



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลัง
ที่เสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

Development of biodegradable packaging from thermoplastic cassava
starch reinforced by pectin and cotton fibers

นางจุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ
นางสาวรอรพรรณ พัฒนสิน
นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2558
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลัง
ที่เสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

Development of biodegradable packaging from thermoplastic cassava
starch reinforced by pectin and cotton fibers

นางจุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ
นางสาววรรรณ พัฒนสิน
นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิ์กุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

ณแหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2558 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 275,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี **ตั้งแต่** 1 ตุลาคม 2557 **ถึง** 30 กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

- | | |
|-----------------------------------|---------------------|
| 1. นางจุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร | หัวหน้าโครงการวิจัย |
| 2. นางสาววรรณ พัฒนาสิน | ผู้ร่วมโครงการวิจัย |
| 3. นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิ์กุล | ผู้ร่วมโครงการวิจัย |

หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยการใช้แป้งมันสำปะหลังมาเป็นส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมแบ่งกับกลีเซอรอลเป็น 65 : 35 สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติด้วย เพคตินและเส้นใยฝ้าย การผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลทำด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษาหมุ่ฟังก์ชันพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 1720 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการใส่เพคตินเข้าไปในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากการศึกษาสมบัติการดูดน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย ดูดซับน้ำได้น้อยลง จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าเพคติน และเส้นใยฝ้ายสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงเพคตินและเส้นใยฝ้ายให้ค่า แรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงที่สุด ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้นในทุกๆ ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุง สดทำยการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายสามารถย่อยสลายได้เร็วที่สุด

คำสำคัญ : บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้, เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, แป้งมันสำปะหลัง.

Research Title: Development of biodegradable packaging from thermoplastic cassavastarch reinforced by pectin and cotton fibers

Researchers: 1. Mrs. Jutarat Prahcayawarakorn
2. Ms. Worawan Pattanasin
3. Ms Vipawan Pitpisutkul

Faculty: Science **Department:** Chemistry
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research studied on properties of thermoplastic starch (TPS) prepared from cassava starch using glycerol as a plasticizer at the ratio of starch : glycerol; 65:35. Properties of the TPS were modified by different contents of pectin and cotton fibers, In addition, the combinations of pectin and cotton fibers were also studied. Cassava starch and glycerol were mixed using an internal mixer and, then, shaped by a compression molding machine. It was found from FT-IR spectra that the new addition wavenumbers of 1720 cm^{-1} was observed by the incorporation of pectin into the TPS matrix. The water absorption was lower when cotton fibers were incorporated into the TPS matrix. For morphology, obtained from Scanning Electron Microscope (SEM), the results illustrated that pectin or cotton fibers were well distributed and compatible with the TPS matrix. The highest maximum load, stress at maximum load and Young's modulus were obtained by the TPS modified by both pectin and cotton fibers. Moreover, thermal stability of the TPS was also improved in all of the modified TPS. Finally, the quickest degradation was found in the TPS modified by both pectin and cotton fibers.

Keywords : biodegradable packaging, thermoplastic starch, cassava starch.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยจนทำให้โครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

น.ส.วรวรรณ พัฒนสิน

น.ส.วิภาวรรณ พิตรพิศุทธิ์กุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมางานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	3
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	4
2.1.2 ประเภทของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยทางชีวภาพ.....	5
2.1.2.1 พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน.....	5
2.1.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์.....	5
2.1.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	5
2.1.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	5
2.1.2.5 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	6
2.1.2.6 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	6
2.1.2.7 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	6

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 แป้ง.....	6
2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	7
2.2.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	10
2.2.3 สมบัติของแป้ง.....	10
2.2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	10
2.2.3.2 การเกิดเจลาทีโนเซชัน.....	11
2.2.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	11
2.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	13
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมันสำปะหลัง.....	13
2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	13
2.3.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	14
2.3.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	14
2.4 พลาสติไซเซอร์.....	14
2.5 เพคติน.....	16
2.5.1 แหล่งที่มาของเพคติน.....	16
2.5.2 โครงสร้างของเพคติน.....	16
2.5.3 สมบัติของเพคติน.....	18
2.5.4 ประโยชน์ของเพคติน.....	18
2.6 เส้นใยฝ้าย.....	18
2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	19
2.6.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
ตอนที่ 1 การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล...26	26
ตอนที่ 2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันสำปะหลัง.....27	27
ตอนที่ 3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันสำปะหลัง.....27	27
ตอนที่ 4 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย.....	27
3.4 วิธีการทดสอบ.....	28
3.4.1 การทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน.....	28
3.4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	28
3.4.3 การวัดสี.....	28
3.4.4 การดูดความชื้น.....	29
3.4.5 การทดสอบสัณฐานวิทยา.....	29
3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	29
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	30
3.4.8 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	31
4.1 การศึกษาการเตรียมและการขึ้นรูป.....	31
4.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุง.....	31
ด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย.....	31
4.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR.....	31
4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	35
4.2.3 การวัดสี.....	36
4.2.4 การดูดความชื้น.....	37
4.2.5 สัณฐานวิทยา.....	39
4.2.6 สมบัติเชิงกล.....	41
4.2.6.1 สมบัติเชิงกลเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงสมบัติ	
ด้วยเพคติน.....	41
4.2.6.2 สมบัติเชิงกลเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงสมบัติ	
ด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย.....	42
4.2.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	44
4.2.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	46
4.2.8.1 การศึกษาการย่อยสลายจากกล้องดิจิตอล.....	46
4.2.8.2 การศึกษาการย่อยสลายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
แบบส่องกราด.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถกันน้ำได้ดีและไม่เป็นสนิม ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น กระจก โลหะ และแก้ว ทำให้ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกมีปริมาณเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด จนเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหาการย่อยสลายยากของพลาสติกในปัจจุบัน

พลาสติกย่อยสลาย (Degradable plastic) คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกโดยทั่วไป เมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อม

วัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาทำพลาสติกย่อยสลายได้ คือ แป้ง (Starch) เนื่องจากแป้งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเรียกพลาสติกที่ทำมาจากแป้งนี้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) และประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากที่สุดในโลก จากข้อมูลทางสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์พบว่าในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยผลิตแป้งมันสำปะหลังประมาณ 23.15 ล้านตัน [1] ประมาณครึ่งหนึ่งของแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้ใช้ในประเทศ และที่เหลือสำหรับส่งออก การใช้แป้งมันสำปะหลังที่มากที่สุด คือ การบริโภคในครัวเรือน

ข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch, TPS) คือ ขึ้นงานจากแป้งจะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก มีการดูดความชื้น และมีความว่องไวต่อน้ำมาก เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของ TPS นั้น มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ทำให้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริง จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น การดัดแปรโครงสร้างทางเคมี การผสมทางกายภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิเมอร์อื่นๆ และการผลิตวัสดุคอมโพสิท (Composite material) ที่มีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นเมทริกซ์เพียงอย่างเดียวหรือร่วมกับพอลิเมอร์อื่น

นอกเหนือจากพอลิเมอร์ที่ได้จากแป้ง ยังมีพอลิเมอร์อื่น เช่น เพคติน หรือ เส้นใยฝ้าย ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งพอลิเมอร์กลุ่มนี้สามารถย่อยสลายได้

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

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) [3] เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) เส้นใยไม้ (Wood fibers) เส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่หาง่าย มักมีราคาถูก น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากมีความแข็งแรง และความหนาแน่นต่ำ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเส้นใยปอ และเส้นในนุ่น [4] โดยใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่าการเติมเส้นใยปอและนุ่นลงไป ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น จากการศึกษาการปรับปรุงฟิล์มแป้งกล้วยด้วย เพคตินและเส้นใยฝ้าย [5] พบว่าการเติมเพคตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณเพคติน และเส้นใยฝ้ายมากเกินไป ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งมันสำปะหลังด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติ จากเพคติน และเส้นใยฝ้าย ซึ่งคาดว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic Cassava Starch) ด้วยเพคติน และเส้นใยฝ้าย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน คือ 70 : 30, 65 : 35 และ 60 : 40

1.3.2 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เพคตินในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก และที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

1.3.3 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

1.3.3.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

1.3.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก

1.3.3.3 ทดสอบการวัดสี

1.3.3.4 ทดสอบการดูดความชื้น

1.3.3.5 ทดสอบสัณฐานวิทยา

1.3.3.6 ทดสอบสมบัติเชิงกล

1.3.3.7 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

1.3.3.8 ทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลได้

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายได้

1.4.3 เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) [6-7]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบันได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ.1960 ด้วยแนวคิดที่จะทำให้เป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง American Social for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการซึ่งสามารถวัดได้ โดยการใช้วิธีตรวจสอบตามมาตรฐานต่างๆของพลาสติก โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 4 ประเภท คือ

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

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกล เป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดราต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของ พอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลต์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ(Biodegradable plastics) การย่อยสลายของ พอลิเมอร์ จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลงจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP ก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) น้ำ เกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่ง หมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่าพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green Plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [8]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐานDIN 103.2 ระบุไว้ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือกระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้ 4 ประเภทคือ

- 1.การย่อยสลายทางชีวภาพ(Biodegradation)
- 2.กระบวนการหมักเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์
3. การย่อยสลาย 2 ขั้นตอน โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ
4. การย่อยสลาย 2 ขั้นตอน โดยผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง ก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ (Photo-biodegradation)

2.1.2 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเทอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น

2.1.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ [8]

นอกเหนือจากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพแล้ว TPS บางเกรดยังสามารถละลายในน้ำอีกด้วย PBSA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและแสดงสมบัติทางเทอร์โมพลาสติกดีมาก จากการวิจัยพบว่าแป้งผสมกับ PBSA ในสัดส่วนร้อยละ 5 - 30 โดยน้ำหนัก จะมี Tensile strength ต่ำกว่า ที่มี PBSA อย่างเดียว และ Tensile strength จะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและสมบัติในการขึ้นรูป

2.1.2.3 การย่อยสลายทางชีวภาพ [9]

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานจะเกิดขึ้นที่ตัวเชื่อมไกลโคซิดิกระหว่างโมเลกุลน้ำตาลโดยเอนไซม์ ทำให้ความยาวสายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และง่ายต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวเคมี สำหรับพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 60 อนุภาคของแป้งทำหน้าที่เป็นตัวประสานอย่างอ่อนๆ และเป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลาย ซึ่งพลาสติกจะแตกตัวเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เท่านั้น แต่จะไม่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์

- จากการทดสอบการฝังกลบพบว่าแป้งผสมพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8 สัปดาห์ และจากการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดสอบโดยการฝังกลบ พบว่าการเติมปริมาณแป้งเพียงร้อยละ 5 ลงใน PBSA จะทำให้พลาสติกถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ ที่มี PBSA อย่างเดียว
- เนื่องจาก PVA ละลายในน้ำ ดังนั้นการย่อยสลายของพลาสติกผลิตจากแป้งผสมกับ PVA จึงเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการย่อยสลายทางชีวภาพของโมเลกุลน้ำตาล

2.1.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์ [7]

(ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้างนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

พบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป และมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าขึ้น พอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลาย เหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน

2.1.2.5 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ปฏิกิริยา ส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับ และความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลาย พอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมี คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.1.2.6 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity ของ พอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง พอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.1.2.7 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้า 2 มิลลิเมตร 30 x 120 มิลลิเมตร² ตัวอย่างละ 2 ชิ้น ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 35 วัน การเก็บตัวอย่างต้องทำ ด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง

2.2 แป้ง [10]

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด มีขนาด โมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยกลูโคส กระบวนการผลิตแป้งนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ หลักการทั่วไป คือ แยกเม็ดแป้งจากองค์ประกอบอื่น เช่น เส้นใย โปรตีน เกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างน้ำ ทำการปั่นแยกและอบแห้ง ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ ละลายในน้ำเย็น

สมบัติของแป้งสามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

1. Starch ผลิตได้จากพืชผลการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และ จากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องใช้แบบเปียก (wet grinding) ซึ่งทำให้แยก starch ออกมาได้

2. Flour ผลิตได้จากโม้แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้สมบัติต่าง ไปจาก starch

แป้งมันสำปะหลังเป็นประเภท Starch เม็ดแป้ง (Starch granule) ไม่ละลายในน้ำเย็น รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับแหล่งของพืชที่ให้แป้ง

2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง [7]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส และ อะมิโลเพกทิน (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.5 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [7]

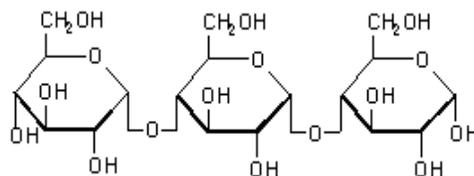
สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	20 0-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

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

1. อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา - 1, 4 ($\alpha - 1, 4$) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส [7]

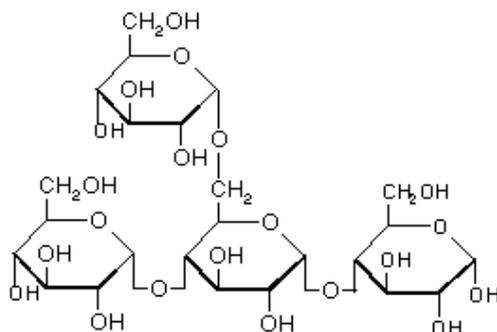
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [7]

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

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลลาทีไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ในใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ด โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

2. อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 ดังรูปที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [7]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสใน อะมิโลเพกทิน ทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมี น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืน ตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [7]

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

3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทินแต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่จะมี กิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับ สภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง
4. ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เล็ก และ ฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

2.2.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

2.2.3 สมบัติของแป้ง [7]

2.2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย[7]

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

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

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลายความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่

ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแบ่ง รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิด จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

2.2.3.2 การเกิดเจลาทีนเซชัน [7]

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทีนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลาทีนเซชันมักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาทีนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาริซได้ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เรียกว่าการเกิดเจลาทีนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาริซได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินเข้ม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจลาทีนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ได้ดีกว่า

2.2.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [7]

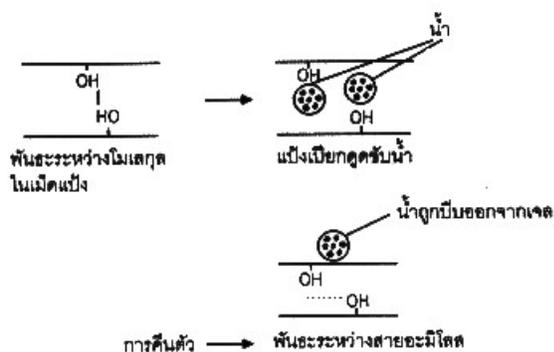
เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.3 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้

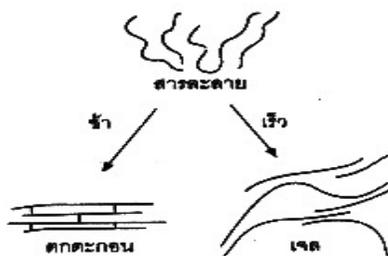
เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมาจนเกิด ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก เช่น แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคืนตัวของแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อัตราในการ คืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [7]



รูปที่ 2.4 กลไกการคืนตัวของแป้ง [7]

