เพื่อให้เส้นใยกระจายตัวในเมทริกซ์ของแป้งได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการเสริมแรงได้ดีขึ้น
2. ศึกษาแนวทางการลดขนาดของเส้นใย โดยทำการบดให้เป็นผง เพื่อทำให้มีอนุภาคที่เล็กลง โดยอาจนำเส้นใยไปผ่านการแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วทำการบด เป็นต้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและแป้ง
3. ศึกษาการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่น การเป่า การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตเป็นชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Griffin, G.J.L. 1994. "Starch polymer blends." *Polymer Degradation and Stability*. 45(2) : 241-247.
- [2] จารุณี ยาห้องอากาศ. 2543. "การผลิตคาร์โบไฮเดรตฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและเพคติน." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] มณฑา จันทรเกตุเลี้ยง. 2541. "วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น." ภาควิชาคหกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร.
- [4] ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ ภาวิณี ถึงสุข และยศธร ธเนศรุ่งโรจน์. 2553. "การปรับปรุงสมบัติฟิล์มย่อยสลายจากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย." โครงการงานพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] วรวรรณ พัฒนสิน. 2556. "การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย". วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Prachayawarakorn, J. Chaiwatyothin, S. Mueangta, S. and Hanchana, A. 2013. "Effect of Jute and Kapok Fibers on Properties of Thermoplastic Cassava Starch Composites." *Materials and Design*. 47(1)309–315.
- [7] ธนาวดี ลี้จากภัย. 2549 . **พลาสติกที่ย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [8] [online]. Available : [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html)
- [9] กล้าณรงค์ ศรีรอด, กาญจนา ภูโรจนวงศ์ และวิไล สันติโสภาศรี. 2541. "โครงสร้างของอะไมโลส อะไมโลเพคตินและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้จากเกษตรศาสตร์ 50 ในอายุต่างๆกัน." ครั้งที่ 36. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [10] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. 1985. **Starch Conversion Technology**.

เอกสารนี้เป็นเอกสาร New York : Marcel Dekker. เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Bradbury, A.G.W. and Bello, A.B. 1993. "Determination of Molecular Size Distribution of Starch and Debranched Starch by a Single Procedure using High-performance-size-exclusion Chromatography." *Cereal Chemistry*. 70 : 543-547.
- [13] Buleon, A. Colonna, P. Planchot, V. and Ball, S. 1998. "Starch Granules: Structure and Biosynthesis." *International Journal of Biological Macromolecules*. 23(2) : 85-112.
- [14] Kerr, R.W. 1950. **Chemistry and Industry of Starch**. (2nded.). New York : Academic Press.
- [15] French, D. BeMiller, J.N. and Paschall, E.F. 1984: **Starch : Chemistry and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Florida : Academic Press Inc.
- [16] Davies, T. Miller, D.C. and Procter, A.A. 1980. "Inclusion Complex of Free Fatty Acids with Amylase." *Starch/Starke*. 32(5) : 149-158.
- [17] Hizukuri, S. 1985. "Relationship Between the Distribution of the Chain Length of Amylopectin and the Crystallite Structure of Starch Granules." *Carbohydrate Research*. 141(2) : 295-306.
- [18] Jane, J. and Ao, Z. Duvick, S.A. Wiklund, M. Yoo, S. Wong, K. and Gardner, C. 2003. "Structure of Amylopectin and Starch Granules : How Are They Synthesised." *Journal Applied Glycoscience*. 50(2) : 167-172.
- [19] Galliard, T. and Bowler, P. 1987. **Starch : Properties and Potential**. New York. : John Wiley and Sons.
- [20] Hizukuri, S. 1988. "Recent Advances in Molecular Structure of Starch." *Journal Japanese Society Starch Science*. 35(3) : 185.
- [21] Oates, C.G. 1997. "Toward an Understanding of Starch Granule Structure and Hydrolysis." *Trends in Food Science and Technology*. 8(11) : 375-382.
- [22] Collison, R. 1968. **Starch and Its Derivatives**. London : Chapman and Hall Ltd.,
- [23] Jane, J. and Shen, J.J. 1993. "Internal Structure of the Potato Starch Revealed by Chemical Gelatinization." *Carbohydrate Research*, 247 : 279-293.
- [24] Kasemsuwan, T. Jane, J. Chen, Y.Y. Lee, L.F. McPherson, A.E. Wong, K.S. and Radosavljevic, M. 1999. "Effects of Amylopectin Branch Chain Length and Amylose Content on the Gelatinization and Pasting Properties of Starch." *Cereal Chemistry*. 76(5) : 629-637.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Oates, C.G. 1996. **Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology**. Bangkok : AIT Center.
- [26] Oates, C.G. 1997. "Toward an Understanding of Starch Granule Structure and Hydrolysis." *Trends in Food Science and Technology*. 8(11) : 375-382.
- [27] Swinkles, J.J.M. 1985. **Starch Conversion Technology**. Newyork : Marcel Dekker. Inc.
- [28] Tester, R.F. Karkalas, J. and Qi, X. 2004. "Starch—composition, fine structure and architecture." *Journal of Cereal Science*. 39(2) 151–165.
- [29] Watson, S.A. 1964. **Method in Carbohydrate Chemistry**. New York : Academic Press. 240-241.
- [30] จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก. 2556. **หนังสือสมุนไพรลดไขมันในเลือด 140. มั่นสำปะหลัง**. กรุงเทพฯ : ปณิตา
- [31] สำนักงานข้อมูลสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2014 **มั่นสำปะหลัง** [online]. Available : <http://www.medplant.mahidol.ac.th/tpex/>.
- [32] ภาควิชาพืชไร่ ภาควิชาเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 2014 **มั่นสำปะหลัง (cassava)** [online]. Available : <http://agri.kps.ku.ac.th/agron/>
- [33] โครงการเผยแพร่ข้อมูลทรัพยากรชีวภาพและภูมิปัญญาท้องถิ่นบนพื้นที่สูง, สถาบันวิจัยและพัฒนาที่สูง (องค์การมหาชน).2014. Cassava, Manioc, Tapioca : [online]. Available : <http://eherb.hrdi.or.th>.
- [34] วันทนีย์ วัฒนาสุรจิตต์ สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด สิงห์บุรี. Cassava (มั่นสำปะหลัง). 2014 [online]. Available : <http://www.sbo.moph.go.th>
- [35] เกศศิณี วงศ์กำภูและสาวิตรี พิเศษกิจจาววัฒน์. 2544 **การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมั่นสำปะหลัง** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [36] 2557 [online]. Available : <http://filing.fda.moph.go.th/library/elearning/CPIC.pdf>
- [37] William, D. ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์ รศ.ดร.กอบกุล หล่อทองคำ และ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน (Material Science and Engineering)**. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- [38] 2557. [online]. Available : <http://www.ceramic.lpru.ac.th/files/9%20fiber.doc>.
- [39] Mohanty, A. Manjusri, M. and Lawrence, T. D. 2005 **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. Newyork : CRC Press Reference
- [40] 2557. [online]. Available : <http://textilelearner.blogspot.com/2012/03/chemical-composition-of-textile-fiber.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] 2557. [online]. Available : [http://www.ars.usda.gov/main/site\\_main.html](http://www.ars.usda.gov/main/site_main.html).
- [42] 2557. [online]. Available : <http://202.28.48.140/isaninfo/?p=164>
- [43] Hribernik, M. S. Kleinschek, K. S. and Kreže, T. “**Plant Fibres for Textile and Technical Applications**” **374**. Slovenia : University of Maribor.
- [44] Liu, Y. Wang, J. Zheng, Y. and Wang, A. 2012. “Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology.” *Chemical Engineering*. 184(1) 248–255.
- [45] Abdullah, M.A. Rahmah, A.U. and Man, Z. 2010. “Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian Ceiba pentandra (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent.” *Journal of Hazardous Materials*. 177(1) 683–69.
- [46] ชลธิชา มีชนะ และระรินธร ศิริธะจารุพงศ์. 2549. “ผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ได้จากแบคทีเรียเซลลูโลส”. ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาชีวประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [47] 2558. [online]. Available : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Saponification/>.
- [48] 2558. [online]. Available : <http://home.roadrunner.com/~lubehawk/BioHELPI/biochem.html>.
- [49] 2557 [online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/.word/magnesium-stearate>.
- [50] 2557 [online] Available : <http://www.carterpharmaceuticalconsulting.com/articles/role-of-lubricants-in-solid-oral-dosage-manufacturing.html>.
- [51] 2557 [online] Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium\\_stearate](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_stearate).
- [52] ปณิตดา พวงเกษม. 2540. “ฟิล์มบริโกลที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง.” วชิยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตรการอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
- [53] Uthaichay, K. Hachawee, K. Arsaipanit, N. Surapat, N. Lerdwijtjarud, W. and Sittattrakul, A. 2005. “Preparation and testing of Thermoplastic Starch.” **31<sup>st</sup> Congress on Science on Science and Technology of Thailand at Queen sirikit National**.
- [54] เกศศิณี ตระกูลทิวากร, วิภา สุโรจนะเมธากุล, ประชาบุญญสิริกุล และ สมยศ จรรยาวินาศ. 2539. “การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง.” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [55] ภุริสา ทศวิไล, อรพิน เกิดชูชื่น และณัฏฐา เลหากุลจิตต์. 2553. “คุณสมบัติของฟิล์มประกอบ Biopolymer จากแป้งและเพคติน.” วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 41(1) 597-600.
- [56] Fishman, M. L. Coffin, D. R. Konstance, R. P. and Onuwulata, C. I. 2000. “Extrusion of Pectin/starch Blends Plasticizer with Glycerol.” *Carbohydrate Polymer*. 41(1) 317-325.
- [57] Lu, Y. Weng, L. and Cao, X. 2006. “Morphological, Thermal and Mechanical Properties of Ramie Crystallites–Reinforced Plasticized Starch Biocomposites.” *Carbohydrate Polymers*. 63(1) 198–240.
- [58] Dobircau, L. Sreekumar, P.A. Satah, R. Leblanc, N. Terrie, C. Gattin, R. and Saiter, J.M. 2009. “Wheat Flour Thermoplastic Matrix Reinforced by Waste Cotton Fiber : Agro-green Composites.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 40(1) 329-334.
- [59] Siti, Y.Z.Z. Lshak, A. Hanieh, K. Lbrahim, A. and Alain, D. 2013. “Potential of using Multiscale Kenaf Fibers as Reinforcing Filler in Cassava Starch-kenaf Biocomposites.” *Carbohydrate Polymers*. 92(1) 2299–2305.
- [60] Muller, C.M.O. Laurindo, J. B. and Yamashita, F. 2009. “Effect of Cellulose Addition on Mechanical Properties and Water Vapor Barrier of Starch-based Film.” *Food Hydrocolloid*. 23(1) 1328-1333.
- [61] Teixeira, E.D. Pasquini, D. and Corradini, E. 2009. “Cassava Bagasse Cellulose Nanofibrils Reinforced Thermoplastic Cassava Starch.” *Carbohydrate Polymers*. 78(1) 422-431.
- [62] The product conforms to the PD 227478-1 (บริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด)
- [63] ASTM D 638. “Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)”, Pliladepha : American Society for Testing and Materials. (1996).
- [64] Chandra, R. and Rustgi, R. 1998. “Biodregadable Polymers.” *Progress in Polymer Science*. 23(1) 1273-1335.
- [65] Chung, C. and Lee, M. 2014. “Characterization of Cotton Fabric Scouring by FT-IRATR Spectroscopy.” *Carbohydrate Polymers*. 58(1) 417-420.

