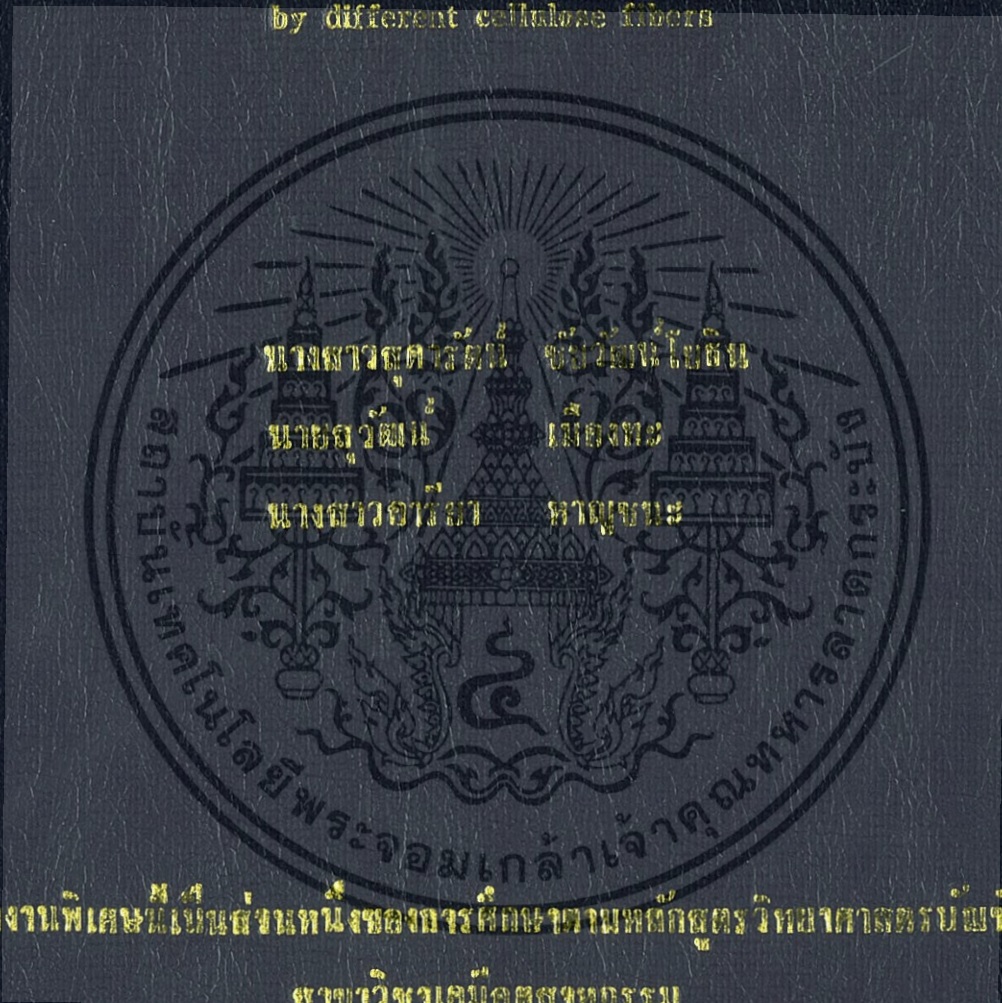


สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสต์คอมโพสิตแป้งมันสำปะหลัง  
เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส

Properties of thermoplastic cassava starch composite reinforced  
by different cellulose fibers



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาค้นคว้าเพื่อศึกษาคณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พุทธศักราช 2554

สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง

เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น

**Properties of thermoplastic cassava starch composite reinforced**

**by different cellulose fibers**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

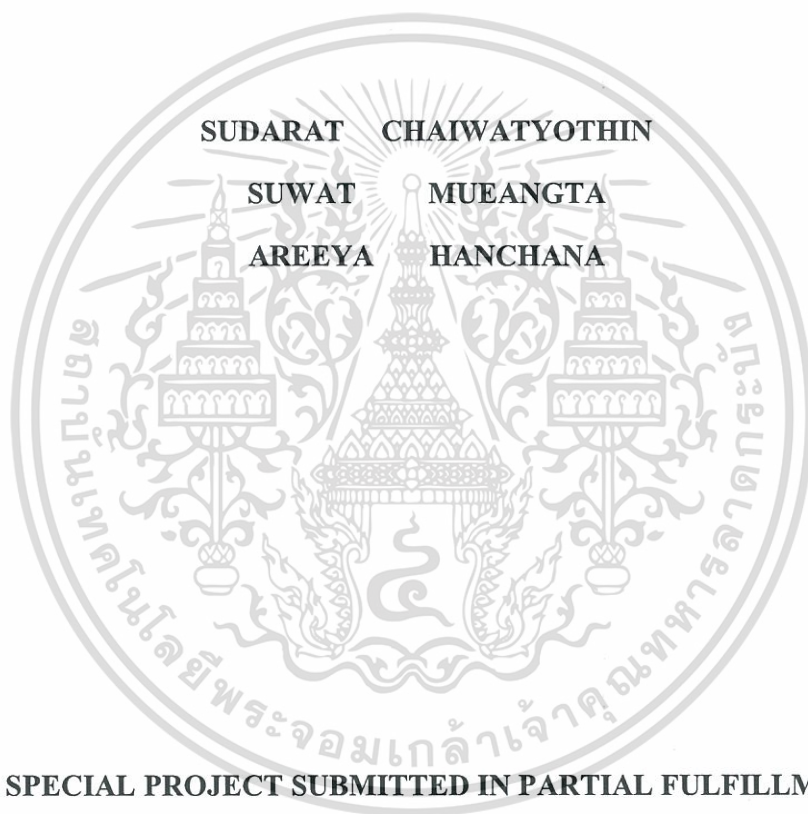
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PROPERTIES OF THERMOPLASTIC CASSAVA STARCH  
COMPOSITE REINFORCED BY DIFFERENT  
CELLULOSE FIBERS**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YAER 2011**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น

Properties of thermoplastic cassava starch composite reinforced by different cellulose fibers


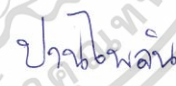

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน  
นายสุวัฒน์ เมืองทะ  
นางสาวอารีญา หาญชนะ

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2554

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์	
ดร.ปานไพลิน สีหาราช	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น		
นักศึกษา	1. นางสาวสุภารัตน์	ชัชวัฒน์โยธิน	รหัสนักศึกษา 51050205
	2. นายสุวัฒน์	เมืองทะ	รหัสนักศึกษา 51050213
	3. นางสาวอารียา	หาญชนะ	รหัสนักศึกษา 51050224
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2554		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิด ปริมาณและขนาดของเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วน 65:35 ของแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอล เส้นใยเซลลูโลสได้แก่เส้นใยปอ และเส้นใยนุ่น โดยใช้ในอัตราส่วน 0 5 10 15% โดยน้ำหนักของแป้งและกลีเซอรอล โดยเริ่มจากเตรียมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลผสมเส้นใยต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน การดูดซึมน้ำ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติการย่อยสลาย พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นจากการเติมเส้นใยลงไป ลักษณะสันฐานวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ ที่ผสมเส้นใย พบว่าเส้นใยเข้ากับเมทริกซ์ของแป้งได้ อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ จากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณเส้นใยปอลงไป แต่อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมเส้นใยนุ่นลงไป การดูดซึมน้ำพบว่าเมื่อผสมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลง และการย่อยสลายโดยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ ที่ผสมเส้นใยมีแนวโน้มต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรฯ ที่ไม่ได้เติมเส้นใย

**Title** Properties of thermoplastic cassava starch composite reinforced by different cellulose fibers

**Students** Miss Sudarat Chaiwatyothin ID 51050205  
 Mr. Suwat Mueangta ID 51050213  
 Miss Areeya Hanchana ID 51050224

**Degree** Bachelor of Science

**Major Program** Industrial chemistry

**Academic Year** 2011

**Advisor** Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachyawarakorn

### Abstract

This research involved with the effect of types, contents, and sizes of different cellulose fibers on properties of thermoplastic starch (TPS), based on cassava starch by plasticized glycerol at the ratio of 65:35 of cassava starch to glycerol. Cellulose fibers were jute and kapok fibers with different of ratios at 0 5 10 15% by TPS weight. Different TPS samples were compounded by internal mixer and shaped by compression molding. Mechanical, physical, morphological, thermal, water uptake, functional groups analysis, and biodegradable properties were then analyzed. The results showed that tensile properties improved when increased the fibers into the TPS. In morphology, the addition of fibers into the TPS matrix resulted in good phase distribution between TPS and fibers. The onset degradation temperature of the TPS increased by the addition jute fibers, but kapok fibers tended to decrease the onset thermal degradation temperature of the TPS. Moreover, water adsorption of the TPS reduced with incorporation of the fibers. Furthermore, the biodegradability of the TPS with the addition of the fibers was lower than the TPS without the fibers.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ดำเนินงานได้เป็นอย่างดีโดยได้รับทุนการสนับสนุนการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และได้รับการสนับสนุนจากด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่เป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำต่างๆเกี่ยวกับโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ และดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษโดยช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ซึ่งทำให้พวกเราสามารถทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์ต่างๆ และให้ความช่วยเหลือรวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ คุณสุภัทร บานเย็น ที่กรุณาช่วยสอนการใช้เครื่อง FTIR นอกจากนี้ยังมีบุคคลกรท่านอื่นที่ให้ความกรุณา ซึ่งผู้จัดมิได้กล่าวถึงกลุ่มวิจัย ขอขอบพระคุณมาเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวสุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน

นายสุวัฒน์ เมืองทะ

นางสาวอารียา หาญชนะ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	X
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	6
2.1 ไบโอฟอสติก	6
2.1.1 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการย่อยสลาย โดยการใช้ฟังกัล	6
2.1.2 การย่อยสลายของแป้ง	7
2.2 คอมโพสิต	8
2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต	9
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต	10
2.3 แป้ง	11
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง	11
2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง	11
2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง	13

	หน้า
2.3.4 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง	19
2.3.5 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	20
2.3.6 สมบัติของแป้ง	23
2.3.7 การเกิดเจลลิตีในเซชัน	24
2.3.8 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	25
2.4 แป้งมันสำปะหลัง	27
2.4.1 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง	27
2.4.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	29
2.5 เส้นใย	31
2.5.1 ประเภทของเส้นใย	32
2.5.2 สมบัติของเส้นใย	33
2.5.3 เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ	33
2.6 พลาสติกไซเซออร์	36
2.7 เทคนิคการอัด	37
2.7.1 เทคนิคการอัด	38
2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด	40
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>47</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	47
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	48
3.3 วิธีการทดลอง	50
3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง	50
3.3.2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง	50
3.3.3 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเส้นใยเซลลูโลส	51
3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	52

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	57
4.1 การวัดสี	57
4.2 การดูดซับน้ำ	61
4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	62
4.4 การเทียบเบร้งสีเอกซ์	64
4.5 สัณฐานวิทยา	66
4.6 การศึกษาสมบัติเชิงกล	70
4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	73
4.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	78
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	81
5.1 สรุปผลวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	84
<b>ภาคผนวก ก</b>	89
<b>ภาคผนวก ข</b>	91
<b>ภาคผนวก ค</b>	95
<b>ภาคผนวก ง</b>	96
<b>ภาคผนวก จ</b>	98
<b>ภาคผนวก ฉ</b>	102
<b>ภาคผนวก ช</b>	103

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	14
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	15
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสเพกทิน	18
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ	19
ตารางที่ 2.5 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ	23
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง	47
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลส	47
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลที่ใช้เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	50
ตารางที่ 3.4 ขนาดของเส้นใยปอ	51
ตารางที่ 3.5 ขนาดของเส้นใยนุ่น	51
ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใย	51
ตารางที่ 3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้	54
ตารางที่ 4.1 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ	57
ตารางที่ 4.2 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น	59
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยและที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ	76
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยและที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น	76

## สารบัญญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะของส่วนเสริมแรงในคอมโพสิต	10
รูปที่ 2.2 วัฏจักรแคลวิน	12
รูปที่ 2.3 วัฏจักรการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างอะมิโลส	14
รูปที่ 2.5 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส	16
รูปที่ 2.6 แบบจำลอง โครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน	16
รูปที่ 2.7 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน	17
รูปที่ 2.8 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา	20
รูปที่ 2.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน	21
รูปที่ 2.10 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	22
รูปที่ 2.11 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งถั่วเขียว	22
รูปที่ 2.12 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	26
รูปที่ 2.13 กลไกการคืนตัวของแป้ง	26
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	29
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	30
รูปที่ 2.16 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านกระบวนการความร้อนขึ้น	31
รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องอัด	37
รูปที่ 2.18 การเติมคอมปาวด์ลงในแป้งที่มีหลายช่อง	39
รูปที่ 2.19 เครื่องแป้งแบบอัตโนมัติ	39
รูปที่ 2.20 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดและการนึ่ง	40
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย	49
รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	55

รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะสีของชิ้นงานตัวอย่าง	60
รูปที่ 4.2	ผลของเส้นใยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง	61
รูปที่ 4.3	อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ	62
รูปที่ 4.4	อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น	63
รูปที่ 4.5	ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ	64
รูปที่ 4.6	ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น	65
รูปที่ 4.7	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง	67
รูปที่ 4.8	ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังผสมด้วยเส้นใยปอ	68
รูปที่ 4.9	ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังผสมด้วยเส้นใยนุ่น	69
รูปที่ 4.10	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยเส้นใยปอ และนุ่น	70
รูปที่ 4.11	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากปอ	74
รูปที่ 4.12	เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากนุ่น	75
รูปที่ 4.13	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	78
รูปที่ 4.14	ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	79

## คำย่อและสัญลักษณ์

TPS = Thermoplastic starch (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช)

PLA = Polylactic acid (พอลิแลคติกแอซิด)

PHAs = Polyhydroxy alkanooate (พอลิไฮดรอกซีอัลคานโอเอท)

$T_m$  = อุณหภูมิการหลอมเหลว

$T_d$  = Onset decomposition temperature (อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว)

CTE = Coefficients of Thermal Expansion (สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน)

DP = Degree of Polymerization (ขนาดโมเลกุล)

NC = Number of Chain (จำนวนสาย)

CL = Chain Length (ความยาวสาย)

ECL = External Chain Length (ความยาวสายภายนอก)

ICL = Internal Chain Length (ความยาวสายภายใน)

TGA = Thermogravitic Analyzer (เครื่องทดสอบทางความร้อน)

SEM = Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)

FTIR = Fourier Transform Infrared Spectroscopy (เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์)

OM = Optical Microscope (กล้องจุลทรรศน์แบบแสง)

XRD = X-ray Diffraction (การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์)

E = Young's modulus (มอดุลัส)

$L^*$  = Lightness (ความสว่าง)

$C^*$  = ความสดสี

$h^\circ$  = Hue Angle

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้ปฏิเสธไม่ได้ว่าพลาสติกมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทำให้ความต้องการใช้พลาสติกมีปริมาณมากจนกลายเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม สาเหตุเกิดจากค่านิยมในการบริโภค และการใช้วัสดุที่ทนหรือบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีการใช้พลาสติกโดยไม่มีมาตรการมาจำกัดหรือบังคับให้ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการกำจัด ทำให้ปริมาณของขยะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น วิธีการกำจัดขยะพลาสติกวิธีที่ง่ายที่สุด คือ การฝังกลบ แต่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติพลาสติกจะถูกย่อยสลายได้ยาก เพราะพลาสติกมีอายุการสลายตัวในธรรมชาติหรือในบรรยากาศมากกว่า 400 ปี จึงทับถมอยู่ในดินและเป็นที่มาของก๊าซมีเทน ก๊าซมีเทนเกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพที่ปราศจากออกซิเจน และนับวันยังมีปริมาณมากขึ้นตามปริมาณการใช้พลาสติก ส่วนการเผาขยะพลาสติกก่อให้เกิดมลพิษและเป็นอันตรายอย่างมาก ถ้าหากนำพลาสติกมาเผาทำลายจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่เป็นต้นเหตุของปัญหาโลกร้อน (Global warming) วิธีการแก้ปัญหaxyขยะพลาสติกที่ได้ผลดีที่สุด คือ การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่หรือการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นพลาสติกที่มาจากสิ่งมีชีวิต เช่น พืช และสัตว์ ตัวอย่างของพลาสติกชีวภาพ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) พลาสติกจากโปรตีนถั่วเหลือง (Soy protein plastic) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxy alkanooate, PHAs) เป็นต้น พลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จึงไม่ก่อให้เกิดการตกค้างของขยะพลาสติกภายหลังการใช้งาน นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถหาใหม่ทดแทนได้ ปัจจุบันวัสดุชีวภาพได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อทดแทนวัสดุสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกทั้งในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันทั่วไป

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีความอุดมสมบูรณ์ในเรื่องของวัตถุดิบเกษตร เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และถั่วต่างๆ เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยส่งออกมันสำปะหลังได้มากที่สุดในโลกเป็นพืชอาหารที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลก โดยเป็นพืชที่ทำรายได้ให้เกษตรกรไทยมากเป็นอันดับที่ 4 มีแหล่งปลูกมันสำปะหลังที่สำคัญที่สุดในปัจจุบันคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มันสำปะหลังสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น ผงชูรส ไม้อัด กระดาษ สิ่งทอ และวัสดุย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นต้น เป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในรูปของคาร์โบไฮเดรตหรือแป้ง ซึ่งแป้งที่ได้มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและมีราคาถูก

แป้งที่ได้จากมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ โดยทั่วไปสตาโรซ์ในรูปของเม็ดแป้งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปโดยเทคโนโลยีที่ใช้กับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดแป้ง ( $T_m \sim 220-240^\circ\text{C}$ ) สูงกว่าอุณหภูมิสลายตัว ( $T_d \sim 220^\circ\text{C}$ ) ส่งผลให้เม็ดแป้งสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว การผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ (เช่น น้ำ กาลีเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น) ในสถานะที่มีคาร์โบไฮเดรต ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน จะให้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ อย่างไรก็ตามเทอร์โม-พลาสติกสตาโรซ์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความว่องไวต่อความชื้น ความยืดหยุ่นหรือความอ่อนตัว และการทนต่อความร้อนต่ำ

การปรับปรุงคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์มีวิธีแก้ปัญหามากมาย เช่น การคัดแปรโครงสร้างทางเคมี การผสมทางกายภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์กับพอลิเมอร์อื่นๆ การผลิตคอมโพสิตที่มีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์เป็นเมทริกซ์เพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับพอลิเมอร์อื่น เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์อาจผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Non-degradable synthetic polymers) และการพัฒนาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์อีกวิธีหนึ่ง คือ การเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติประเภทต่างๆ เช่น ป่าน ปอ และเซลลูโลส เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถใช้แทนเส้นใยแก้วที่ใช้อยู่ทั่วไปและมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องของน้ำหนัก และการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ ส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์ดังกล่าว นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การเสริมแรงด้วยเส้นใยจะช่วยพัฒนาสมบัติหลายประการ เช่น ความสามารถในการทนความร้อน การลดอัตราการดูดซับความชื้น รวมทั้งการหดตัวขณะขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) ที่พบเห็นและนำมาใช้ประโยชน์ในปัจจุบันส่วนใหญ่มานอกจากเส้นใยที่ได้จากพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับประรด โยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น เป็นต้น และเส้นใยสัตว์ เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้มีสมบัติที่ดีหลายประการ โดยเฉพาะในด้านสิ่งแวดล้อม สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ ต้นทุนการผลิตต่ำ และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อการผลิตเป็นวัสดุ "คอมโพสิต (Composite)" โดยได้มีการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงในพลาสติก เพื่อเป็นการลดต้นทุนเพิ่มปริมาณการผลิต และเพิ่มความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ผลิตได้นี้มีน้ำหนักเบา และสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากนำมาผสมกับพลาสติกชีวภาพ (Bio-plastic) ให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ "กรีนคอมโพสิต (Green composite)" ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือเอนไซม์

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1] มีการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการศึกษาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนักและมีการดูดซึมน้ำสูง ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเส้นใยฝ้าย พบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น และทำให้สมบัติการดูดซึมน้ำลดลง นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายยังส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดเพื่อปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้มีสมบัติโดยรวมดีขึ้น โดยใช้วัสดุจากธรรมชาติที่หาง่าย ราคาต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการเตรียม การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยมุ่งศึกษาการนำเส้นใยปอและนุ่นมาเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการลดการดูดซึมน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สำหรับเส้นใยที่ใช้คือ เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยนุ่น และเส้นใยปอ ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินแตกต่างกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติโดยการใช้เส้นใยปอและนุ่นเป็นวัสดุเสริมแรง
2. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้เส้นใยปอและนุ่น รวมถึงปริมาณและขนาดต่างๆ
3. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง เช่น สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นหางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เส้นใยปอและนุ่นเป็นวัสดุเสริมแรง
3. ศึกษาขนาดและปริมาณของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่เหมาะสม
4. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ ดังนี้
  - 4.1 สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
  - 4.2 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวัดสี (Color measurement)
  - 4.3 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravitic analysis (TGA)
  - 4.4 สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)
  - 4.5 ศึกษาองค์ประกอบด้วยเทคนิค Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
  - 4.6 ศึกษาการดูดซับน้ำ (Water absorption)
  - 4.7 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน
  - 4.8 ศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เส้นใยปอและนุ่น เป็นวัสดุเสริมแรงและชิ้นงานที่ได้มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น
2. วัสดุที่เตรียมได้สามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและสามารถทดแทนวัสดุที่ได้จากพอลิเมอร์
3. ส่งเสริมการนำวัสดุธรรมชาติที่หาง่าย ราคาถูก นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ไบโอพลาสติก (Bioplastic) [2]

ไบโอพลาสติก (Bioplastic) เป็นยุคใหม่ของพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยการฝังกลบ (Compostable) และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) ไบโอพลาสติกนั้นสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่สามารถทดแทนใหม่ได้ (Renewable Resources) เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง เซลลูโลส โพรตีนจากถั่ว กรดแลคติก (Lactic Acid) เป็นต้น ซึ่งไม่เป็นพิษต่อกระบวนการผลิตและสามารถย่อยสลายกลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล

##### 2.1.1 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการย่อยสลายโดยการฝังกลบ (Biodegradability & Compostability) [2]

ไบโอพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและจุดประสงค์ของการย่อยสลายในเชิงพาณิชย์ โดยที่อุณหภูมิของการย่อยสลายสูงขึ้นจะสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลา 90-180 วัน มาตรฐานของนานาชาติส่วนใหญ่กำหนดให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้องย่อยสลายได้ 60% ภายใน 180 วัน ในที่นี้พลาสติกที่จะเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายโดยการฝังกลบได้นั้น ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ทั้ง 3 ชั้นนี้

1. เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegrade) คือ การสลายตัวได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและชีวมวล ที่อัตราการสลายตัวเดียวกับเซลลูโลส (กระดาษ)
2. เกิดการแยกส่วน (Disintegrate) คือ วัสดุสามารถแบ่งแยกออกจากกันได้ใน การย่อยสลาย ซึ่งก็คือ การแยกเป็นชิ้นเล็กมากจนมองไม่เห็นและแยกออกได้เป็นชิ้นๆ
3. ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-toxicity) คือ การย่อยสลายทางชีวภาพจะต้องไม่ก่อให้เกิดวัสดุที่เป็นพิษและเมื่อย่อยสลายแล้วจะต้องเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic) เป็นพลาสติกซึ่งจะย่อยสลายจากการกระทำของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) เชื้อรา (Fungi) เป็นต้น เป็นระยะเวลาหนึ่งจะสังเกตเห็นว่าการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นจะไม่มีสิ่งเป็นพิษตกค้างและทราบเท่าที่ไม่มีสิ่งตกค้างจึงยังคงเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ

## 2.1.2 การย่อยสลายของแป้ง [2]

### 1. การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

#### 1.1 การทำลายทางกายภาพ (Mechanical Damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

#### 1.2 การทำลายทางเคมี (Chemical Damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นต้นเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ดังอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus Flavus* หรือรอยด่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

#### 1.3 การเกิดรอยดำ (Soiling)

ความเสียหายสุดท้าย คือ การเกิดรอยด่างดำ เป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะจากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์ที่สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของอะมิโลเพกติน

- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดร-กลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่ non-reducing และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,6 ไกลโคซิดิกของอะมิโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงและแตกตรินไปเป็นกลูโคส

- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลาย non-reducing

## 2. การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งดัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาตินไนซ์โดยใช้ Direct Steam Injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยระดับถึงที่ต้องการหยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยการเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในหารย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไฮโดรไลซ์เดกซ์ทริน

## 2.2 คอมโพสิต (Composites) [3]

คอมโพสิต (Composites) หรือ “วัสดุประกอบ” เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก ในปัจจุบันมีปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 5-10% คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุดคือมีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์

โดยนิยาม คอมโพสิต (Composites) คือ วัสดุประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันเห็นได้ชัดเจน (Distinct components) อยู่ด้วยกัน โดยเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกันแล้วทำให้เกิดสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ดีขึ้น โดยเฉพาะการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นหรือเกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) องค์ประกอบสองส่วนของคอมโพสิต คือ

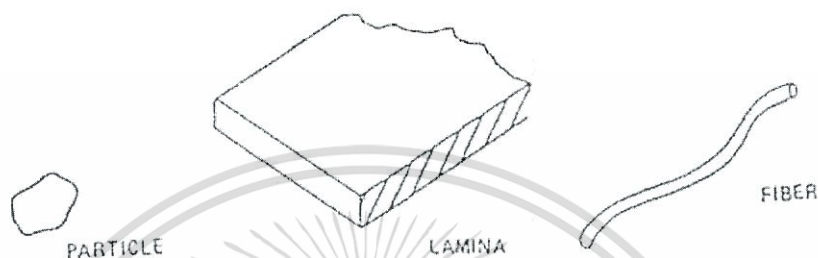
1. **ส่วนเสริมแรง (Reinforcement หรือ Reinforcing Component)** คือส่วนที่เป็นโครงสร้าง ที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นเสริมแรงมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle Load-carrying Members) ของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass Fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fibers) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous Fiber) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous หรือ Chopped Short Fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ
2. **เมทริกซ์ (Matrix)** เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous Phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load Transfer Medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง และเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสี เนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกซ์
  - พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Polymer Composites” สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermosets)
  - โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Metal Composites”
  - เซรามิกซ์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Ceramics Composites”

### 2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites) [3]

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะของส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. **คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites)** คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short Fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. **คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar Composites)** คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ (Sandwich) หรือเป็น โครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)
3. **คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate Composites)** คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Bead) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของส่วนเสริมแรงในคอมโพสิต [3]

### 2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต [3]

วัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้สามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to Weight/Density Ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific Modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific Stiffness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติตามต้องการ (Tailor-made Properties) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เลือกชนิดเส้นใยและเมทริกซ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน กำหนดปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต การจัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง ฯลฯ
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติการรับแรงและแดมป์ (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ดี

- มีเสถียรภาพต่อรูปร่าง (Dimensional Stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of Thermal Expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