ตารางที่ 2.4 อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิด [7]

ชนิดของแป้ง	%การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.5	1

2.3 แป้งมันสำปะหลัง [11]

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Manihot esculenta* (L.) Crantz ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch, Monioc starch เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากหัวของมันสำปะหลังมีแป้งในปริมาณมากแต่มีสารอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ในปริมาณต่ำ จึงเป็นแหล่งแป้งบริสุทธิ์ชั้นเลิศ ที่สามารถสกัดออกมาได้ง่ายและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ได้อย่างหลากหลาย คุณสมบัติที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลังคือ แป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวแป้งเปียกใสและมีความเหนียวสูง ด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้แป้งมันสำปะหลังมีความสะดวกและพร้อมที่จะนำไปใช้ผสมกับสารแต่งกลิ่นรสและสารแต่งสี นอกจากนี้มันสำปะหลัง ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแปรรูปอีกมากมาย เช่น ผงชูรส สารให้ความหวานและแอลกอฮอล์ เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [11]

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

2.3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [11]

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลสและ อะไมโลสเพกทินซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกันแบ่งได้เป็น แบบ คือ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบมีอะไมโลส บางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอก ของอะไมโลสเพกทินและยึดติดกันด้วย

พันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และ พองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สองโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลสเพกทินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และ พองตัวได้ง่าย

2.3.3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

1. น้ำมันสำปะหลังสดที่ซื้อเข้าเครื่องชั่งน้ำหนักวัดเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่มีในหัวมัน
2. การทำความสะอาดและจัดเตรียมหัวมัน เริ่มตั้งแต่นำหัวมันสดเข้าสู่เครื่องร่อนจากนั้นลำเลียงเข้าสู่เครื่องล้าง เพื่อทำความสะอาดหัวมันแล้วจึงนำเข้าสู่เครื่องสับ และชุดเปลือกเพื่อให้หัวมันมีขนาดเล็กและแยกเอาเปลือกออกแล้วเข้าสู่เครื่องบด
3. เมื่อบดเสร็จแล้ว จะส่งเข้าเครื่องสกัด (Extractor) แยกเอากากและน้ำแป้งออกจากกัน กากมันนี้ จะถูกนำไปตากแดดให้แห้งเพื่อให้เป็นส่วนประกอบอาหารสัตว์

2.3.4 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch)

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษา และ ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุที่สามารหาได้ง่ายมีมากในธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (filler) ใน polyolefin ต่อมา มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด กลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายกับ low density polyethylene โดยทั่วไปเราไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูป thermoplastic ทั่วไป เพราะแป้งจะไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อเราให้ความร้อน ในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็น thermoplastic starch จำเป็นที่จะต้องเติม plasticizer เช่น glycerol, ethanolamine, พอร์มาไมด์ และ ซอร์บิทอลลงไป ซึ่งภายใต้อุณหภูมิสูง ประมาณ 90-180 องศาเซลเซียสและได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอจะทำให้แป้งสามารถหลอม และไหลได้ สามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ เช่น single screw extrusion, twin screw extrusion, compression molding

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) หมายถึงวัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์พลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลส และ อะไมโลสเพกทิน เป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ ซึ่งพลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch)

2.4 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) [9]

สารเสริมสภาพพลาสติกหรือที่รู้จักกันในนาม พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเคมีที่เติมลงในพลาสติกและยางเพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวและดัดโค้งได้ ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ พลาสติกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเติมสารเคมีประเภทนี้พบว่าถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกตั้งแต่สมัย Alexander Parkers ผลิต

Parkesine โดยใช้กัมมะถันเป็นพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งต่อมา Hyatt ใช้กัมมะถันผสมในเซลลูโลสไนไตรต เพื่อช่วยให้พลาสติกขึ้นรูปได้ง่าย

สารเคมีที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ควรมีสมบัติ

1. เป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนมากเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูงควรมีน้ำหนักโมเลกุลอย่างต่ำประมาณ 300 ด้วยเหตุนี้ที่อุณหภูมิห้องจึงมีอัตราการละลายในเนื้อพอลิเมอร์ช้า
2. ควรมีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกับพลาสติกหรือยางที่ผสม
3. พลาสติกไซเซออร์ไม่ควรตกผลึกในช่วงอุณหภูมิขณะใช้งาน เว้นเสียแต่จะสามารถเกิดแรงดึงดูดจำเพาะกับพอลิเมอร์ได้

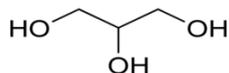
หน้าที่เบื้องต้นของพลาสติกไซเซออร์ คือ ช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล พลังงานในการหมุนพันธะ (Bond rotation) จึงลดลงทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature) ทั้งนี้เพราะสารประเภทนี้เมื่อผสมกับพลาสติกจะแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเท่ากับลดความแข็งแรงของพอลิเมอร์

สรุปหน้าที่สำคัญของพลาสติกไซเซออร์ได้แก่

1. ลดความหนืด ทำตัวคล้ายตัวทำละลายและสารหล่อลื่นลดแรง van der waals ระหว่างโซ่พอลิเมอร์ แต่แตกต่างจากตัวทำละลาย ตรงที่ว่าต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 300 เพื่อที่จะได้ไม่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์พลาสติกและยางระหว่างการใช้งาน
2. ต้องทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความอ่อนตัวทำให้ตัดโค้งง่าย โดยลดค่า T_g ของพอลิเมอร์ทำให้สภาพตัดโค้งงอเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ลดลงแต่ความยาว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น รวมทั้งความทนแรงกระแทกดีขึ้นด้วย

Glycerol

- ชื่อเคมี IUPAC 1,2,3-propanetriol ;1,2,3-Trihydroxypropane
- ชื่อเคมีทั่วไป Glycerol , Glycerine
- สูตรโมเลกุล $C_3H_5(OH)_3$
- สูตรโมเลกุล



สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอล [9]

สถานะ	ของเหลว
สี	ใสคล้ายน้ำมัน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	92.90
จุดเดือด (°C)	290
จุดหลอมเหลว (°C)	18
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ = 1)	1.26
ความหนืด (mPa.sec)	1400
ความดันไอ (มม.ปรอท)	0.0025
ความหนาแน่นไอสัมพันธ์ (อากาศ = 1)	3.1
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100มล)	ละลายได้ที่ 20 °C
ความเป็นกรดต่าง (pH)	5 ที่ 20 °C
จุดวาบไฟ(°C)	199
จุดลุกไฟได้เอง(°C)	370

2.5 เพคติน [2]

2.5.1 แหล่งที่มาของเพคติน

เพคตินเป็นสารประกอบโพลีเมอร์ที่พบในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง จัดเป็นสารประกอบ คาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับ แป้งและเซลลูโลส แม้ว่าเพคตินปกติจะเกิดขึ้นมากในเนื้อเยื่อของพืชที่ยึดติดอยู่กับองค์ประกอบของมิดเดิลลามেলাและส่วนที่เป็นความหนาของผนังเซลล์ แต่แหล่งของเพคตินที่ใช้ในทางการค้ามีค่อนข้างจำกัด เพราะความสามารถในการเกิดโครงสร้างของเจลของเพคติน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและระดับการแทนที่ด้วยเมทิล (Degree of methylation : DM) แหล่งของเพคตินที่แตกต่างกัน เพคตินที่ได้จะมีความสามารถในการเกิดเจลได้ในสภาวะแตกต่างกัน

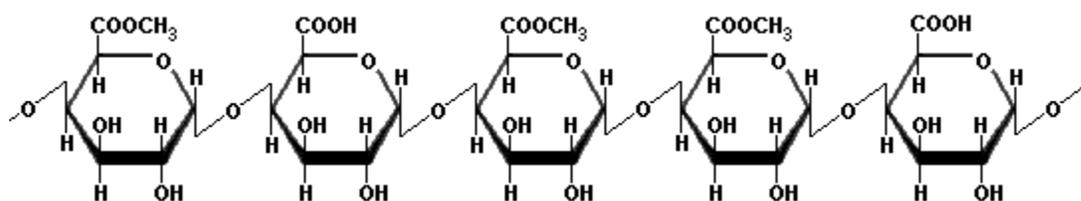
เพคตินจำนวนมากพบอยู่ที่ผนังเซลล์ของผลไม้ เป็นสารอาหารที่สำคัญและมีความสำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ เพราะมีคุณสมบัติในการเกิดเจลได้ เพคตินได้จากของเหลือในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล ส้ม มะนาว เนื้อของหัวบีทที่ใช้ทำน้ำตาล หรือของเหลือจากการสกัดน้ำตาล เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นแหล่งที่ดีของเพคตินที่มีคุณภาพดีได้จากเปลือกมะม่วงสุก ปริมาณเพคตินในผลไม้ชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.7

2.5.2 โครงสร้างของเพคติน

เพคตินเป็นโพลีแซคคาไรด์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) 150 - 500 หน่วย (น้ำหนักโมเลกุล 30000 - 100000) และ ส่วนที่ถูกเอสเทอร์ไฟต์ (esterified) กับกลุ่มเมทอกซี (methox group) ส่วนที่เป็นสายโซ่ตรง (backbone chain) จะประกอบด้วย แอล รามโนส (L- rhamnose) และส่วนที่เป็นกิ่งกับสายโซ่หลักที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ประกอบด้วย บีต้า- ดี - กาแลคโทไพราโนส (β -D-

galactopyranose) และ แอลฟา แอลอลาบีโนฟูราโนส (α -L-arabinofuranose) (รูปที่ 2.5)
 ตารางที่ 2.7 ปริมาณเพคตินในผลไม้ชนิดต่าง ๆ [2]

ชนิดพืช	ปริมาณเพคติน
ถั่วลิสง	5.98%
ส้มเขียว	3.90%
ถั่วเหลือง	3.45%
มะนาว	2.90%
ส้ม	2.36%
แครอท	2.00%
ฟักทอง	1.24%
กระเทียม	1.11%
กล้วย	0.94%
มัน	0.83%
แอปเปิ้ล	0.78%
สตอเบอรี่	0.75%
ถั่วเขียว	0.70%
องุ่น	0.19%
แตงโม	0.18%
แตงกวา	0.16%
สับปะรด	0.09%
พริกเขียว	0.09%



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเพคติน [2]

2.5.3 สมบัติของเพคติน

1. การละลาย เพคตินละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำร้อนให้สารละลายที่มีความข้นหนืด แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ปัญหาที่ควรระวัง คือการจับตัวเป็นก้อนของเพคตินเมื่อนำไปละลายน้ำ วิธีการแก้ไขโดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องผสมความเร็วสูงช่วยในการละลายเพคติน โดยค่อยเติมเพคตินในน้ำร้อนอุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเปิดเครื่องความเร็วสูงเป็นเวลา 5-10 นาที

2. ความหนืดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการเอสเทอร์ฟิเคชันของเพคติน ความเข้มข้น อุณหภูมิ พีเอช และเกลือชนิดต่างๆ

3. การเกิดเจล จัดเป็นสมบัติที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบโดยใช้ระดับการเอสเทอร์ไฟด์

3.1 เพคตินที่มีระดับการแทนที่ด้วยหมู่เมทิลสูง (High methoxy pectin : HM) จะมี DE มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิดเจลได้เมื่อมีของแข็ง ที่ละลายได้เป็นตัวกลาง ปกติจะใช้ซูโครส มากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ ที่มีความเป็นกรด- ต่างเฉลี่ย 2.0 – 3.5

3.2 เพคตินที่มีระดับการแทนที่ด้วยหมู่เมทิลต่ำ (Low methoxy pectin : LM) จะมี DE ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์สามารถเกิดเจลได้เมื่อใช้แคลเซียมไอออนเป็นตัวเหนียวน้ำ และสามารถเกิดได้เมื่อมีของแข็ง ที่ละลายได้เป็นตัวกลางในปริมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ มีความเป็นกรด - ต่างเฉลี่ย 2.5 – 6.5 สถานะนี้สามารถทำให้เกิดเจลของเพคตินมีความคงตัวได้ 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์

2.5.4 ประโยชน์ของเพคติน

มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางค์มาช้านานโดย ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารก่อเจล ในผลิตภัณฑ์แยม เจลลี่ และสารเพิ่มความคงตัวของระบบคอลลอยด์ในเครื่องดื่มผลไม้ และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำเพคตินมาใช้ในทางเภสัชกรรม และอุตสาหกรรมยาเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเพคตินมีสมบัติเฉพาะที่ทำให้สามารถนำมาใช้เก็บกักหรือนำส่ง ยา โปรตีน และ เปปไทด์ เป็นต้น และ จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทไฟเบอร์ หรือ เส้นใยอาหารที่ไม่ถูกย่อย โดยเอนไซม์ในระบบการย่อยในร่าง กายมนุษย์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักโภชนาการมากขึ้น เพราะจากการวิจัยให้ผลออกมาว่าอาหารที่มีไฟเบอร์สูงจะช่วยป้องกันการเกิดโรคต่าง ๆ หรือในทางกลับกันคนที่กินอาหารที่มีไฟเบอร์น้อยก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดโรคต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น

2.6 เส้นใยฝ้าย (Cotton fiber) [12]

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่นิยมมากที่สุดในกลุ่มเส้นใยเซลลูโลส มีอัตราการผลิตและการใช้งานสูง ประเทศที่ส่งออกฝ้ายเป็นหลัก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน อินเดีย ปากีสถาน แอฟริกา เป็นต้น

ฝ้ายมาจากปุยฝ้ายของพืชตระกูล *Gossypium* และมีหลายชนิด แต่เส้นใยฝ้ายในตลาดส่วนใหญ่ทั่วโลกเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่มีชื่อว่า กอสลีเปียม ฮิสชูตัม (*Gossypium hirsutum*) และ กอสลีเปียม บาบาดินส์ (*Gossypium barbadense*) จากประเทศอเมริกา เส้นใยฝ้ายมีความแตกต่างกันในเรื่องความยาว ความ

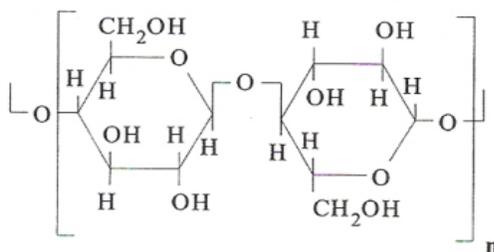
แข็งแรง การยืดตัว ความละเอียด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) ความแตกต่างนี้มาจากพันธุ์และสภาพแวดล้อมในการปลูกฝ้าย เช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณความชื้น ปริมาณแสงแดด และวิธีการเก็บเกี่ยว

ฝ้ายเป็นเซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้น โครงสร้างทางเคมี คือ poly (1,4- β -D-anhydroglucopyranose) แสดงดังรูปที่ 2.13 โครงสร้างภายนอกของฝ้ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เส้นใยฝ้ายมีความละเอียดมาก มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 10-65 มิลลิเมตร ขึ้นกับคุณภาพของเส้นใย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-22 ไมครอน (ไมโครเมตร= 10^{-6} เมตร) องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพและเคมีของเส้นใยฝ้ายแสดงในตารางที่ 2.8 และรูปที่ 2.7 9 ตามลำดับ

2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [12]

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



รูปที่ 2.6 โครงสร้างซ้ำของ poly (1,4- β -D-anhydroglucopyranose) [12]

2.6.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี

ตารางที่ 2.7 สมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยฝ้าย [12]