- [66] เย็นหทัย แนนหนา. 2549. **สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [67] Pawlak, A. and Mucha, M. and Aoi, K. 2006. "Retrogradation of Ethyleneisformamide and Sorbital." *Starch*. 58(1) 580-586.
- [68] Aoi, K. Takasu, A. and Okada, M. 2000. "DNA-based Polymer Hybrid Part 1 Compatibility and Physical Properties of Poly (vinyl alcohol)/DNA sodium, salt Blend." *Polymer*. 41(1) 2846-2853.
- [69] Mishra, R.K., Datt, M., Pal, K. and Banthia, A.K. 2008. "Preparation and Characterization of Amidate Pectin Based Hydrogels for Drug Delivery System", *Journal of Material Science*. 19(1) 2275-2280.
- [70] Heitner, C., Dimmel, D.R. and Schmidt, J.A., 2010. "Vibration Spectroscopy", *Lignin and Lignans Advances in Chemistry*. 121-122.
- [71] พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์. 2551. **เพคติน . พอลิเมอร์ชีวภาพทางเภสัชกรรม** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า 188.
- [72] Bukayev, P.T. 1984. **General Technology of Cotton Manufacturing**. Translated by Chernysheva, N. Russia : Rubinoz.
- [73] Smole, M.S. Hribernik, S. Kleinschek, K.S. and Kreže, T. 2005. **Plant Fibres for Textile and Technical Applications**. United States : CRC Press.
- [74] Phillip, J. Wakelyn, Bertoniere N.R., French, A.D. Devron, P. Triplett, T.B.A. Rousselle, M.A. Goynes, W.R. Edwards, J.V. Hunter, L. McAlister, D.D. Gamble, G.R. 2006. **Cotton Fiber Chemistry and Technology**. United States : CRC Press.
- [75] Xiangwu, Z. 2014. **Fundamentals of Fiber Science**. United States : DEStech Publications
- [76] วัลลดา หวานเสนาะ. 2553. "สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลีทจากแป้งข้าวเจ้า เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด" *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [77] Eyring, H. and Halsey, G. 1946. "The Mechanical Properties of Textiles", *III. Textile Research Journal*. 16(1) 13-25.
- [78] Lim, T.T. Huang, X. 2007. "Evaluation of Kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a Natural Hollow Hydrophobic-oleophilic Fibrous Sorbent for Oil Spill Cleanup." *Chemosphere*. 66(1) 955-963.
- [79] Gáspár, M. Benkő, Z. Dogossy, G., Réczey, K. and Czigány, T. 2005. "Reducing Water Absorption in Compostable Starch based Plastics", *Polymer Degradation and Stability*. 90(30) 563-569.
- [80] Eliangelade, M. Cybele, L. Ana, C. Kelcilene, B. Teodoro, R. José, M. and Luiz, H.C. 2011. "Thermoplastic Corn Starch Reinforced with Cotton Cellulose Nanofibers." *Journal of Applied Polymer Science*. 120(4) 2428-2433.
- [81] Ma, X. Yua, J. and Kennedy, J.F. 2005. "Studies on the Properties of Natural Fibers Reinforced thermoplastic Starch Composites." *Carbohydrate Polymers*. 62(1) 19-24.
- [82] Martins, M. Sandra, G. Olivetra, P.L. Carmen, S.R. and Armando, J.D. 2009. "New Biocomposites based on Thermoplastic Starch and Bacterial Cellulose." *Composites Science and Technology*. 69(13) 2163-2168.
- [83] จีราวรรณ ไสธร วรณวรารงค์ สุทธะ และวิชรี คุณวิวัฒน์. 2552. "สมบัติต่างๆเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งท้าวยายม่อม หรือแป้งถั่วเขียว" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [84] Abidi, N. Hequet, E. and Ethride, D. 2007. "Thermogravimetric Analysis of Cotton Fibers: Relationship with Maturity and Fineness." *Journal of Applied Polymer Science*. 103(1) 3476-3482.
- [85] Prachayawarakorn, J. Ruttanabus, P. and Boonsom, P. 2011. "Effect of Cotton Fiber Contents and Lengths on Properties of Thermoplastic Starch Composites

Prepared from Rice and Waxy Rice Starches.” *Polymer and Environment*. 19(1)  
274–282.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