อย่างไรก็ดีวัสดุคอมโพสิตมีข้อเสียหรือข้อจำกัดบางประการ คือ

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต
- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse Direction)
- ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจวิเคราะห์ (Characterization) สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle)

## 2.3 แป้ง [4]

### 2.3.1 ความรู้เบื้องต้นและความสำคัญของแป้ง [4]

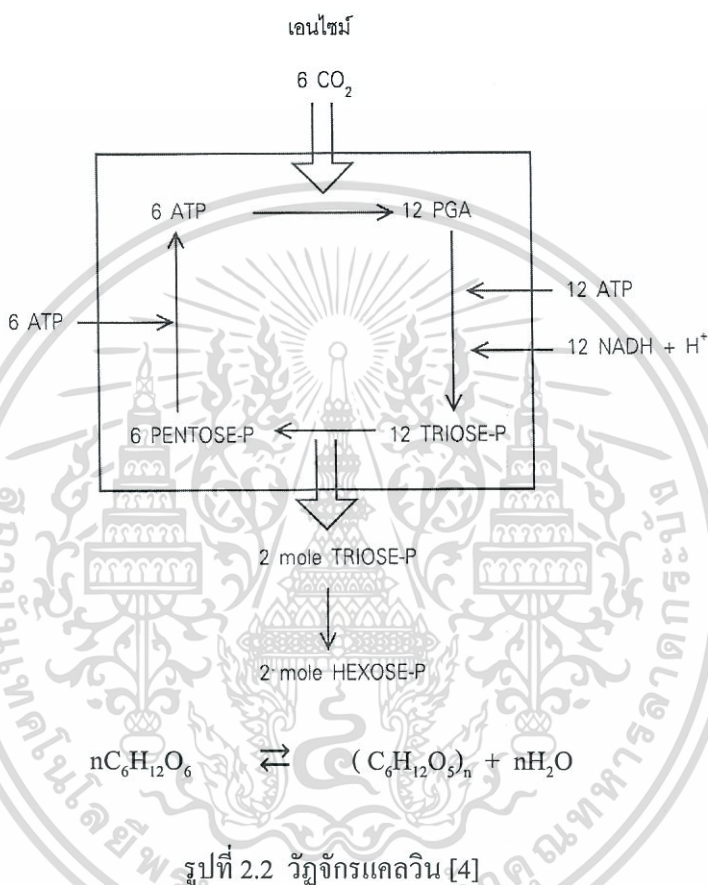
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในกลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งอาหาร เช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งอาหารให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย, แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ที่สำคัญที่มีการใช้ทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลีและมันสำปะหลัง แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนิด เช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยว และพาสต้า เป็นต้น

### 2.3.2 การสังเคราะห์แป้ง [4]

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรฟิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



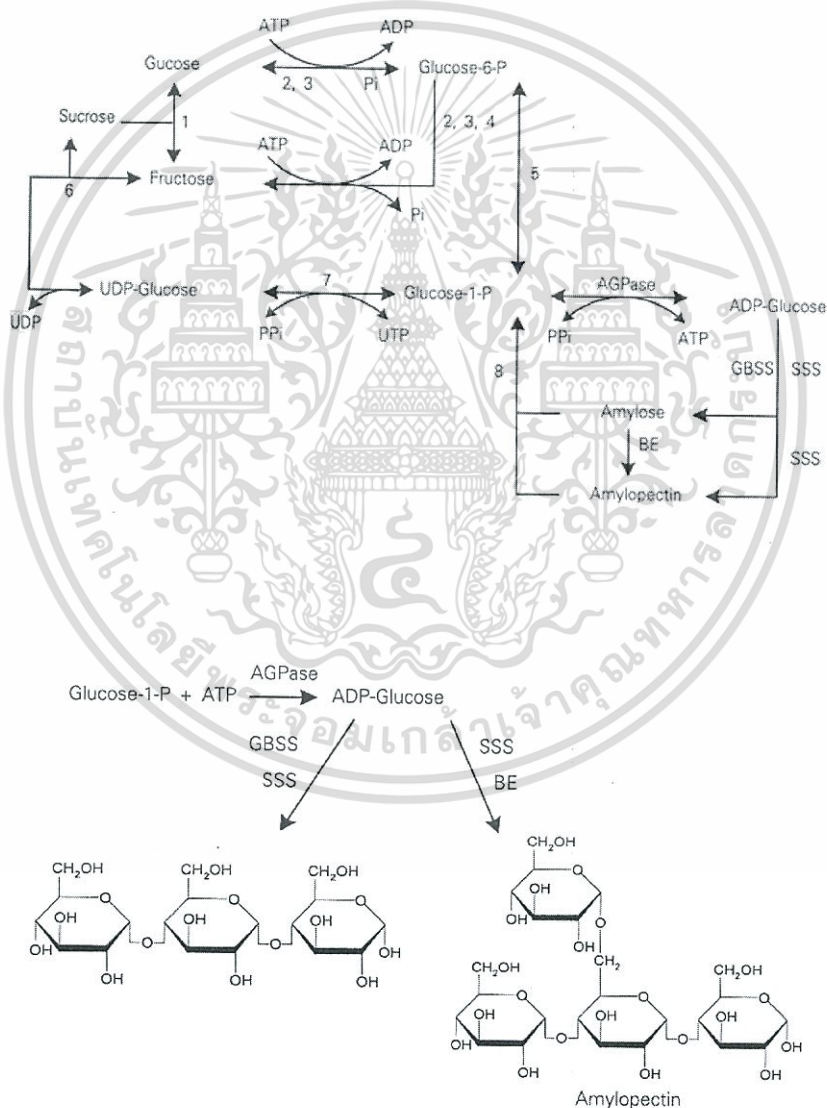
ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ และสร้างกรดฟอสฟอกลีเซอร์ริก (Phosphoglyceric Acid, PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม กรดฟอสฟอกลีเซอร์ริกจะผ่านวัฏจักรแคลวิน (Calvin Cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกขานกันว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่าย ดังนี้



ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้งขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันเทศ มันฝรั่ง ท้ายายม่อม) เก็บไว้ที่ลำต้น (สาเก สับปะรด) เป็นต้น

### 2.3.3 องค์ประกอบภายในแป้ง [4]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  เป็นเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde Group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (Reducing End Group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวระนาบ แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้งดังภาพ แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 วัฏจักรการสังเคราะห์อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

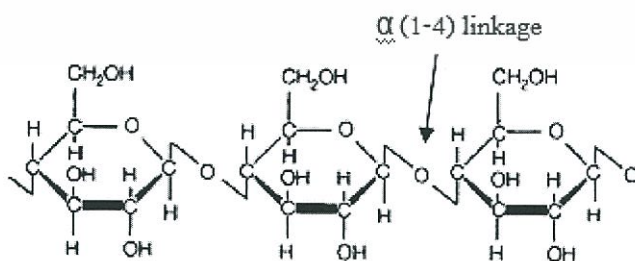
1. อะมิโลส (Amylose)
2. อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate Material)

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [4]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha -1,4$	$\alpha -1,4$ และ $\alpha -1,6$
ขนาด	200 – 2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ ตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

### 2.3.3.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) ชนิด แอลฟา-1,4 ( $\alpha -1,4$ ) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างอะมิโลส [4]

แป้งจากรัฐพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาหร่ายมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% แป้ง ข้าวเหนียว (Waxy Starch) ไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมต (Amylomaize) มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีที่มีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้น จะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [4]

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

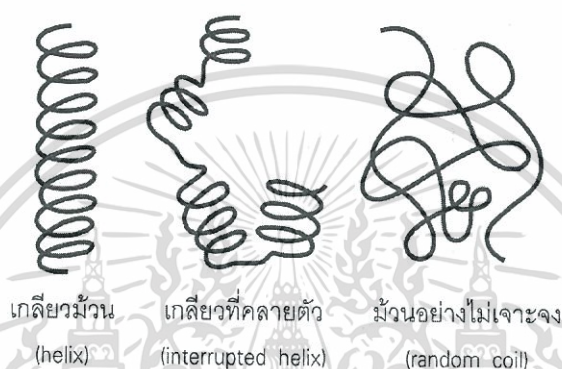
\*\*หมายเหตุ :  $\beta$ -Amylolysis = % การย่อยแป้งโดย  $\beta$ -amylase

DP = Degree of Polymerization

NC = Average Number of Chain

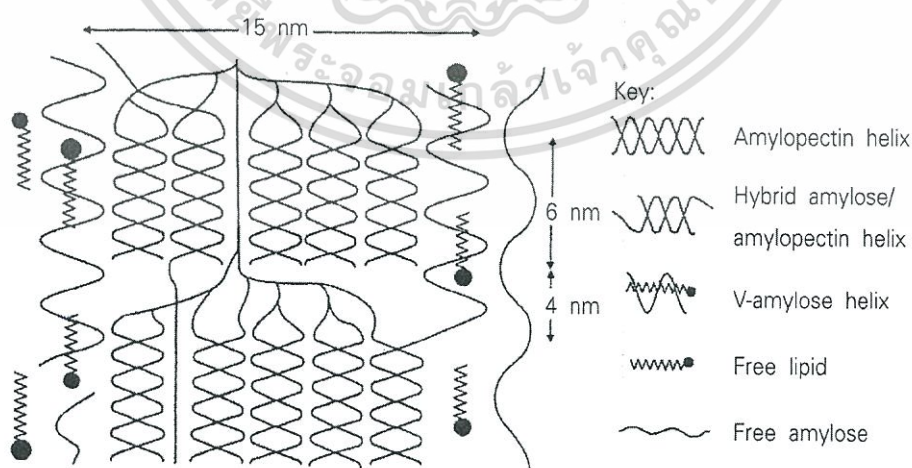
CL = Average Chain Length

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีอยู่หลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted Helix) หรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random Coil) ดังรูปที่ 2.5 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิด อะมิโลสอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 อยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double Helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.5 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส [4]

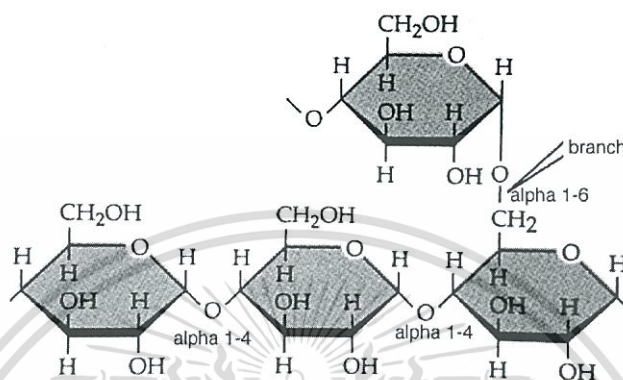
แบบจำลองของ โครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน (Monoacyl lipid) ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.6 อะมิโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินเป็นเกลียวคู่ (Double Helix)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน [4]

### 2.3.3.2 อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน [4]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^8$  ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโล-เพกทิน แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [4]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโล เพกทิน(%)	ขนาด โมเลกุล เฉลี่ย (DP)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย ภายนอกเฉลี่ย (ECL)	ความยาว สายภายใน เฉลี่ย (ICL)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
อินดิกา (Indica,IR36)		4,700	21	220	14	6
จาโปนิกา (Japonica)		12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว (Waxy Rice)		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันฝรั่ง	79	9,800	24	410	15	8
แป้ง มันสำปะหลัง	83					

หมายเหตุ : DP = Degree of polymerization

NC = Average number of chain

CL = Average chain length

ECL = External chain length

ICL = Internal chain length

### 2.3.3.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทิน แต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และสารตัวกลางในแป้งสาลีมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับอะมิโลเพกทินแต่มีกิ่งสั้นกว่า นอกจากนี้สารตัวกลางในแป้งข้าวโอ๊ตสามารถเกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับอะมิโลส แต่มีค่าสัมพรรคภาพไอโอดีน (Iodine Affinity) และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน (Blue Value) ต่ำกว่าอะมิโลสแต่มากกว่าค่าของอะมิโลเพกทิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาร

ตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะกึ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่มีกึ่งที่ยาวกว่าปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช

### 2.3.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง [4]

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate Material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface Material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal Components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.4

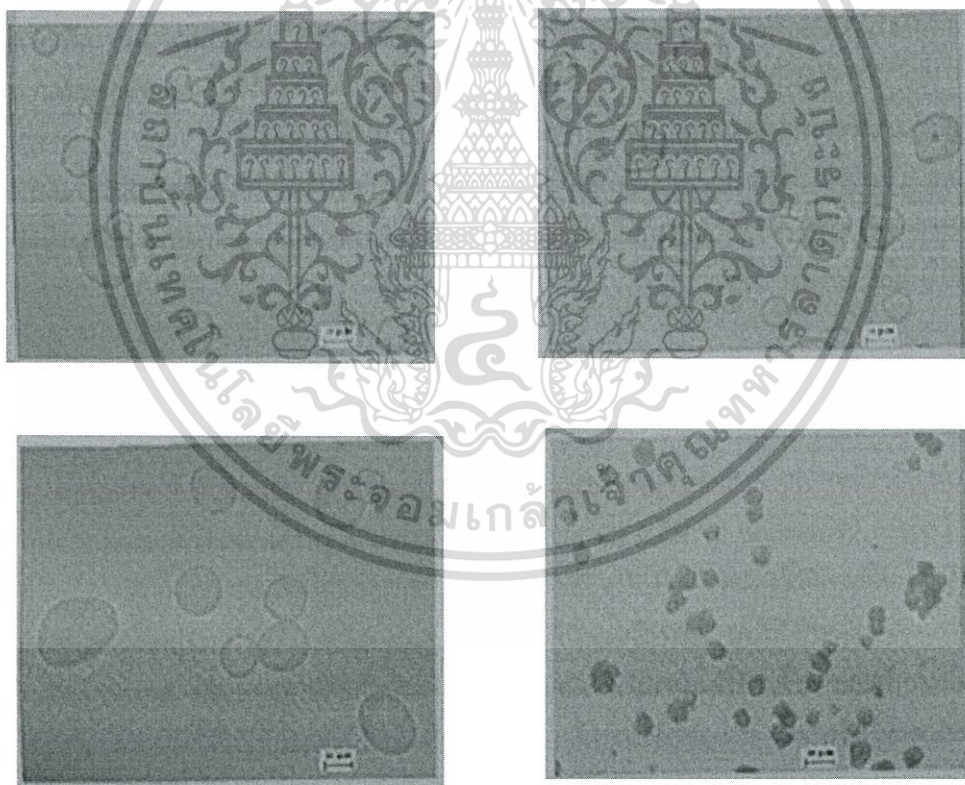
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ [4]

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

### 2.3.5 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง [4]

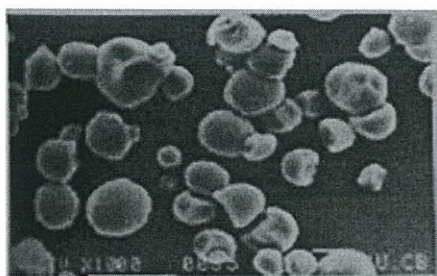
แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.8) และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) (รูปที่ 2.9) พบว่าเม็ดแป้งมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous หรือ Gel Phase) ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

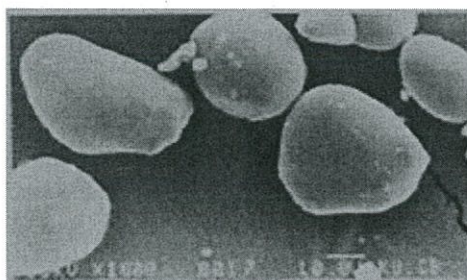


รูปที่ 2.8 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา

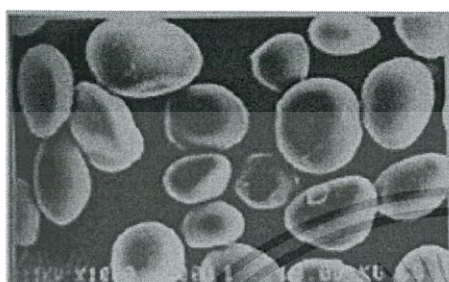
(กำลังขยาย 40 เท่า) [4]



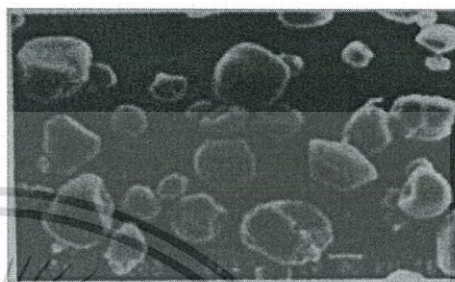
(ด) แป้งมันสำปะหลัง



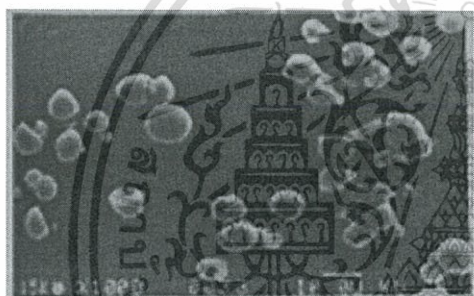
(จ) แป้งสาคู



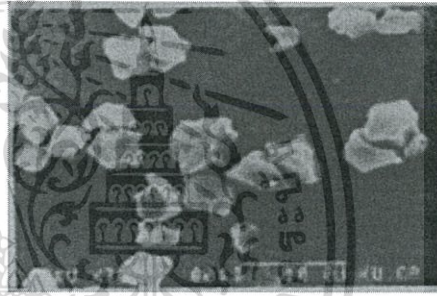
(ข) แป้ง Arrowroot



(ง) แป้งมันเทศ



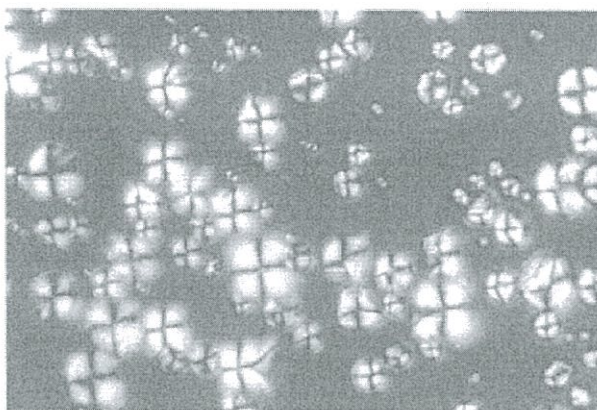
(ก) แป้งเม็ดขนุน (Ackfruit)



(ค) แป้งข่าจั่ว

รูปที่ 2.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน  
ที่กำลังขยาย (ก)-(จ) 1,000 เท่า และ (ด) 3,000 เท่า [4]

เม็ดแป้งมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 จากรูปแบบการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ แสดงให้เห็นว่าในเม็ดแป้งมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ 25 ถึง 50 % ในแป้งจากหัวหรือราก ส่วนอะมิโลเพกทินมีโครงสร้างบางส่วนที่เป็นผลึก และส่วนอะมิโลสอยู่ในส่วนของอสัณฐาน สำหรับแป้งจากธัญพืช ส่วนอะมิโลเพกทินรวมตัวกันเป็นผลึก ส่วนอะมิโลสรวมตัวกับไขมันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งจากธัญพืชพองตัวได้ช้า



รูปที่ 2.10 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง [4]



รูปที่ 2.11 ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งถั่วเขียว [4]

เม็ดแป้งมันฝรั่งมีลักษณะเป็นรูปไข่ขนาดใหญ่ ถือได้ว่าใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งอุตสาหกรรมทั่วไป เม็ดแป้งสาลีมี 2 ขนาด คือ ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เม็ดแป้งขนาดเล็กจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 10 ไมครอน เม็ดแป้งขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 ถึง 45 ไมครอน มีอยู่ในแป้งสาลีประมาณ 20% แต่มีน้ำหนักถึง 90% ของเม็ดแป้งสาลี ส่วนเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดปานกลาง (25 ไมครอน) ขนาดใกล้เคียงกับเม็ดแป้งข้าวโพด ขนาด รูปร่างของเม็ดแป้งแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ขนาดและรูปร่างของเมล็ดแป้งชนิดต่างๆ [4]

แหล่งแป้ง	ขนาด (ไมครอน)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2-35	กลม ค่อนข้างรี
ข้าวโพด	5-25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3-5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2-35	กลม คล้ายไข่
ข้าวฟ่าง	15-35	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอ๊ต	5-8	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10-50	กลม ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8-20	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ทริทีกัล (Triticale)	2-35	กลม ค่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือก หอย
มันสำปะหลัง	5-35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
ท้าวขาม่อม	13-70	รูปไข่
สาเก	15-65	รูปไข่ที่มีรอยตัด

### 2.3.6 สมบัติของแป้ง [4]

#### 2.3.6.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย [4]

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเมล็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถดูดน้ำได้ในปริมาณ 39.9, 42.9, 50.9 และ 51.4 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับกันของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง ทำให้ได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [ $n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)$ ]

แป้งดิบไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลายความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น สมบัติการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปลงแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

### 2.3.7 การเกิดเจลลาทีไนเซชัน [4]

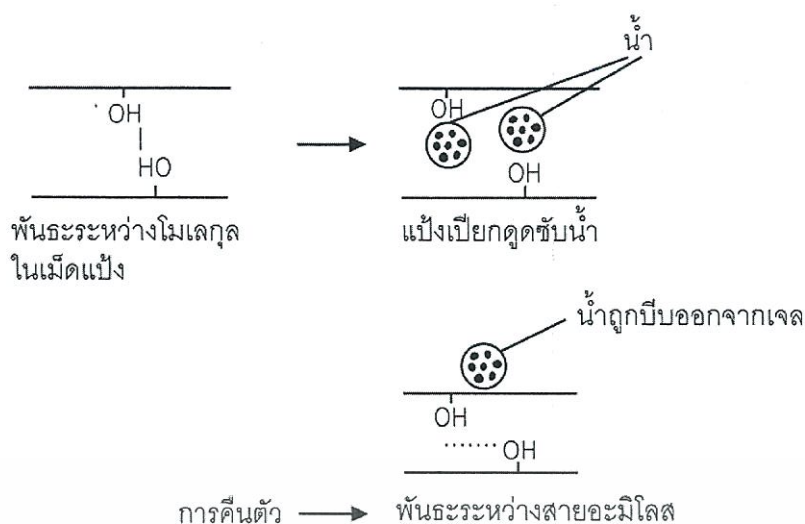
โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยานี้ เรียกว่า การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาไนซ์ เมื่อตรวจวัด

ด้วยเครื่องวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Time) ซึ่งจะแตกต่างกันแป่งแต่ละชนิด แป่งจากพืชหัว เช่น แป่งมันสำปะหลัง แป่งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป่งธัญพืช

การเกิดเจลาทีไนเซชันของเม็ดแป่งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป่งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (Micelles) ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป่งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (Birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป่งจนถึงประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป่ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป่งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป่งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป่งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน เม็ดแป่งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป่งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายใสโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป่งจะไม่แน่นอน การละลายของแป่งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาทีไนเซชันของแป่งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

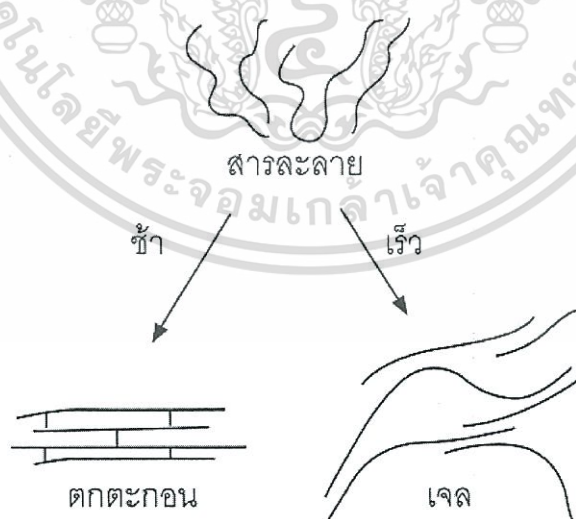
### 2.3.8 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [4]

เมื่อแป่งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป่งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็น โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [4]

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเป็นเจลขุ่น ดังแสดงกลไกการคืนตัวของแป้งรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กลไกการคืนตัวของแป้ง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุบวกและลบ (Monovalent Anion และ Cation) , แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากกว่าและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of Polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะมิโลส ในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะมิโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะมิโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน (Amylase-lipid Complex)

## 2.4 แป้งมันสำปะหลัง [4]

ถิ่นกำเนิดของมันสำปะหลังอาจกล่าวได้ว่าอยู่ในอเมริกาใต้ บราซิล/เม็กซิโก มีการเรียกชื่อต่าง ๆ กันตามรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส เช่น Cassava, Mandioca, Yucca, Tapioca และ Manioc ในทางพฤกษศาสตร์มันสำปะหลังเป็นพืชในวงศ์ (Class) ไบเลียงคู่ (Dicotyledoneae) ตระกูล (Family) Euphobiaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz. (แต่เดิมมีการใช้ชื่อว่า *Manihot utilisima* Pohl.)