Property	Evaluation
Shape	Fairly uniform in width, 12-20 microns; length varies from ½ to 2½ inches; typical length is 7⁄8 to 1¼ inches.
Luster	Low
Tenacity (strength)	
- Dry	3.0-5.0 g/d
- Wet	3.3-6.0 g/d
Resiliency	Low
Density	1.54-1.56 g/cm ³
Moisture absorption	8.5%
Dimensional stability	Good
Resistance to	
-acids	damage, weaken fibers
- alkalis	resistant; no harmful effects
- organic solvents	high resistance to most
- sunlight •	Prolonged exposure weakens fibers
- microorganisms	Mildew and rot-producing bacteria damage fibers
- insects	Silverfish damage fibers

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปนัดดา พวงเกษม [13] ศึกษาฟิล์มบริโภาคที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง และทดสอบสมบัติ โดยพบว่า ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ที่มีสมบัติที่เหมาะสมนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากการเตรียมน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไซเซอร์ แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร มีค่าการต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กิโลกรัมต่อ มิลลิเมตร การดึงยืดร้อยละ 10.13 ค่าการซึมผ่านของออกซิเจน 6 มิลลิเมตรต่อตารางเมตร สามารถต้านทานน้ำมันได้ 120 วัน ย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ

กาญจนา อุทัยฉาย และคณะ [14] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง (TPS) โดยนำแป้งและกลีเซอรอลผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นตัวอย่างด้วยเทคนิคการอัดเข้าแม่พิมพ์ ในการทดลองได้ใช้แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว ผสมกับกลีเซอรอลที่อัตราส่วนกลีเซอรอล 15%, 20%, 25% และ 30% w/w รวมถึงศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS ด้วยการเติมผงแคลเซียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 -0.355 มม. และ 0.038-0.150 มม. ผสมกับแป้งในอัตราส่วนผงแคลเซียม 1% และ 3% w/w ผลการทดลองพบว่า TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล 15% w/w มีค่า Tensile strength มากที่สุด และการเติมผงแคลเซียมขนาด 0.038-0.150 มม. ปริมาณ 1% w/w ทำให้ TPS มี Tensile strength และ Impact strength สูงขึ้น

วิระพงษ์ บัวศรี และคณะ [15] ได้พัฒนาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้มีความว่องไวต่อความชื้นลดลง โดยการเคลือบผิวเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วย Fatty acids, Chitosan และ Chitosan derivatives จากการทดสอบสมบัติความว่องไวต่อการดูดความชื้น พบว่า ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เคลือบผิวมีการดูดความชื้นได้น้อยกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้เคลือบผิว ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย Chitosan และ Chitosan derivatives มีการยึดติดกันระหว่างสารที่นำมาเคลือบผิวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ดีกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เคลือบด้วย Fatty acid แต่ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เคลือบผิวด้วย Fatty acid มีการดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เคลือบด้วย Chitosan และ Chitosan derivatives หลังจากเก็บชิ้นงานไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 53% เป็นเวลา 15 วันทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้เคลือบผิวมีการเปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเคลือบผิว

เกศศิณี ตระกูลทิวากร และคณะ [1] ผลิตภัณฑ์ที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง คือ นำแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ผสมกับกลีเซอรอล หรือ กลีเซอรอลโมโนสเตียเรต ร้อยละ 0.2 5 และ 10 โดยใช้เครื่องอัดรีดในการผสม จากการปรับปรุงด้วยปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะเรียบขึ้น แต่ทนทานต่อการแตกเมื่อพับลดลง การผสมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ในปริมาณต่างกัน ไม่ส่งผลต่อความเรียบของฟิล์ม และจากการผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล พบว่าฟิล์ม มีความใส ยืดหยุ่นดี ส่วนฟิล์มที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าผสมกับกลีเซอรอล มีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นพอใช้ และฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้ายังมีความเปราะบางกว่าฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง

ภูริสา ทศวิล และคณะ [16] ศึกษาสมบัติของฟิล์มประกอบของแป้งข้าวเจ้าและเพคติน ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (ร้อยละ 0, 1, 2 และ 3) พบว่า ฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้ามีการต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีการดึงยืดที่สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.58 MPa และ ร้อยละ 45.40 ตามลำดับ และฟิล์มที่ปรับปรุงด้วยเพคตินทั้ง 3 ความเข้มข้นมีการต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ เพคตินที่มากขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 10.25 - 38.56 MPa ส่วนการดึงยืดของฟิล์ม ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และการซึมผ่านของไอน้ำและการละลายน้ำของฟิล์มประกอบลดลง เมื่อความเข้มข้นของเพคตินเพิ่มสูงขึ้น และฟิล์มประกอบจากแป้งข้าวเจ้าผสมเพคติน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีการซึมผ่านของไอน้ำและการละลายน้ำของฟิล์มต่ำที่สุดเท่ากับ 59.2 กรัมต่อตารางเมตร และร้อยละ 40.77 ตามลำดับ

ชยาภา วิระโพธิ์ประสิทธิ์ และคณะ [3] ศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วยด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย โดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ เมื่อใส่สารละลายเพคตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้ฟิล์มแป้งกล้วยมีความเป็นผลึกสูงขึ้น สมบัติการดูดซับน้ำฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพคติน 50% มีการดูดซับน้ำมากที่สุด สำหรับสำเนาฐานวิทยาพบว่า

มีความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกล้วยกับสารละลายเพคติน และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า การปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใย ส่งผลให้พีคที่ตำแหน่ง O-H stretching เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง นอกจากนี้ พบว่า พอลิเมอร์แป้งกล้วยที่ใส่สารละลายเพคติน 10% และเส้นใยฝ้าย 10% ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และสำหรับการสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า พอลิเมอร์แป้งกล้วยที่เติมเพคติน 50% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงที่สุด และจากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มแป้งกล้วยพบว่าเมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น ส่วนสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10% มีแนวโน้มย่อยสลายช้าที่สุด

สุพจิต สุกันตะ และคณะ [17] ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของแผ่นฟิล์มชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้จากโคโตซาน - เจลาติน โดยศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของโคโตซานที่ผลิตได้ ศึกษาการละลายโคโตซานในกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดแลคติก โพรพิโอนิก และ ซิตริก รวมถึงการนำสารละลายโคโตซานที่ได้ไปผลิตเป็นแผ่นฟิล์มโคโตซาน ทำการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และ ทางกลของแผ่นฟิล์มให้ได้มาตรฐานโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล และ ซอร์บิทอล เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มโคโตซานที่มีสมบัติดีขึ้น ผลการทดลองพบว่า โคโตซานที่ผลิตได้ในห้องปฏิบัติการ มีค่าความชื้นร้อยละ 6.85 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 6.34 ไขมันร้อยละ 0.1 เถ้าร้อยละ 0.25 ระดับการกำจัดหมู่อะซิตราย่อยร้อยละ 86.7 และค่าความหนืด 230 เซนติพอยส์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับโคโตซานที่ขายตามท้องตลาด ในการนำโคโตซานที่ผลิตได้นี้ไปทดลองเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพ ได้ทำการคัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติฟิล์ม เช่น ปริมาณโคโตซาน ชนิดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ ปริมาตรของสารละลายโคโตซานอัตราส่วนของ เจลาติน รวมถึงชนิดของพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม พบว่าฟิล์มขนาด 20×25 ซม.² ที่เตรียมจากสารละลายโคโตซานและเจลาติน ร้อยละ 1 ในกรดโพรพิโอนิกเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 150 มล. และมีส่วนผสมของกลีเซอรอล ร้อยละ 0.5 ให้สมบัติของแผ่นฟิล์มที่ดีที่สุด โดยมีสมบัติดังนี้ ค่าการต้านทานแรงดึง 70.385 นิวตัน/มม.² ค่าการยืดตัวเมื่อขาด 13.463 มม./มม. และการต้านทานแรงฉีกขาดเท่ากับ 617.7 มิลลินิวตัน

R. Sothonvit และ N. Pitak [18] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ที่มีผลต่อฟิล์มแป้งกล้วย โดยใช้ น้ำ 100 มิลลิลิตร แป้งกล้วยปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 4 6 และ 8% โดยน้ำหนัก กลีเซอรอล 30 และ 50 % โดยน้ำหนัก เพคติน 0 และ 1% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปเข้าตูบ ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าแป้งกล้วยมีลักษณะแข็งสีเหลือง แป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งกล้วย ส่วนฟิล์มแป้งที่มีส่วนผสมกลีเซอรอล 50% ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงสุด และยังพบว่าเมื่อกลีเซอรอลและ เพคตินมีปริมาณมากขึ้นทำให้การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในแป้งกล้วยลดลง นอกจากนี้วัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารแห้งยังสามารถย่อยสลายได้เองโดยการฝังดิน

M. L. Fishman และ คณะ [19] ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่รับประทานได้และย่อยสลายได้จากแป้งผสมเพคตินโดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในการทดลองผสมเพคตินและเม็ดแป้งที่มีอะไมโลสสูง และกลีเซอรอลในปริมาณต่าง ๆ โดยทำการขึ้นรูปเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลทางความร้อน ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) ซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำในระหว่างการอัดรีดซึ่งใช้ในการควบคุมการเกิดเจลลิตินในซของแป้งได้ และข้อมูลจากเทคนิค DMTA พบว่าปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอัดรีด ส่งผลถึงการเกิดเจลลิตินในซของแป้ง ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งผสมเพคติน และพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่า -50 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิห้องฟิล์มสามารถดึงยืดได้

C. Xiao และ คณะ [20] ศึกษาการผสมโคโตซานกับแป้งบุก (Konjac glucomannan) แล้วทำการหล่อฟิล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโคโตซาน พบว่า อัตราส่วนระหว่างโคโตซานต่อแป้ง 7:3 สามารถผสมเข้ากันได้ดีที่สุด และแผ่นฟิล์มที่ได้มีความใส รวมทั้งยังมีสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) สูงที่สุด เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีโนของโคโตซานกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งบุก และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งบุกแผ่นฟิล์มที่ได้ละลายน้ำได้ดีขึ้น

M. Hasagawa และ คณะ [21] ศึกษาสมบัติของฟิล์มระหว่างโคโตซานกับเซลลูโลส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซานความชื้นของแผ่นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 12 -19% โดยน้ำหนัก และ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมปริมาณความเป็นผลึกของแผ่นฟิล์มลดลง โดยโคโตซานขัดขวางการตกผลึกของเซลลูโลส อัตราส่วนที่ใช้โคโตซาน 30% ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากเซลลูโลสกับโคโตซาน มีความเป็นขั้ว จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน และโคโตซานทำให้ขนาดวฏภาคของเซลลูโลสลดลง และเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล นอกจากนี้ยังพบว่า ความร้อน ทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลลดลง โดยความร้อนทำลายแรงระหว่างโมเลกุล

Y. Lu และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลีเมอร์จากแป้งข้าวสาลีที่ผสมเส้นใยป่านรามิ โดยใช้ความยาว 538.5±125.3 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85.4±25.3 นาโนเมตร เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) โดยใช้ปริมาณ เส้นใยที่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 40 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยมากขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีบนเมทริกซ์ของแป้ง อีกทั้งเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น ทำให้คอมโพลีเมอร์มีการดูดซับความชื้นได้น้อยลง จึงกล่าวได้ว่า การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลีเมอร์โดยใช้เส้นใยป่านรามิ ทำให้โครงสร้างของคอมโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นโครงร่างสามมิติ และมีแรงกระทำระหว่างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับเมทริกซ์ของแป้ง

L. Dobircan และคณะ [23] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลีเมอร์จากแป้งข้าวสาลีที่มีโปรตีนสูง เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายความยาวระดับนาโนเมตรถึงมิลลิเมตร โดยทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ปริมาณเส้นใยฝ้ายที่ใช้ คือ 0 5 7.5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมก่อนทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเส้นใยมากขึ้นทำให้ค่าการดึงยืดได้น้อยลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ค่าการดึงยืดที่ได้ลดลง 78 % เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยฝ้าย และที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10 % โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ดี และมีการกระจายตัวที่ดี และส่งผลให้เกิดการกระจายแรงระหว่างเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์มีความสม่ำเสมอ และเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน (Flax) พบว่าแนวโน้มของสมบัติเชิงกลเป็นไปในแนวเดียวกันแต่ค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยืดสูงกว่าการใช้เส้นใยฝ้าย แต่ทำการขึ้นรูปโดยใช้สภาวะการอัดรีดที่อุณหภูมิและความดันต่างกัน และภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวที่ดีของเส้นใยบนเมทริกซ์ แต่เมื่อใส่เส้นใยที่มากเกินไป พบว่าเส้นใยเริ่มจับตัวกันเป็นก้อน เช่นจากการศึกษาที่ปริมาณการใช้เส้นใย 15 % โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของเส้นใยเริ่มไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยลงไปไม่ได้มีผลต่อความเป็นผลึกของคอมโพลีเมอร์ที่ได้ โดยลักษณะพิกคล้ายกับเทอร์โมพลาสติก

สตาร์ชที่ไม่ได้ผสมเส้นใย สำหรับสมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า การใส่เส้นใยไม่ส่งผลให้สมบัติทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. แปะงมันสำปะหลัง ตรายดาว จาก บริษัท เจ้าพระยาพีซีไร้ 2999 (กำแพงเพชร) จำกััด โดยมี องค์ประกอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแปะงมันสำปะหลังโดยทั้วไป

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

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
3. เพคตินชนิดผง จาก บริษัท รวมเคมี 1986 จำกััด โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเพคติน

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

4. เส้นใยฝ้าย มีองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของเส้นใยฝ้าย

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
ความยาว (L)	mm	2.00
เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	µm	1
L/D ratio	-	200/1

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (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 TGA (Thermogravimetric analyzer, TGA) : Perkin Elmer Instrument Co.,Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : LEO รุ่น 1455VP
8. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
9. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) : XRD รุ่น D 8 Advance
10. เกรียง
11. เวอร์เนียร์
12. ไมโครมิเตอร์

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล

- 3.3.1.1 ชั่งน้ำหนักแป้งและกลีเซอรอล ใส่ลงในภาชนะ ตามอัตราส่วน 70 : 30, 65 : 35 และ 60 : 40
- 3.3.1.2 นำทั้ง 3 สูตรข้างต้นมาเก็บในภาชนะปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง หลังจากนั้นนำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส [5] และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพของของผสมที่ได้
- 3.3.2.3 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำหรือความชื้นออกจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

- 3.3.2.4 ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช วางแผ่นใสบนแม่พิมพ์
- 3.3.2.5 ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงในแม่พิมพ์ และนำแม่พิมพ์ไปใส่เครื่องอัดขึ้นรูป และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยไม่มีการประกบแม่พิมพ์ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 °C (อุณหภูมิเดียวกันกับการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช) และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที
- 3.3.2.6 จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานทั้ง 3 สูตร คือ ที่อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอรอล 70 : 30 65 : 35 และ 60 : 40 และเลือกสูตรที่ดีที่สุด

ตอนที่ 2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

- 3.3.1.1 ชั่งน้ำหนักแป้งและกลีเซอรอล ในอัตราส่วน 65 : 35 คือ สูตรที่มีการขึ้นรูปเหมาะสมที่สุด
- 3.3.1.2 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง หลังจากนั้นนำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพของของผสมที่ได้