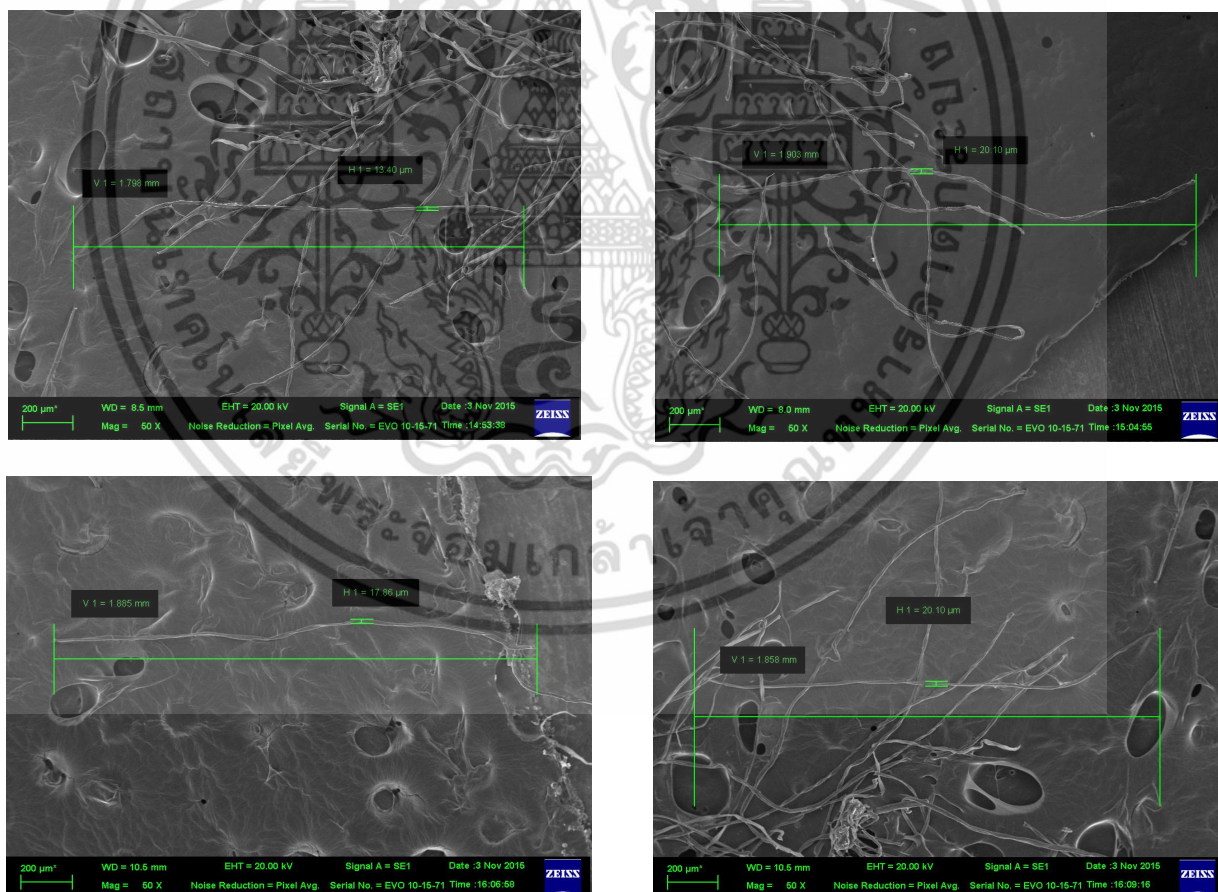
## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

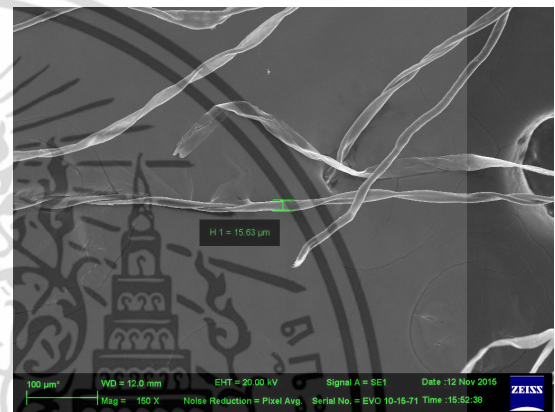
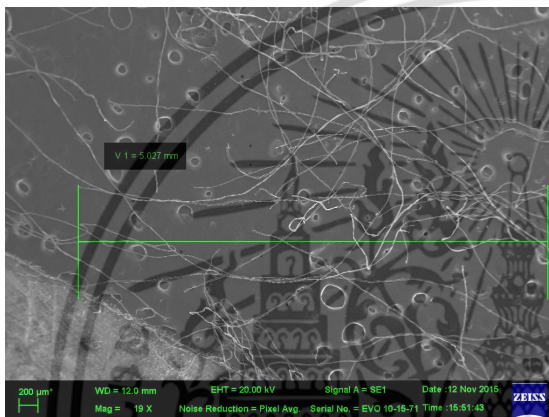
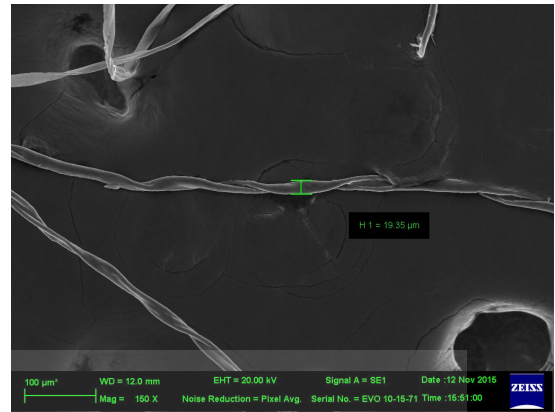
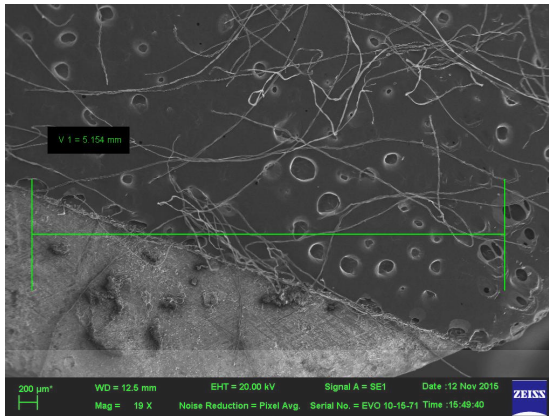
การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

ชนิดของเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ( $\mu\text{m}$ )	ความยาว (L) (mm)	L/D ratio
ฝ้าย	18.34 $\pm$ 1.62	2.06 $\pm$ 0.24	112/1
	15.14 $\pm$ 2.90	5.08 $\pm$ .25	335/1
นุ่น	21.75 $\pm$ 4.50	2.08 $\pm$ 0.22	95/1
	25.16 $\pm$ 4.24	5.21 $\pm$ 0.32	207/1