### 2.4.1 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีสตาร์ชอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณ โปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (< 1%) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่ และอาจมีรอยรุมที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ด เม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางอยู่ในช่วง 3-40 ไมครอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15

ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแป้งมันฝรั่ง (5-100 ไมครอน) แต่ใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้า ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจดูด้วย X-ray Diffractometer จะมีทั้งที่แบบเป็น A และแบบ C ที่ใกล้เคียงกับแบบ A ( $C_A$ ) และมีปริมาณผลึก (%Crystallinity) 15-18%

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำคือ 18-23% และมีขนาดแตกต่างกัน โดยมีค่า Degree of Polymerization (DP) ตั้งแต่ 1,100-3,220 ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการวัดขนาด โครงสร้างของอะมิโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นกิ่ง โดยอัตราส่วนของโครงสร้างเป็นเส้นตรงต่อโครงสร้างที่เป็นกิ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.58 ต่อ 0.42 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวโพด (0.56:0.44)

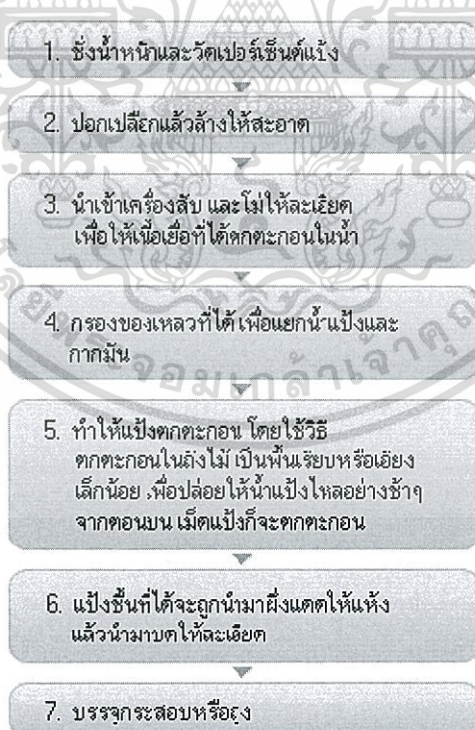
สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองขึ้น ซึ่งกำลังจะพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน สารอื่นๆ ที่มีอยู่ในแป้ง เช่น ไขมัน หมู่ฟอสเฟต เป็นต้น แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของมีอะมิโลสที่เป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และมีอะมิโลสอาจจับตัวกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ จึงมีกำลังการพองตัวที่ดี และมีค่าความสามารถในการละลายได้ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวสูง โดยกำลังการพองตัวซึ่งวัดได้จากน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวอย่างอิสระในน้ำต่อน้ำหนักแห้งของแป้ง จะมีค่าประมาณ 50 และละลายได้ประมาณ 35% ที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งมีค่ามากกว่าแป้งข้าวโพด แต่ต่ำกว่าแป้งมันฝรั่ง

โดยทั่วไปเมื่อเม็ดแป้งที่พองตัวได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่ในสภาพของแป้งเปียก (Paste) ที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นตัวลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะความหนืดของแป้งเปียกและเกิดเจลในแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิและมีการกวนตลอดเวลา สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องวัดความหนืด Rapid Visco Analyzer หรือ Brabender Viscoamylograph แป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนจะมีกำลังการพองตัวสูงจึงให้ความหนืดสูง (Peak Viscosity) แต่แป้งเปียกก็ยังคงได้รับความร้อนและแรงกลอย่างต่อเนื่องจะมีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว (Trough) ดังนั้นแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก

(ค่า Breakdown สูง) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นข้อจำกัดของการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงจำเป็นต้องมีการคัดแปรแป้ง เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก เมื่อแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังเย็นตัวลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Final Viscosity) ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีอะมิโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดการจับตัวกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสในระหว่างเย็นตัวต่ำ (Retrogradation) แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำ (ค่า Setback ต่ำ) และให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น

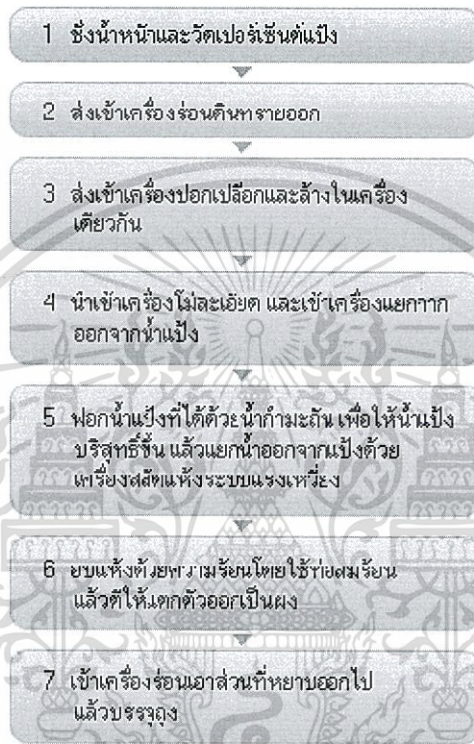
#### 2.4.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [5]

ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังนั้น ต้องใช้หัวมันเป็นจำนวนมาก โดยมีอัตราส่วนที่หัวมันสด 4.4 กิโลกรัม สามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ 1 กิโลกรัม กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบใหม่และแบบเก่า กรรมวิธีแบบเก่าจะพบในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังขนาดเล็ก กรรมวิธีนี้จะทำการแยกแป้งออกจาก หัวมันสดด้วยวิธีการตักตะกอนด้วยน้ำ ทำให้ได้แป้งที่มีคุณภาพไม่ดีนัก เรียกแป้งที่ผลิตตามกรรมวิธีนี้ว่า "Tapioca Flour" มีขั้นตอนการผลิตแบ่งเป็น 7 ขั้นตอนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [5]

ส่วนกรรมวิธีการผลิตแบบใหม่ เป็นกรรมวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในโรงงานขนาดใหญ่ และขนาดกลาง โดยใช้ระบบแรงเหวี่ยงที่ใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ทันสมัย มีการม่ด้วยลูกม่ และแยกกากโดยเครื่อง Decanter เสร็จแล้วแยกน้ำแป้งด้วยเครื่อง Centrifuge และอบแห้งด้วยเตาน้ำมันได้แป้งบริสุทธิ์ คุณภาพดี และใช้เวลาในการผลิตน้อย แป้งที่ได้เรียกว่า "Tapioca Starch" หรือ "Raw Starch" หรือ "Native Starch" ทั้งหมดจะมีขั้นตอนการผลิต 7 ขั้นตอนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15

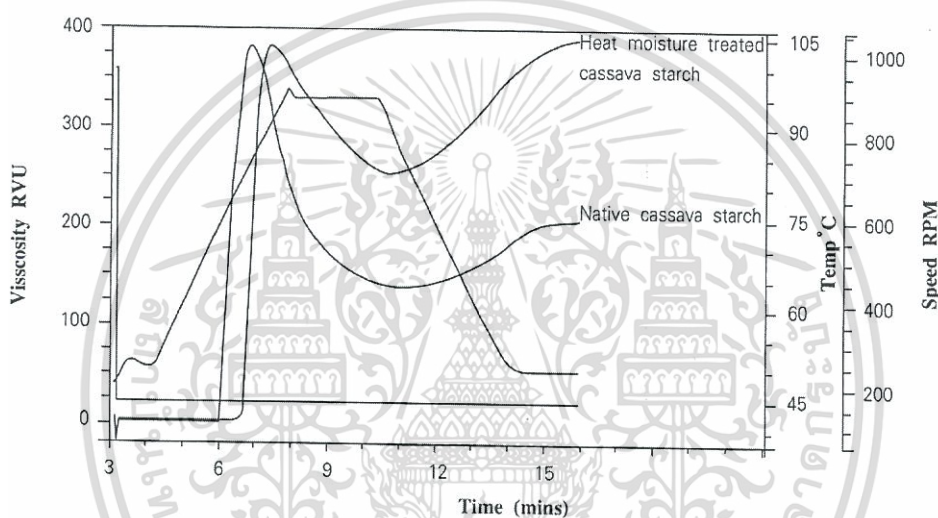


รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [5]

แป้งที่มีกระบวนการผลิตแตกต่างกัน จะมีสมบัติแตกต่างกันด้วยที่สำคัญได้แก่

- 1) วิธีการผลิต ในกระบวนการผลิตที่มีการใช้เครื่อง Decanter จะมีการแยกโปรตีนและไขมัน ทำให้แป้งที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง
- 2) น้ำที่ใช้ในการสกัดแป้ง ปริมาณและคุณภาพของน้ำที่ใช้จะให้แป้งที่มีคุณสมบัติต่างกัน แป้งที่ผ่านการล้างด้วยน้ำสะอาด ปริมาณมาก จะมีสิ่งปนเปื้อนน้อยกว่าและมีความขาวมากกว่า

- 3) ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในน้ำกำมะถัน โรงงานส่วนใหญ่จะมีการใช้น้ำกำมะถันในกระบวนการผลิตเพื่อช่วยควบคุมปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และช่วยฟอกสี แป้งที่มีการใช้กำมะถันสูงจะมีสีขาวกว่า แต่ขณะเดียวกันความหนืดของแป้งจะลดลงด้วย
- 4) การอบแห้ง การอบแห้งจะมีการใช้ความร้อนสูงซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของแป้ง การอบแห้งเป็นการทำให้เกิดโครงสร้างเป็นรูในเม็ดแป้ง ซึ่งจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือการเข้าไปทำงานของเอนไซม์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้แป้งหมากที่จะอบแห้งโดยส่วนใหญ่จะมีความชื้นอยู่ประมาณ 35-40% เมื่อถูกความร้อนสูงจะทำให้เกิด Heat Moisture Treatment ได้ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของแป้งเปลี่ยนไปและมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งด้วย ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการความร้อนขึ้น [4]

## 2.5 เส้นใย [6-7]

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียว องค์ประกอบของเซลล์ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมากเกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น

## 2.5.1 ประเภทของเส้นใย [6-7]

### 1. เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

1) เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น ทรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็นโฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

2) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ใยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

3) เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท

1) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่นไม่เปื่อยอันตรายเป็นเวลานาน สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

2) เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาแลม ( $\text{NaOH} + \text{Ca(OH)}_2$ ) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

3) เส้นใยอะคริลิก เช่น ออร์โซใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ้านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคา กันแดด ผ้าม่าน พรหม เป็นต้น

4) เซลลูโลสอะซีเตต เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตต เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์เนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอง แอมเบอร์ก-เรยอง เป็นต้น

### 2.5.2 สมบัติของเส้นใย [6-7]

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีสมบัติ ดังนี้คือ

- มีความแข็งแรง และทนทาน (Strength and Durability)
- สามารถปั่นได้ (Can be spun)
- มีความสามารถในการดูดซับดี (Absorbency)

โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้น การทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ ได้และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภท ได้ถูกต้องตามความต้องการ ที่จะนำไปใช้งาน

### 2.5.3 เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ [6-7]

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และ ออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า Anhydro-d-glucose ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไปแต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับที่ไม่เกิดกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ หมู่ไฮดรอกซิล จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี อีกทั้งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา กับกรดแอซิดิกได้เป็นเซลลูโลสซีเทตหรือ เส้นใยประดิษฐ์ชนิดแอซียเทตนั่นเอง

ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โม่เลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -c-o-c- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วย ผลจากการเกิดออกซิเดชันหรือจากการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โม่เลกุลยาวขาดลงกลายเป็นส่วนเล็กๆ ล้ากับน้ำตาลแล้วสลายเป็นอาหารของพืชแล้วสัตว์ต่อไป ลูกโซ่โม่เลกุลยาวของกลูโคสที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถทำการตรวจวิเคราะห์ได้โดยจากค่าของน้ำหนักโม่เลกุล ในกรณีของฝ้ายมีค่าตั้งแต่ 100,000 ไปจนถึง 1-2 ล้าน ของลินิน ป่าน ปอ อาจมีน้ำหนักโม่เลกุลสูงถึง 6 ล้าน เส้นใยเรยอนที่เป็นเส้นใยประดิษฐ์ในช่วง 20,000-230,000 หรือเยื่อกระดาษมีน้ำหนักโม่เลกุลเพียงประมาณ 4,000 เท่านั้นเอง

### 2.5.3.1 ปอ (Jute) [6-7]

เป็นเส้นใยที่นับว่ามีราคาถูกที่สุดและมีการใช้กว้างขวางเป็นอันดับสองรองจากฝ้าย เป็นเส้นใยที่ได้มาจากลำต้น โดยแหล่งที่ปลูกมากต้องมีความร้อนและความชื้นสูง เช่น ในอินเดียและปากีสถาน เส้นใยมีความแข็งแรงต่ำนิยมนำไปทำเป็นกระสอบหรือทำเป็นพื้นด้านในของพรมต่างๆ หากแยกเส้นใยออกจากกัน พบว่าเป็นเส้นใยสั้นและเปราะ เมื่อนำมาทอเป็นผ้าที่รู้จักกันมากคือ ผ้าเบอร์แลบ (Burlap) นำมาทำเป็นเส้นผ้า เครื่องนุ่งห่ม เป็นที่นิยมพอสมควร แต่มีข้อเสียคือผ้าชนิดนี้เมื่อนำมาซักฟอกความแข็งแรงจะลดลงและอีกประการหนึ่งก็คือมักมีปัญหาเรื่องของกลิ่น ข้อสำคัญของการดูแลรักษาก็คือ ควรซักด้วยการซักแห้ง เนื่องจากปอมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเปียกน้ำ

ส่วนประกอบทางเคมีของปอมีความแตกต่างไปจากฝ้ายและลินินคือ ประกอบด้วยเซลลูโลสที่ถูกดัดแปลงไปเป็นลิกนินเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนผสมของเซลลูโลสและลิกนิน โดยลิกนินทำหน้าที่เสมือนหนึ่งเป็นซีเมนต์และเป็นตัวเชื่อมเกาะที่ไม่ค่อยแข็งแรง เนื่องจากสามารถถูกทำลายได้ง่ายจากสารเคมีต่างๆ

### สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะภายนอก	คล้ายลินิกินมาก แต่ไม่เห็นรอยคล้ายข้ออ้อยตามแนวขวางที่มี ในลินิกิน
ความยาว	ประมาณ 4-7 ฟุต (1.2-2.1 เมตร)
สี	ปกติเป็นสีขาวไปจนถึงสีน้ำตาล อากาศจะมีฝนต่อสี และคุณภาพ
ความมัน	มีความมันดี
ความแข็งแรง	ไม่ค่อยดี มีความแข็งแรงต่ำกว่าลินิกิน
การยึดตัว	ปานกลาง
น้ำ	ความแข็งแรงลดลงเมื่อเปียกน้ำ
ความร้อน	ทำละลายได้
<u>สมบัติทางเคมี</u>	
กรด	ถูกทำลายไปง่ายด้วยกรด ไอโอดีนและกรดกำมะถันทำให้ ปอเป็นสีเหลือง ในขณะที่เป็นเซลล์โลสบริสุทธีจะเปลี่ยนเป็น สีน้ำเงิน
ด่าง	ถูกทำลายได้ง่ายด้วยด่างเช่นเดียวกัน
สารซักฟอก	สารซักฟอกทำลายความแข็งแรงของเส้นใย อาจซักฟอกได้บ้าง นานๆครั้ง โดยให้หลีกเลี่ยงประเภทคลอรีน
รา	มีการเกิดราได้ง่าย
แสง	คล้ายฝ้ายคือ ถูกทำลายได้ด้วยแสง
การย้อมสี	สามารถย้อมสีได้ด้วยสีเบสิก ไคเรก และแวท ปอมีสารประกอบ ที่เป็นแทนนินอยู่ด้วย ซึ่งเป็นตัวช่วยในการย้อมสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.2 นุ่น (Kapok) [6-7]

ใยนุ่นได้จากส่วนที่เป็นเมล็ดของต้นนุ่น ต้นนุ่นชอบขึ้นในแถบร้อน และขึ้นได้ดีในประเทศไทย ลำต้นสูงประมาณ 50 ฟุตหรือมากกว่า ฝักนุ่นมีลักษณะคล้ายฝ้าย แต่มีขนาดยาวและใหญ่กว่าฝ้าย เมื่อฝักแก่หรือสุกจะหล่นเองได้ ต่อมานำมาดัดปุยและเมล็ดออก ซึ่งเมล็ดจะหลุดออกมาจากปุยได้ง่าย

นุ่นจะมีน้ำหนักเบา นุ่ม และไม่เป็ยกน้ำง่าย นิยมนำมาใช้เป็นไส้หมอน ทำที่นอนและเครื่องเรือน เส้นใยนุ่นที่สั้นเกินไปและนำมาปั่นเส้นด้ายทอผ้าไม่ได้ จึงไม่นำมาทอเป็นผ้า แต่จะใช้ทำไส้ที่นอนโดยเฉพาะในเมืองและประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น เพราะนุ่นจะระบายความร้อนและความชื้นได้รวดเร็วและดี

### 2.6 พลาสติกไซเซออร์ [8]

เป็นสารเคมีที่เติมลงไปโฟลิมเมอร์เพื่อทำให้วัสดุอ่อนตัวและโค้งงอได้ได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ควรมีสมบัติ ดังนี้

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง และมีน้ำหนักอย่างน้อยประมาณ 300
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลาย (Solubility Parameter) ใกล้เคียงกับพลาสติกที่ต้องการผสม
3. พลาสติกไซเซออร์ไม่ควรตกผลึกที่อุณหภูมิใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับโฟลิมเมอร์ได้

หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติกไซเซออร์ คือ ช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ (Bond Rotation) ลดลง ทำให้โฟลิมเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition Temperature) ทั้งนี้เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับโฟลิมเมอร์จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของโฟลิมเมอร์ จึงเท่ากับเป็นการลดการแข็งแรงของโฟลิมเมอร์ลง

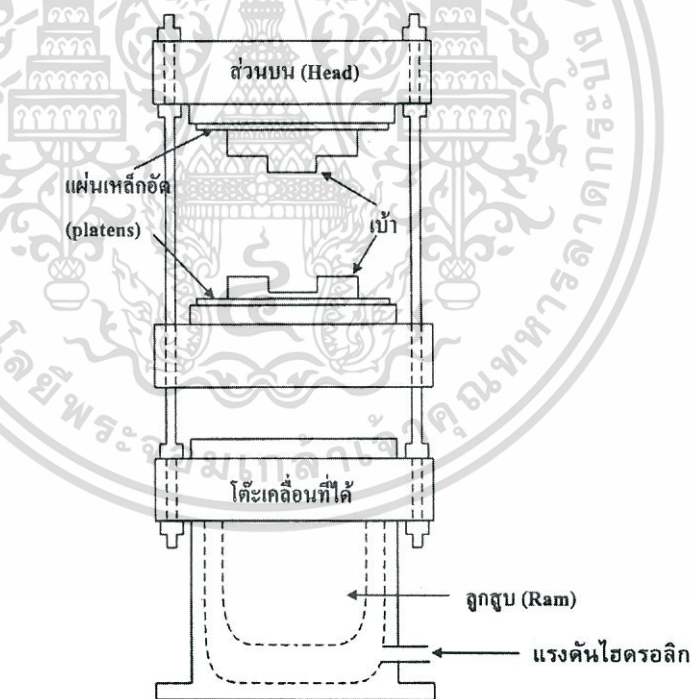
หน้าที่สำคัญของพลาสติกไซเซออร์ คือ

- 1) ลดความหนืดโดยกระทำตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่น เพื่อลดแรง Van der-wals ระหว่างสายโซ่โฟลิมเมอร์แต่แตกต่างจากตัวทำละลายที่ว่า ต้องมีน้ำหนักโมเลกุล ประมาณ 300 เพื่อที่จะไม่ระเหยออก ออกจากพลาสติกระหว่างใช้งาน

- 2) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวในการโค้งงอ (Flexibility) โดยทำการลด  $T_g$  ของพอลิเมอร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ลดลง แต่ทำให้มีการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) และความทนแรงกระแทก (Impact Strength) เพิ่มขึ้น

## 2.7 เทคนิคการอัด (Compression Molding) [9]

ในเทคนิคการอัด ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิดและเปิดเข้าได้เนื่องจากเข้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อนระบบไฮดรอลิก และอาจจะมีอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องที่ใช้แปรรูปพลาสติกโดยการอัด แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะของเครื่องอัด (Compression Molding) [9]

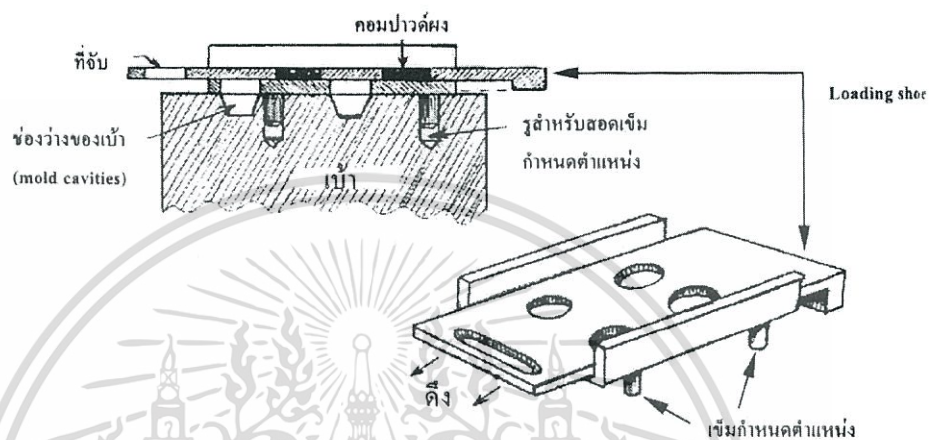
### 2.7.1 เทคนิคการอัด

การแปรรูปโดยการอัด เริ่มจากการยึดเบ้าติดต่อกับแผ่นเหล็กอัด (Platens) ทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อน โดยตั้งอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Cross-linking Reaction) ตามชนิดของเทอร์โมเซตที่ใช้ โดยทั่วไปอุณหภูมิของเบ้าสำหรับการอัดเทอร์โมเซต อยู่ในช่วง 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมกับสารเติมแต่ง ชนิดต่างๆ และได้เตรียมให้อยู่ลักษณะผงหรือเม็ด โดยเติมปริมาณของคอมปาวด์ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดเบ้า โดยใช้แรงอัดที่เหมาะสม เนื่องจากคอมปาวด์ร้อนขึ้นจะเกิดการอ่อนตัวและผลจากการใช้แรงอัด ทำให้วัสดุเกิดการไหลเข้าไปในช่องว่าง (Cavities) ของเบ้า ในขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง หลังจากปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเวลาหนึ่ง กล่าวคือ ตามระยะเวลาการสุก (Cure Time) ของเทอร์โมเซตนั้นๆ เปิดเบ้า เอาชิ้นงานออกขณะร้อน เติมคอมปาวด์ลงในเบ้าเพื่อเริ่มต้นวัฏจักรใหม่

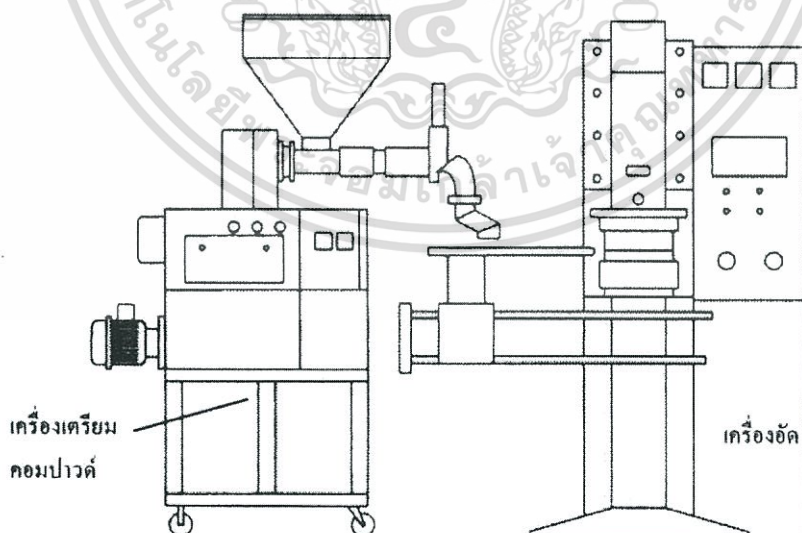
เวลาของการทำการอัดในแต่ละรอบ หรือวัฏจักรของการอัด (Cycle Time) ค่อนข้างนาน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง กล่าวคือ ต้องใช้ระยะเวลาให้นานพอในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ และในขณะที่ทำการอัดเบ้าจะเกิดก๊าซขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้เสียเวลาในการไล่ก๊าซออกของเบ้า เพื่อที่จะลดเวลาของการแปรรูป ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการอัดเบ้า หลายรูปแบบ ดังต่อไปนี้

- ให้ความร้อนคอมปาวด์ก่อนที่จะเติมลงในเบ้า (Preheating)
- ใช้อุปกรณ์ช่วยในการเติมคอมปาวด์ ลงเบ้าที่มีช่องว่างหลายช่อง (Multi-cavity Molds) แสดงในรูปที่ 2.18 เป็นการใช้อุปกรณ์ช่วยในการเติมคอมปาวด์ ที่เรียกว่า ชุดเติมผงคอมปาวด์ (Loading Shoe) ลงในเบ้าที่มีช่องว่าง 44 ช่อง
- ใช้คอมปาวด์ในรูปแบบเม็ด (Pellets) จะมีความสะดวกในการแปรรูปมากกว่าแบบผง
- ให้มีขั้นตอนพิเศษในการไล่ก๊าซออก (Degassing Stage) ในระหว่างการอัดเบ้า

- ใช้ระบบการอัดเป่าแบบอัตโนมัติ โดยลำดับของการแปรรูป ประกอบด้วยการทำความสะอาดเป่าโดยใช้ลมเป่า ตามด้วยการเติมคอมปาวด์ที่ร้อนแล้ว จากเครื่องเตรียมคอมปาวด์ อัดเป่าโดยการไล่ก๊าซออกหรือไม่ก็ได้ (แล้วแต่ชนิดพอลิเมอร์) ถอดชิ้นงานออกจากเป่า ทุกขั้นตอนทำโดยใช้เครื่องแบบอัตโนมัติ ซึ่งตัวอย่างเครื่องที่ทำงานโดยอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การเติมคอมปาวด์ลงในเบ้าที่มีหลายช่อง [9]



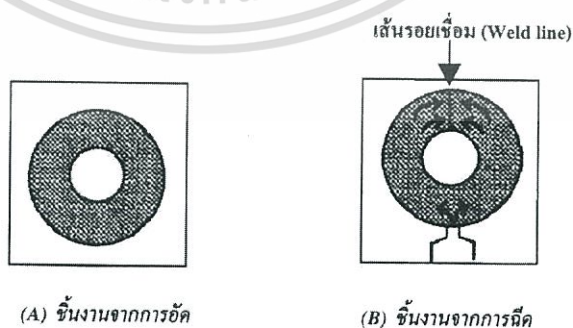
รูปที่ 2.19 เครื่องเป่าแบบอัตโนมัติ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด

การอัดเข้าเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานาน แต่ยังมีการใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เช่น การฉีดเข้าเบ้า เข้ามาแทนที่ แต่เทคนิคการอัดยังมีความสำคัญในการแปรรูปพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากข้อได้เปรียบจากการใช้เทคนิคการอัดหลายประการ ดังสรุปได้ดังต่อไปนี้

- เบ้าราคาถูกและผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุ น้อยมาก กล่าวคือมีส่วนที่เป็น Flash จากการอัดเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2-5% เท่านั้น)
- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Orientation) น้อยมาก เนื่องในระหว่างการอัด เกิดการไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติกบางชนิดมาก
- เครื่องอัดมีราคาถูกกว่า เครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld Lines) บนชิ้นงาน เช่นเดียวกับการเกิดในการแปรรูปโดยการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า (Injection Molding) เส้นรอยเชื่อมเป็นจุดอ่อนที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย ตัวอย่างของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ที่ได้จากการอัด และการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า แสดงดังในรูปที่ 2.20
- เบ้าที่ใช้ในการอัดไม่มีท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gates) จึงทำให้ไม่มีรอยตำหนิ (Scars) บนชิ้นงาน ในตำแหน่งที่ต้องตัดส่วนประตูเข้า หลังจากถอดชิ้นงานออกจากเบ้า เช่นเดียวกับกรณีการฉีดเข้าเบ้า



รูปที่ 2.20 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดและการฉีด [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าการฉีดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียเปรียบหลายประการสรุปได้ดังนี้

- คอมพิวเตอร์ในช่องว่างของเบ้ามีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ดังนั้นในขณะทำการอัด ทำให้เกิดความเครียดภายในเบ้าสูงมาก จึงไม่สามารถสอดใส่วัสดุใดๆ เช่น โลหะ ลงในเบ้าได้ จึงทำให้ไม่สามารถทำผลิตภัณฑ์แบบหุ้มโดยใช้เทคนิคนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะทำให้โลหะที่ใส่ลงไปบิดเบี้ยว และเบ้าเกิดการเสียหายในขณะทำการอัด
- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ ตัวอย่างชิ้นงานที่กล่าวถึง เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาวและมีขนาดเล็ก และแท่งทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย เป็นต้น ดังนั้นเทคนิคการอัด ใช้กับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงง่ายเท่านั้น
- เวลาของวัฏจักรของการผลิต (Cycle Time) ค่อนข้างยาว
- การผลิตชิ้นงานที่หนา ต้องใช้เวลานาน เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน จึงต้องใช้เวลาในการแปรรูปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์
- จำเป็นต้องมีการตัด Flash ทิ้งเสมอ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติเทอร์โม-พลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch, TPS) จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับแป้งข้าวเจ้าไปสู่ที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาทีให้สมบัติเชิงกลที่สูงที่สุดจึงถูกเลือกให้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าสำหรับขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนการดัดแปลงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0, 0:1, 1:1, 1:2 และ 2:1 พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 มีค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด ส่วนสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายด้วยที่ดี และสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงมีแนวโน้มในการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายเร็วที่สุด