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง

- 3.3.3.1 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ไอน้ำหรือความชื้นออกจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- 3.3.3.2 ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช วางแผ่นใสบนแม่พิมพ์
- 3.3.3.3 ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงในแม่พิมพ์ และนำแม่พิมพ์ไปใส่เครื่องอัดขึ้นรูป และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยไม่มีการประกบแม่พิมพ์ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 °C และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที
- 3.3.3.4 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปทดสอบด้วยวิธีต่างๆ

ตอนที่ 4 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

- 3.3.4.1 ปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ที่เตรียมได้ในตอนที่ 2 มาปรับปรุงด้วยผงเพคติน 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก และนำสูตรที่ดีที่สุดมาปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก
- 3.3.4.2 จากนั้นเก็บไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 1 คืน และนำของผสมที่เตรียมได้มาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 3.3.4.3 ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงในแม่พิมพ์ และนำแม่พิมพ์ไปใส่เครื่องอัดขึ้นรูป และให้ความ

ร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยไม่มีการประกบแม่พิมพ์ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิ 140 °C และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที

3.3.4.4 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปทดสอบต่อไป

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy) โดยนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

3.4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) [24]

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่ความหนา 200 μ m และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 3-33° ด้วยอัตราเร็ว 1°/นาทีแล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชิ้นตัวอย่าง

3.4.3 การวัดสี (Color measurement) [24]

ทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แล้วเปรียบเทียบกับแถบมาตรฐานโดยวัดทั้งสิ้น 10 จุด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนด์หรือซีนอน D 65/10° โดย

L*	:	ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)
		L = 0 = perfect black sample
		L = 100 = perfect white sample
a*	:	ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (red-green)
		a เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีแดง
		a เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว
b*	:	ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellow-blue)
		b เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง
		b เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน
C*	:	ความสดใสของสี
สามารถคำนวณได้จาก		$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$
h°	:	เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา
สามารถคำนวณได้จาก		$h^\circ = \tan^{-1} [b^*/ a^*]$

3.4.4 ปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

ทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการอัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 104 [25] นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปเก็บในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และน้ำกลั่น (Distilled water) ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยนำชิ้นงานชิ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 วัน ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซนต์ความชื้น
 W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ
 W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

3.4.5 การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (Cryogenic fracture) เตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาการกระจายตัวของเฟคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้ายในเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ

3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.4 [26]

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เตรียมได้

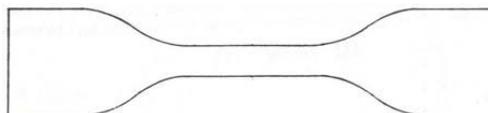
สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด (Elongation)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Strain at break)	ASTM D 638	%

3.4.6.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.1)จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 40 mm
Load cell : 100 N



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบจากเครื่อง Compression molding [26]

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) และ เปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% weight loss at onset degradation temperature) ของตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศของไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิในช่วง 50-700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้ว จึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

3.4.8 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [27]

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 2 มม. ขนาด 20×50 มม.² ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยการฝังดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิในการย่อยสลาย 32 ± 2 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 15-20% และเก็บตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง จากนั้นดูการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องดิจิทัลและกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซออร์ และปรับปรุงด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย ในปริมาณต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายด้วยการฝังดิน จากการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน และเส้นใยฝ้ายได้ผลดังนี้

4.1 การศึกษาการเตรียมและการขึ้นรูป

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล ให้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด

อัตราส่วนระหว่างแป้ง:กลีเซอรอล	ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกดอัด
70 : 30	ชิ้นงานไม่เต็มแม่แบบ ลักษณะสีขาวขุ่น เนื่องจากใส่แป้งในปริมาณมากเกินไป ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีความหนืดสูง ส่งผลให้ไหลไม่เต็มแม่แบบ
65 : 35	ชิ้นงานเต็มแม่แบบ ลักษณะสีขาวขุ่น
60 : 40	ชิ้นงานเต็มแม่แบบ ลักษณะสีขาวขุ่น

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล ทั้ง 65 : 35 และ 60 : 40 ให้ลักษณะของชิ้นงานที่เต็มแม่แบบเหมือนกัน และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง แต่เราเลือกอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลที่ 65 : 35 เนื่องจากอัตราส่วน 65 : 35 ใช้ กลีเซอรอลในปริมาณที่น้อยกว่า ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่มากกว่าอัตราส่วน 60 : 40 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอลที่ 65 : 35 มาทำการปรับปรุงด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้ายต่อไป

4.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

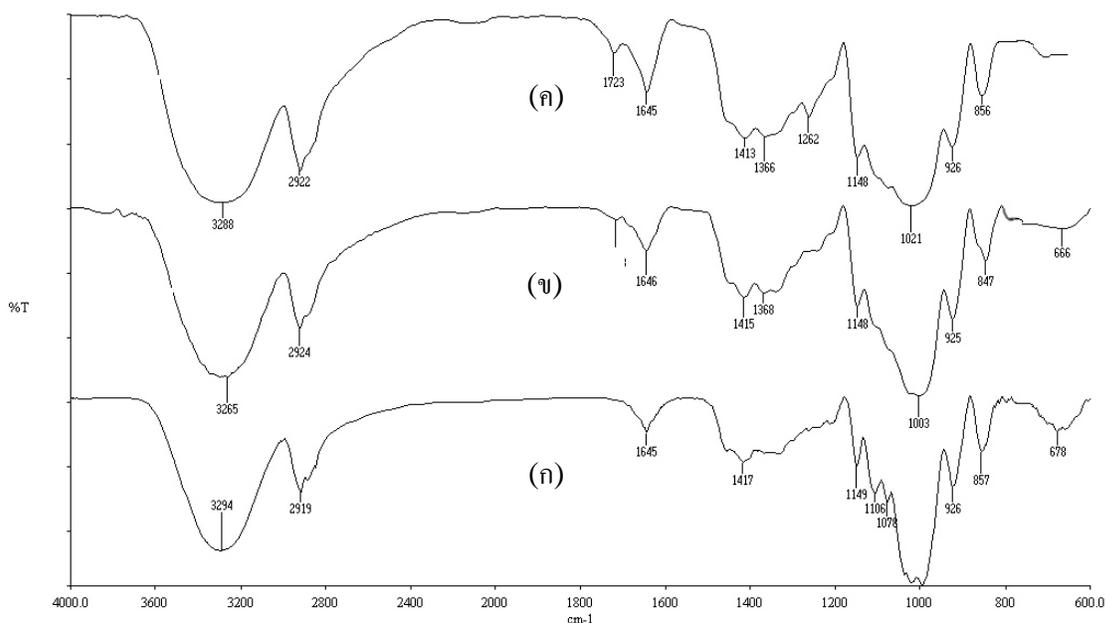
การศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซออร์ ด้วยเพคตินปริมาณ 6% และ 10% โดยน้ำหนัก และเทอร์โมพลาสติกที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก และปรับปรุงด้วยเพคติน 10% รวมกับเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1 Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

จากการศึกษา Fourier-Transform Infrared Spectroscopy ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาผลของการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย พิคปรากฏมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์แต่ละตัวอย่าง [28-29]

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200-3600 (v)	O-H stretching
2800-3000 (m s)	Alkanes C-H stretching
1640	Bounded water
1445-1485 (m)	O-H-bending
1410 (s)	C-H wagging (in-plane bending)
1300-1000 (s)	C-O stretching
1200-1000 (s)	C-H bending
900-940 (s)	C-H out-of-plane bending
800-860 (s)	C-H out-of-plane bending
735-770 (s)	C-H out-of-plane bending
723 (s)	C-H ของ CH_2 - rocking

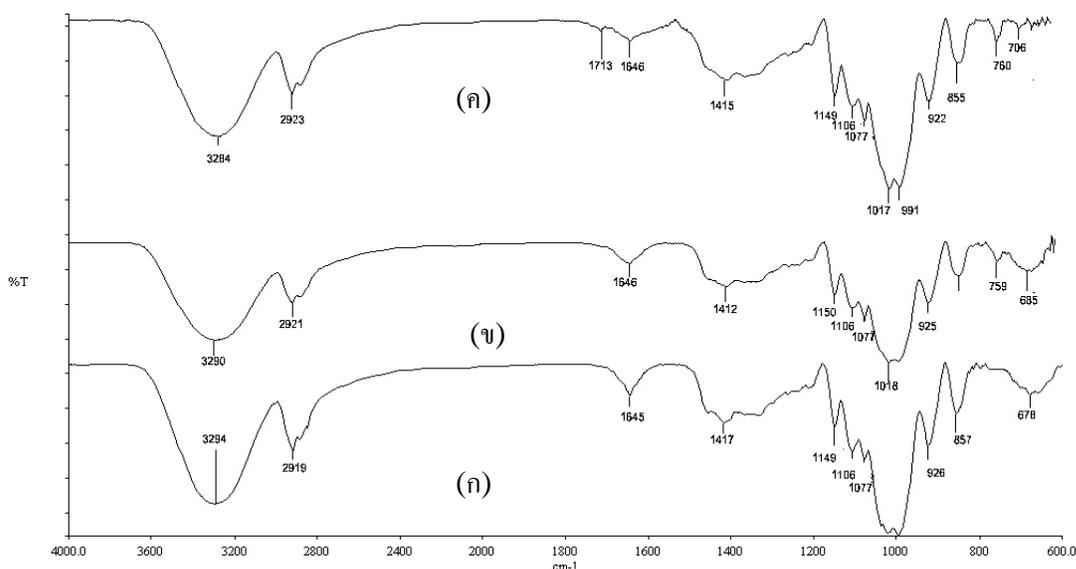


รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินในปริมาณต่างๆ (ก) TPS (ข) TPSP6 และ (ค) TPSP10

รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งมันสำปะหลัง ที่ปริมาณ เพคติน ต่างๆ พบว่าอินฟราเรดทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสตามลักษณะดังนี้ แถบพีคที่ความยาวคลื่น $3200\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล แถบพีค

ในช่วง $2800-2900\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 ของแป้งแกมพิค 1650 cm^{-1} ซึ่งสามารถอธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลน้ำแล้วเกิด Dehydration เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรดชัน ซึ่งการ Hydrated ของ OH group ในแป้ง พิคช่วง 1400 cm^{-1} เป็นพิคของ O-H bending พิคช่วง $1300-1100\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะการสั่นแบบ C-O stretching ของแป้ง และแกมพิคช่วง $1200-1100\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะการสั่นแบบ C-H bending พิคช่วง $800-850\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะการสั่นแบบ C-H bending [28-29]

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน พบว่าการเติมเพคตินลงไป ทำให้พิคที่ตำแหน่ง $3200-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawlak and M.Mucha [30] และ K.Aoi et al [31] โดยรายงานวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FT-IR โดยที่เมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้ จะทำให้เกิดอันตรกิริยาเคมีขึ้นระหว่างองค์ประกอบ (พันธะไฮโดรเจน) ที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ นอกจากนี้มีพิคใหม่เกิดขึ้น คือ ที่ประมาณ 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching ซึ่งมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เพคตินที่เพิ่มขึ้น (6% และ 10% โดยน้ำหนัก) ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ในโครงสร้างของเพคติน [32]



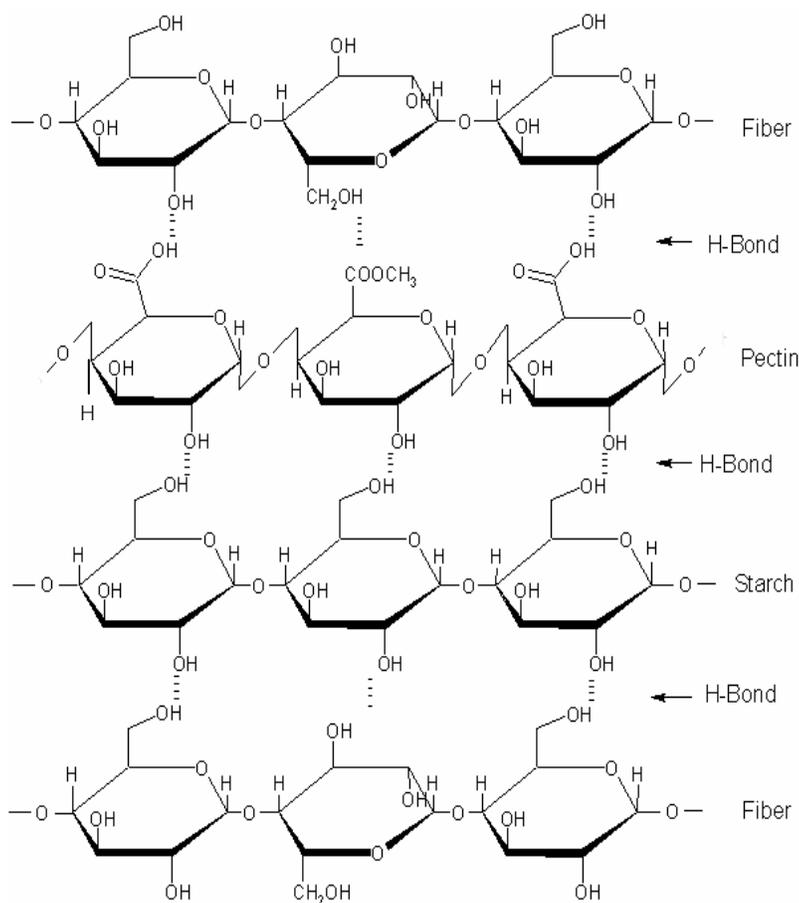
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ (ก) TPS (ข) TPSF5 และ (ค) TPSP10F5

เมื่อเติมเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจะพบพิคที่มีลักษณะคล้ายกับพิคของแป้ง เนื่องจากแป้งและเส้นใยฝ้าย ลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน

สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย รูปที่ 4.2 (ข) จากสเปกตรัมของเส้นใยฝ้ายพบพิคที่ 759 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH_2 - rocking นอกจากนี้ยังพบว่าพิค $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงการสั่นของ O-H stretching มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ ระหว่างองค์ประกอบที่

1 และองค์ประกอบที่ 2 ทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ [30-31]

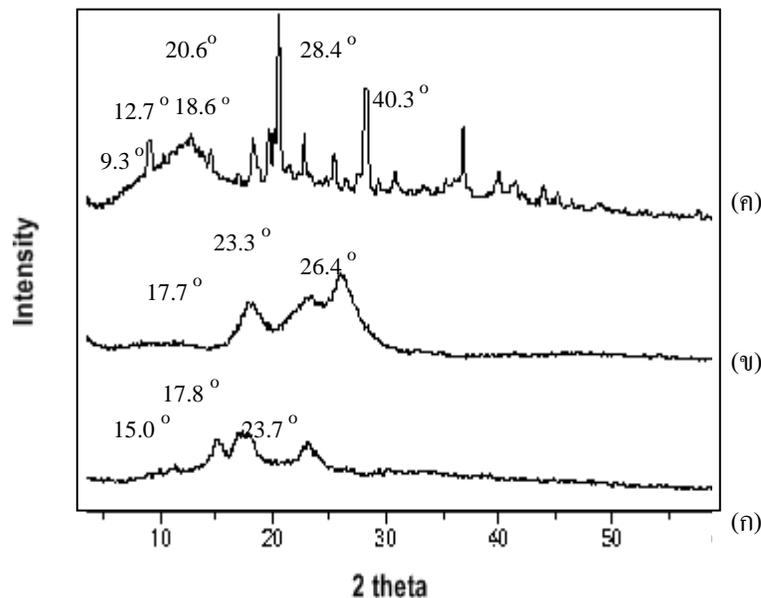
สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย รูปที่ 4.2 (ค) พบพีคที่ 1713 cm^{-1} ซึ่งเป็นเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching ซึ่งแสดงอยู่ในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COOH) ของเพคติน และพบพีคที่ 760 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH_2 -rocking ของเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้ยังพบว่าพีค $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงการสั่นของ O-H stretching มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลัง เพคติน และเส้นใยฝ้าย ถึงอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลัง เพคตินและเส้นใยฝ้ายแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลัง เพคตินและเส้นใยฝ้าย