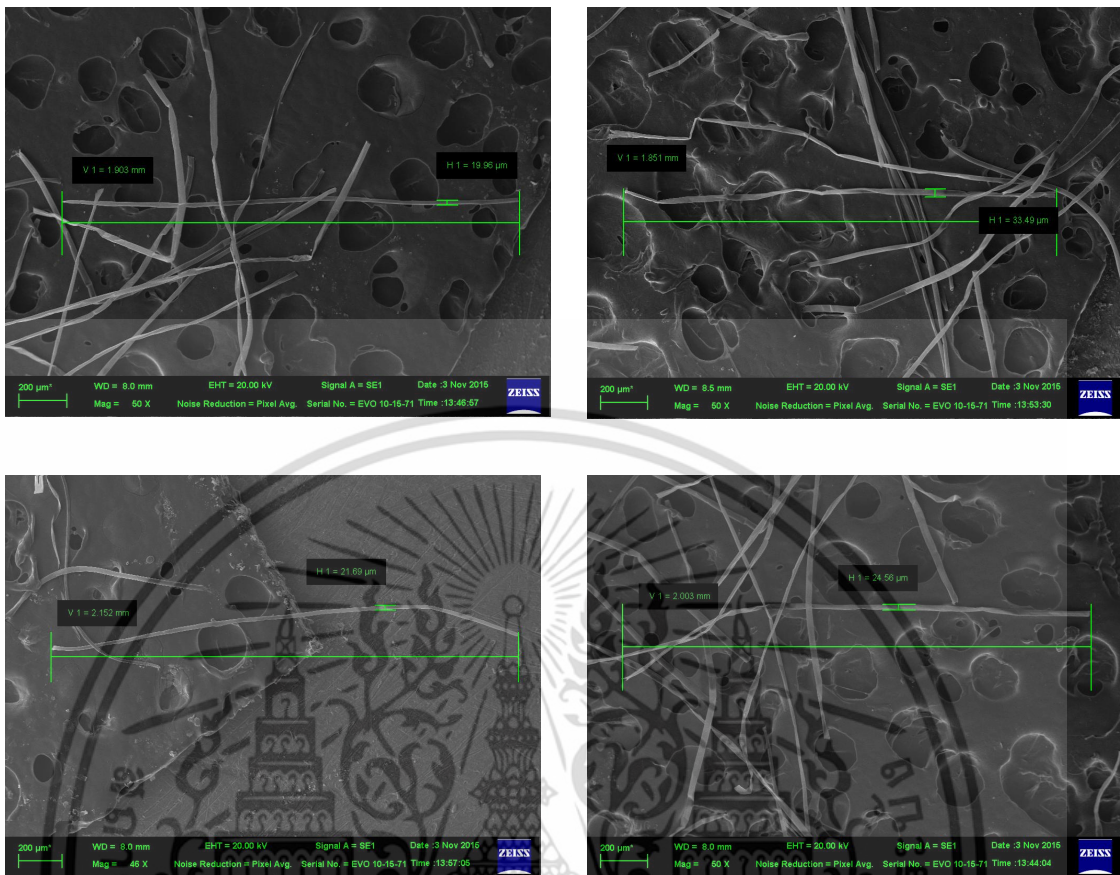
รูปที่ ก.1 เส้นใยฝ้ายที่ความยาว 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



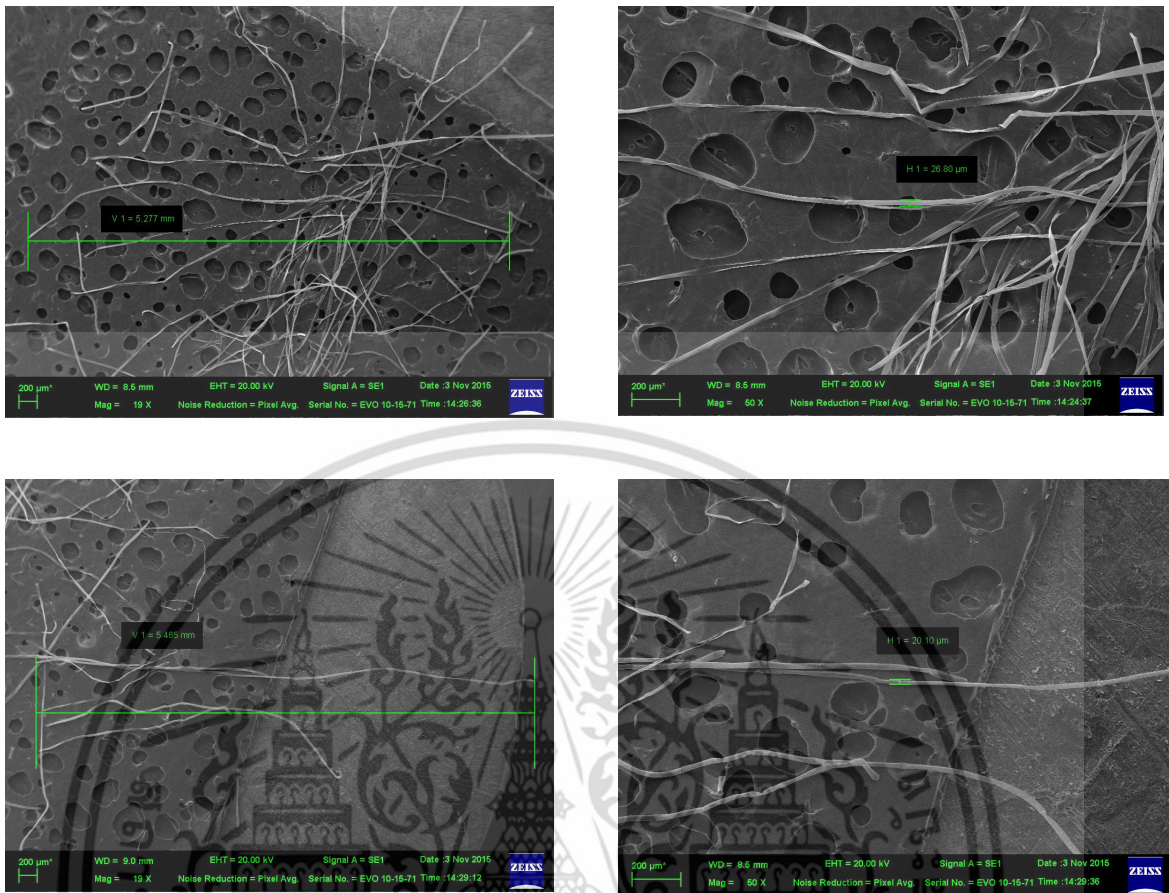
รูปที่ ก.2 เส้นใยฝ้ายที่ความยาว 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 เส้นใยนาโนที่มีความยาว 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 เส้นใยุ่นที่ความยาว 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### สมบัติการย่อยสลาย

ลักษณะชิ้นงานหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน เส้นใยฝ้ายและเส้นใยถั่วในปริมาณและความยาวต่างๆ



รูปที่ ข.1 ภาพชิ้นงาน 2 สัปดาห์ของการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่ได้จากกล้องดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 ลักษณะของชิ้นงานหลังทดสอบดูดซับความชื้นเป็นระยะเวลา 22 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดิน เป็นระยะเวลา 0, 2 และ 4 สัปดาห์ ของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

(1) ตารางแสดงค่าแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังฝังดิน

Maximum load (N)			
แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	10.04±1.42	5.45±1.34	5.45±1.31
TPCS20P	20.53±3.08	9.18±1.58	5.54±0.36
TPCS20P5C-2	33.03±2.2	18.19±5.51	11.52±2.7
TPCS20P15C-2	57.81±7.5	23.15±2.56	17.07±1.07
TPCS20P15C-5	41.05±4.3	20.18±2.15	15.71±1.04
TPCS20P5K-2	29.08±1.87	15.99±1.8	11.25±2.43
TPCS20P15K-2	92.56±6.1	23.68±4.07	22.2±1.24
TPCS20P15K-5	60.65±13.12	31.96±5.75	24.52±0.82
TPCS15C-2	37.82±4.14	32.07±6.39	16.53±3.34
TPCS15K-2	42.56±2.53	35.79±11.4	27.78±5.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) ตารางแสดงค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังฝังดิน

Stress at max load (MPa)			
แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	0.78±0.09	0.37±0.08	0.37±0.08
TPCS20P	1.55±0.21	0.51±0.23	0.36±0.02
TPCS20P5C-2	2.2±0.19	1.18±0.35	0.74±0.14
TPCS20P15C-2	4.03±0.52	1.4±0.21	1.01±0.1
TPCS20P15C-5	2.9±0.41	1.29±0.13	0.68±0.14
TPCS20P5K-2	2.38±0.13	0.98±1.81	1.35±0.06
TPCS20P15K-2	6.3±0.38	1.48±0.25	1.39±0.11
TPCS20P15K-5	4.16±0.61	2.05±0.36	0.68±0.14
TPCS15C-2	2.61±0.38	2.16±0.43	1.11±0.19
TPCS15K-2	3.2±0.15	2.2±0.76	1.82±0.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (3) ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ก่อนและหลังฝังดิน

Strain at max load (%)			
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	193.24±34.24	57.43±11.69	57.43±11.69
TPCS20P	66.13±18.43	30.47±13.53	40.33±3.11
TPCS20P5C-2	29.46±5.14	31.25±3.2	32.53±7.76
TPCS20P15C-2	12.89±2.77	20.31±3.07	25.9±4.54
TPCS20P15C-5	13.08±2.05	19.17±2.46	25.5±1.96
TPCS20P5K-2	25.56±8.7	25.93±1.81	29.54±4.67
TPCS20P15K-2	5.33±0.82	10.37±3.2	21.06±4.97
TPCS20P15K-5	4.14±1.52	12.12±1.91	15.27±1.7
TPCS15C-2	36.49±8.4	18.55±1.02	27.63±2.7
TPCS15K-2	20.1±3.76	2.28±0.76	16.62±3.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (4) ตารางแสดงค่ามอดูลัส ก่อนและหลังฝังดิน