ปราณี ชุมสำโรง [10] ได้การศึกษาลมบัติเชิงกลของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มีในประเทศไทย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการนำเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีในประเทศไทยมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีน โดยเลือกใช้เส้นใยกล้วยน้ำว้าและเส้นใยป่านศรนารายณ์ การเตรียมพอลิเมอร์เชิงประกอบหรือพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยน้ำว้าและเส้นใยป่านศรนารายณ์ใช้ปริมาณเส้นใย 1-10 % โดยไม่มีการดัดแปรทั้งพอลิเมอร์และเส้นใย ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยทั้งสองชนิดทำให้ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์เชิงประกอบสูงกว่าพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์และสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าสูงกว่าพอลิพรอพิลีนเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยต่ำ (1-5 %) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นค่าความแข็งแรงในการดึงลดลง ที่เปอร์เซ็นต์เส้นใยเท่ากับพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ใช้เส้นใยกล้วยน้ำว้ามี

ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์เชิงประกอบจากเส้นใยป่านศรนารายณ์เล็กน้อย ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เชิงประกอบลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ เส้นใยพอลิเมอร์เชิงประกอบจากเส้นใยกล้วยน้ำว้าและเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกัน จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์เชิงประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์พบว่า พอลิเมอร์เชิงประกอบที่ใช้ปริมาณเส้นใยสูงมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยโหว่ ภายในชิ้นงาน

กษิตศ อัมประไพ และคณะ [11] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโกลได้ จากแป้งต่างชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้น 5, 10 และ 15% (w/v) โดยเติมพลาสติกไซเซอร์ความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนักของแป้ง และขึ้นแผ่นฟิล์มโดยเทลงบน ถาดอะไครลิก ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนา (Thickness) ความใส (Opacity) อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) การละลาย (Solubility) ความทนต่อแรงยึด (Tensile strength, TS) และการยืดตัว (Elongation, E) พบว่า ความหนาของฟิล์มจากแป้งทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ความเข้มข้นของแป้งเพิ่มมากขึ้น ความใสของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่า Opacity ต่ำกว่าฟิล์มแป้ง ข้าวเจ้า และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้า และเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น สำหรับการละลาย ความทนต่อแรงยึด และการยืด ตัวของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการละลาย ความทนต่อแรงยึด และการยืดตัวสูงกว่าฟิล์มจาก แป้งข้าวเจ้า และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้งเพิ่มขึ้น

Teixeira E.D. และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก แป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยนาโนไฟบริลจากเซลลูโลสมันสำปะหลัง (Cellulose Cassava Bagasse Nanofibrils, CBN) ที่ถูกสกัดได้โดยตรงจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ชานอ้อยมันสำปะหลัง (Cassava Bagasse, CB) โครงสร้างสัณฐานวิทยาของอนุภาคโนนาที่ได้ นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) Atomic Force Microscopy (AFM) ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น น้ำตาล สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Thermogravimetric Analysis (TGA) และ X-ray Diffraction (XRD) ผลจากการทดลองแสดงถึง ลักษณะทางกายภาพของนาโนไฟบริล พบว่า มีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำและมีความหนา 2-11 นาโนเมตร ยาว 360-1700 นาโนเมตร นาโนไฟบริลนี้ถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคเสริมแรงใน

เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรหรือใช้ของผสมระหว่าง กลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลในอัตราส่วน 1:1 พิล์มคอมโพสิตนั้นสามารถเตรียมได้จากกระบวนการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $140 \pm 10$  องศาเซลเซียสในถังผสม ขึ้นรูปด้วยการกดอัดขณะร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบด้วยเทคนิค Dynamical Mechanical Tests (DMA) และการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) พบว่า ความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกไซเซอรที่ใช้ ซึ่งคอมโพสิตที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรมีข้อจำกัด เนื่องจากน้ำตาลที่อยู่ในแป้งจะถูกย่อยสลายในระหว่างกระบวนการสกัดกรด (Acid Extraction) ส่งผลให้มีปริมาณพลาสติก-ไซเซอรเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากการลดลงของอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) หลังเกิดการรวมตัวกันของนาโนไฟบริลในคอมโพสิต และการเพิ่มขึ้นของค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) แต่เมื่อใช้กลีเซอรอลผสมกับซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร เกิดการตกผลึกของอะมิโลเพกทินบนพื้นที่ผิวของนาโนไฟบริล ซึ่งขัดขวางการทำงานของ CBN ไม่ให้ทำหน้าที่ได้ตามปกติ แต่สิ่งที่เกิดขึ้นนั้นกลับทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับคอมโพสิตแทน CBN ส่งผลให้มีสมบัติต่างๆ ที่ดีกว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร และการรวมตัวกันของ CBN ในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลส่งผลให้สมบัติความชอบน้ำลดลง โดยเฉพาะเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร

Osmani H. และคณะ [13] ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การศึกษาของผลกระทบจากการทำการบำบัดเส้นใยด้วยสารเคมี โดยการใช้วิธี แอลคาไลเซชัน (Alkalization) แล้วศึกษาสมบัติการโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตพอลิเอสเตอร์ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงนี้ประกอบด้วยเส้นใยแอลฟา (Alfa Fiber) โดยใช้วิธีการสกัดจากต้น Stippa Tenacissima จาก Hodna Region (Algeria) เส้นใยแอลฟานี้จะบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10% เป็นระยะเวลา 0, 24 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส วัสดุคอมโพสิตนั้นถูกเสริมแรงด้วยชั้นของแอลฟาแบบสุ่ม และได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลายต่างที่มีผลต่อสมบัติการโค้งงอของเส้นใย เพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลายต่าง มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแอลฟา กล่าวคือ พฤติกรรมการโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างนั้นดีกว่าวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง สำหรับเส้นใยแอลฟาที่ผ่านกระบวนการ

การปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลาย NaOH ด้วยความเข้มข้น 10% ในเวลา 24 ชั่วโมง มีค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus ที่ขึ้นจาก 23 MPa เป็น 57 MPa และจาก 1.16 GPa เป็น 3.04 GPa ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติของการโค้งงอของวัสดุคอมโพสิตลดลงหลังจากการปรับปรุงเส้นใยด้วยสารละลาย NaOH 5% ในเวลา 48 ชั่วโมง เนื่องจากปริมาณลิกนินที่เชื่อมยึดระหว่างเซลลูโลสภายในเส้นใยลดลง

Iwakiri S. และคณะ [14] ในงานวิจัยนี้เสนอวิธีการเตรียมคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง ผสมกับเส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิล (Brazilian Green Coconuts) คอมโพสิตนี้ถูกเตรียมด้วยการใช้ปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่แตกต่างกัน โดยขึ้นรูปด้วยการเทคอมโพสิตผสมลงในแม่พิมพ์โลหะให้มีลักษณะเป็นแผ่นและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ทำการปรับปรุงชิ้นงานด้วยความร้อนให้กับเมทริกซ์และคอมโพสิต จากนั้นนำเมทริกซ์และคอมโพสิตที่ถูกปรับปรุงด้วยความร้อนแล้ว และที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อนมาทดสอบสมบัติเชิงกล ผลจากการทดสอบพบว่าคอมโพสิตที่ถูกปรับปรุงด้วยความร้อนแล้วมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน ตั้งแต่ได้จากค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) และค่า Young's Modulus (Young's Modulus) ของคอมโพสิตที่ปรับปรุงแล้วมีค่าเท่ากับ 3.42 MPa, 59.81 MPa และ 112.68 N ตามลำดับ ส่วนคอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 1.56 MPa, 14.56 MPa และ 50.77 N ตามลำดับ ซึ่งสมบัติเชิงกลของแป้งมันสำปะหลังนอกจากใช้ความร้อนในการปรับปรุงสมบัติแล้ว ยังสามารถใช้เส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิลปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ด้วยการทดลองพบว่า คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิล นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซึมน้ำ การบวมตัวในน้ำ และการดูดซึมความชื้น พบว่ามีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิล เนื่องจากเกิดพันธะบนพื้นผิวระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิล ทำให้ไปกีดขวางการดูดซึมน้ำของเส้นใย และเมื่อทำการศึกษาด้วยเทคนิค SEM สามารถทำนายได้ว่าชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงเนื่องจากเส้นใยมะพร้าวเขียวบราซิลกับเมทริกซ์สามารถยึดติดกันได้อย่างดี

Dobircan L. และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวสาลี เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ใช้แล้ว โดยการทดลองเติมปริมาณเส้นใยฝ้าย 0, 5, 10 และ 15 % w/w ลงในเมทริกซ์แป้งข้าวสาลี ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก ศึกษาด้วยเทคนิค SEM ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาผลของปริมาณเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไป ในเมทริกซ์ต่อสมบัติเชิงกลและ

สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเส้นใยฝ้ายที่เติมเข้าไปในเนื้อแป้งไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาผลึกของคอมโพสิต เมื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดย TGA พบว่าเกิดการสลายตัวเป็นสองขั้น ขั้นแรกคือการระเหยของโมเลกุลน้ำ ส่วนขั้นที่สองเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบของคอมโพสิต การรวมตัวกันของเส้นใยไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความร้อน ส่วนสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง และความแข็งแรงดึงเพิ่มตามปริมาณที่เติมเส้นใยลงไป ในเมตริกซ์แต่จะสูงสุดที่ 10 %w/w หลังจากนั้นมียาลดลง การที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีของเส้นใยในเมตริกซ์ ซึ่งส่งผลให้ส่งผ่านแรงเค้นระหว่างพื้นผิวได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์ SEM อธิบายได้ว่าการไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิต เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้เส้นใยป่านเสริมแรง พบว่า สภาวะในกระบวนการผลิตมีอิทธิพลต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต ส่วนการรวมตัวกันของเส้นใยไม่ส่งผลต่อการนำความร้อนและความต้านทานความร้อนของคอมโพสิต ดังนั้นวัสดุที่เตรียมได้เหมาะแก่การนำไปศึกษาเป็นคอมโพสิตที่ไม่นำไฟฟ้า

Prachayawarakorn J. และคณะ [16] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า (Thermoplastic Rice Starch : TPRS) โดยเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของ มาลิก แอนไฮไดต์ กราฟท์-พอลิเอทิลีน (MAPE) และไวนิลไตรเมท-ออกซิไซเลน (VTMS) ที่เติมลงไป ใน TPRS/LDPE ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษา TPRS/Cotton, TPRS/LDPE, TPRS/LDPE/MAPE และ TPRS/LDPE/VTMS โดยการเติมส่วนเสริมแรงจะมีในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการทดสอบแรงดึงและสัณฐานวิทยา พบว่า TPRS/Cotton และ TPRS/LDPE มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นกว่าเดิมและมีการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อใช้ MAPE และ VTMS เติมเข้าไปใน TPRS/LDPE พบว่าทั้งสองตัวอย่างช่วยปรับปรุงสมบัติการดึงยึดได้ แต่ทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ TPRS/LDPE ที่ไม่ได้เติม MAPE และ VTMS เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่า เส้นใยฝ้ายฝังอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ ส่วน TPRS/LDPE เกิดการแยกตัวกัน แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติม MAPE และ VTMS เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันได้ดีขึ้น ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนของ TPRS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไป และคาดว่า TPRS/Cotton สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่า TPRS/LDPE ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ดีที่สุด (สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลาย) คือ แป้งข้าวเจ้าที่ผสมเส้นใยฝ้าย 10% w/w

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แป้งมันสำปะหลังตราปลามังกร ผลิตโดย โรงงานแป้งมัน ไทยท่า ชลบุรี องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เยื่อใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
3. ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของเส้นใยปอและนุ่น

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลส, %wt [17]

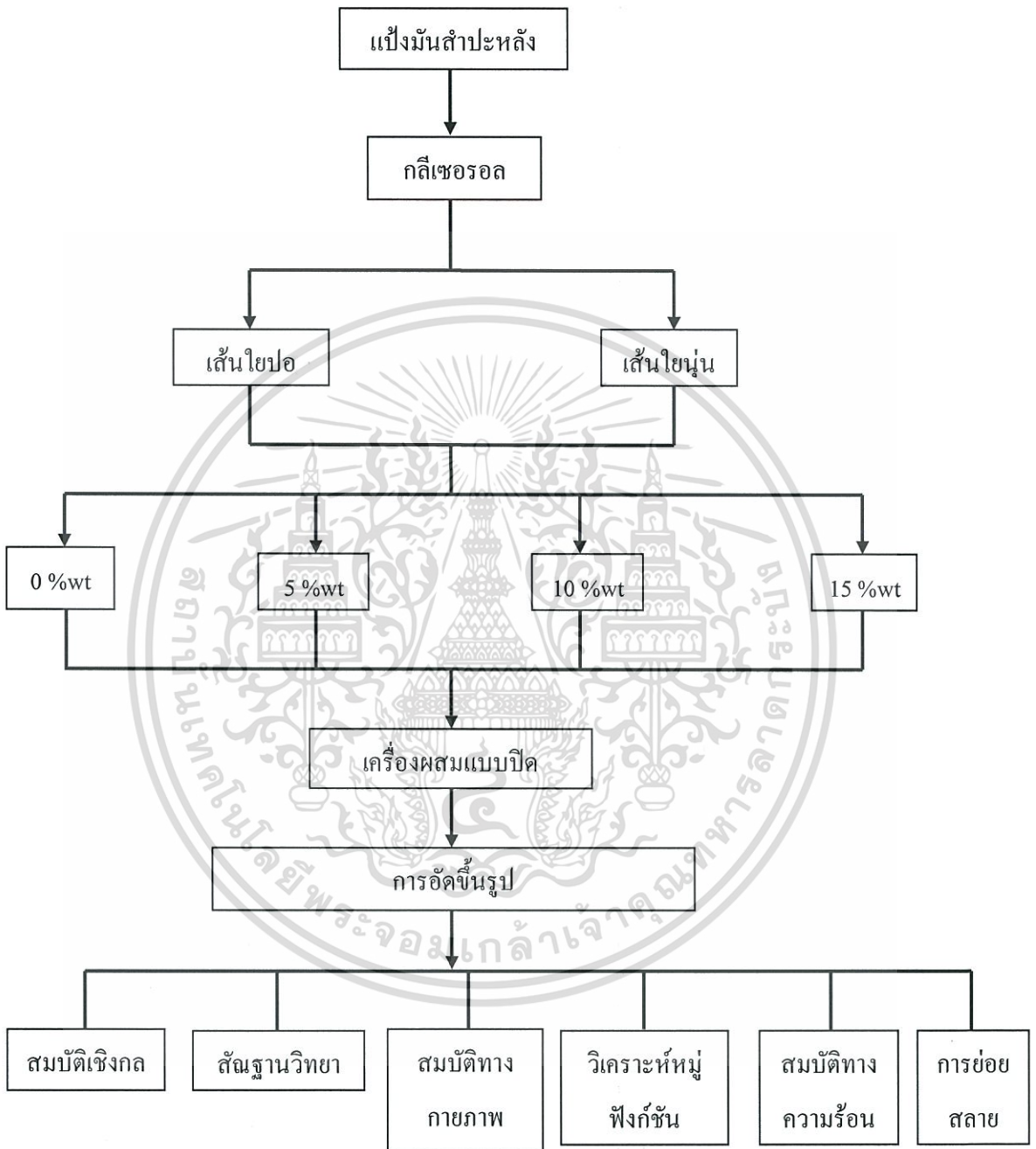
ชนิดของเส้นใย	Cellulose	Hemicellulose	Pectins	Lignin	Extractives
ปอ	71.5	13.4	0.2	13.1	1.8
นุ่น	64.0	23.0	23.0	13.0	-

#### 4. น้ำมันซิลิโคน

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) : Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) : LABTECH ENGINEERING รุ่น LP 20
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD.  
รุ่น LR 5K
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก : Precisa Instrument
5. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร
6. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) : Parkin Elmer Instrument Co.,Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : LEO  
รุ่น 1455VP
8. เครื่องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) : Hollywood International LTD.  
รุ่น Nikon AFX-IIA
9. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) :  
Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
10. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) : Hunter lab รุ่น Miniscan XE plus
11. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) : XRD รุ่น D 8 Advance

แผนการดำเนินงานในโครงการพิเศษนี้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองผสมสูตรโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 เพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลที่ใช้เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

แป้งมันสำปะหลัง (g)	กลีเซอรอล (g)
65	35

1. ชั่งแป้งและกลีเซอรอลใส่ลงในภาชนะอัตราส่วนตามตารางที่ 3.3 แล้วเก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลเข้าไปในเนื้อแป้ง
2. นำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

#### 3.3.2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง

1. ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแล้วประกบด้วยแผ่นโลหะชนิดพอลิเอสเตอร์
2. วางเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลงในแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันแล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (140 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่อ 5 นาที
3. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

### 3.3.3 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกกึ่งตัวนำด้วยเส้นใยเซลลูโลสชนิดต่างๆ

1. นำเส้นใยปอ และเส้นใยนุ่น มาตัดให้ได้ค่า L/D ratio ประมาณ 155 ดังตารางที่ 3.4-3.5 โดยนำเส้นใยมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่า L และ D

ตารางที่ 3.4 ขนาดของเส้นใยปอ

สมบัติทั่วไป	ค่าที่ได้ (mm)
ความยาว (L)	10.67±0.65
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	0.07±0.02

ตารางที่ 3.5 ขนาดของเส้นใยนุ่น

สมบัติทั่วไป	ค่าที่ได้ (mm)
ความยาว (L)	3.36±1.18
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	0.02±0.01

2. ทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกกึ่งตัวนำ โดยการผสมเส้นใยปอและนุ่น ที่ปริมาณต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทำเทอร์โมพลาสติกกึ่งตัวนำที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใย

ปริมาณ		ชนิดเส้นใย (%wt)	
แป้ง (g)	กลีเซอรอล (g)	ปอ	นุ่น
65	35	0	0
65	35	5	0
65	35	10	0
65	35	15	0
65	35	0	5
65	35	0	10
65	35	0	15

3. นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
4. เทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตร ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นหล่อเย็น 5 นาที
5. นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ไปทดสอบต่างๆ ต่อไป

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 1. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

##### 1.1 การวัดสี (Color measurement)

ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบ แล้วการเปรียบเทียบกับแถบมาตรฐาน โดยวัดทั้งสิ้น 10 จุด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทังสเตนหรือซีนอน D 65/10° โดย

$L^*$  : ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$  = Perfect black sample

$L = 100$  = Perfect white sample

$a^*$  : ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (Red-green)

$a$  เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีแดง

$a$  เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

$b^*$  : ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (Yellow-blue)

$b$  เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง

$b$  เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

$C^*$  : ความสดใของสี

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

$C^*$  มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง วัตถุมีสีซีดจาง (เทา)

มีค่าเข้าใกล้ 60 หมายถึง วัตถุมีสีเข้ม

$h^\circ$  : เป็นตัวเลขที่ระบุว่ามีตำแหน่งอยู่ที่ใดมีหน่วยเป็นองศา

สามารถคำนวณได้จาก  $h^\circ = \tan^{-1}[b^*/a^*]$  เมื่อ  $a^* > 0$  และ  $b^* \geq 0$

$$h^\circ = \tan^{-1}[b^*/a^*] + 180^\circ \text{ เมื่อ } a^* < 0$$

$$h^\circ = \tan^{-1}[b^*/a^*] + 360^\circ \text{ เมื่อ } a^* > 0 \text{ และ } b^* < 0$$

โดยที่ 0-45 องศา	แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง	180-225 องศา	แสดงสีเขียวถึงสีน้ำเงิน
45-90 องศา	แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง	225-270 องศา	แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงสีน้ำเงิน
90-135 องศา	แสดงสีเหลืองถึงสีเหลืองเขียว	270-315 องศา	แสดงสีน้ำเงินถึงสีม่วง
135-180 องศา	แสดงสีเหลืองเขียวถึงสีเขียว	315-360 องศา	แสดงสีม่วงถึงสีม่วงแดง

## 1.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water Absorption)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled Water) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 วัน ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $M_t$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

$W_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

$W_w$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

## 2. การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง 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 แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

### 3. การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเตรียมตัวอย่างที่มีความหนา 200  $\mu\text{m}$  และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ ( $2\theta$ ) ในช่วง  $3-33^\circ$  ด้วยความเร็ว  $1^\circ/\text{นาที}$  แล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชั้นตัวอย่าง

### 4. การทดสอบสัณฐานวิทยา

4.1 เครื่องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ใช้ในการวัดความยาว (L) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของเส้นใย นำเส้นใยที่ตัดได้มาส่องเพื่อหาความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย โดยทำการวัดทั้งสิ้น 10 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดของเส้นใย

4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษารายละเอียดของเส้นใยในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และรอยต่อระหว่างวิฤภาคของเส้นใยและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

### 5. สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เตรียมได้

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

### 5.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซึ่งานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 60 mm

Load cell : 100 N



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [18]

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

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

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

## 6. สมบัติทางความร้อน

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสียดสภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  ในช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน

## 7. การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20x50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยการฝังดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิในการย่อยสลาย  $32\pm 2$  องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 30-40% ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ลดลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์โดยใช้เส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ เส้นใยจากปอ และนุ่นเป็นส่วนเสริมแรง โดยเลือกศึกษาชนิดของเส้นใย ปริมาณและขนาดที่เหมาะสมของเส้นใยที่ทำให้สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังดีขึ้น โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติการย่อยสลาย

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

#### 4.1 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 เพื่อวัด  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h^\circ$  ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าการวัดสีของของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$
Pure Thermoplastic starch	33.0	-0.5	2.0	2.0	103.9
Thermoplastic starch + Jute 5%	33.2	4.7	12.4	13.3	69.3
Thermoplastic starch + Jute 10%	31.6	5.5	12.2	13.4	65.6
Thermoplastic starch + Jute 15%	32.8	4.7	12.3	13.2	69.3

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

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอพบว่า เมื่อผสมเส้นใยปอลงไปทีปริมาณต่างกัน (5% 10% และ 15%) มีแนวโน้มให้ค่าความสว่างใกล้เคียงกัน สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอที่ปริมาณ 10% ให้ค่าความสว่างน้อยที่สุด

ค่า  $a^*$  พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีเขียว ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอมีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีแดงเช่นเดียวกันหมด

ค่า  $b^*$  พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง แต่เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอและเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยที่ต่างกันแล้วพบว่าแสดงค่า  $b^*$  ใกล้เคียงกันโดยมีแนวโน้มแสดงค่าไปทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมด

ค่า  $C^*$  ซึ่งแสดงถึงความสดใสพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีความสดใสดำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอและพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอที่ปริมาณต่างกันมีความสดใสใกล้เคียงกัน

ค่า  $h^\circ$  พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอ เนื่องมาจากค่าตัวเลขของ  $a^*$  และ  $b^*$  เมื่อพิจารณาค่าของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอที่ปริมาณต่างกันแต่ให้ค่า  $h^\circ$  ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชิ้นงานตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ผสมเส้นใยแสดงสีชิ้นงานสีเหลืองเขียว ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอแสดงสีชิ้นงานเป็นสีส้มแดง

ตารางที่ 4.2 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาarchคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L*	a*	b*	C*	h°
Pure Thermoplastic starch	33.0	-0.5	2.0	2.0	103.9
Thermoplastic starch + Kapok 5%	55.6	5.3	17.5	18.3	73.0
Thermoplastic starch + Kapok 10%	53.2	5.8	18.7	19.6	72.8
Thermoplastic starch + Kapok 15%	59.8	5.5	20.7	21.4	75.1

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

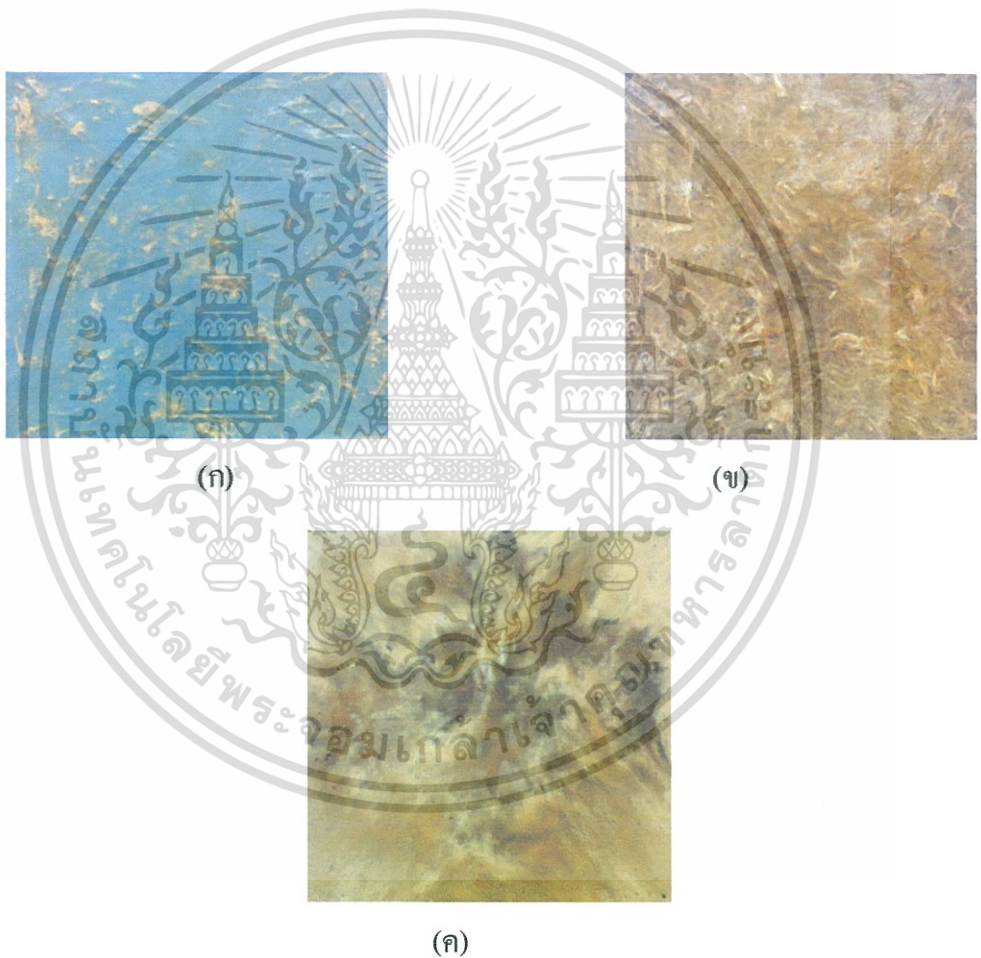
จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L\*) ของเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังกับเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นลงไปทำให้ค่าความสว่างมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผสมเส้นใยุ่นมีสีจางลง