4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงแบบผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) โดยขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ 2θ ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว $1^\circ/\text{นาที}$ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
(ก) แป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ (ข) เส้นใยฝ้าย และ (ค) เพคติน

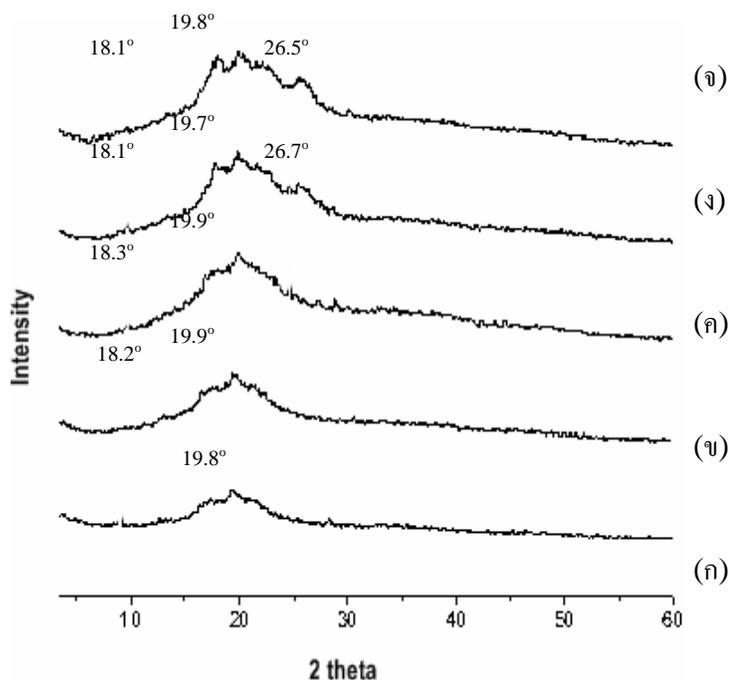
จากรูป 4.4 (ก) แสดง X-ray diffraction patterns ของแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ ให้พิกที่มุม 2θ เท่ากับ 15.0° , 17.8° และ 23.7° ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B-type [32] (ข) แสดง X-ray diffraction patterns ของเส้นใยฝ้ายพบพิกที่มุม 2θ เท่ากับ 17.7° , 23.3° และ 26.4° โครงสร้างแบบ Cellulose I [33] (ค) แสดง X-ray diffraction patterns ของเพคตินพบพิกที่มุม 2θ เท่ากับ 9.3° , 12.7° , 18.6° , 20.6° , 28.4° และ 40.3° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ β -Helix [34-35]

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป และปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย พบว่าโครงสร้างของแป้งหายไป เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีความเป็นผลึกลดลง (V_H -type) [36] แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ให้พิกของผลึกที่มุม 2θ เท่ากับ 19.8°

รูปที่ 4.5 (ข) (ค) และ (จ) แสดง X-ray diffraction patterns ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน จะเห็นว่าความเข้มของพิกที่มุม 2θ เท่ากับ 18.2° และ 19.9° มีความเข้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเพคตินมีพิกเด่นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.6° และ 20.6° เมื่อปริมาณเพคตินเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการซ้อนทับกันระหว่างแป้งและเพคติน ทำให้ความเข้มของพิกที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกที่ปรับปรุงด้วยเพคติน มีแนวโน้มความเป็นผลึกมากกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคติน

รูปที่ 4.5 (ง) และ (จ) แสดง X-ray diffraction patterns ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ให้พิกของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ คือ ที่มุม 2θ เท่ากับ 26.5° ซึ่งเกิดจากการเติมเส้นใยฝ้าย และพิกที่มุม 2θ เท่ากับ 18.1° และ 19.8° มีแนวโน้มความเข้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ

เปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ซึ่งแสดงแนวโน้มความเป็นผลึกที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟรกโตแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย (ก) TPS (ข) TPSP6 (ค) TPSP10 (ง) TPSF5 และ (จ) TPSP10F5

4.2.3 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ H° ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
TPS	44.2	-1.0	3.5	3.7	74.2
TPSP6	25.3	2.7	16.5	16.7	73.4
TPSP10	20.4	5.8	16.6	17.6	70.5
TPSF5	64.9	1.9	9.6	9.8	78.6
TPSP10F5	38.3	9.6	18.0	25.0	67.3

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง ค่า a^* กำหนดสีเหลืองหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน ค่า C^* แสดงค่าความสดใสของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

ค่าความสว่าง (L^*)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า TPSF5 มีค่าความสว่างมากที่สุด รองมาได้แก่ TPS, TPSP10F5, TPSP6 และ TPSP10 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน พบว่าเมื่อมีการเติมเพคติน ทำให้ค่าความสว่างของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเติมเพคตินมีสีเข้มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน (6 และ 10%โดยน้ำหนัก) พบว่าสีของชิ้นงานตัวอย่างมีแนวโน้มเข้มขึ้น ตามปริมาณเพคตินที่เพิ่มขึ้น

ค่า a^*

TPSP10F5 มีสีออกแดงมากที่สุด รองมาได้แก่ TPSP10, TPSP6 ส่วน TPSF5 มีสีออกไปทางเขียว และ TPS แสดงสีเขียวมากที่สุด และ เมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน (6 และ 10 %โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานมีสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเพคตินมากขึ้น

ค่า b^*

TPSP10F5 มีสีออกเหลืองมากที่สุด รองมา คือ TPSP10, TPSP6, TPSF5 และ TPS เมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน (6 และ 10%โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเพคตินมากขึ้น

ค่า C^*

TPSP10F5 รองลงมา TPSP10, TPSP6 ซึ่งมีสีใกล้เคียงกัน ส่วน TPSF5 และ TPS มีค่าความสดใสน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน (6 และ 10%โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างมีความสดใสของสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเพคตินมากขึ้น

ค่า H°

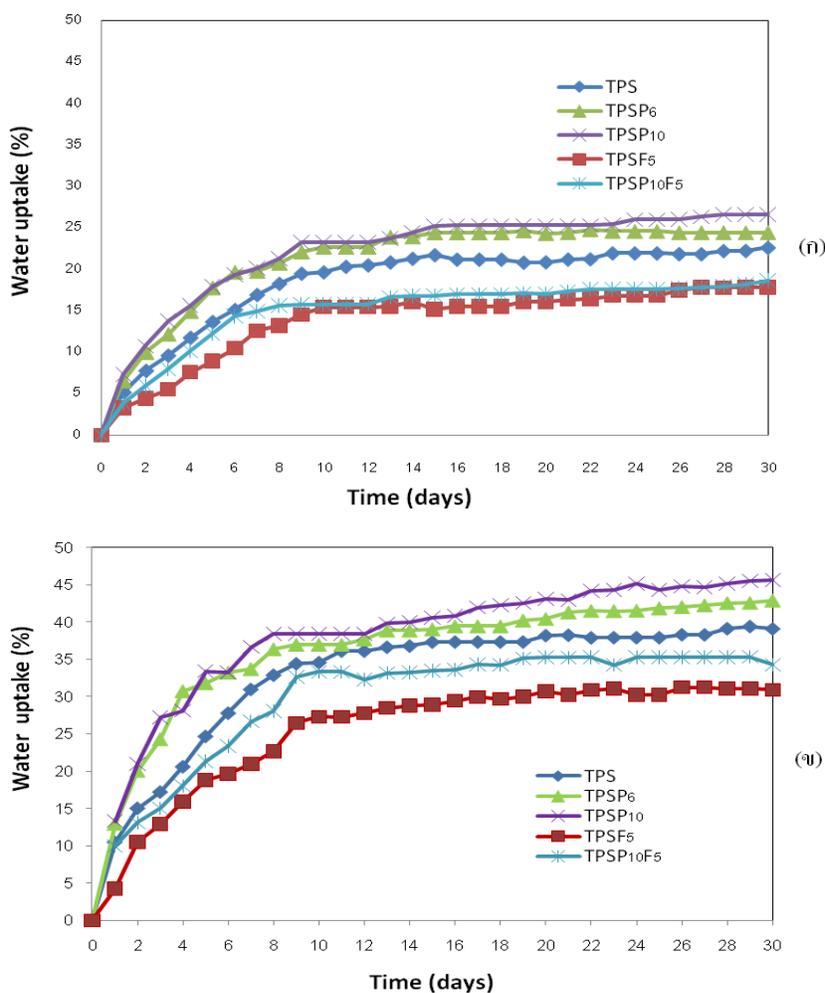
ค่าตำแหน่งของสี (H°) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเพคตินเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน (6 และ 10 %โดยน้ำหนัก) พบว่า TPSP10F5 ให้ค่า H° สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชิ้นงานตัวอย่างของมีสีออกไปทางสีน้ำตาล เนื่องจากผงของเพคตินก่อนนำมาขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีสีน้ำตาล จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีสีออกไปทางสีน้ำตาล

4.2.4 การดูความชื้น

ศึกษาการดูความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงด้วยเพคติน และเส้นใยฝ้าย TPS, TPSP6, TPSP10, TPSF5 และ TPSP10F5 ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% แสดงดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 แสดงการดูความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0 6 และ 10% โดยน้ำหนักและ เส้นใยฝ้ายปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 100% ตามลำดับ ภายในระยะเวลา 30 วัน พบว่าในช่วง 10 วันแรกชิ้นงาน มีการดูความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเวลาผ่านไปการดูความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งอิ่มตัว โดยเปอร์เซ็นต์การดูความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ TPS, TPSP6, TPSP10, TPSF5 และ TPSP10F5 เท่ากับ

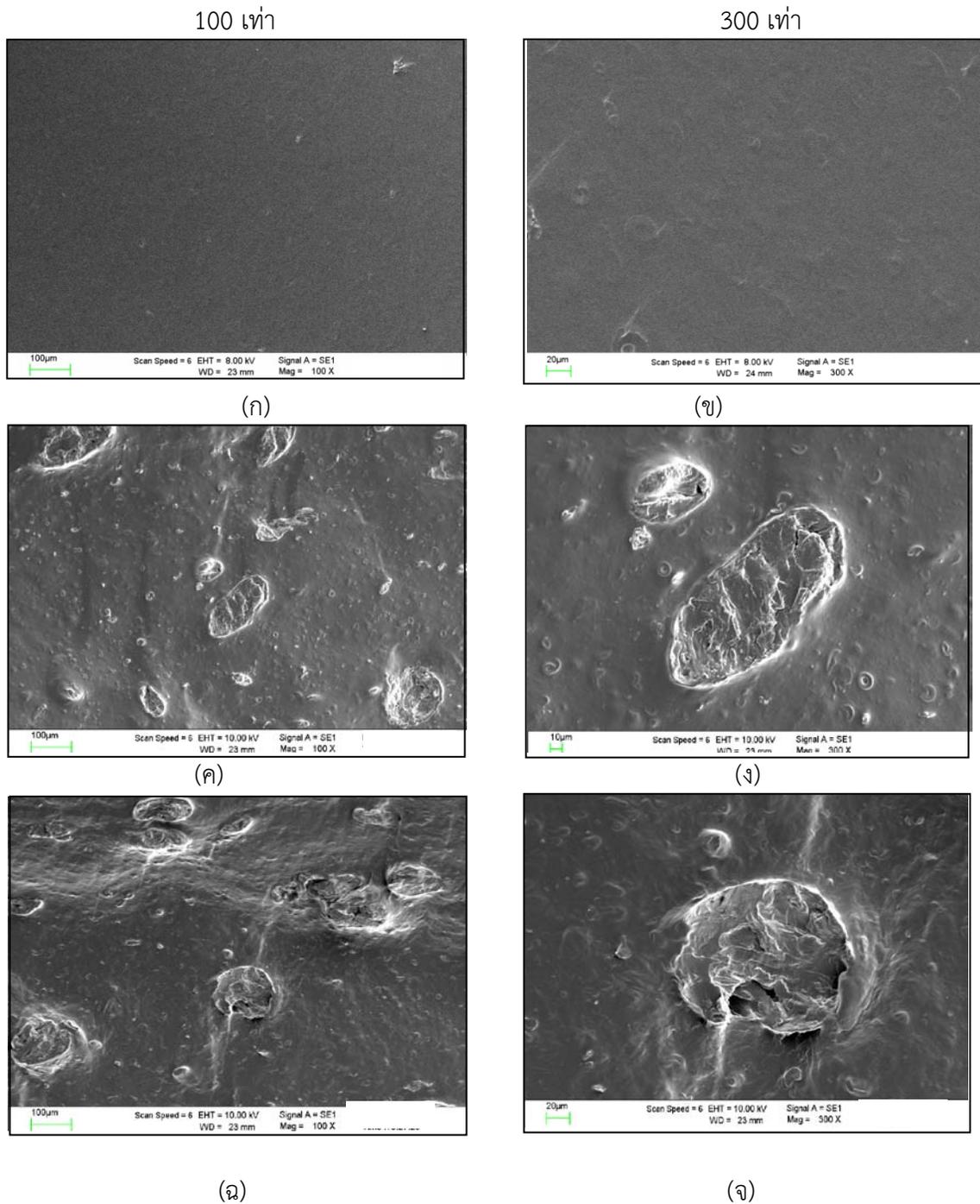
22.6, 24.4, 26.6, 16.9 และ 18.6% ตามลำดับ และ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นเท่ากับ 39.1, 42.9, 45.6, 30.1 และ 34.3% ตามลำดับ ซึ่ง TPSP5 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นน้อยที่สุดเนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงส่งผลให้เส้นใยฝ้ายดูดความชื้นได้น้อยกว่าแป้งและจากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ M.Gaspar et al. [37] นอกจากนั้นเส้นใยฝ้ายยังประกอบด้วยเซลลูโลสเรียงตัวขนานกัน และอัดแน่นกันเป็นชั้นๆ ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นน้อยกว่าแป้ง สำหรับเพคตินที่มีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกันกับแป้ง จึงส่งผลให้ TPSP10 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมากที่สุด เนื่องจากเพคตินมีหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล (COOH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีความเป็นขั้ว ทำให้มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ นอกจากนี้เพคตินยังสามารถเกิดลักษณะที่เป็นเจลทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ [37]