Young's modulus (MPa)			
มอดูลัส			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	1.49±0.26	0.73±0.51	0.73±0.51
TPCS20P	13.34±2.71	3.91±0.98	1.92±2.1
TPCS20P5C-2	27.63±5.08	9.52±2.99	9.03±8.66
TPCS20P15C-2	57.17±5.03	12.85±2.53	8.36±3.64
TPCS20P15C-5	54.9±9.76	14.39±1.85	15.51±6.88
TPCS20P5K-2	27.5±11.2	9.25±4.00	5.78±0.3
TPCS20P15K-2	204.34±37	43.38±7.64	22.55±4.66
TPCS20P15K-5	158.29±36	42.16±7.19	25.66±7.29
TPCS15C-2	22.22±9.7	25.23±6.06	4.53±1.58
TPCS15K-2	37.2±6.19	33.54±4.6	25.08±12.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (5) ตารางแสดงค่าการดิ่งยัด ก่อนและหลังฝังดิน

Deflection at max load (mm)			
การดิ่งยัด			
สูตร	ระยะเวลาในการฝังดิน		
	0 สัปดาห์	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์
TPCS	50.16±5.29	14.35±2.92	14.35±2.92
TPCS20P	15.88±4.36	7.46±0.98	10.05±0.79
TPCS20P5C-2	7.7±1.47	6.8±1.01	9.13±0.78
TPCS20P15C-2	3.22±0.69	5.07±0.76	8.36±3.64
TPCS20P15C-5	2.66±1.18	4.78±0.61	6.3±0.49
TPCS20P5K-2	6.38±2.19	5.95±1.06	7.58±2.92
TPCS20P15K-2	1.33±0.2	2.59±0.8	4.22±0.54
TPCS20P15K-5	1.03±0.37	3.02±0.48	3.81±0.42
TPCS15C-2	7.97±1.75	4.6±0.25	6.9±0.68
TPCS15K-2	5.01±0.94	3.19±0.7	4.15±0.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

### สมบัติเชิงกล

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น

1. สมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

สมบัติเชิงกลของเส้นใยฝ้ายที่ความยาว 2 มิลลิเมตร

Maximum load (N) แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใยที่ ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร	0	10	20
0	10.81±1.42	12.39±1.5	20.3±3.11
5	10.23±0.71	23.66±1.75	33.03±2.38
10	20.54±1.92	42.25±8.75	45.46±4.44
15	37.82±4.47	42.61±11.05	57.81±8.2

Stress at max load (MPa) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	0.78±0.09	0.95±0.12	1.52±0.21
5	0.84±0.07	1.88±0.15	2.20±0.2
10	1.68±0.15	2.95±0.59	3.4±0.26
15	2.61±0.41	2.98±0.78	4.03±0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young's modulus (MPa) มอดุลัส			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	1.49±0.26	4.55±2.02	13.17±3.07
5	2.42±0.35	13.84±2.73	27.63±5.48
10	9.86±3.31	21.47±14.27	46.46±6.89
15	22.22±10.55	45.86±23.21	57.17±5.44

Strain at max load (%) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	193.24±34.24	129.07±31.35	66.51±17.37
5	83.18±16.39	48.21±15.75	29.46±5.55
10	44.75±8.56	13.31±1.92	20.63±4.08
15	36.49±9.08	17.28±5.9	12.89±2.99

Extension at max load (mm) การดึงยืด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	50.16±5.29	32.25±7.83	16.14±4.16
5	20.79±4.09	12.02±3.93	7.7±5.48
10	11.18±2.13	2.97±0.87	5.15±1.02
15	7.97±1.89	4.32±1.47	3.22±0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมบัติเชิงกลของเส้นใยฝ้ายที่ความยาว 5 มิลลิเมตร

Maximum load (N) แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใยที่ ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร	0	10	20
0	10.81±1.42	12.39±1.5	20.3±3.11
5	0.67±0.02	14.05±1.59	27.26±3.39
10	16.9±1.09	28.66±8.4	31.94±14.34
15	17.34±1.28	30.88±4.44	41.05±4.65

Stress at max load (MPa) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	0.78±0.09	0.95±0.12	1.52±0.21
5	7.92±0.36	1.10±0.10	1.93±0.13
10	1.30±0.08	1.92±0.36	2.28±0.87
15	1.46±0.10	2.16±0.26	2.90±0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young's modulus (MPa) มอดุลัส			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	1.49±0.26	4.55±2.02	13.17±3.07
5	1.63±0.14	5.65±1.07	23.47±3.92
10	9.44±2.01	8.71±4.93	39.65±14.9
15	15.94±3.86	17.58±1.32	54.9±10.54

Strain at max load (%) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	193.24±34.24	129.07±31.35	66.51±17.37
5	93.55±21.34	59.01±13.67	30.00±4.29
10	53.95±4.45	26.12±3.79	15.56±2.81
15	51.42±7.63	28.29±8.09	13.08±2.21

Extension at max load (mm) การดึงยืด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	50.16±5.29	32.25±7.83	16.14±4.16
5	23.38±5.33	14.76±3.40	7.5±1.03
10	13.52±1.13	5.2±1.05	3.88±0.70
15	7.24±1.12	7.06±2.02	2.66±1.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.สมบัติเชิงกลของ TPCS ที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณและความยาวต่างๆ

สมบัติเชิงกลของเส้นใยุ่นที่ความยาว 2 มิลลิเมตร

Maximum load (N) แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใยที่ ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร	0	10	20
0	10.81±1.42	12.39±1.5	20.3±3.11
5	16.78±1.74	17.68±1.72	29.08±2.02
10	25.31±2.63	45.34±2.91	81.91±12.98
15	42.56±2.73	52.26±6.45	92.56±6.59

Stress at max load (MPa) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	0.78±0.09	0.95±0.12	1.52±0.21
5	1.34±0.13	1.55±0.16	2.38±0.14
10	2.06±0.23	3.31±0.15	5.39±0.8
15	3.21±0.16	3.56±0.43	6.30±0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young's modulus (MPa) มอดุลัส			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	1.49±0.26	4.55±2.02	13.17±3.07
5	7.36±0.85	11.07±3.07	27.5±12.1
10	18.25±3.82	49.87±5.34	114.55±22.81
15	37.28±6.69	108.37±36.14	204.34±40.97

Strain at max load (%) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	193.24±34.24	129.07±31.35	66.51±17.37
5	59.6±12.05	27.96±9.33	25.56±9.4
10	33.18±5.69	15.66±2.1	9.82±1.81
15	20.1±4.06	12.68±2.14	5.33±0.89

Extension at max load (mm) การดึงยืด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	50.16±5.29	32.25±7.83	16.14±4.16
5	14.89±3.02	7.33±2.85	6.38±2.36
10	7.58±1.56	3.9±0.52	2.45±0.45
15	5.01±1.01	3.74±0.70	1.33±0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมบัติเชิงกลของเส้นใยุ่นที่ความยาว 5 มิลลิเมตร

Maximum load (N) แรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใยที่ ความยาวเส้นใย 2 มิลลิเมตร	0	10	20
0	10.81±1.42	12.39±1.5	20.3±3.11
5	14.11±0.78	16.07±1.33	19.25±2.16
10	19.68±3.63	38.42±9.03	49.07±10.03
15	21.62±3.98	40.87±8.87	60.65±14.35

Stress at max load (MPa) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	0.78±0.09	0.95±0.12	1.52±0.21
5	1.2±0.07	1.29±0.09	1.59±0.18
10	1.69±0.31	2.57±0.59	3.51±0.52
15	1.64±0.24	3.02±0.64	4.16±0.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young's modulus (MPa)			
มอดุลัส			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	1.49±0.26	4.55±2.02	13.17±3.07
5	5.32±0.96	11.62±2.69	14.02±2.96
10	15.06±1.9	48.17±9.62	102.91±27.51
15	33.78±7.32	95.37±16.37	158.29±39.54