ค่า a\* พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มไปทางสีเขียว ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นมีแนวโน้มไปทางสีแดง สำหรับกรณีเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าค่าแสดงสีแดงใกล้เคียงกัน

ค่า b\* พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังกับเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นมีแนวโน้มไปทางสีเหลือง แต่เทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่น และเมื่อพิจารณากรณีเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าค่าแสดงสีเหลืองใกล้เคียงกันซึ่งโดยรวมแล้วเทอร์โมพลาสติกสตาarchที่ผสมเส้นใยุ่นทุกสูตรมีแนวโน้มแสดงค่าไปทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมด

ค่า  $C^*$  พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีความสโตไสน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่น และพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่นในปริมาณที่แตกต่างมีความสโตไสใกล้เคียงกัน

ค่า  $h^0$  พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่น เนื่องจากค่าตัวเลขของ  $a^*$  และ  $b^*$  เมื่อพิจารณาค่าของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่นที่ปริมาณต่างกันแต่ให้ค่า  $h^0$  ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชิ้นงานตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ผสมเส้นใยแสดงสีชิ้นงานสีเหลืองเขียว ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่นแสดงสีชิ้นงานเป็นสีเหลือง

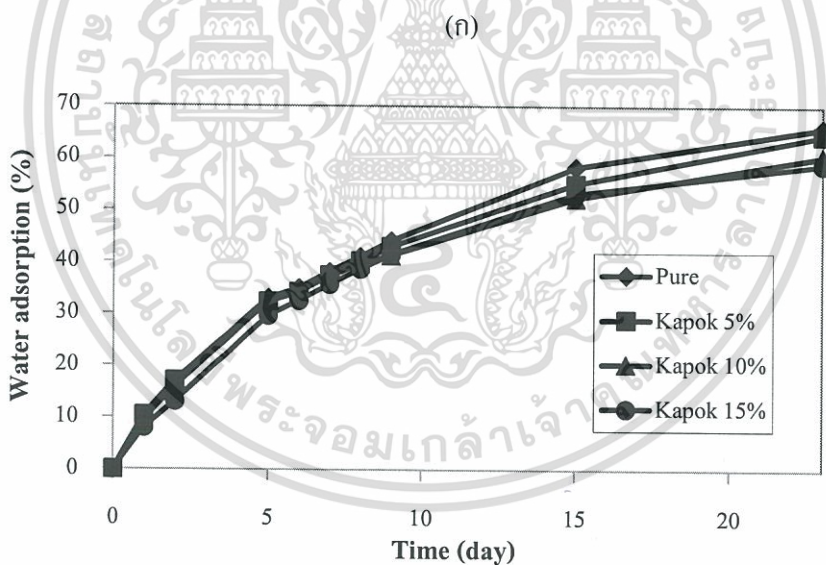
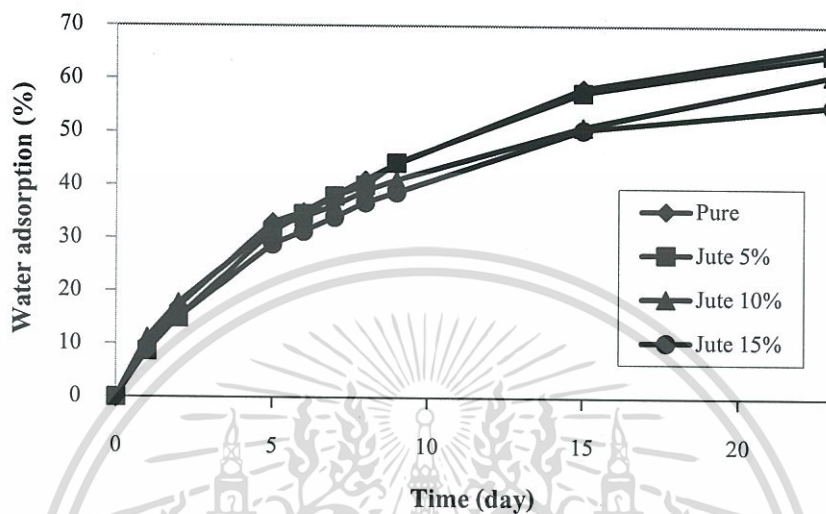


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสีของชิ้นงานตัวอย่าง  
 (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ผสมเส้นใย  
 (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอ และ  
 (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยนุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การดูดซับน้ำ

ศึกษาการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซคอมโพลีตจากแป้งมันสำปะหลัง เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสได้แก่ ปอและนุ่น โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยที่ใช้ 0% 5% 10% และ 15% ภายใต้อุณหภูมิสัมพัทธ์ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



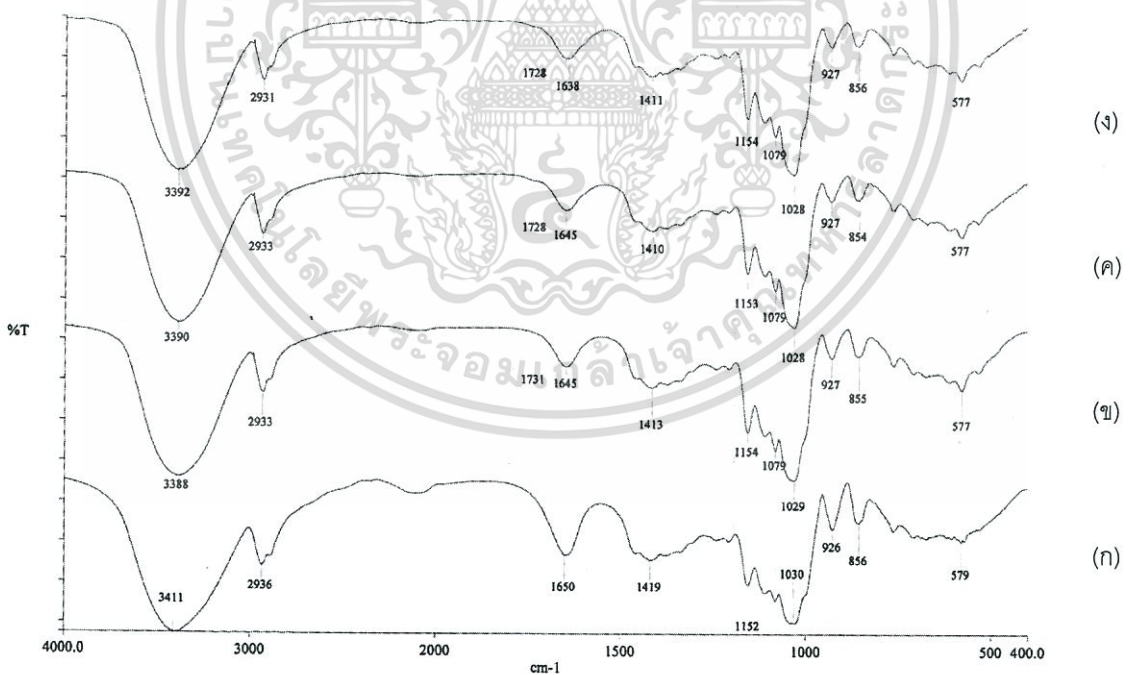
(ข)

รูปที่ 4.2 ผลของเส้นใยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของเทอร์โม-พลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (ก) ผสมเส้นใยจากปอ และ(ข) ผสมเส้นใยจากนุ่น

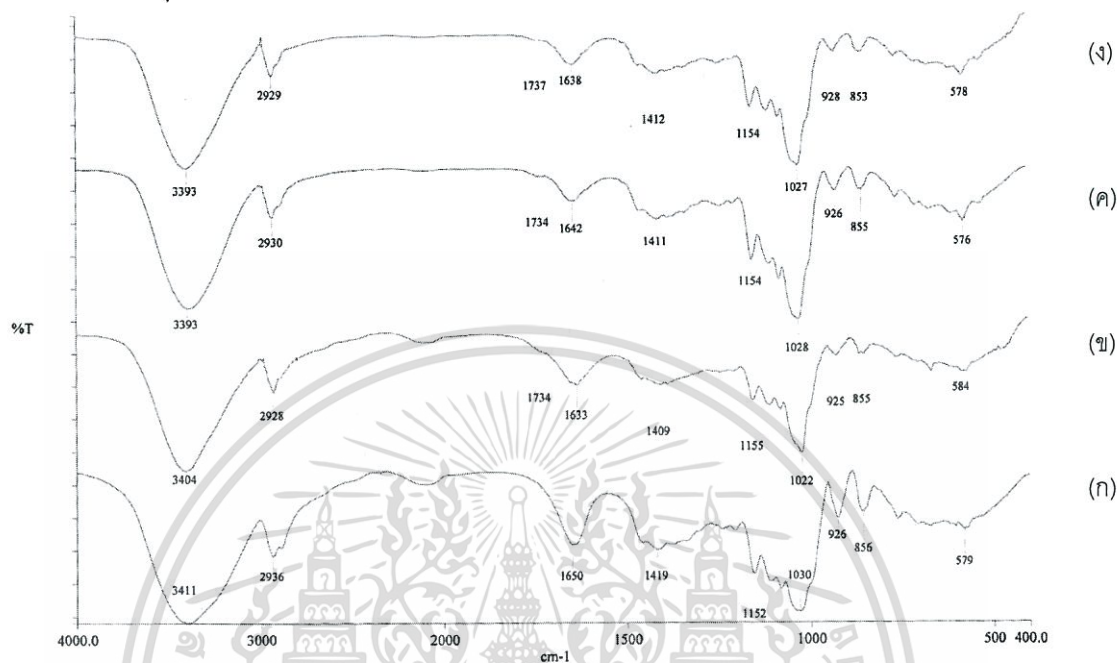
จากรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผสมด้วยเส้นใยมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ และนุ่นที่ปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซึมน้ำมากกว่าเส้นใยเซลลูโลส [28-29] และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยปอและนุ่นแล้ว พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยนุ่นมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยปอ แต่เนื่องจากเส้นใยนุ่นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic property) [30] ดังนั้นจึงอาจเกิดจากการที่เส้นใยนุ่นมีลักษณะเป็นทอกลวง (รูปที่ 4.9) จึงเป็นที่มาของการดูดซึมน้ำที่สูง

### 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังทำได้โดยใช้เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีเสริมแรงด้วยเส้นใยเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ (ก) ที่ไม่มีเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ (ข) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากปอ 5% โดยน้ำหนัก (ค) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากปอ 10% โดยน้ำหนัก และ(ง) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากปอ 15% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว (ก) ที่ไม่มีเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว (ข) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากถั่ว 5% โดยน้ำหนัก (ค) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากถั่ว 10% โดยน้ำหนัก และ(ง) มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากถั่ว 15% โดยน้ำหนัก

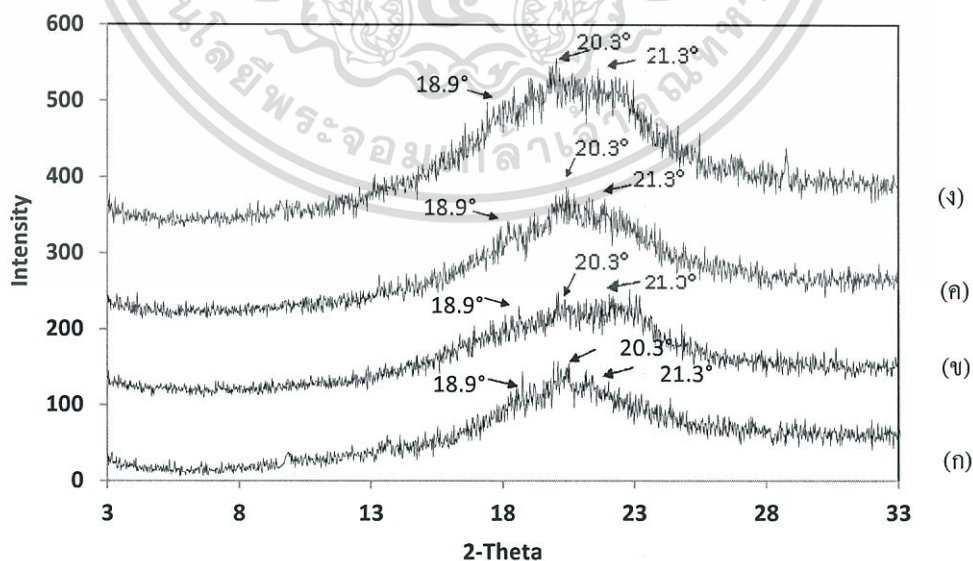
จากรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านของแสงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยปอ (รูปที่ 4.3) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยถั่ว (รูปที่ 4.4) พบว่า แถบพิคที่ช่วง  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ OH-stretching จากแป้งและกลีเซอรอล แถบพิคที่ช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH-stretching ของ  $\text{CH}_2$  หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง แถบพิคที่  $1650\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง แถบพิคที่  $1410\text{ cm}^{-1}$  [19] เป็นลักษณะการสั่นแบบ OH-bending ของแป้ง [18] แถบพิคที่ช่วง  $1300-1000\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่น

แบบ C-O-C stretching ของแป้ง แลพบที่ช่วง  $1200-1000\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [19]

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยปอและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น พบว่า แลพบที่  $3410\text{ cm}^{-1}$  และ  $1410\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงลักษณะการสั่นของ OH-stretching และ OH-bending ในแป้ง เมื่อผสมเส้นใย ทำให้พีกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้ แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและเส้นใยที่ใส่เข้าไป นอกจากนี้ พบแลพบที่  $1735\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่เอสเทอร์ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ในเส้นใยทั้งสอง [20-21] (รูปที่ 4.2 และ 4.3 (ก)-(ค)) นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสและเพกตินซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีในเส้นใยนุ่นมีปริมาณมาก คาดว่าสามารถทำอันตรกิริยากับกลีเซอรอลได้เช่นกัน

#### 4.4 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

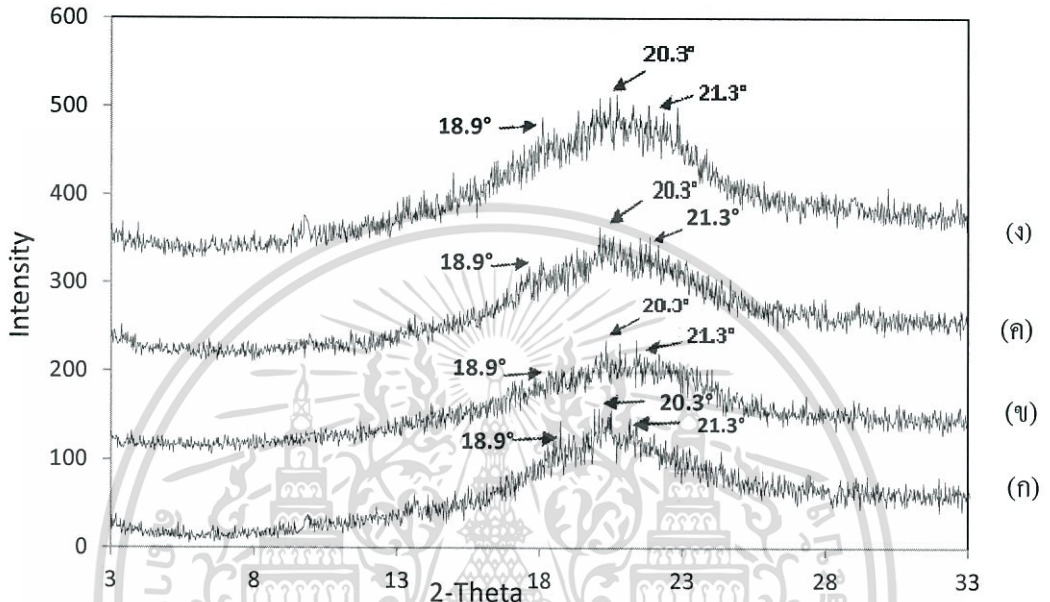
รูปแบบผลึกของแป้งบริสุทธิ์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ ปอ และนุ่น โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมด้วยเส้นใยปอ
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 5%
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 10% และ
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 15%



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟร็กโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมด้วยเส้นใยนุ่น

- (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมด้วยเส้นใยนุ่น
- (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 5%
- (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 10% และ
- (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 15%

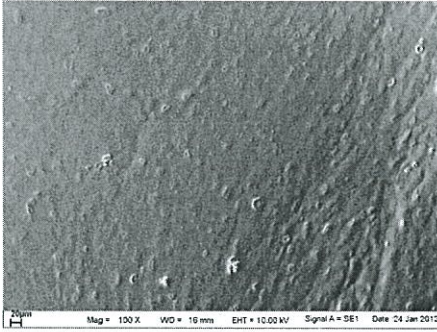
จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า X-ray diffraction pattern ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย แสดงโครงสร้างผลึกแบบ  $V_h$ -type ที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสของแป้งกับกลีเซอรอล พบพีกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $18.9^\circ$ ,  $20.3^\circ$  และ  $21.3^\circ$  [22] เมื่อทำการผสมเส้นใย พบว่า X-ray diffraction pattern ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอและนุ่น 5%, 10% และ 15% พบพีกที่มุม  $2\theta$  เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสม โดยเมื่อเติมเส้นใยลงไปไม่ได้ส่งผลต่อความเข้ม (Intensity) ของพีกที่มุม  $2\theta$  ที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเติมปริมาณเส้นใยลงไปมากขึ้น

#### 4.5 สัณฐานวิทยา

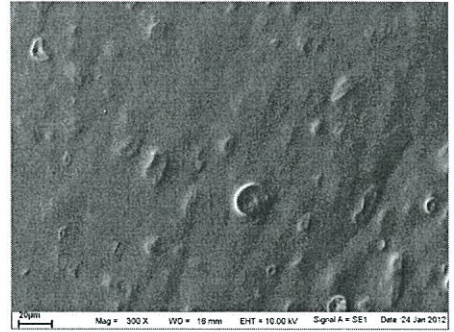
การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยปอและนุ่นทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แป้งมันสำปะหลังและลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้งมันสำปะหลังโดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติก-สตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่นและปอที่ปริมาณ 5% 10% และ 15% ของน้ำหนักแป้งที่ความยาวของเส้นใย 3 mm และ 10 mm ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีเสริมแรงด้วยเส้นใยที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงผลดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ข) ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล แสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยพบว่าลักษณะพื้นผิวมีความเรียบและขรุขระเล็กน้อย





(ก)

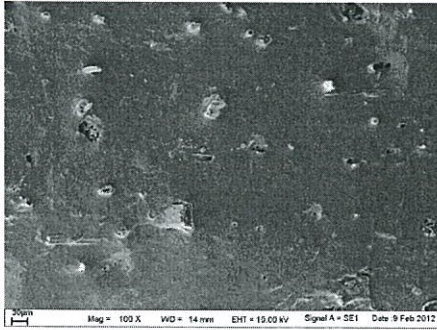


(ข)

รูปที่ 4.7 ลักษณะผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งมันสำปะหลัง (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมเส้นใยปอ 5% (รูปที่ 4.8 (ก)-(ข)) เส้นใยปอ 10% (รูปที่ 4.8 (ค)-(ง)) และเส้นใยปอ 15% (รูปที่ 4.8 (จ)-(ฉ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่าเส้นใยปอมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้งและเส้นใยปอมีการฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยปอต่างกัน (5% 10% และ 15%) พบว่าพื้นผิวของเส้นใยปอถูกปกคลุมด้วยแป้งซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุแป้งและเส้นใยปอ การที่เส้นใยปอสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้กับเมทริกซ์แป้งเนื่องจากการที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงความมีขั้วเหมือนกันทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุ มีการยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น มีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แป้งกับเส้นใยปอที่แข็งแรง

จากรูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยหนุ่น 5% (รูปที่ 4.9 (ก)-(ข)) เส้นใยหนุ่น 10% (รูปที่ 4.9 (ค)-(ง)) และเส้นใยหนุ่น 15% (รูปที่ 4.9 (จ)-(ฉ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่า เส้นใยหนุ่นมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้งและเส้นใยหนุ่นมีการฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์แป้ง โดยเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจาก 5% 10% และ 15% ตามลำดับ พบว่าพื้นผิวของเส้นใยหนุ่นถูกปกคลุมด้วยแป้งซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุแป้งและเส้นใย การที่เส้นใยหนุ่นสามารถกระจายตัวเข้ากันได้กับเมทริกซ์แป้งเนื่องจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลเหมือนกันทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสองวัสดุ มีการกระจายตัวที่ดี มีการยึดเกาะกันแน่น ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แป้งกับเส้นใยหนุ่นที่แข็งแรง



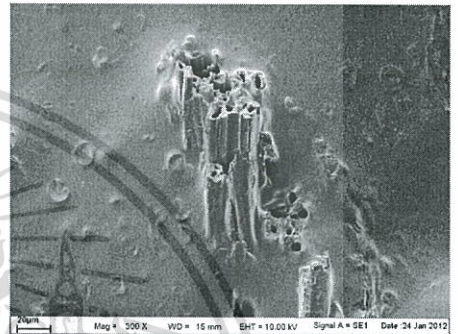
(ก)



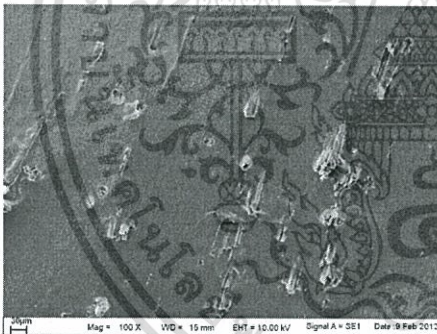
(ข)



(ค)



(ง)

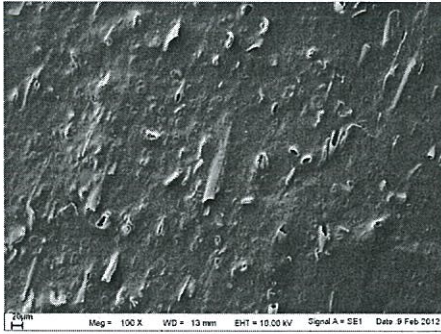


(จ)

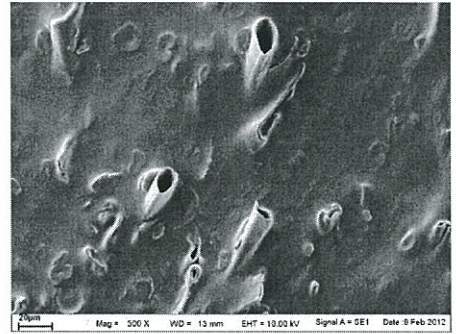


(ฉ)

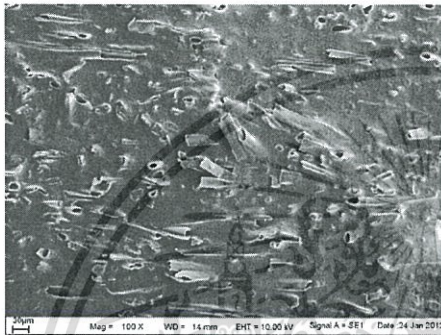
รูปที่ 4.8 ภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังผสมด้วยเส้นใยจากปอที่ กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยจากปอ 5% โดยน้ำหนักของแป้ง (ค-ง) ผสมเส้นใยจากปอ 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และ(จ-ฉ) ผสมเส้นใยจากปอ 15% โดยน้ำหนักของแป้ง



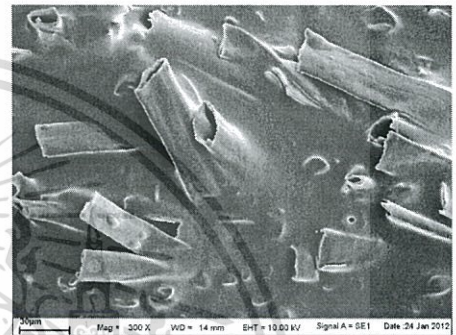
(ก)



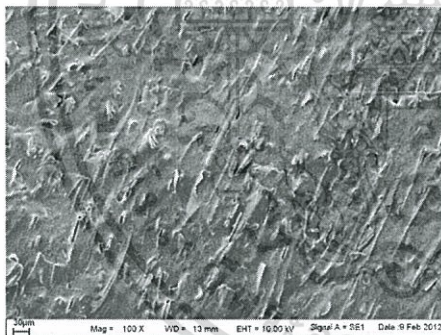
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

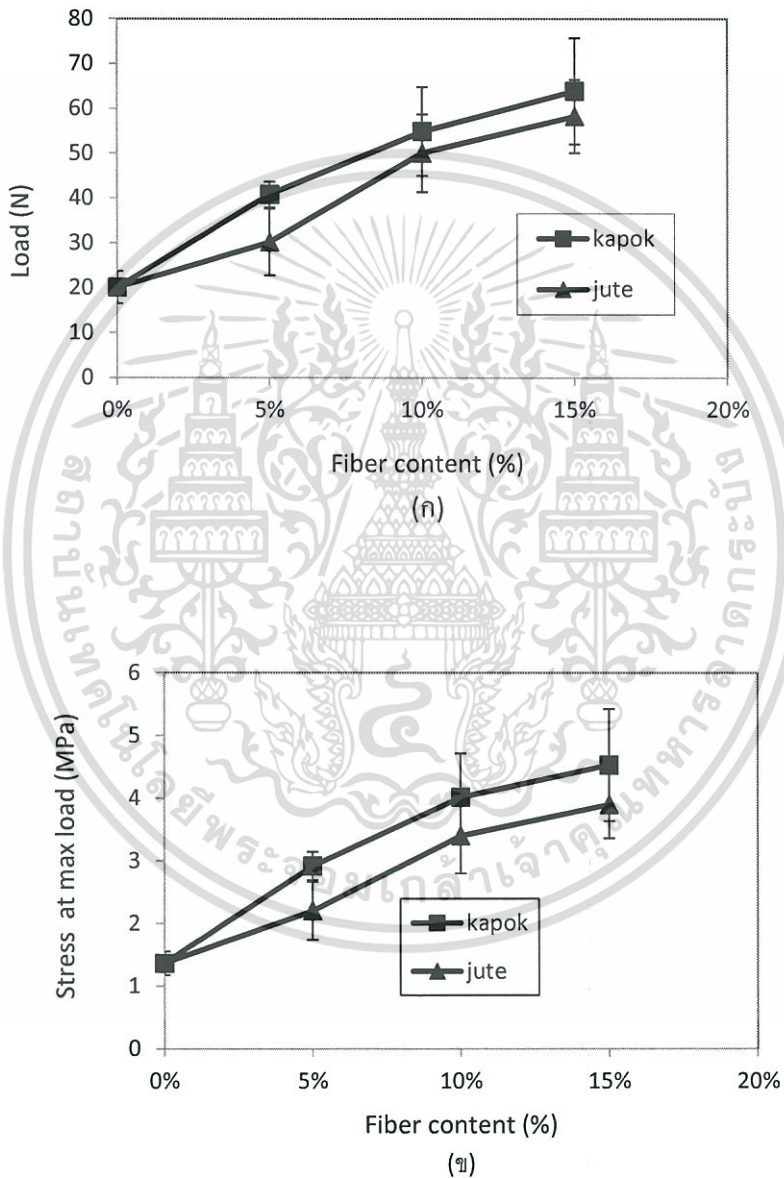


(ฉ)