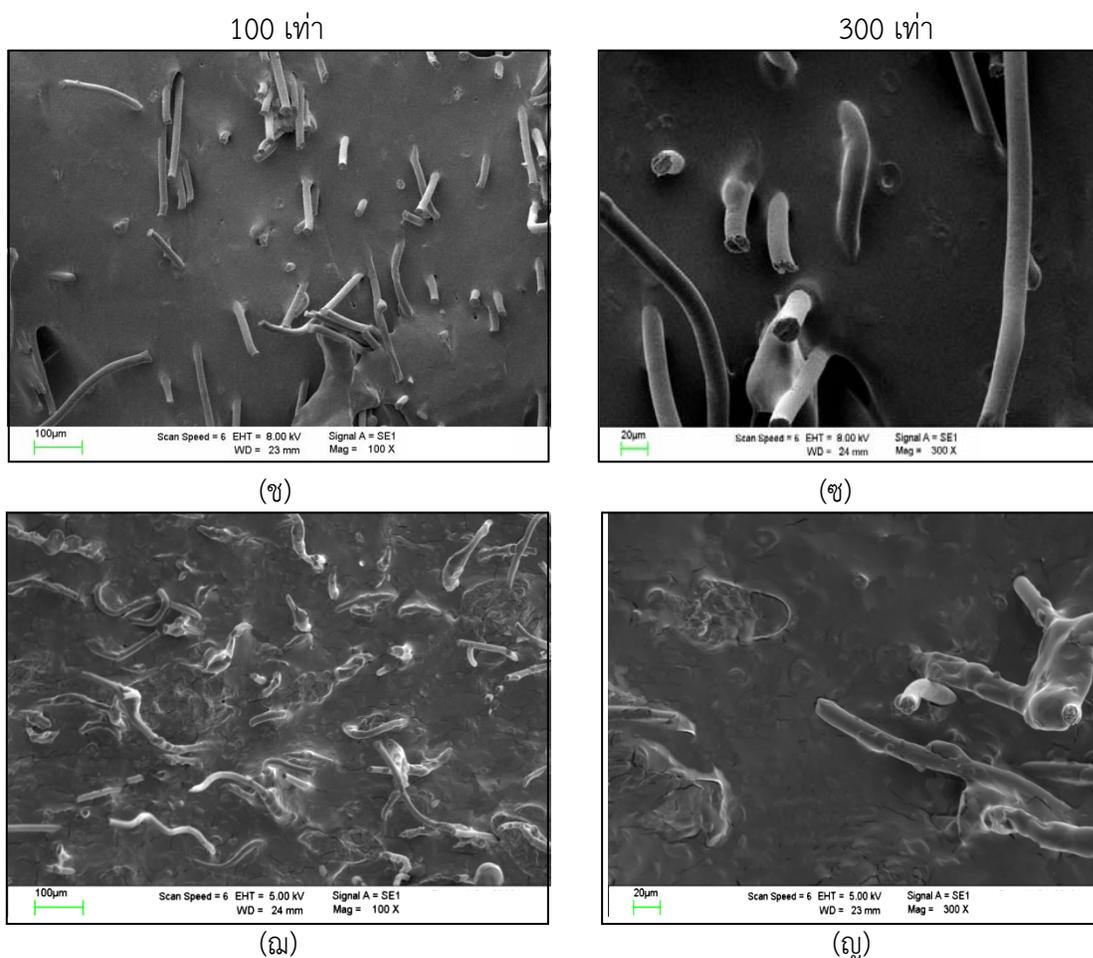
รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (ก) 50% และ (ข) 100%

4.2.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า (ก)-(ข) TPS (ค)-(ง) TPSP6 และ (จ)-(ฉ) TPSP10 (ช)-(ซ) TPSP5 และ (ณ)-(ญ) TPSP10F5



รูปที่ 4.7 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ข) แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 0% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 4.7 (ค)-(ง) และ (จ)-(ฉ) แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 6% และ 10% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 6% และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าเพคตินไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับ TPS แต่เพคตินมีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ TPS เนื่องจาก TPS และเพคตินมีโครงสร้างที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลเหมือนกัน ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นขั้วเหมือนกัน ทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่าง TPS และเพคติน โดยไม่พบช่องว่างระหว่างวัฏภาคของ TPS และเพคติน

รูปที่ 4.7 (ซ)-(ช) แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 0% และเส้นใยฝ้ายที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าเส้นใยฝ้ายไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทริกซ์ของ TPS แต่มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของ TPS และยังพบว่ามี TPS เกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยฝ้าย (Surface wetting) ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของ TPS และเส้นใยฝ้าย เนื่องจาก TPS และเส้นใยฝ้าย มีโครงสร้างที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.7 (ณ)-(ญ) แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วย เพคติน 10% และเส้นใยฝ้ายที่ 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่า TPS เพคตินและเส้นใยฝ้าย ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เพคตินและเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีใน TPS และจากการที่ TPS เพคตินและเส้นใยฝ้ายมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน ทำให้ TPS บางส่วนเกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายและเพคติน ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวิภาคของ TPS เพคติน และเส้นใยฝ้าย

4.2.6 สมบัติเชิงกล

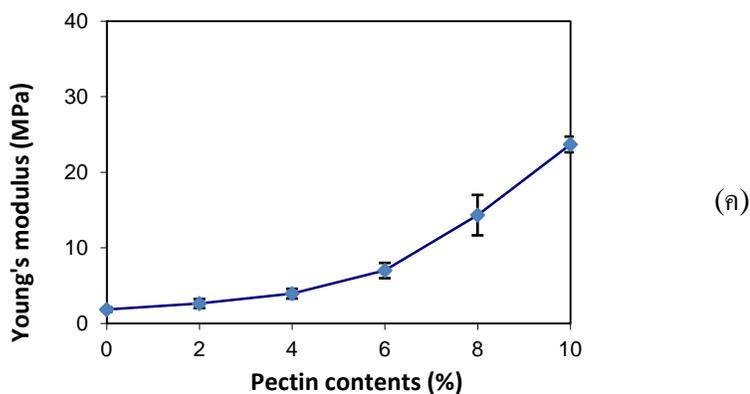
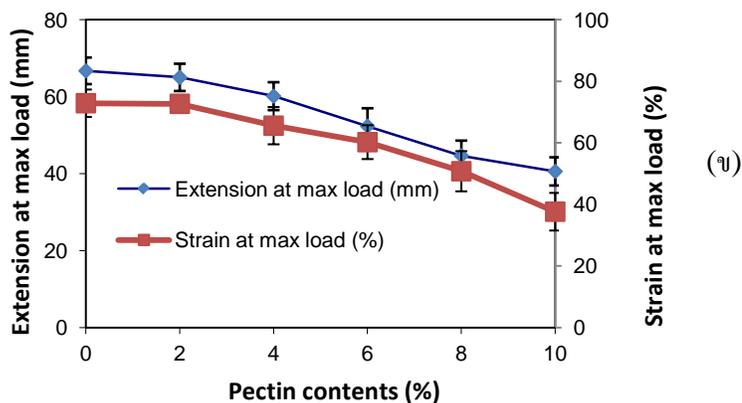
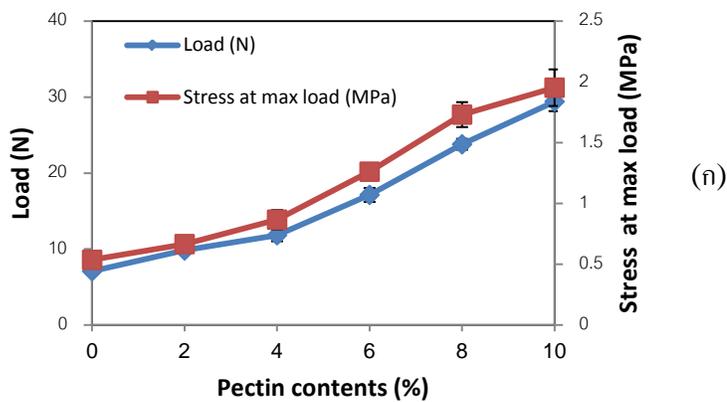
การศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอล 65 : 35 และปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสูตรที่ไม่ได้ปรับปรุงและสูตรที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดมาใส่เส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

4.2.6.1 สมบัติเชิงกลเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการปรับปรุงด้วยเพคติน

ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณเพคติน 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.8 (ก) และ (ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเพคตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเพคติน และ TPS สามารถเข้ากันได้ดี และไม่มีช่องว่างระหว่างวิภาค และโครงสร้างโมเลกุลของ TPS และ เพคติน มีความเป็นขั้วเหมือนกัน คือ TPS มีหมู่ไฮดรอกซิล และเพคตินมีหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ FT-IR (รูปที่ 4.1) พบว่าตำแหน่งของการสั่นแบบ O-H stretching มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง และจากผลของ XRD (รูปที่ 4.4) พบว่าจากการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน ส่งผลให้ความเข้มของพีคมีค่าสูงขึ้น แสดงถึงความเป็นผลึกที่เพิ่มมากขึ้น และยังสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.7) พบว่าอนุภาคของเพคตินกระจายตัวแทรกอยู่ในวิภาคของ TPS จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยสูตรที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% โดยน้ำหนัก มีสมบัติที่ดีที่สุด

รูปที่ 4.8 (ข) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0%, 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยน้ำหนัก ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณ เพคตินเพิ่มขึ้น ค่าการดึงยืด และเปอร์เซ็นต์ความเครียดลดลง เนื่องจากเพคติน และ TPS สามารถเข้ากันได้ดี มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งมากขึ้น และมีความยืดหยุ่นของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปรับปรุงด้วยเพคติน
(ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เฟอร์เซนต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส

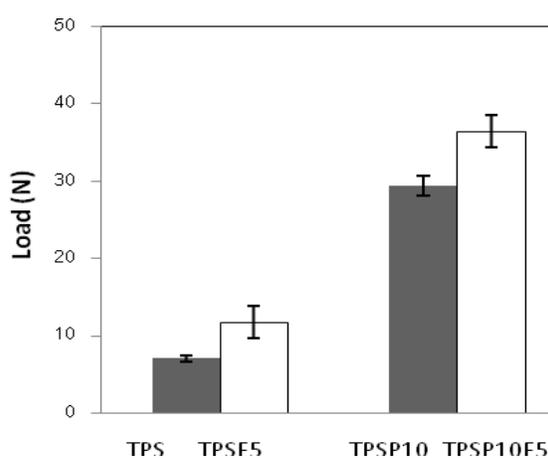
4.2.6.2 สมบัติเชิงกลเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.9 (ก) (ข) และ (จ) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย โดยนำสูตรที่สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ สูตรที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% โดยน้ำหนัก มาใส่เส้นใยฝ้ายปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติ จากผลการทดลองพบว่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไปมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง จึงทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อีกทั้งแบ่งมันสำปะหลังและเส้นใยฝ้ายยังมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย สามารถรับแรงได้มากขึ้น

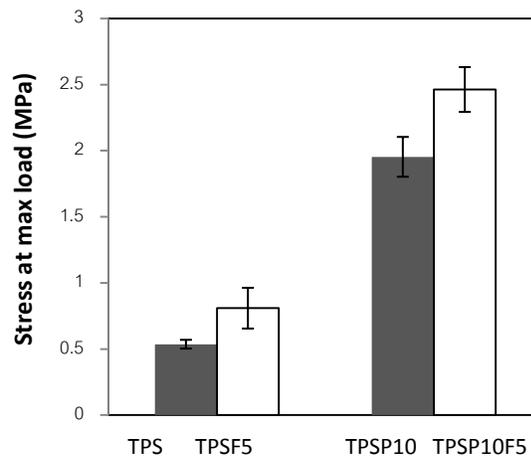
จากรูปที่ 4.9 (ค) และ (ง) แสดงค่าการดึงยืด และ เปอร์เซนต์ความเครียด ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการดึงยืด และเปอร์เซนต์ความเครียด มีค่าลดลงเมื่อใส่เส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความยืดหยุ่นลดลง

นอกจากนี้ผลของสมบัติเชิงกลยังสอดคล้องกับผล FT-IR (รูปที่ 4.2) ซึ่งมีลักษณะ Shift ของหมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งกับเส้นใยฝ้าย จึงทำให้แรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัส มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายสามารถเข้ากับแป้งได้ดี เพราะในโครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นขั้วเหมือนกัน และมีความสัมพันธ์กับสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.7) คือ เส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของ TPS จากนั้นยังพบว่า มี TPS เกาะอยู่บนผิวของเส้นใยฝ้ายและเพคติน และยังพบว่าเส้นใยฝ้ายฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ TPS ซึ่งแสดงถึงการเข้ากันได้ระหว่าง TPS เพคตินและเส้นใยฝ้าย

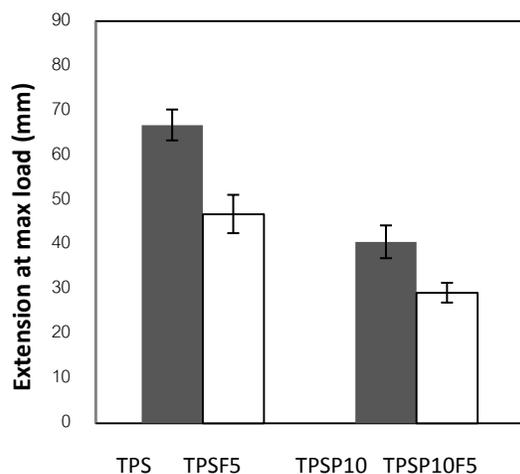
จึงสรุปได้ว่าสูตรที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% และเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก คือ สูตรที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด มีแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส เพิ่มขึ้น 413%, 364% และ 1735% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย



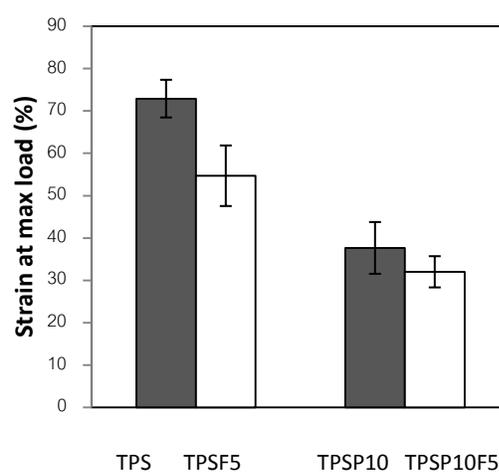
(ก)



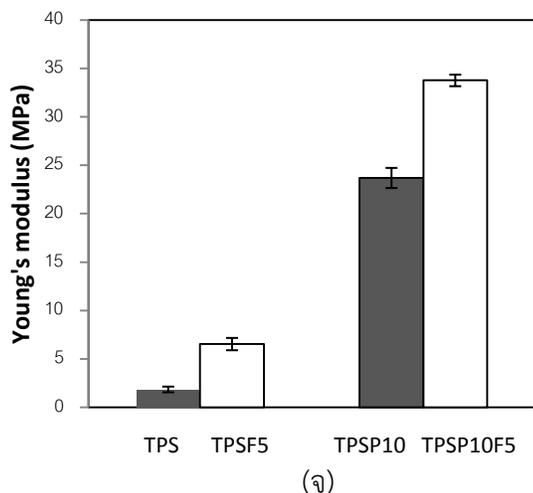
(ข)



(ค)



(ง)