Strain at max load (%)			
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	193.24±34.24	129.07±31.35	66.51±17.37
5	71.82±12.38	28±5.6	29.75±5.14
10	33.30±10.67	15.26±3.23	5.65±1.56
15	11.05±1.68	6.05±1.91	4.14±1.67

Extension at max load (mm)			
การดึงยืด			
สูตร	ปริมาณเพคติน (%)		
ปริมาณเส้นใย	0	10	20
0	50.16±5.29	32.25±7.83	16.14±4.16
5	17.96±3.1	6.99±1.40	8.67±1.29
10	8.35±2.63	2.74±0.99	1.41±0.39
15	2.27±0.62	1.51±0.47	1.03±0.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## การดูดซับน้ำ

สูตร	ค่าแสดง
1	TPCS
2	TPCS20P
3	TPCS20P5C-2
4	TPCS20P15C-2
5	TPCS20P15C-5
6	TPCS20P5K-2
7	TPCS20P15K-2
8	TPCS20P15K-5
9	TPCS15K-2
10	TPCS15C-2

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	8	7	7	7	7	7	6	9	11
2	16	13	11	12	11	11	12	10	14	17
3	25	24	20	22	21	21	21	20	23	26

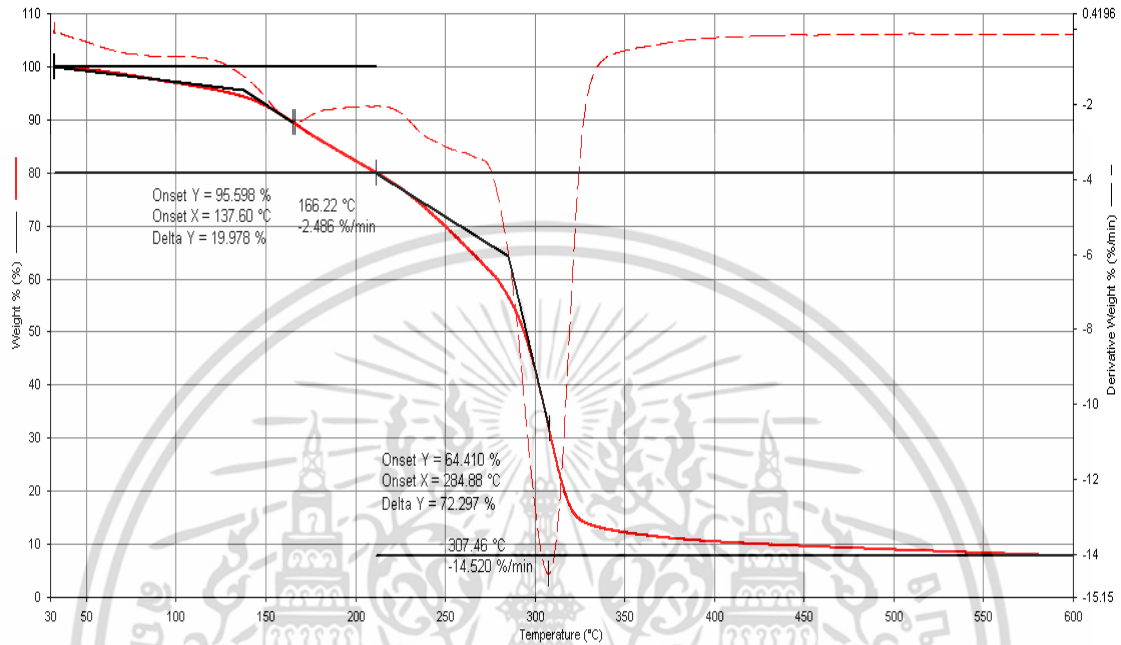
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (วัน)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	28	27	24	25	23	24	25	24	27	29
5	30	30	27	26	27	28	30	27	30	31
6	32	33	29	31	30	30	32	29	31	32
7	39	36	32	34	32	32	34	32	32	33
8	39	41	33	36	33	34	36	34	34	36
9	48	48	40	43	39	40	42	40	40	45
10	49	49	42	44	40	41	43	41	40	45
11	52	50	43	45	41	43	35	41	41	47
12	55	55	41	46	41	43	45	42	41	49
13	57	58	49	51	48	49	51	47	45	50
14	57	60	50	51	50	50	52	48	45	49
15	56	61	50	51	51	51	53	49	45	49
16	57	61	50	53	51	51	53	49	45	49
17	59	64	53	54	52	53	55	51	45	49
18	59	64	53	54	52	53	55	51	45	49
19	59	64	53	54	52	53	55	51	45	49
20	59	64	53	54	52	53	55	51	45	49
21	59	64	53	54	52	53	55	51	45	49

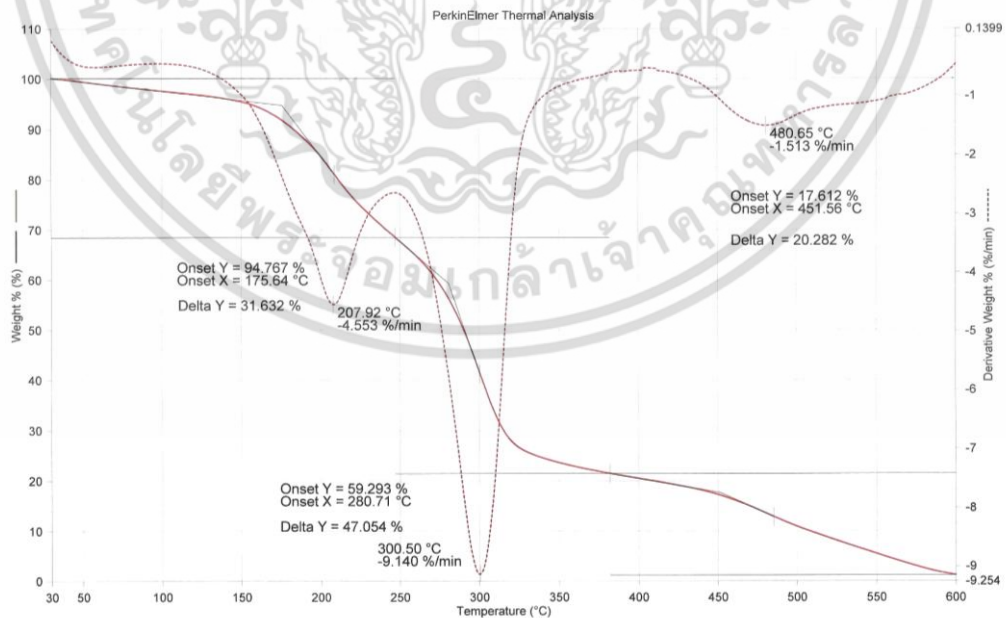
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