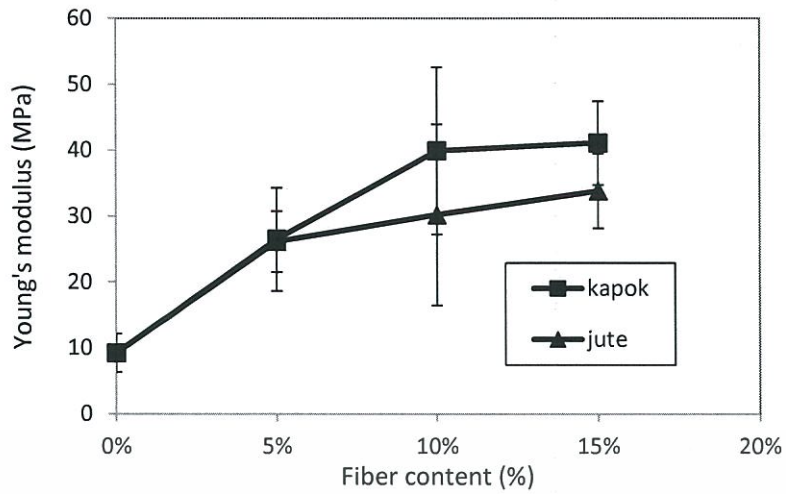
รูปที่ 4.9 ภาคนัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังผสมด้วยเส้นใยจากนุ่นที่  
กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า (ก-ข) ผสมเส้นใยจากนุ่น 5% โดยน้ำหนักของแป้ง (ค-ง) ผสมเส้นใยจาก  
นุ่น 10% โดยน้ำหนักของแป้ง และ(จ-ฉ) ผสมเส้นใยจากนุ่น 15% โดยน้ำหนักของแป้ง

#### 4.6 การศึกษาสมบัติเชิงกล

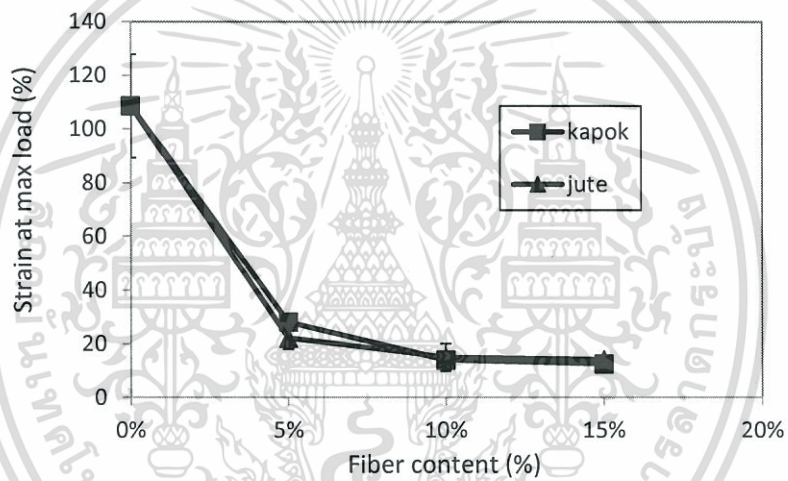
สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การยืดออก และเปอร์เซ็นต์ความเครียด โดยพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่นในปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ประมาณ 155 เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยให้ผลการทดลองดังนี้



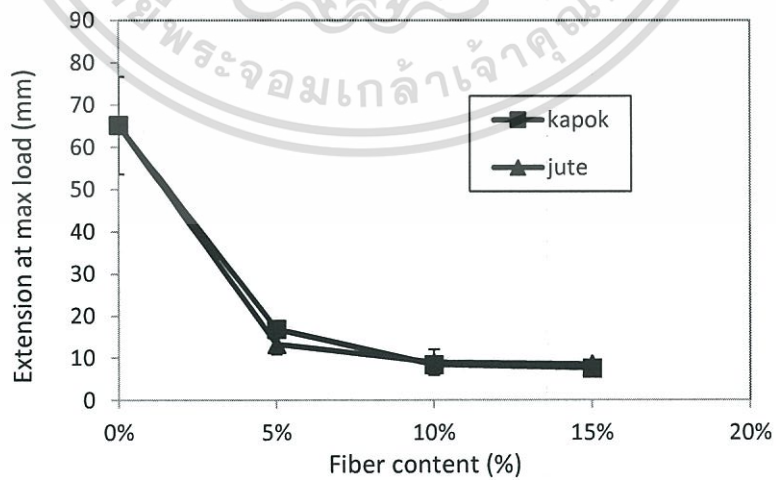
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)



(จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยปอ และนุ่น (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ(จ) การดึงยืด

จากรูปที่ 4.10 (ก)-(จ) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยปอและนุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้ค่า  $L/D$  ratio มีค่าประมาณ 155 พบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.10 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.10 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.10 (ค)) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณเส้นใยปอและนุ่น 15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยทั้งสองชนิดได้ สอดคล้องกับตำแหน่งของพีก สเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ที่ตำแหน่ง OH-stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4) เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการผสมเส้นใย และมีการผสมเข้ากันได้ดี (ภาพจาก SEM รูปที่ 4.8 (ก)-(จ) และรูปที่ 4.9 (ก)-(จ)) และเมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยปอและนุ่น พบว่า แรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยนุ่นมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยปอ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.2 พบว่าเส้นใยปอมีปริมาณเซลลูโลสที่มากกว่า แต่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและเพกตินที่น้อยกว่าเส้นใยนุ่น ซึ่งเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและเพกตินมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยเหล่านี้ [17] ดังนั้นจึงทำให้การเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นให้ความแข็งแรงที่มากกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ นอกจากนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยนุ่นมีน้ำหนักน้อยกว่าเส้นใยปอ จึงทำให้มีปริมาณเส้นใยนุ่นกระจายตัวในเมทริกซ์แป้งในจำนวนที่มากกว่าที่น้ำหนักเส้นใยที่เท่ากัน (รูปที่ 4.8 และ 4.9)

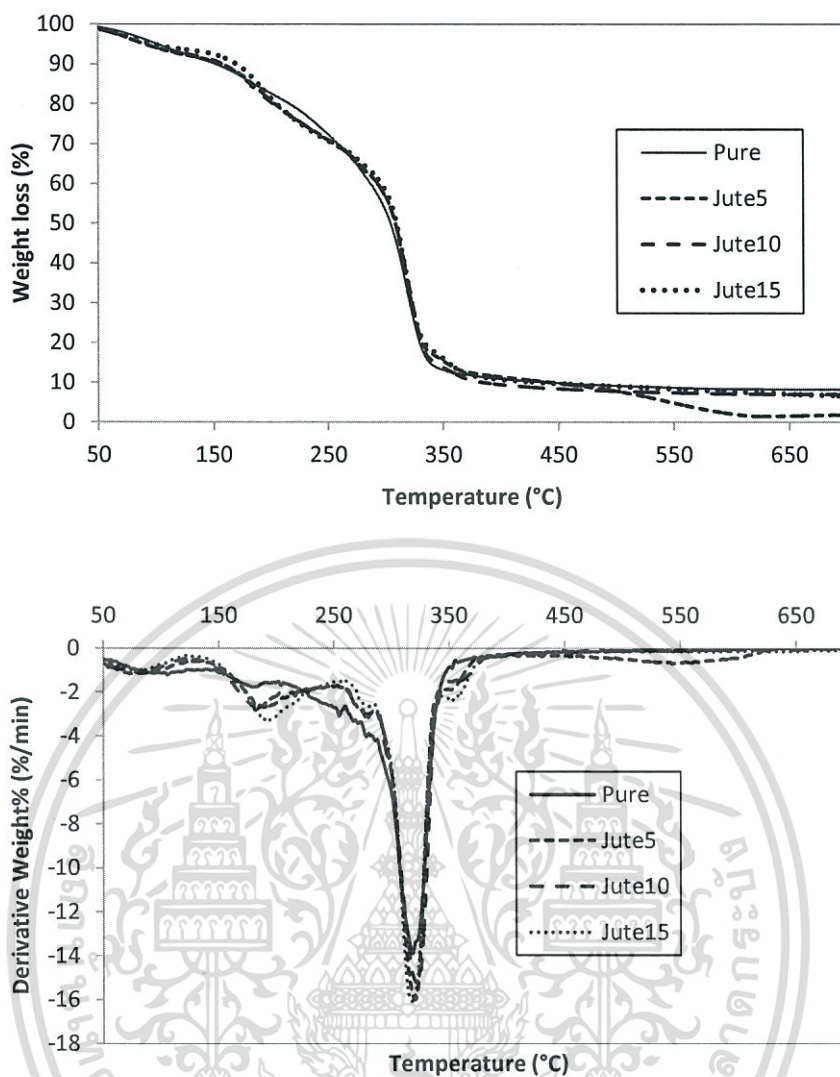
ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.10 (ง)) และการดึงยืด (รูปที่ 4.10 (จ)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเพราะมีเส้นใยเข้าไปช่วยเสริมแรงเนื่องจากสมบัติของเส้นใยทั้งปอและนุ่นมีความเป็นผลึกและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำจึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยืดออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้อย่างมาก สำหรับชนิดของเส้นใยที่ต่างกันพบว่า เปอร์เซ็นต์ความเครียดและการดึงยืดของทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอและนุ่นในปริมาณที่แตกต่างกันสรุปได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยเส้นใยนุ่นที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงที่สุดและเปอร์เซ็นต์ความเครียดและค่าการดึงยืดไม่แตกต่างกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก โดยให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มขึ้น 5% 10% และ 15% เมื่อเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ผสมเส้นใย

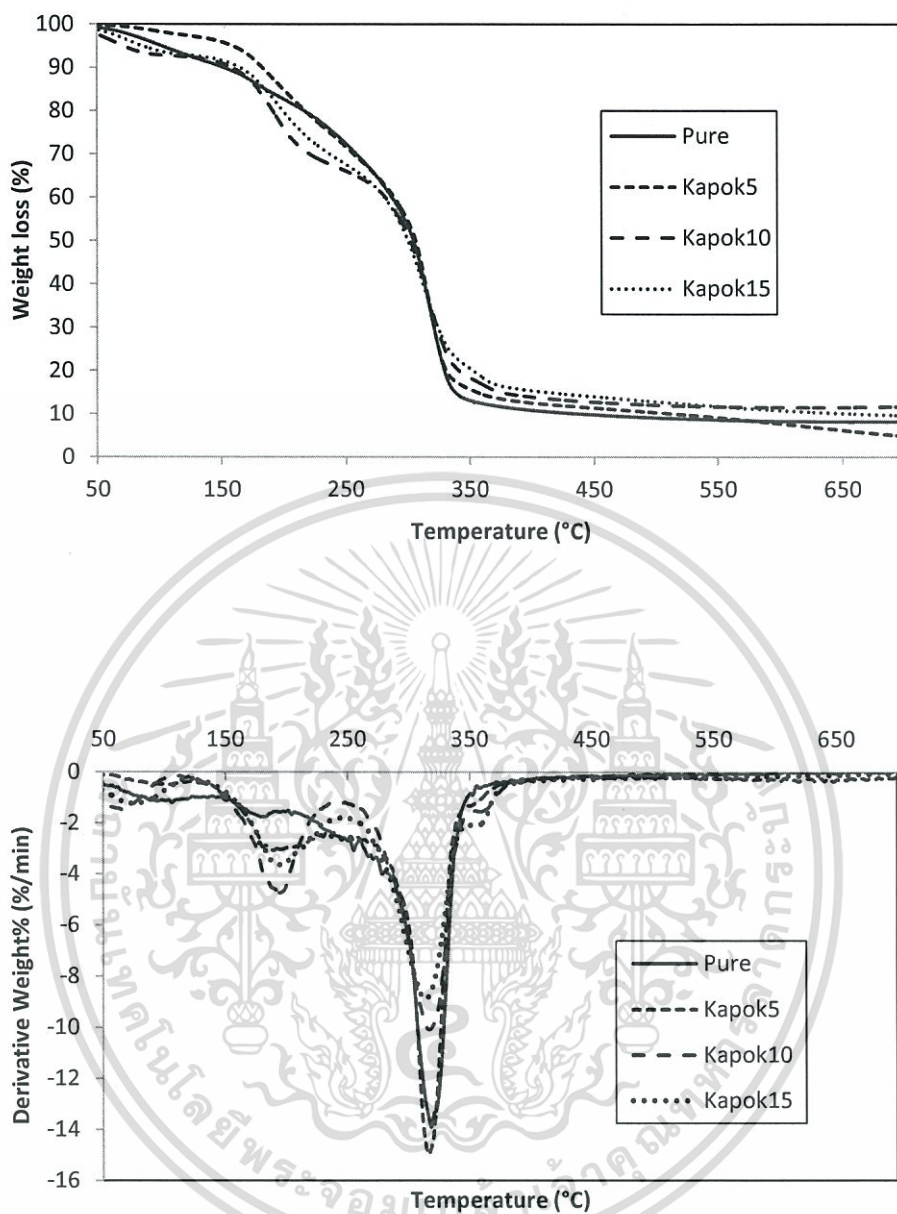
#### 4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้มีการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset decomposition temperature,  $T_d$ ) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่นที่ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ให้ผลดังรูปที่ 4.11 กับรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.3 กับ 4.4 ตามลำดับ





รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากปอ



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจากนุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยและที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)			%น้ำหนักที่หายไป (แป้ง)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยปอ)	
Pure Thermoplastic starch	163.6	297.3	-	74.32
Thermoplastic starch + Jute 5%	167.3	304.0	362.7	53.70
Thermoplastic starch + Jute 10%	162.8	304.1	374.2	56.74
Thermoplastic starch + Jute 15%	169.1	304.2	348.5	52.12

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาarch ที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใยและที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยหนุ่น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)			%น้ำหนักที่หายไป (แป้ง)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยหนุ่น)	
Pure Thermoplastic starch	163.6	297.3	-	74.32
Thermoplastic starch + Kapok 5%	165.8	302.9	355.3	58.75
Thermoplastic starch + Kapok 10%	167.5	293.3	372.3	48.25
Thermoplastic starch + Kapok 15%	169.1	290.0	362.8	47.60

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการผสมเส้นใยปอมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 2 ช่วง โดยที่ช่วงที่ 1 เริ่มต้นที่ 163.6 องศาเซลเซียส [23-24] และช่วงที่ 2 เริ่มต้นที่ 297.3 องศาเซลเซียส [25] และเมื่อมีการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชโดยการเติมเส้นใยปอพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมี 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอลอยู่ในช่วง 162.8-169.1 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังในช่วง 304.0-304.2 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยปอในช่วง 348.5-374.2 องศาเซลเซียส [26] โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยปอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ไม่มีการผสมเส้นใยและยังพบว่า การเติมเส้นใยปอทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเติมเส้นใยปอทำให้เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชมีเสถียรภาพทางความร้อนขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยต่างกัน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงได้ว่าปริมาณของเส้นใยไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการผสมเส้นใยนุ่นมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 2 ช่วง โดยที่ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 163.6 องศาเซลเซียส [23-24] และช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ 297.3 องศาเซลเซียส [25] และเมื่อมีการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชโดยการเติมเส้นใยนุ่น อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวมี 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วง 165.8-169.1 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งในช่วง 290.0-302.9 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยนุ่นในช่วง 355.3-372.3 องศาเซลเซียส [27] โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งในเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นมีแนวโน้มลดลง คาดว่าเกิดจากความเป็น Hydrophobic ของเส้นใยนุ่นจึงทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งลดลง และยังพบว่า การเติมเส้นใยนุ่นทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเติมเส้นใยนุ่นทำให้เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยนุ่นจาก 5% 10% และ 15% ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณเส้นใยนุ่นไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 พบว่าปริมาณของกลีเซอรอลที่ไม่ได้

ไป Plasticized กับแป้งเพิ่มมากขึ้นจากการเติมเส้นใยปอและนุ่นลงไป เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสของเส้นใยปอและนุ่นเข้าทำปฏิกิริยาแทนที่กลีเซอรอลได้

#### 4.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการผสมเส้นใยเซลลูโลสและที่มีการผสมเส้นใยเซลลูโลส ให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังทุกสูตรมีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่มีในดิน ซึ่งเห็นได้จากรูปชิ้นงานเกิดการเน่าผุ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดความชื้น (หัวข้อ 4.1.2) คือเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น การดูดความชื้นมีค่าลดลง ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ผสมเส้นใยมีการสลายตัวที่ต่ำสุด และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการผสมเส้นใยที่ปริมาณ 5% 10% และ 15% พบว่าการผสมเส้นใยที่ปริมาณ 5% มีการย่อยสลายดีที่สุดใน เนื่องจากเติมปริมาณเส้นใยในจำนวนที่น้อย ทำให้มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังในชิ้นงานมาก ซึ่งแป้งมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเส้นใย และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสม เส้นใยนุ่นมีการสลายตัวดีกว่าเส้นใยปอ เนื่องจากเส้นใยนุ่นมีลักษณะเป็นท่อนกลางจึงสามารถดูดความชื้นได้ดีกว่า การย่อยสลายจึงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิโพรพิลีนทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยพอลิ (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิ 5% โดยน้ำหนัก (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิ 10% โดยน้ำหนัก (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมเส้นใยพอลิ 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน (ก) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมเส้นใยุ่น (ข) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยุ่น 5% โดยน้ำหนัก (ค) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยุ่น 10% โดยน้ำหนัก (ง) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยุ่น 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมีแนวโน้มไปทางสีเหลืองเขียว แต่เมื่อผสมด้วยเส้นใยปอสีของชิ้นงานเป็นสีส้มแดง มีค่าความสว่างใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมเส้นใย และเมื่อผสมเส้นใยนุ่นสีของชิ้นงานเป็นสีเหลือง มีค่าความสว่างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมเส้นใย

2. จากการศึกษาการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมด้วยเส้นใยปอและนุ่นเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมเส้นใย พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผสมด้วยเส้นใยมีการดูดซับน้ำสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่นที่ปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น การดูดซับน้ำมีค่าลดลง

3. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า แถบพีกที่  $3410\text{ cm}^{-1}$  และ  $1410\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงลักษณะการสั่นของ OH- stretching และ OH-bending ในแป้งเมื่อผสมเส้นใยทำให้พีกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง และเมื่อเติมเส้นใยปอและนุ่นเข้าไปทำให้พีกที่  $1735\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching

4. จากการศึกษารูปแบบผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมด้วยเส้นใยปอและนุ่นเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผสมเส้นใย พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ  $V_n$ -type ซึ่งพบพีกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $18.9^\circ$ ,  $20.3^\circ$  และ  $21.3^\circ$  และเมื่อเติมเส้นใยลงไปไม่ทำให้ความเข้ม (Intensity) เปลี่ยนแปลง

5. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบและขรุขระเล็กน้อย ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอและนุ่น พบว่าเส้นใยปอและนุ่นมีการกระจายตัวบนเมทริกซ์แป้งและฝังเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งได้ และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจาก 5% 10% และ 15% ตามลำดับ พบว่ามีอนุภาคของแป้งเกาะอยู่ที่พื้นผิวของเส้นใยทั้งปอและนุ่น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุแป้งและเส้นใย

6. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอและนุ่น ในปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณเส้นใยปอลงไป แต่การเติมปริมาณเส้นใยนุ่นทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง

8. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยปอและนุ่น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นการย่อยสลายเกิดขึ้นช้าลง

9. จากงานวิจัยนี้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยนุ่นเป็นส่วนเสริมแรง 15% โดยน้ำหนัก ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ โดย

1. ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยให้เข้ากันกับแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงให้ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายอัลคาไลน์ (Alkali treatment) ทำให้พื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระและมีรูพรุนมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยยึดเกาะกับแป้งได้ดีขึ้น [13]
2. ศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซออร์ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น พรอพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ไดเอทิลีนออกไซด์ไกลคอล (Diethyleneoxide glycol) เป็นต้น
3. ปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น การอัดรีด การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

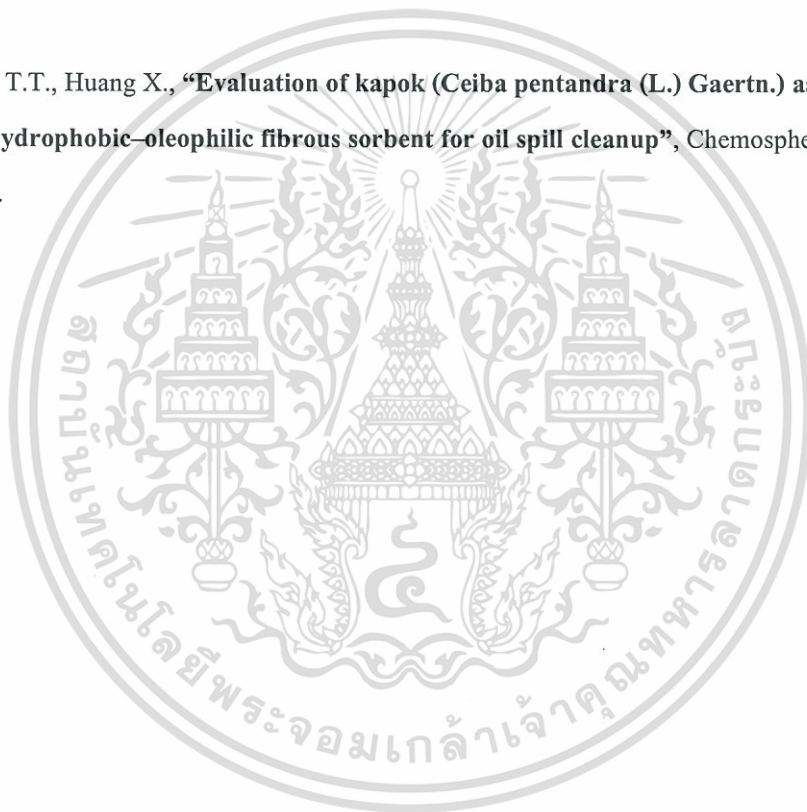
- [1] บุญยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ ประภาวดี เกตุสุตา และวีรยา ธรรมมิกะ. 2550. “การเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Bioplastic. [Online]. Available : [www.worldcentric.org/biocompostable/bioplastic](http://www.worldcentric.org/biocompostable/bioplastic) . (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 7 มิถุนายน 2554)
- [3] อิทธิพล แจ่มชัด.2554. “พอลิเมอร์คอมโพสิต”. เอกสารประกอบคำสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกฤษ ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [5] กรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง .[Online]. Available : [www.afet.or.th/v081/thai/product/ts/index.php?page=2](http://www.afet.or.th/v081/thai/product/ts/index.php?page=2) . (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 5 สิงหาคม 2554)
- [6] มณฑา จันทร์เกตุเลิศ.2541. “เส้นใยธรรมชาติ”. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชา คหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร
- [7] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา.2543. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [8] มาลินี ชัยสุขภักดีสินธุ์.2546. เกมพอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] เจริญ นาคะสรรค์.2544. “กระบวนการแปรรูปพลาสติก”.ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ปราณี ชุมสำโรง.2547. “การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มีในประเทศไทย”. โครงการงานพิเศษสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [11] กษิตศ อิ่มประไพ, และคณะ.2553. “ การศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง”. โครงการงานพิเศษคณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [12] Teixeira E.D. , Pasquini D., Curvelo A .A S., Corradini E., Belgacem M.N. and Dufresne A.,**“Cassava bagasse cellulose nanofibrils reinforced thermoplastic cassava starch”**, Carbohydrate Polymers, 78 (2009) 422–431.
- [13] Rokbia M., Osmania H., Imad A. and Benseddiq N., **“Effect of Chemical treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite”**, Procedia Engineering, 10 (2011) 2092–2097.
- [14] Ramírez M.G.L., Satyanarayana K.G., Iwakiri S., Muniz G.B., Tanobe V. and Sahagun T.S.F., **“Study of the properties of biocomposites. Part I. Cassava starch-green coir fibers from Brazil”**, Carbohydrate Polymers, 86 (2011) 1712-1722.
- [15] Dobircau L., Sreekumar P.A., Saiah R., Leblanc N. ,Terrié C., Gattin R., and Saiter J.M., **“Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre: Agro-green-composites”**, Composites: Part A, 40 (2009) 329–334.
- [16] Prachayawarakorn J., Sangnitdej P., and Boonpasith., **“Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene”**, Carbohydrate Polymers, 81 (2010) 425-433.
- [17] Young R. A., **“Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology”** ,Fibers Vegetable, 11 (2003) 288.

- [18] Tensile testing. [Online]. Available : [www.physicsforums.com/showthread.php?t=147777](http://www.physicsforums.com/showthread.php?t=147777) .  
(สืบค้นข้อมูล : วันที่ 7 มิถุนายน 2554)
- [19] Chung C., and Lee M., **“Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy”**, Carbohydrate Polymers , 81 (2004) 417-420.
- [20] Heitner C., Dimmel D.R., and Schmidt J.A., 2010. **“Vibrational Spectroscopy”**, Lignin and Lignans Advances in Chemistry , 121-122.
- [21] Saha P., Manna S., Chowdhury S. R., Sen R., Roy D., Adhikari B., **“Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment”**, Bioresource Technology, 101 (2010) 3182–3187
- [22] Teixeira E. M., Curvelo A. A.S., Correa A. C. , Marconcini J. M., Glenn G. M., Mattoso L.H.C., **“Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid)”**, Industrial Crops and Products 37 (2012) 61– 68
- [23] Curvelo A.A.S., Carvalho A.J.F. and Agnelli J.A.M., **“Thermoplastic starch cellulosic fiber composite preliminary results”**, Carbohydrate Polymers, 45 (2011) 183-188.
- [24] Ma X., Yue J., and Kennedy J.F., **“Studies on the properties of natural fibers reinforced thermoplastic starch composites”**, Carbohydrate Polymers, 62 (2005) 19-24.
- [25] Costa F. J. O. G., Almeida R. R., Lacerda L. G., Carvalho-Filho M. A. S., Bannach G., Schnitzler E., **“Thermoanalytical studies of native cassava starch and treated with hydrogen peroxide”**, Alim. Nutr., Araraquara, 22 (2011) 7-15
- [26] Sutapun W., Ruksakulpiwat Y., Jarukumjorn K., Supakarn N., Chumsamrong P., and Kluengsamrong J., **“Studies of thermal properties and surface characteristics of pretreated jute fibers by boiling and soxhlet extraction”**, [Online]. Available : [www.scisoc.or.th/stt/30/sec\\_e/paper/stt30\\_E0060.pdf](http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec_e/paper/stt30_E0060.pdf) (สืบค้นข้อมูล : วันที่ 21 มีนาคม 2555)

- [27] Hong X., Wei Dong Y., Mei Wu S., 2005. “Structures and performances of the kapok fiber”, Textile Research, [Online]. Available : [www.fzxb.org.cn/EN/abstract/abstract4461.shtml](http://www.fzxb.org.cn/EN/abstract/abstract4461.shtml) .  
(สืบค้นข้อมูล : วันที่ 21 มีนาคม 2555)
- [28] Ramirez M.G.L, Satyanarayana K.G., Iwakiric S., Munizc G.B., Tanobec V., and Flores-Sahagund T.S., “Study of the properties of biocomposites. Part I. Cassava starch-green coir fibers from Brazil”, Carbohydrate Polymers, 86 (2011) 1712– 1722.
- [29] Bogoeva-Gaceva G., Avella M., Malinconico M., Buzarovska A., Grozdanov A., Gentile G., and Errico M.E., “Natural Fiber Eco-Composites” , Polymer Composites, (2007) 101-107.
- [30] Lim T.T., Huang X., “Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic–oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup”, Chemosphere, 66 (2007) 955–963.



# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ลักษณะชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมเส้นใย และที่ผสมเส้นใยปอและนุ่นในปริมาณต่างๆ



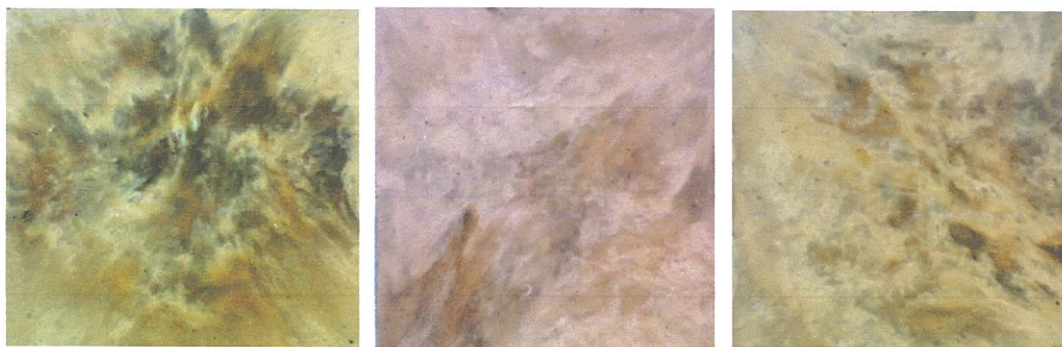
(ข)

(ค)

(ง)

เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ผสมเส้นใยปอในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 5% (ค) 10% และ (ง) 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

(ค)

เทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยุ่นในปริมาณต่างๆ (ก) 5% (ข) 10% และ(ค) 15% โดยน้ำหนัก

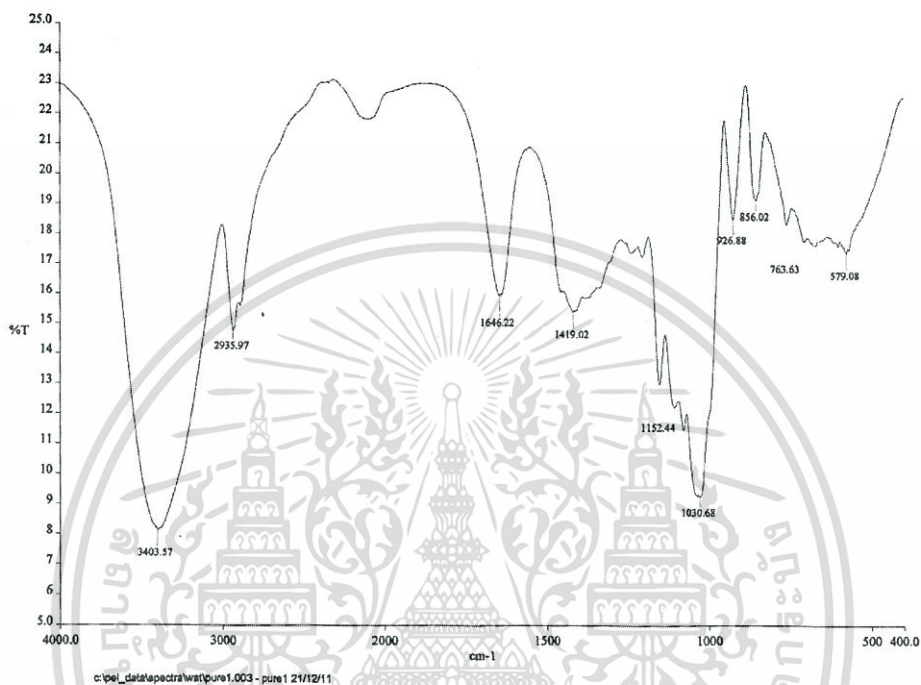


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

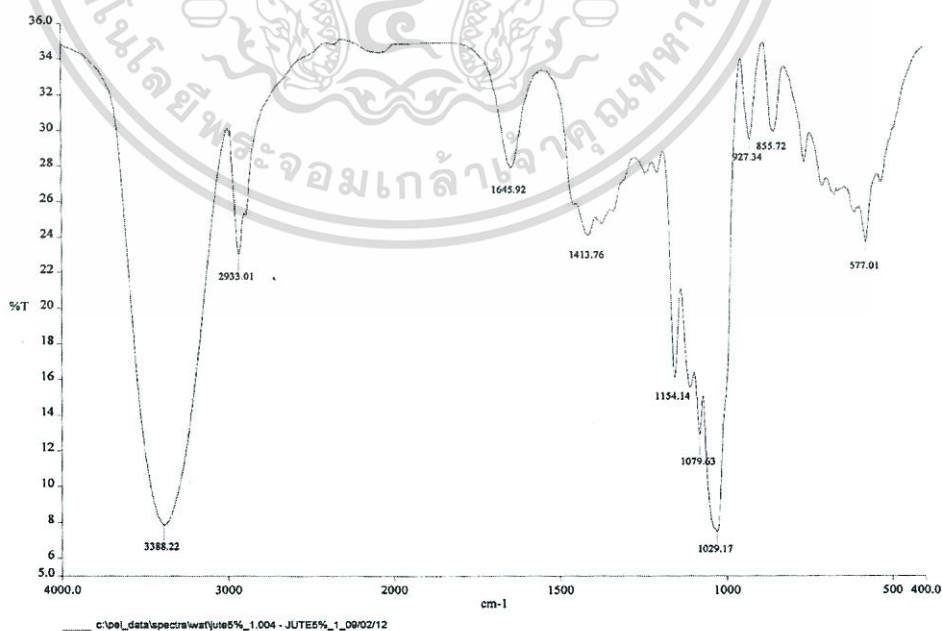
## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมเส้นใย

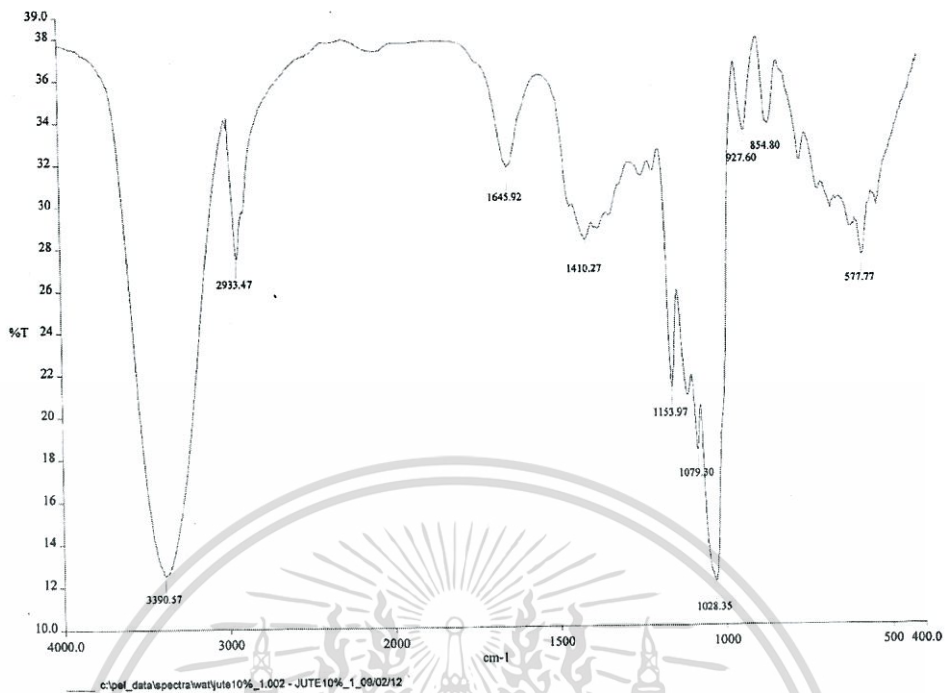


เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 5% โดยน้ำหนัก

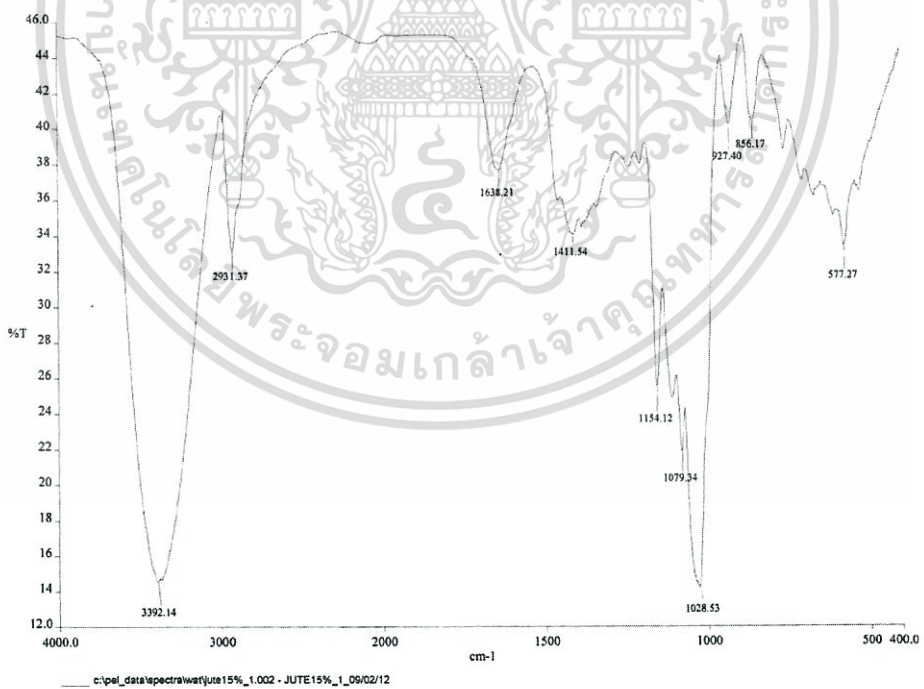


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยปอ 10% โดยน้ำหนัก

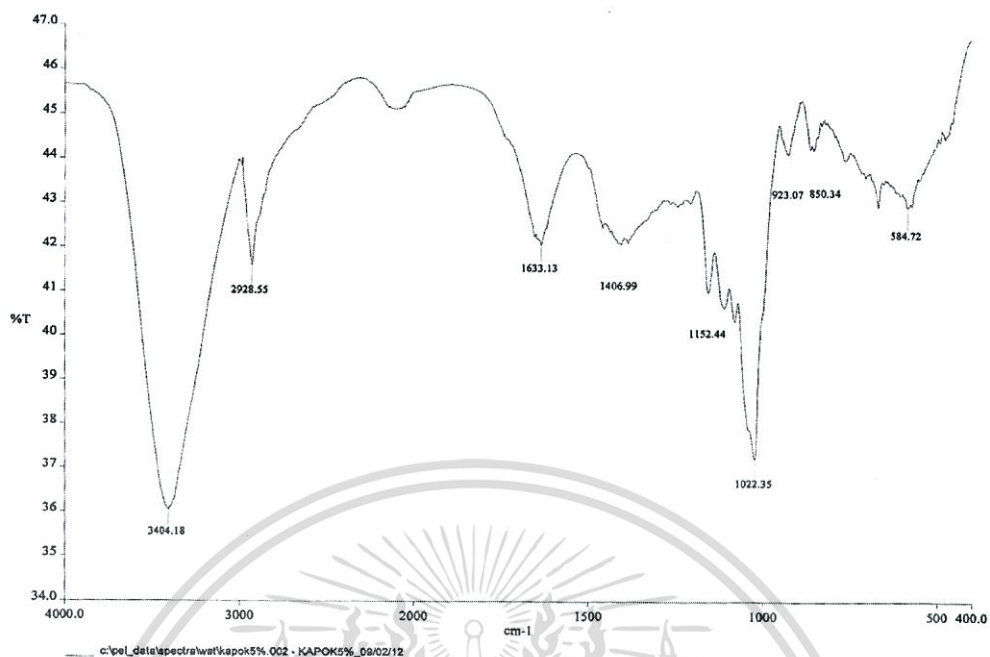


### เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยปอ 15% โดยน้ำหนัก

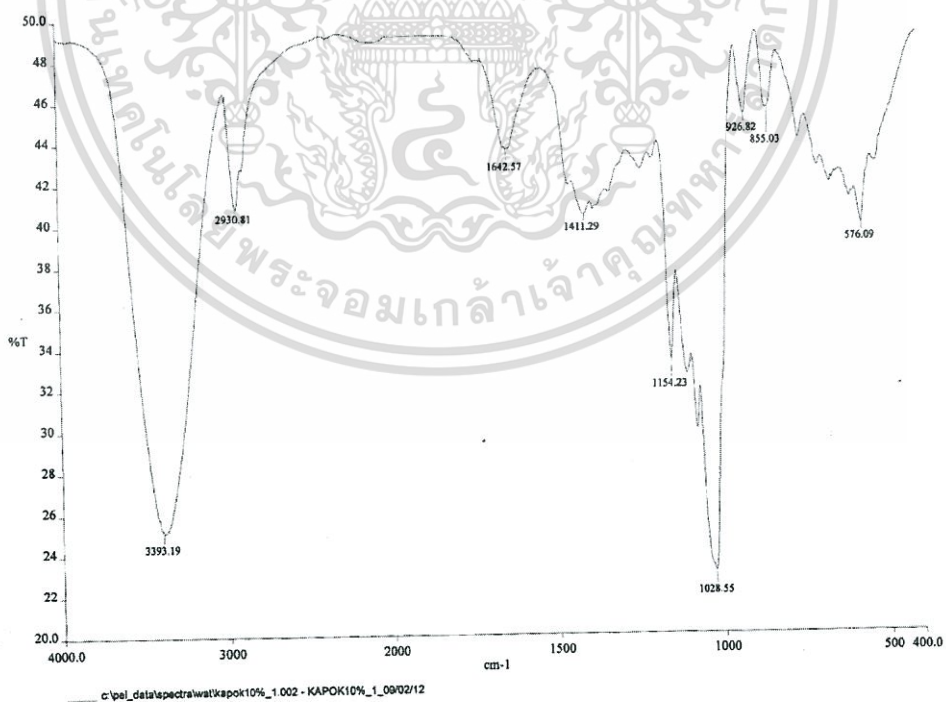


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยนุ่น 5% โดยน้ำหนัก

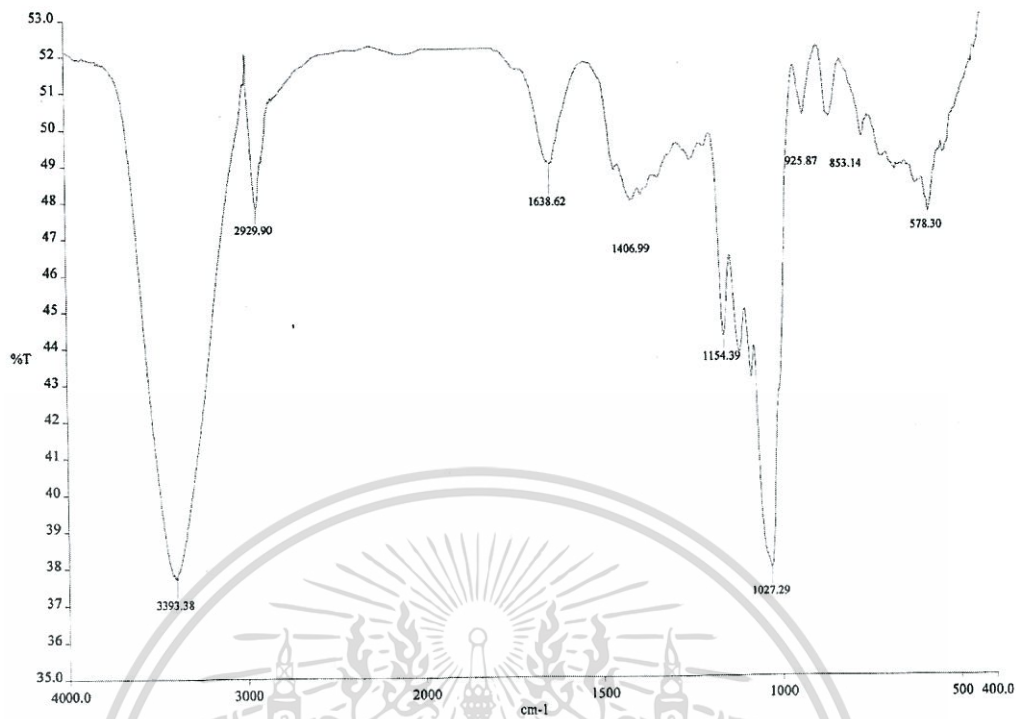


### เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยนุ่น 10% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ 100 %  
ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ และนุ่นในปริมาณต่างๆ

	เปอร์เซ็นต์										
	วันที่	0	1	2	5	6	7	8	9	15	23
ตัวอย่าง ที่ 1	Pure	0.0	9.5	15.5	31.4	34.2	37.1	39.8	44.0	57.7	64.1
	Jute 5%	0.0	8.9	14.7	30.8	33.5	35.9	38.0	41.8	52.5	64.3
	Jute 10%	0.0	10.8	16.9	30.9	33.2	35.7	38.1	41.6	53.3	59.2
	Jute 15%	0.0	9.3	15.5	29.7	32.6	34.1	37.2	38.9	50.9	53.7
	Kapok 5%	0.0	10.6	17.0	32.8	34.3	37.4	40.1	43.0	54.9	65.2
	Kapok 10%	0.0	9.8	16.0	31.3	34.4	37.4	39.8	42.3	52.6	58.0
	Kapok 15%	0.0	8.1	13.6	30.3	32.8	35.7	37.8	40.5	52.8	58.5
	ตัวอย่าง ที่ 2	Pure	0.0	10.2	17.0	33.0	34.9	38.1	41.0	44.0	58.3
Jute 5%		0.0	8.7	14.9	31.3	34.6	38.0	40.0	44.2	57.5	64.7
Jute 10%		0.0	11.2	17.7	32.1	34.0	36.1	38.9	41.0	51.0	60.8
Jute 15%		0.0	9.4	15.0	28.8	31.3	34.0	36.8	38.7	50.5	55.0
Kapok 5%		0.0	10.4	17.1	32.3	34.1	37.5	40.1	42.9	55.1	64.5
Kapok 10%		0.0	9.6	15.9	32.3	34.3	37.2	39.7	41.2	52.3	60.4
Kapok 15%		0.0	8.0	13.1	29.6	32.5	35.6	38.6	41.4	53.1	58.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผสมเส้นใยและที่ผสมเส้นใยปอและนุ่นในปริมาณต่างๆ

### แรงดึง

ชิ้นงานทดสอบ	Load (N)
TPS	20.08 ± 3.59
TPS + jute 5%	30.18 ± 7.40
TPS + jute 10%	50.00 ± 8.68
TPS + jute 15%	58.23 ± 8.17
TPS + kapok 5%	40.76 ± 2.87
TPS + kapok 10%	54.83 ± 9.90
TPS + kapok 15%	63.86 ± 11.86

### ความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานทดสอบ	Stress at max load (MPa)
TPS	1.362 ± 0.19
TPS + jute 5%	2.199 ± 0.461
TPS + jute 10%	3.398 ± 0.601
TPS + jute 15%	3.897 ± 0.536
TPS + kapok 5%	2.914 ± 0.228
TPS + kapok 10%	4.013 ± 0.702
TPS + kapok 15%	4.529 ± 0.895

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การดึงยืด

ชิ้นงานทดสอบ	Extension at max load (mm)
TPS	65.17 ± 11.54
TPS + jute 5%	13.26 ± 2.45
TPS + jute 10%	8.982 ± 3.099
TPS + jute 15%	8.482 ± 0.969
TPS + kapok 5%	16.84 ± 1.93
TPS + kapok 10%	8.386 ± 1.153
TPS + kapok 15%	7.499 ± 0.963

## เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ชิ้นงานทดสอบ	Strain at max load (%)
TPS	108.6 ± 19.2
TPS + jute 5%	22.11 ± 4.08
TPS + jute 10%	14.97 ± 5.17
TPS + jute 15%	14.14 ± 1.62
TPS + kapok 5%	28.07 ± 3.22
TPS + kapok 10%	13.98 ± 1.92
TPS + kapok 15%	12.50 ± 1.61

## มอดุลัส

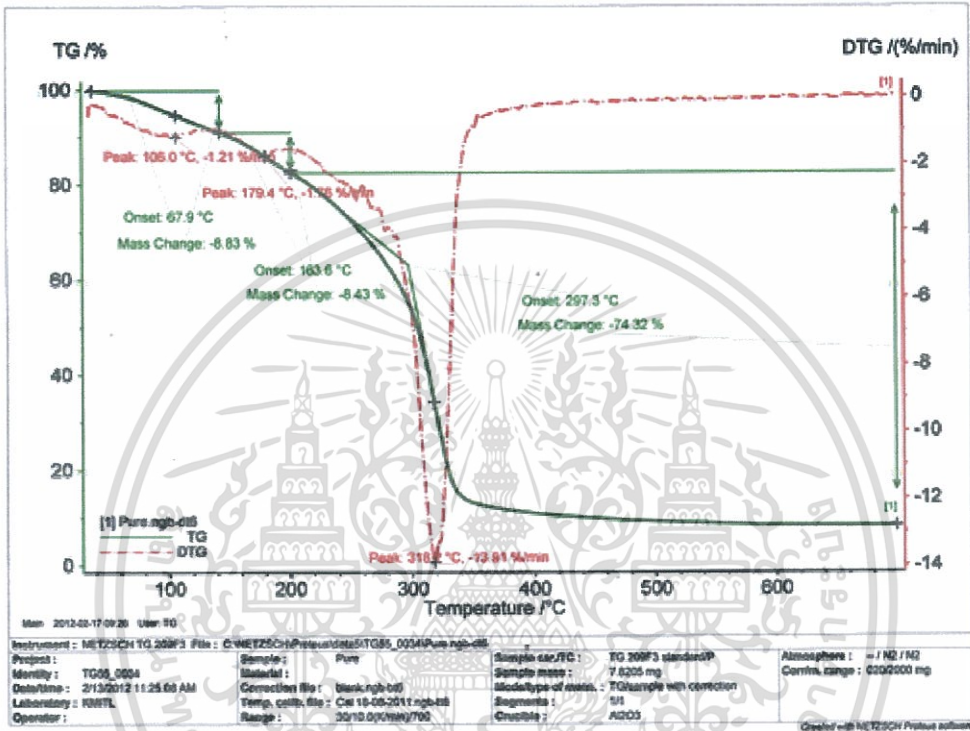
ชิ้นงานทดสอบ	Young's modulus (MPa)
TPS	9.15 ± 2.925
TPS + jute 5%	25.8 ± 7.309
TPS + jute 10%	30.19 ± 13.75
TPS + jute 15%	33.81 ± 5.64
TPS + kapok 5%	26.475 ± 7.831
TPS + kapok 10%	39.912 ± 12.622
TPS + kapok 15%	41.075 ± 6.357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

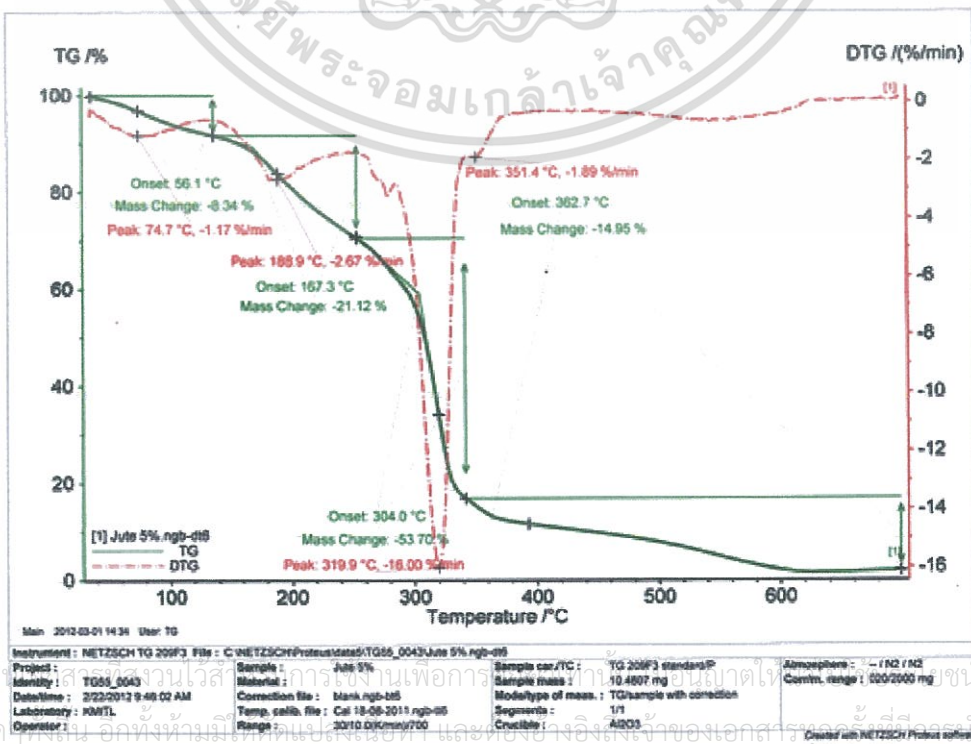
# ภาคผนวก จ

## สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมเส้นใย

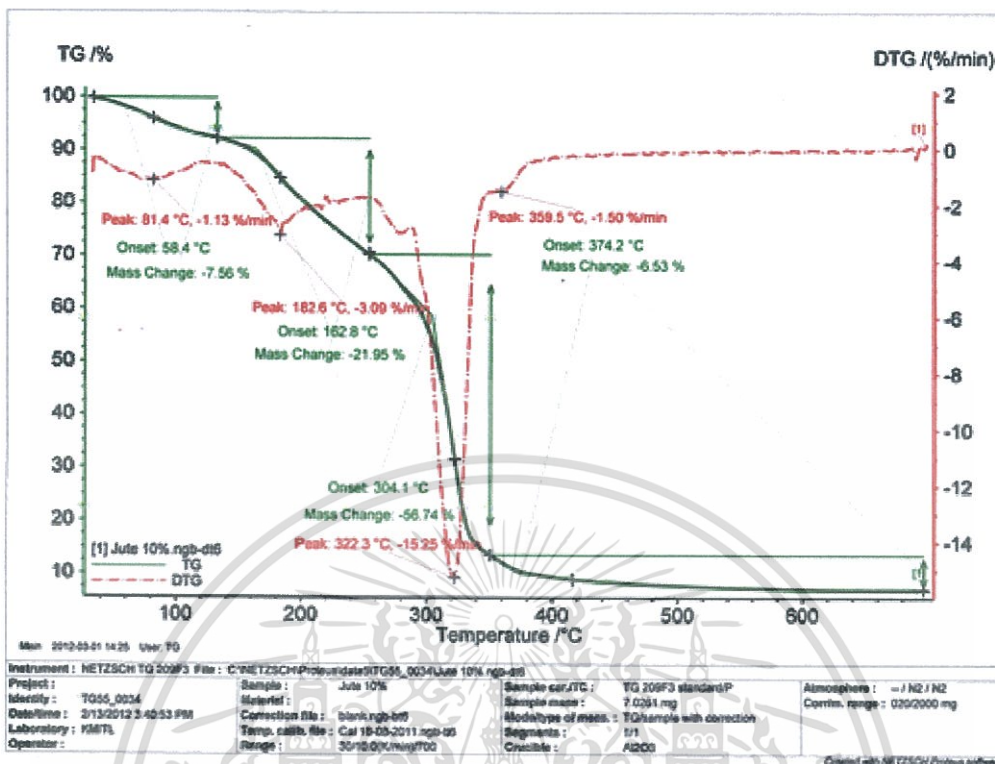


เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมเส้นใยปอ 5% โดยน้ำหนัก

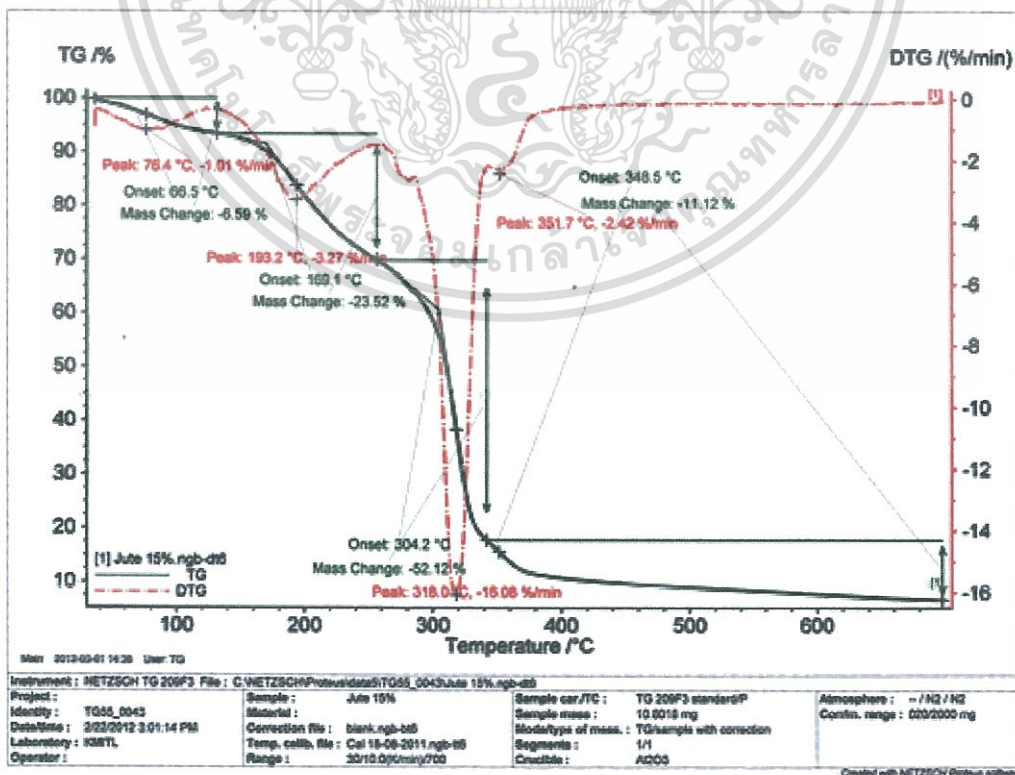


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการพาณิชย์โดยไม่ขออนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาพลาสติกของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำข้อมูลอื่นที่ปรากฏในเอกสารนี้ไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยปอ 10% โดยน้ำหนัก