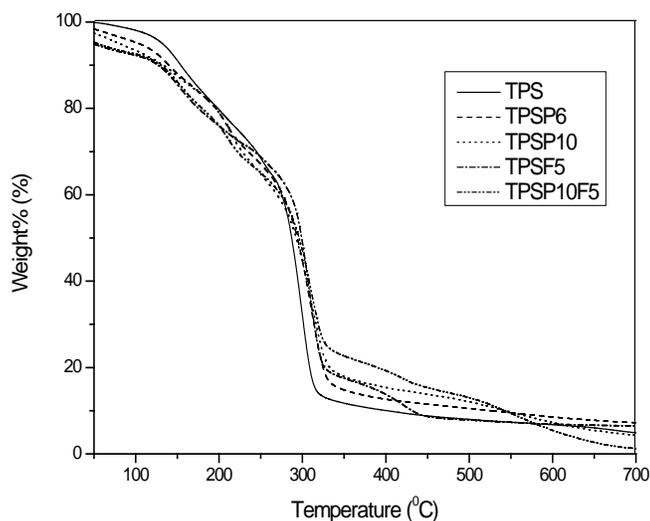


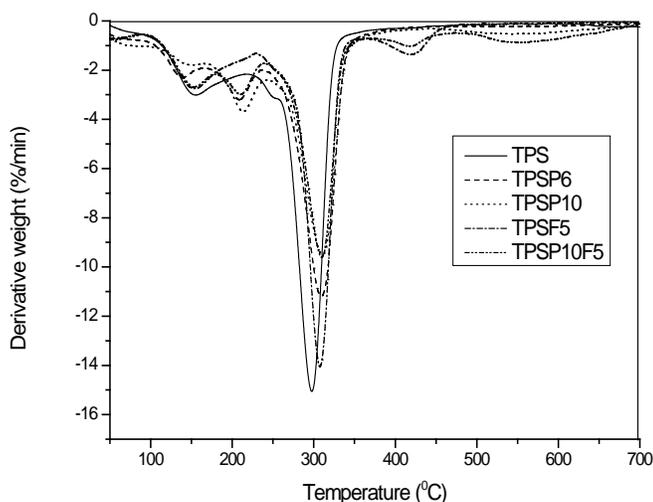
รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย

4.2.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

การศึกษาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวทางความร้อน (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก (%Weight loss) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0 6 และ 10 %โดยน้ำหนัก และเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.4

จากรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.4 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 2 ช่วง กล่าวคือ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิประมาณ 119.7 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอล [38-39] และ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 278.7 °C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง [23, 39] จากการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0 %, 6% และ 10%โดยน้ำหนักโดยน้ำหนัก ซึ่งเพคตินมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ 191.7 °C และที่ปริมาณเพคติน 6 % และ 10%โดยน้ำหนัก พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งอยู่ที่ 284.0 °C และ 282.5 °C ตามลำดับ





รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วย เพคตินและเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ

ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย พบว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวมี 4 ช่วง ซึ่งช่วงสุดท้ายเป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ 381.6 - 391.4 °C [40] จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของแป้งอยู่ในช่วง 44.9 - 70.6% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเพคตินและเส้นใยฝ้ายทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลดลง จึงอธิบายได้ว่าการเติมเพคตินและเส้นใยฝ้าย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย

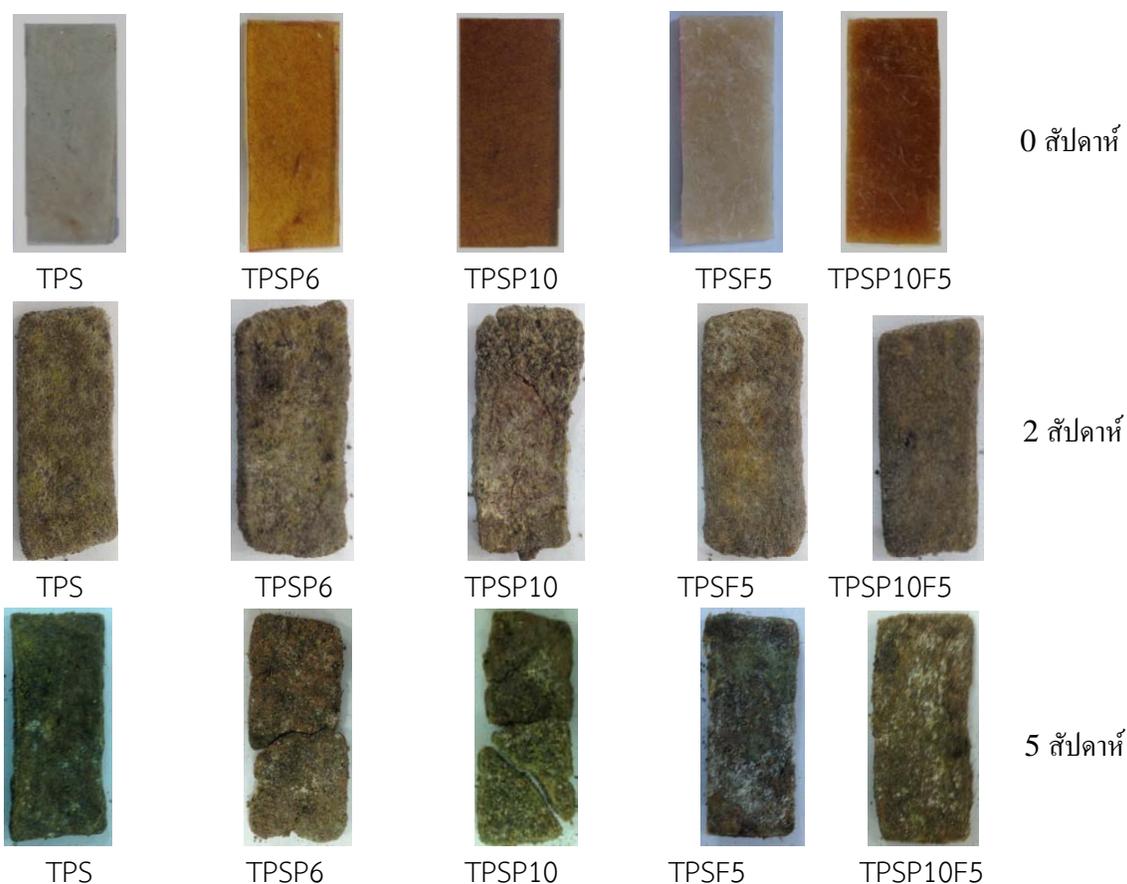
ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)				น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (เพคติน)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)	ช่วงที่ 4 (เส้นใยฝ้าย)	
TPS	119.7	-	278.7	-	70.6
TPSP6	131.5	202.4	284.0	-	59.8
TPSP10	142.4	203.6	282.5	-	62.6
TPSF5	143.3	-	286.9	391.4	54.5
TPSP10F5	139.1	202.3	281.0	381.6	44.9

4.2.8 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

สมบัติการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทดสอบโดยการฝังดิน เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 5 สัปดาห์

4.2.8.1 การศึกษาการย่อยสลายจากกล้องดิจิทัล

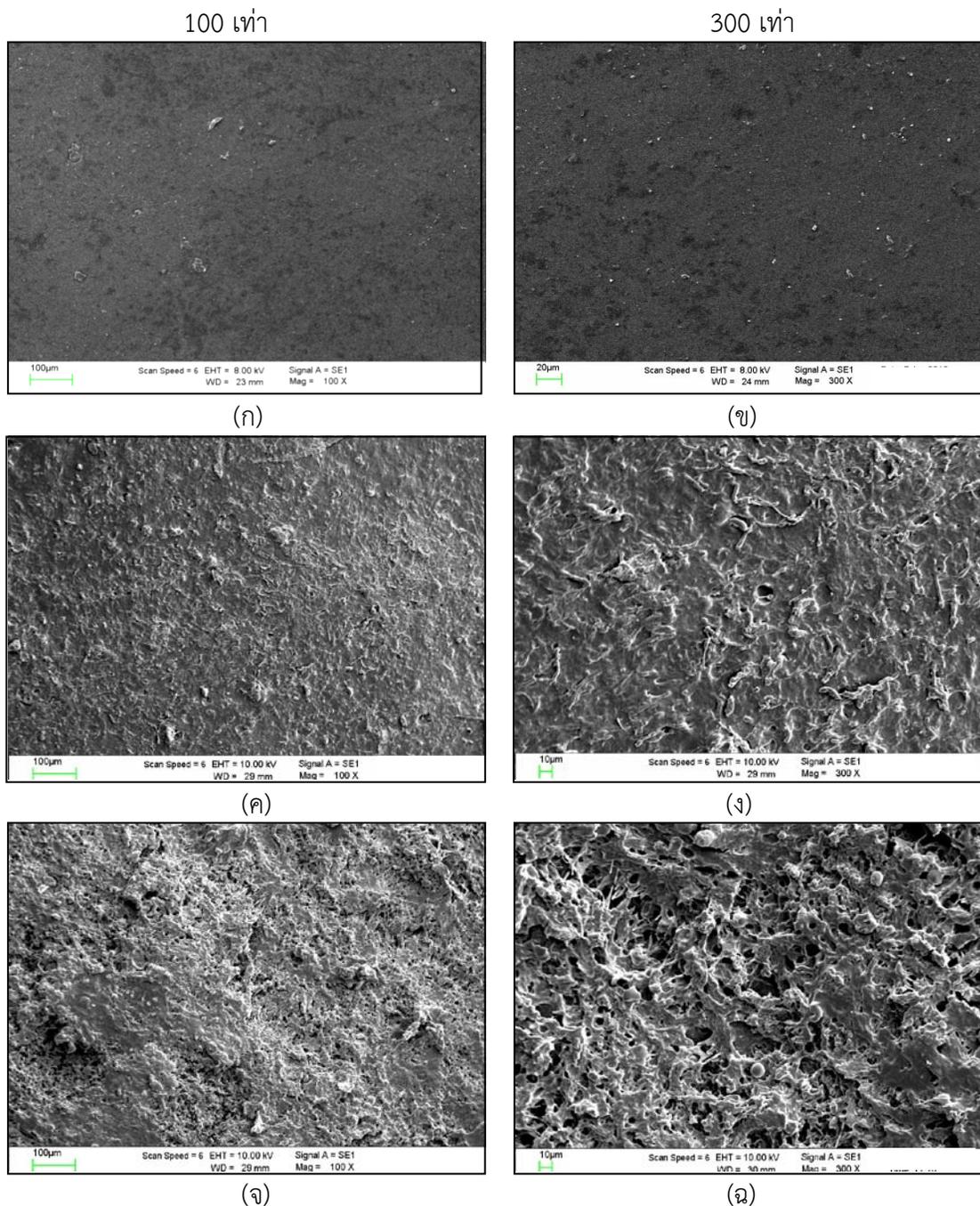
การศึกษาลักษณะการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย จากรูปที่ 4.11 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก และเพคติน 10% + เส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกันเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินซึ่งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีเชื้อราเกิดขึ้นบริเวณทั่วชิ้นงาน และเกิดการแตกหักย่อยสลายของชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป จากนั้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% โดยน้ำหนัก เกิดการย่อยสลายได้มากที่สุด เพราะเพคตินมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน จึงทำให้สามารถดูดความชื้นได้มากกว่าสูตรที่ไม่ได้ปรับปรุงและเกิดการย่อยสลายได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการดูดความชื้น (หัวข้อที่ 4.2.4) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายมีการย่อยสลายช้าที่สุด เนื่องจากเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลสจัดเรียงตัวขนานกัน และอัดแน่นกันเป็นชั้นๆ ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นน้อยกว่าแป้ง



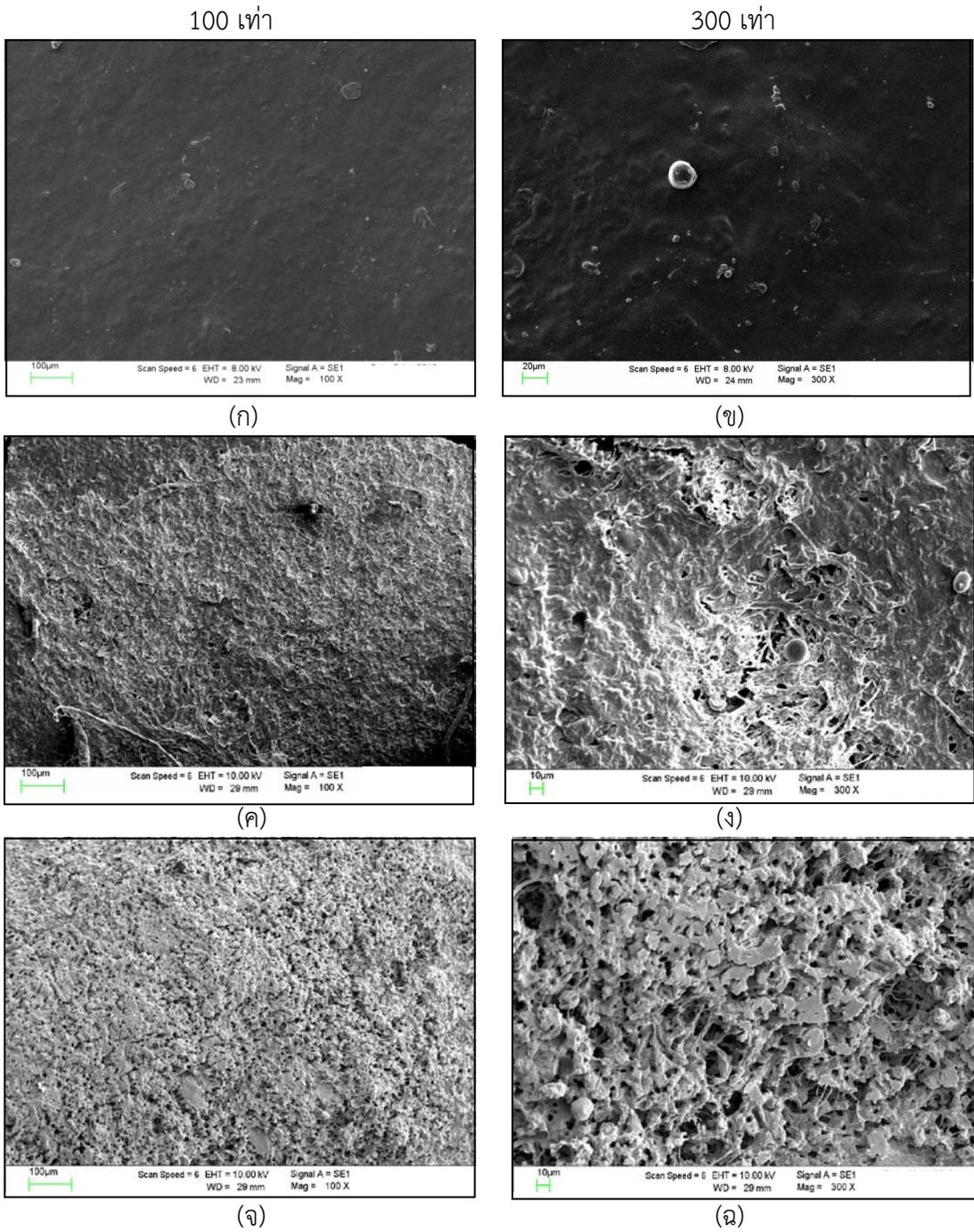
รูปที่ 4.11 ภาพการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากกล้องดิจิทัล

4.2.8.2 การศึกษาการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากล่องจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เพื่อศึกษาลักษณะการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย โดยใช้ล่องจูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

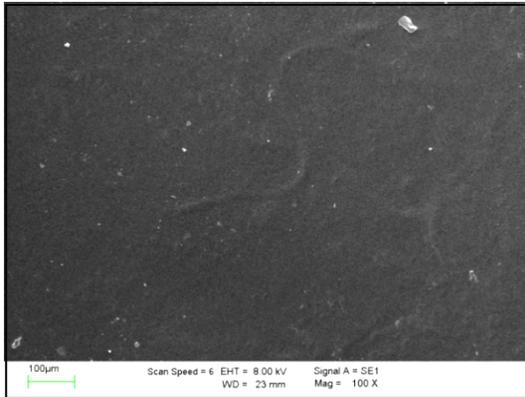


รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วย TPS ที่กำลังขยาย 100 เท่า - 300 เท่า (ก)-(ข) 0 สัปดาห์ (ค)-(ง) 2 สัปดาห์ และ (จ)-(ฉ) 5 สัปดาห์