สมบัติทางความร้อน

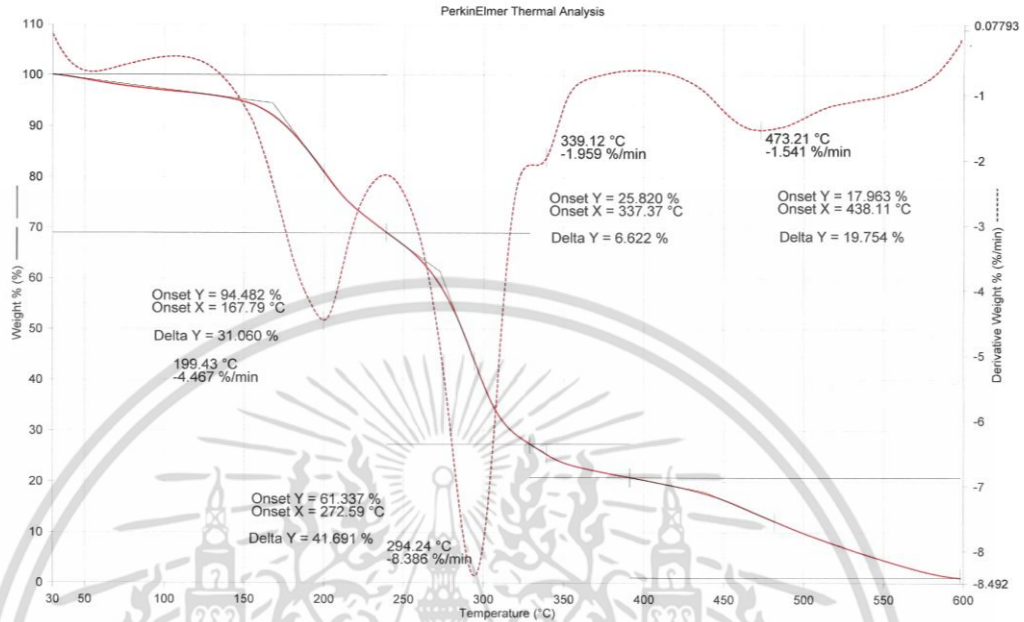


รูปที่ จ.1 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุง

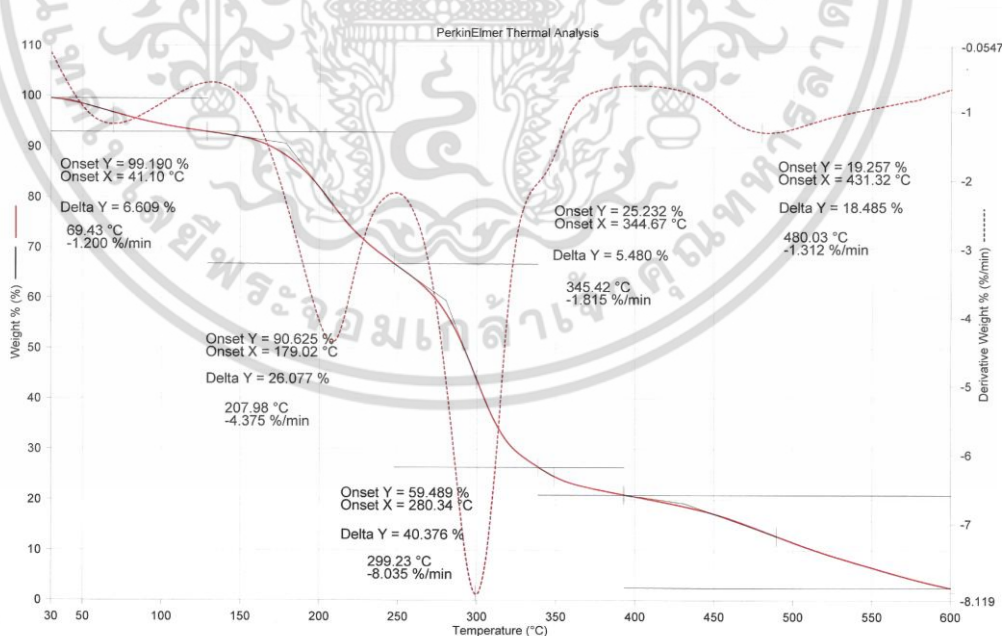


รูปที่ จ.2- เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

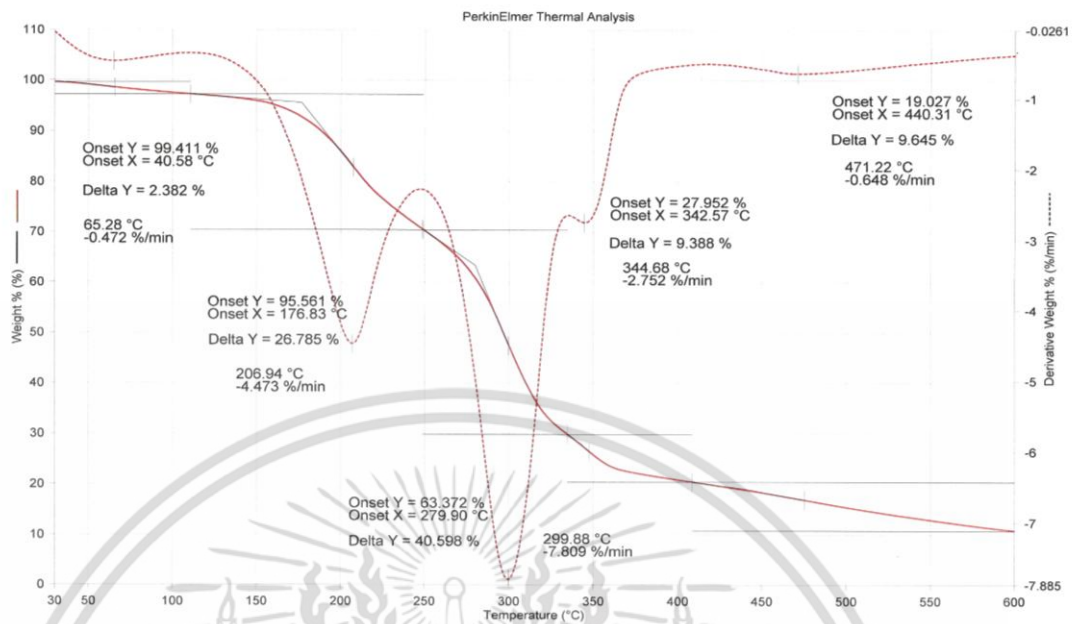


รูปที่ จ.3 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณ 5% ความยาว 2 มิลลิเมตร

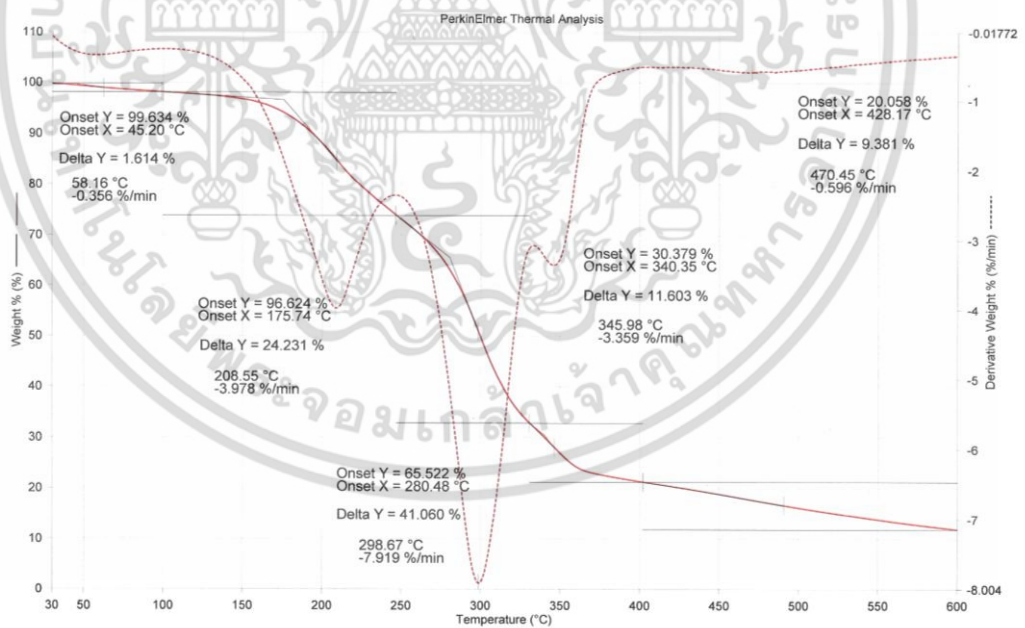


รูปที่ จ.4 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณ 15% ความยาว 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