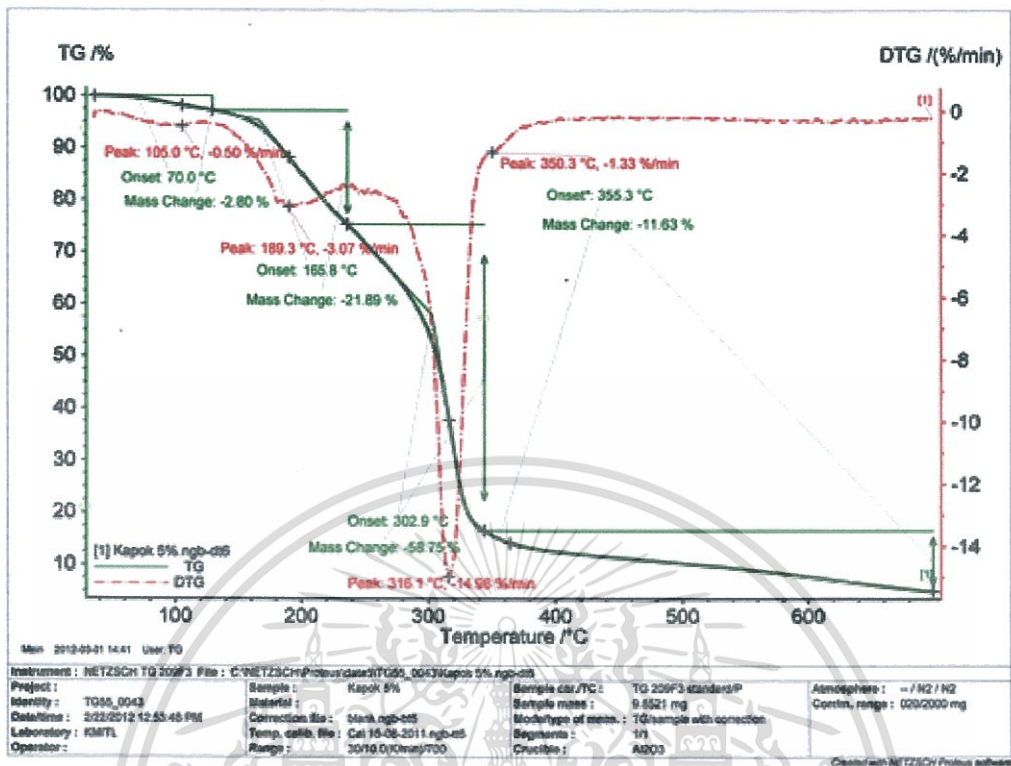


เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยปอ 15% โดยน้ำหนัก

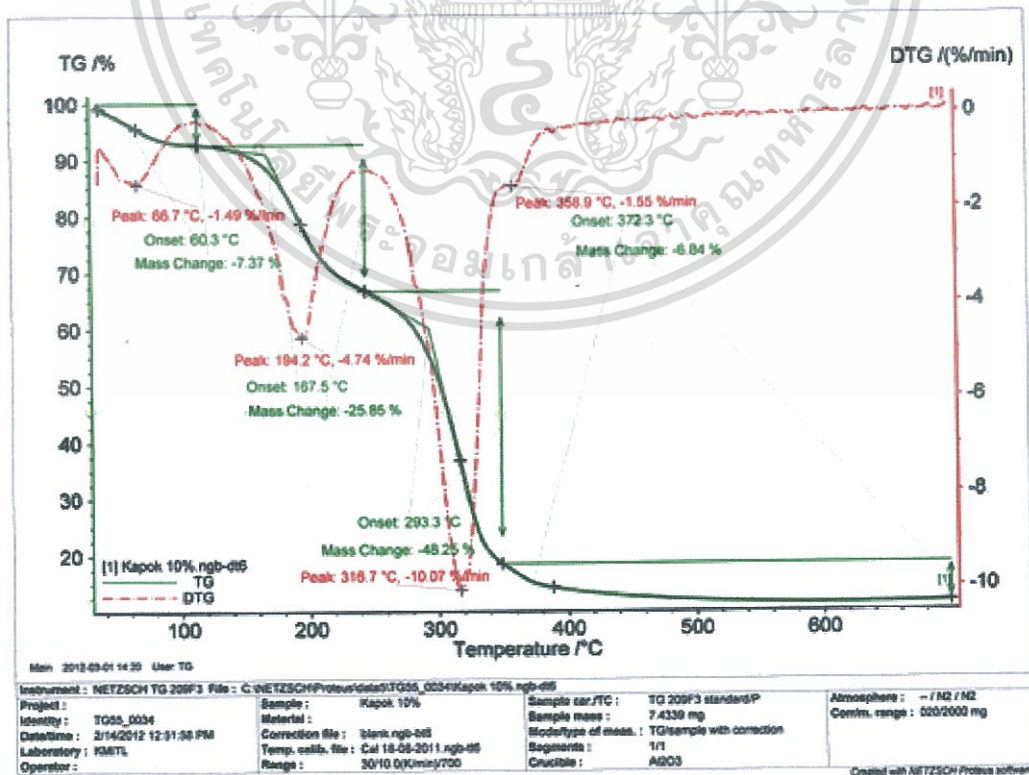


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมเส้นใยถั่ว 5% โดยน้ำหนัก

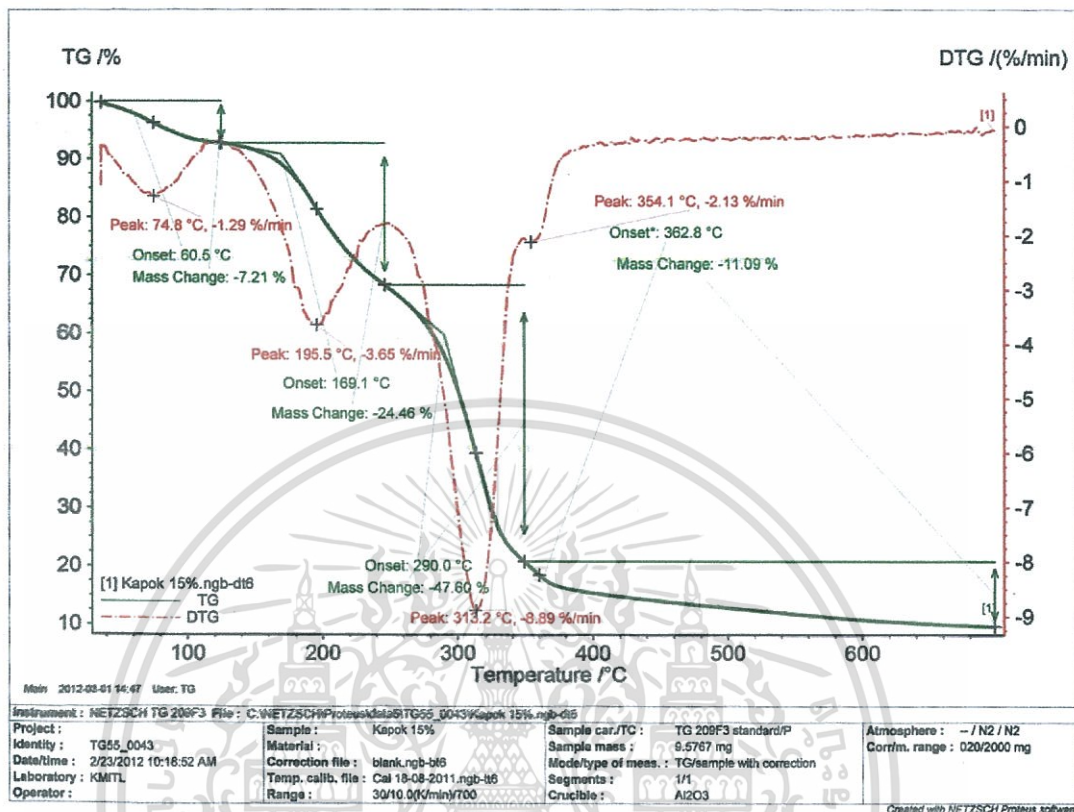


เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมเส้นใยถั่ว 10% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยุ่น 15% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจากการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติก  
สตาร์ชที่ผสมเส้นใยปอ และนุ่นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ 30-40 %

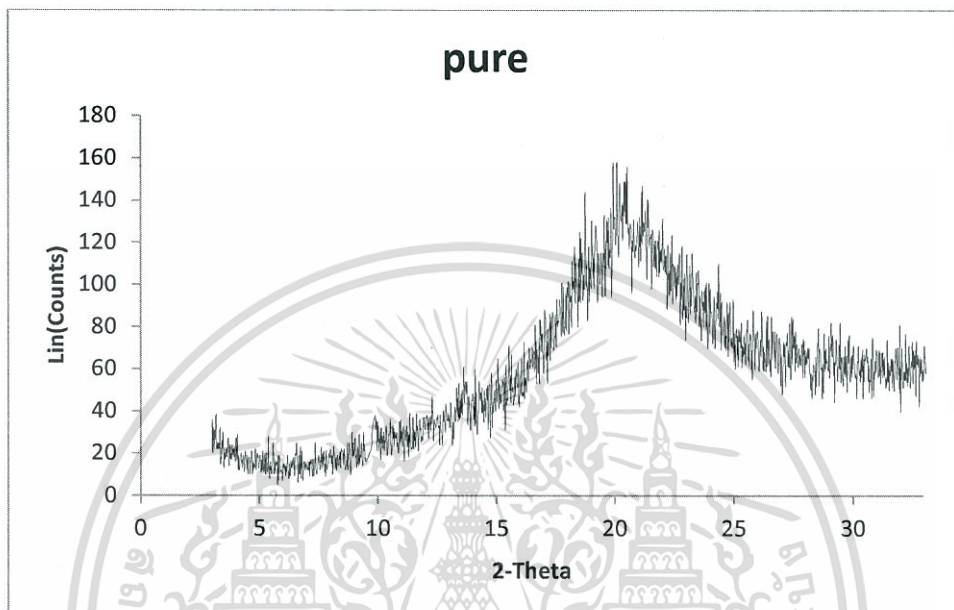
		เปอร์เซ็นต์									
วันที่		0	1	2	5	6	7	8	9	15	23
ตัวอย่าง ที่ 1	Pure	0.0	80.2	95.0	94.9	95.8	94.5	93.3	87.6	73.7	55.4
	Jute 5%	0.0	89.2	131.4	168.9	173.7	179.3	175.5	165.6	117.3	75.1
	Jute 10%	0.0	89.0	125.8	148.2	148.2	147.5	146.7	137.5	107.4	73.3
	Jute 15%	0.0	85.8	117.9	136.0	138.2	135.2	129.6	123.5	96.5	66.6
	Kapok 5%	0.0	94.3	136.9	168.1	173.3	167.9	164.1	147.9	100.2	60.7
	Kapok 10%	0.0	93.6	132.7	153.9	154.1	149.1	141.2	129.6	95.6	63.3
	Kapok 15%	0.0	135.0	183.0	219.9	224.5	224.0	220.7	215.0	179.6	146.9
	ตัวอย่าง ที่ 2	Pure	0.0	79.5	95.9	96.8	97.7	96.3	93.5	90.3	76.8
Jute 5%		0.0	88.0	131.2	169.2	174.6	177.0	174.5	166.6	125.8	83.3
Jute 10%		0.0	87.3	122.9	144.0	145.3	145.5	141.6	134.8	108.0	76.9
Jute 15%		0.0	79.1	98.9	105.0	104.5	102.6	98.4	93.9	81.1	60.8
Kapok 5%		0.0	94.5	136.8	171.7	177.0	173.5	167.9	154.2	105.1	60.8
Kapok 10%		0.0	87.5	125.0	154.7	154.0	149.7	142.5	132.9	102.7	69.9
Kapok 15%		0.0	77.1	113.0	140.9	143.6	143.7	141.0	134.8	110.7	87.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

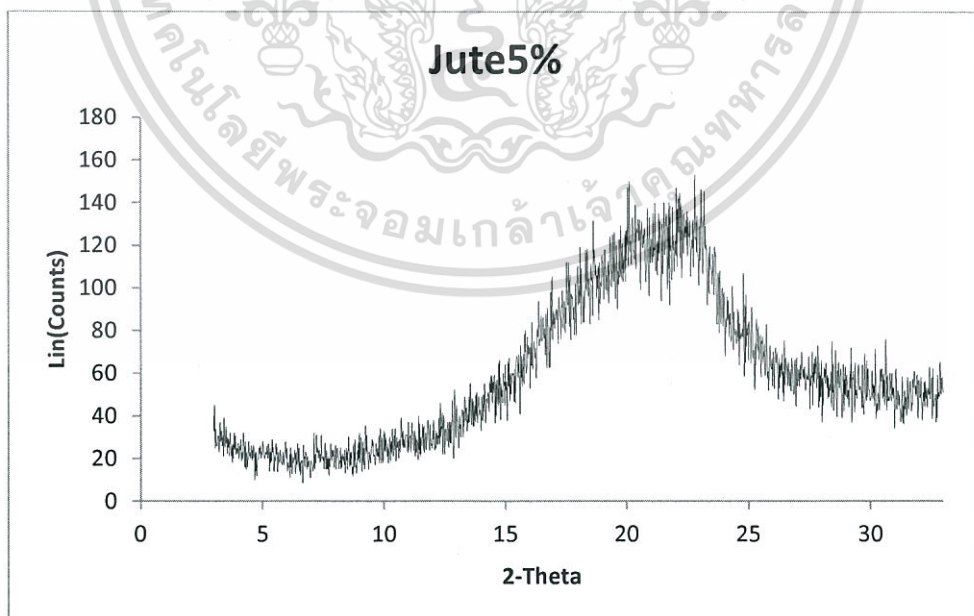
## ภาคผนวก ข

### การเลี้ยวเบนรังสี

เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมเส้นใย

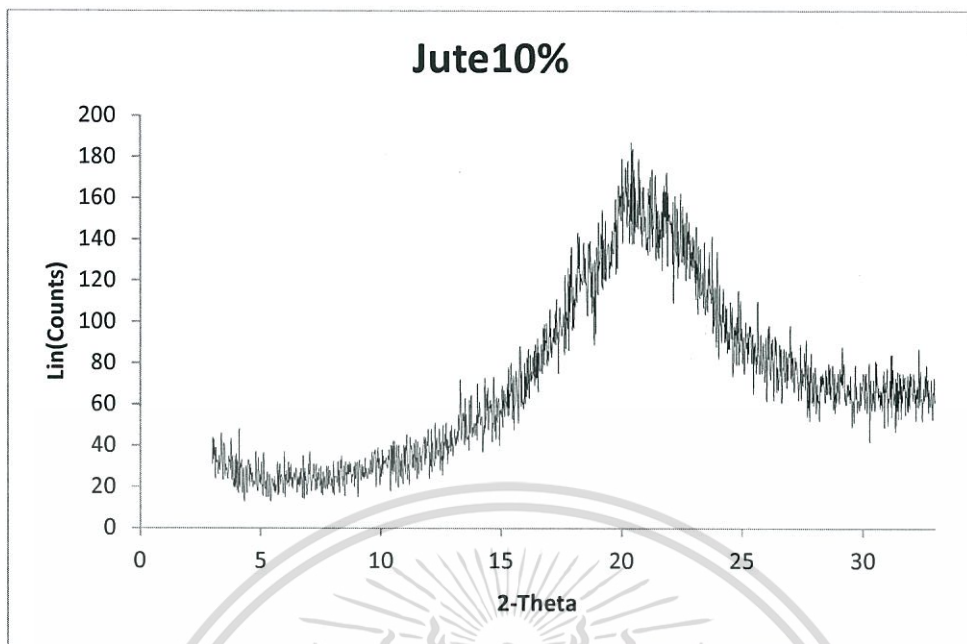


เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผสมเส้นใยปอ 5% โดยน้ำหนัก

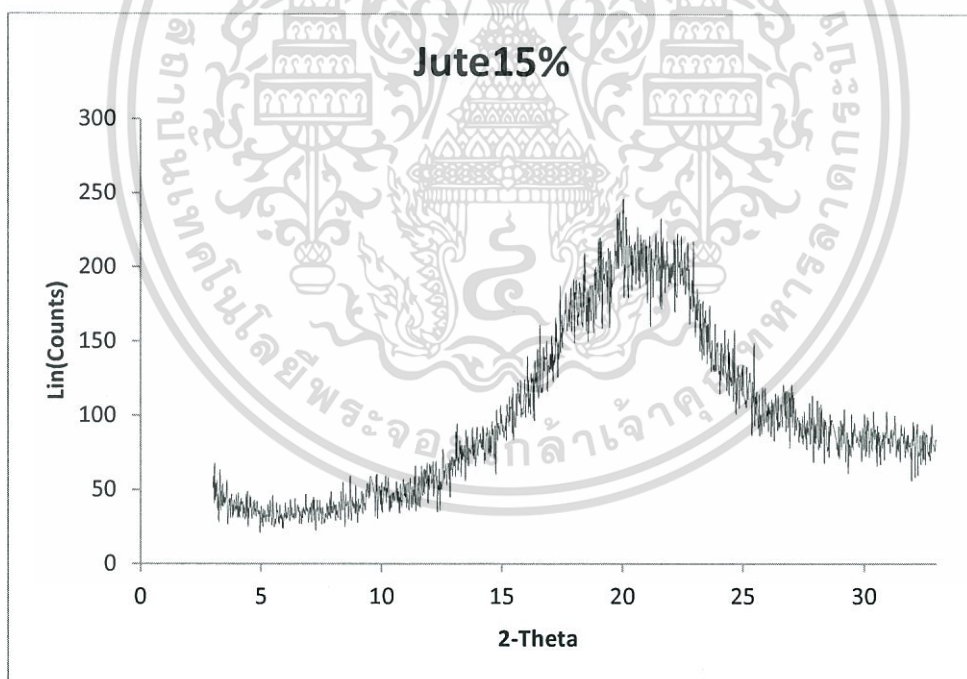


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์จที่ผสมเส้นใยปอ 10% โดยน้ำหนัก

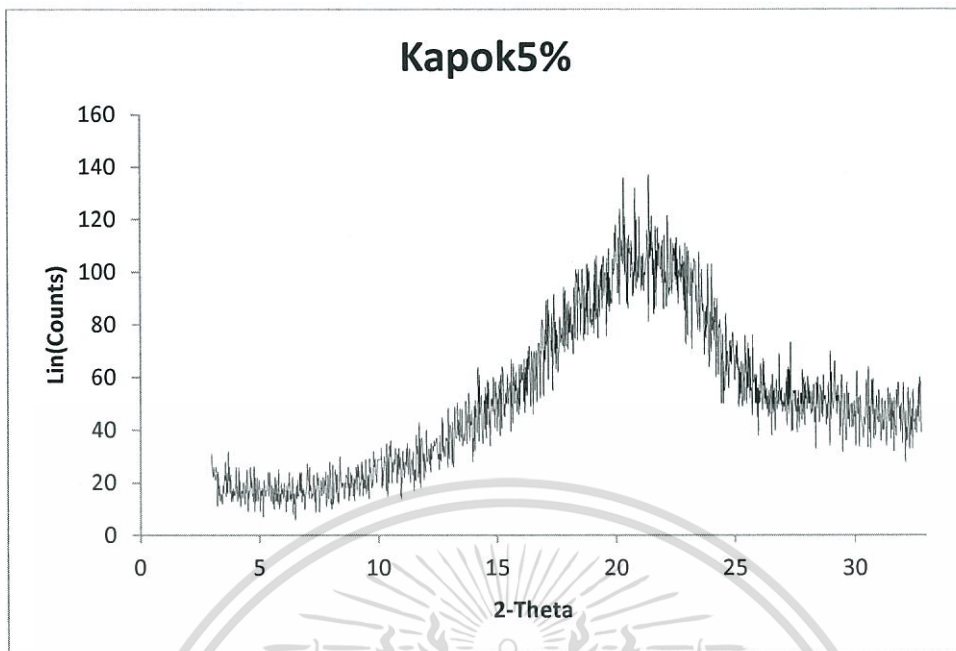


เทอร์โมพลาสติกสตาร์จที่ผสมเส้นใยปอ 15% โดยน้ำหนัก

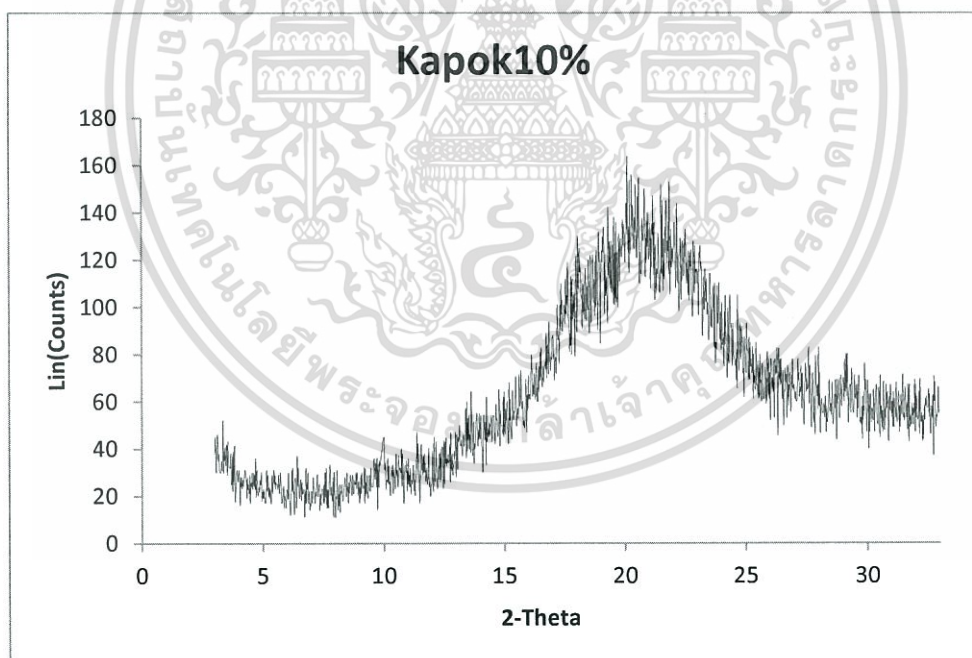


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 5% โดยน้ำหนัก

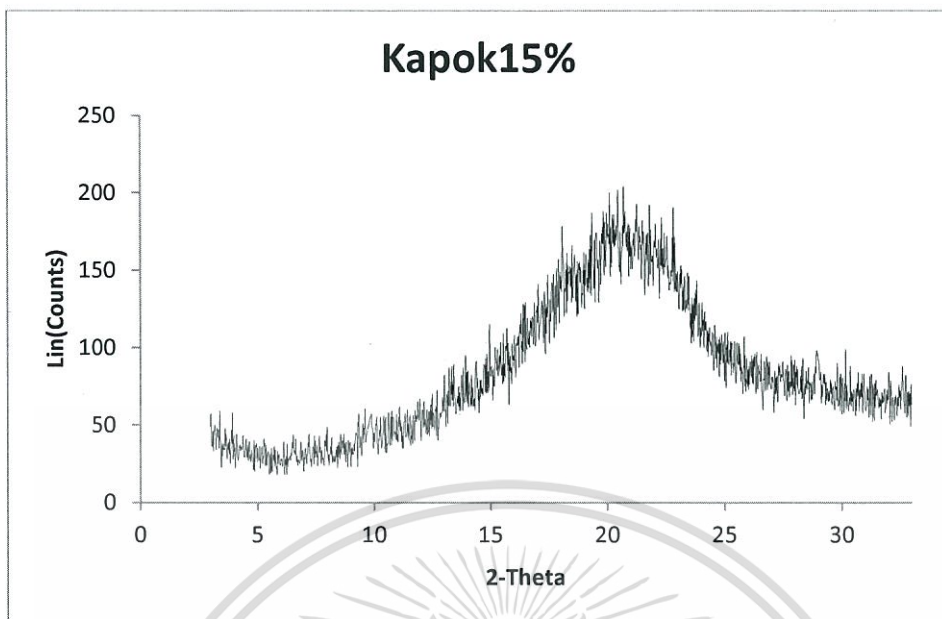


เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 10% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยนุ่น 15% โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้