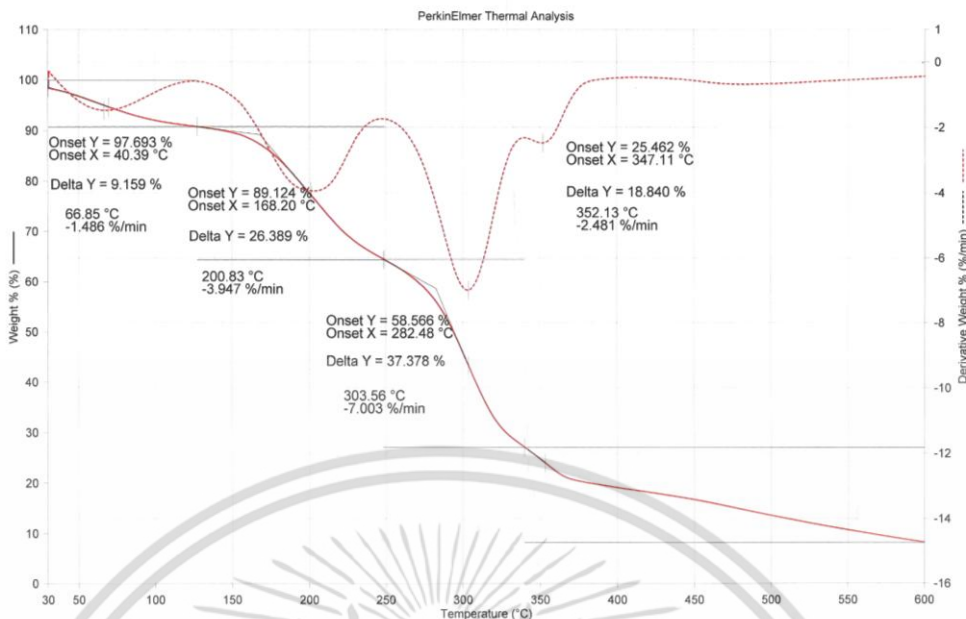


รูปที่ จ.5 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นที่ปริมาณ 15% ความยาว 5 มิลลิเมตร

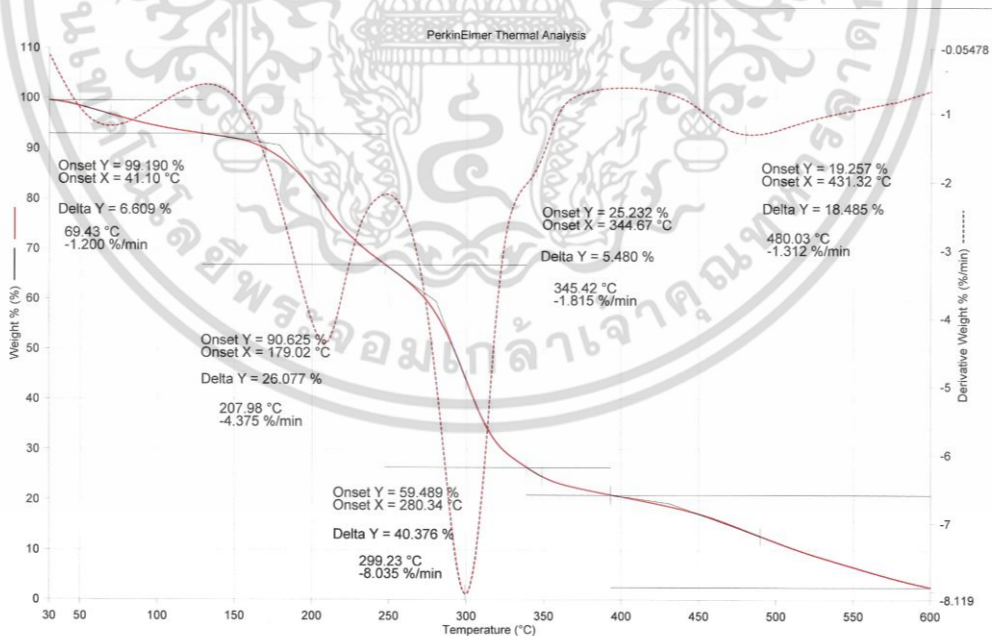


รูปที่ จ.6 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 5% ความยาว 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

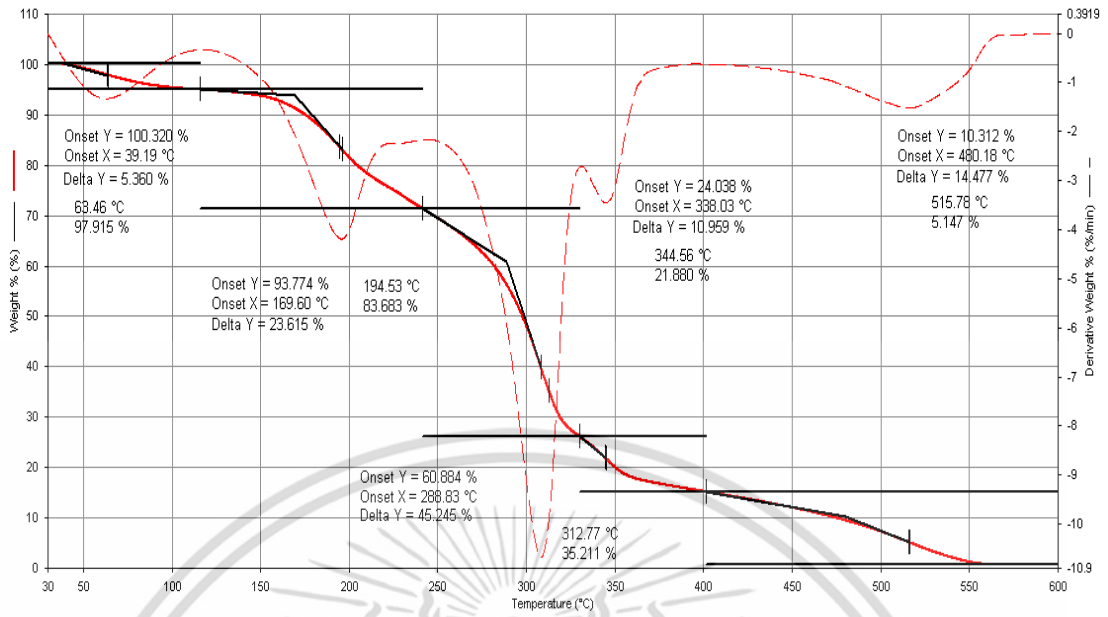


รูปที่ จ.7 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ความยาว 2 มิลลิเมตร

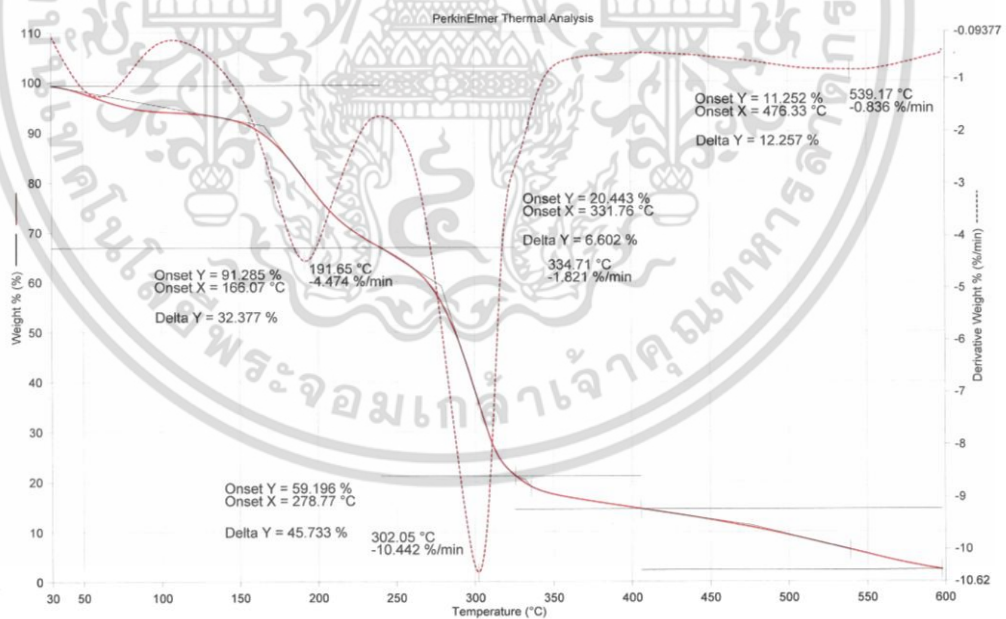


รูปที่ จ.8 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยเพคติน เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ความยาว 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.9 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ จ.10 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่นที่ ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้