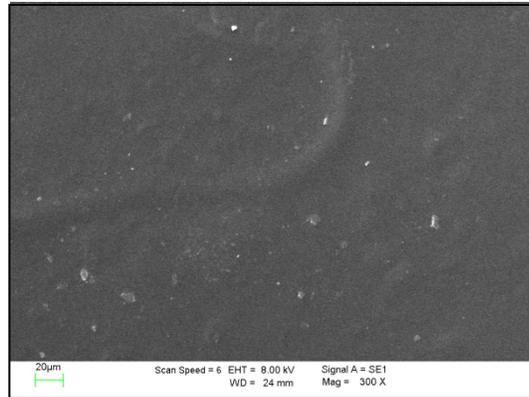
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคติน TPSP10 ที่กำลังขยาย 100 เท่า - 300 เท่า (ก)-(ข) 0 สัปดาห์ (ค)-(ง) 2 สัปดาห์ และ (จ)-(ฉ) 5 สัปดาห์

100 เท่า

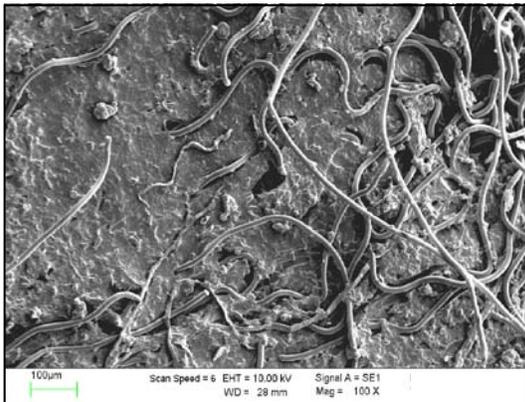


(ก)

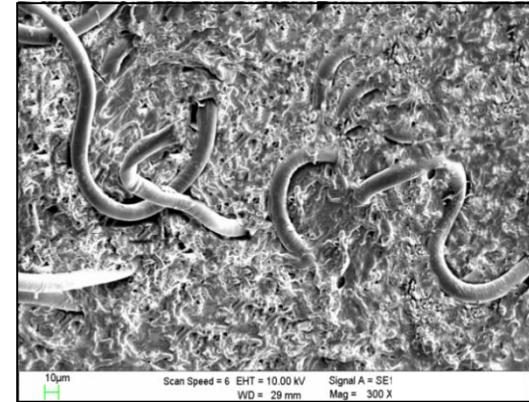
300 เท่า



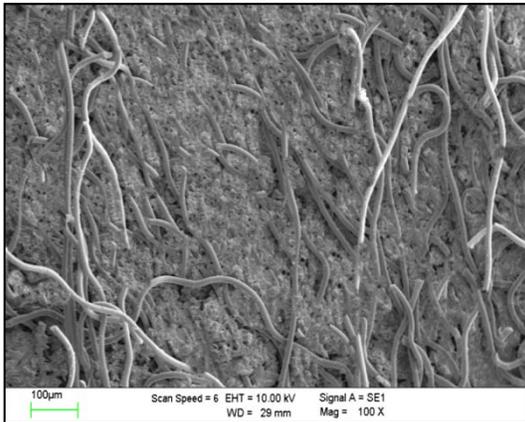
(ข)



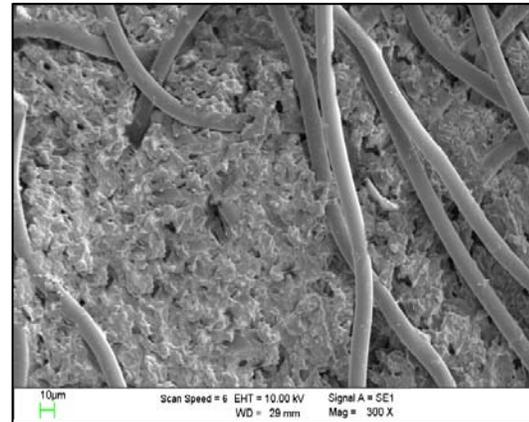
(ค)



(ง)



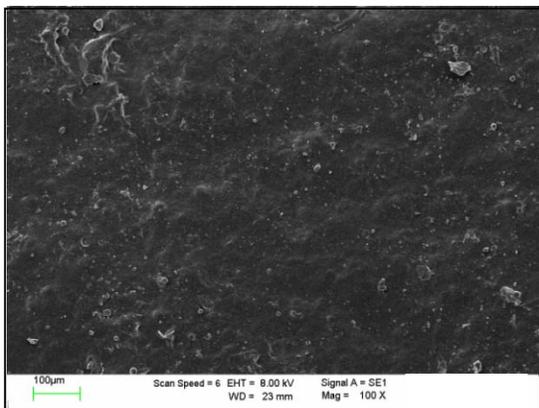
(จ)



(ฉ)

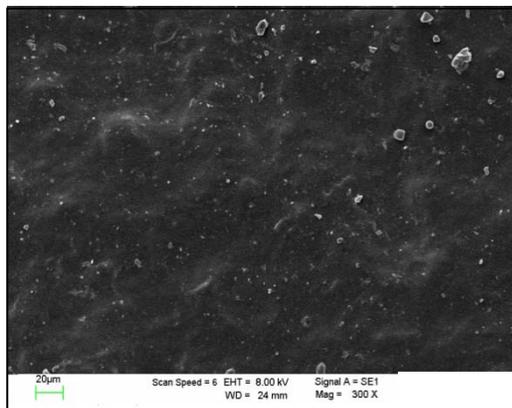
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย TPSF5 ที่กำลังขยาย 100 เท่า - 300 เท่า (ก)-(ข) 0 สัปดาห์ (ค)-(ง) 2 สัปดาห์ และ (จ)-(ฉ) 5 สัปดาห์

100 เท่า

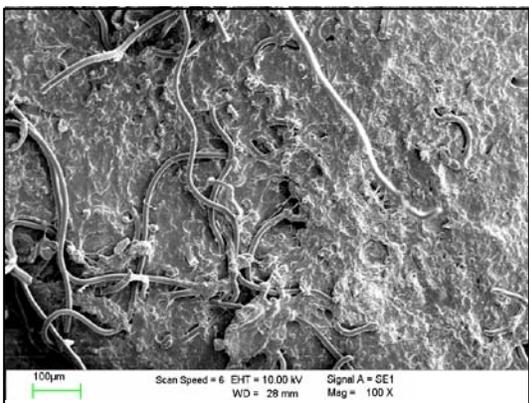


(ก)

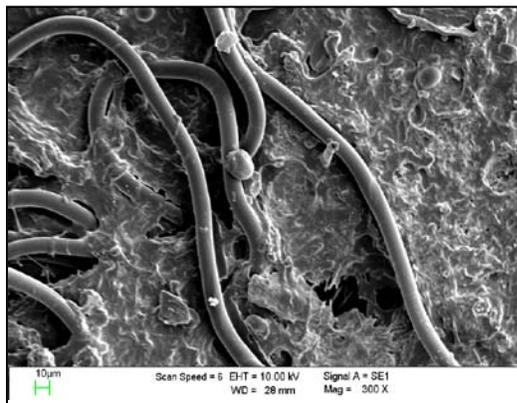
300 เท่า



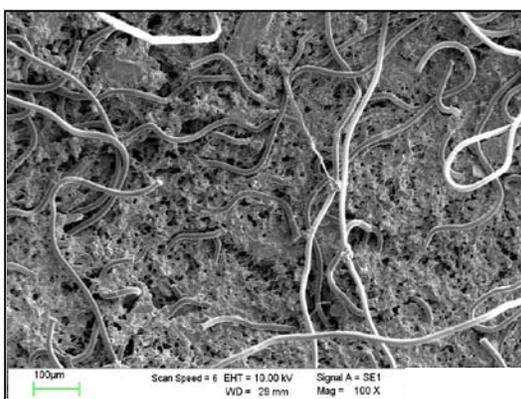
(ข)



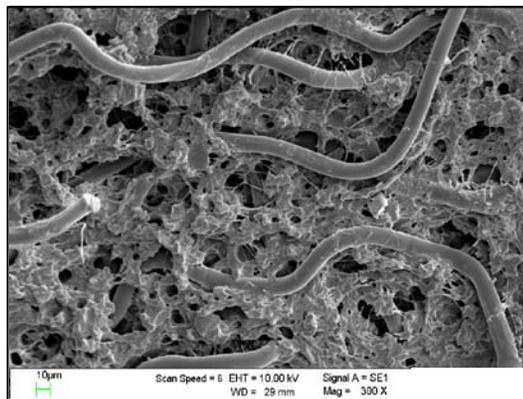
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย TPSP10F5 ที่กำลังขยาย 100 เท่า - 300 เท่า (ก)-(ข) 0 สัปดาห์ (ค)-(ง) 2 สัปดาห์ และ (จ)-(ฉ) 5 สัปดาห์

ตารางที่ 4.5 ลักษณะชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการฝังดิน

สูตร	ลักษณะชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล
TPS	เมื่อผ่านไป 1 วัน ชิ้นงานเริ่มมีความชื้นมากขึ้น ยังไม่มีการย่อยสลายของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มมีการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มมีเชื้อราขึ้น และมีรูทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน ชิ้นงานมีเชื้อราเพิ่มมากขึ้น และชิ้นงานมีลักษณะรูทั่วชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้น
TPSP6	เมื่อผ่านไป 1 วัน ชิ้นงานเริ่มมีความชื้นมากขึ้น ยังไม่มีการย่อยสลายของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มมีการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มมีเชื้อราขึ้น และมีรูทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน ชิ้นงานมีเชื้อราเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ชิ้นงานมีลักษณะรูทั่วชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้น และมีลักษณะที่ขาดออกจากกัน
TPSP10	เมื่อผ่านไป 1 วัน ชิ้นงานเริ่มมีความชื้นมากขึ้น ยังไม่มีการย่อยสลายของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มมีการย่อยสลาย เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มมีเชื้อราขึ้น และมีรูทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน ชิ้นงานมีเชื้อราเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ชิ้นงานมีลักษณะรูทั่วชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้น และมีลักษณะที่ขาดออกจากกัน
TPSF5	เมื่อผ่านไป 1 วัน ชิ้นงานเริ่มมีความชื้นมากขึ้น ยังไม่มีการย่อยสลายของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มมีการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มมีเชื้อราขึ้น และมีรูทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน ชิ้นงานมีเชื้อราเพิ่มมากขึ้น และชิ้นงานมีลักษณะรูทั่วชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้น
TPSP10F5	เมื่อผ่านไป 1 วัน ชิ้นงานเริ่มมีความชื้นมากขึ้น ยังไม่มีการย่อยสลายของชิ้นงาน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มมีการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มมีเชื้อราขึ้น และมีรูทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 35 วัน ชิ้นงานมีเชื้อราเพิ่มมากขึ้น และชิ้นงานมีลักษณะรูทั่วชิ้นงานที่ใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินดังรูปที่ 4.12-4.16 และตารางที่ 4.5 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0% 6% และ 10% โดยน้ำหนัก และเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกันเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินซึ่งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จะเห็นว่าเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้นบริเวณทั่วทั้งชิ้นงาน และจากกล้องจุลทรรศน์จะสังเกตเห็นปริมาณ

เชื้อราบนผิวของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นตามวันและเวลาที่มากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้แตกต่างกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% โดยน้ำหนัก เกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด เนื่องจากเพคตินมีหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิล (COOH) และไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสามารถดูดความชื้นได้มากกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดความชื้น คือ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 10% มีค่าการดูดความชื้นมากที่สุด และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชยามา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ และคณะ [5] ที่แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแบงกัวยที่ปรับปรุงด้วยเพคตินมีการย่อยสลายได้เร็วกว่าฟิล์มแบงกัวยที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเพคตินเช่นกัน และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย มีการย่อยสลายช้าที่สุดเนื่องจากเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลสเรียงตัวขนานกันและอัดแน่นกันเป็นชั้นๆ ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นน้อยกว่าแบง จึงส่งผลให้ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแบงเกิดการย่อยสลายก่อนส่วนที่เป็นเส้นใยฝ้าย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปขึ้นงานโดยวิธีการกดอัดขึ้นรูปทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสเปกตรัมที่ได้พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน พบพีคที่ตำแหน่งประมาณ 1720 cm^{-1} และจากการเพิ่มเส้นใยฝ้ายของทุกสูตรพบพีคที่ตำแหน่งประมาณ 760 cm^{-1} เพิ่มขึ้น จากการปรับปรุงด้วยเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย พบว่าพีคที่ตำแหน่งของ OH-stretching มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง

2. จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพและเส้นใยฝ้าย พบว่ามีแนวโน้มความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ

3. จากการศึกษาการวัดสี พบว่าการปรับปรุงด้วยเพคติน จากค่า Hue angle พบว่าชิ้นงานมีสีออกไปทางสีน้ำตาล และ จากการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความสว่างมากขึ้น

4. จากการศึกษาการดูดความชื้น พบว่าการเติมเพคตินทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น แต่การใส่เส้นใยฝ้าย มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีการดูดความชื้นน้อยลง

5. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเพคติน และเส้นใยฝ้ายไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ TPS แต่มีการกระจายตัวที่ดี และ TPS บางส่วนเกาะปกคลุมบนพื้นผิวของเพคตินรวมกับเส้นใยฝ้าย

6. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การปรับปรุงด้วยเพคตินรวมกับเส้นใยฝ้าย (TPSP10F5) ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ไม่ปรับปรุงสมบัติซึ่งให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำสุด

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย, ทุกสูตรให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวเพิ่มขึ้น และมีน้ำหนักการหายไปของแป้งลดลง

8. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าการเติมเพคตินและเส้นใยฝ้าย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิล มีการย่อยสลายได้มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการลดปริมาณการดูดความชื้นให้น้อยลงของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล เช่น นำชิ้นงานไปเคลือบด้วยไขมัน เพื่อปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นต่อไป

2. ศึกษาการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่นการเป่า การฉีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตเป็นชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.oea.go.th>. (วันสืบค้นข้อมูล 14 กันยายน 2554)
- [2] จารุณี ยาห้องอากาศ. 2543. “การผลิตคาร์โบไฮเดรตฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและ เพคติน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] <http://www.tdx.cesca.es/tesis/upc/available/tdx-0619102-193943/05cpitol3.pdf>. (วันสืบค้นข้อมูล 14 กันยายน 2554)
- [4] มณฑา จันทร์เกตุเลี้ยง. 2541. “วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น.” ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร
- [5] สุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน สุวัฒน์ เมืองทะ และอารียา หาญชนะ. 2554. “สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์คอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ และเส้นใยนุ่น.” โครงการงานพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ ภาวิณี ถึงสุข และ ยศธร ธนเศรษฐ์โรจน์. 2553. “การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย.” โครงการงานพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio-de_plas.html. (วันสืบค้นข้อมูล 20 พฤศจิกายน 2552)
- [8] กล้านรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกุลปิยะจอมขวัญ. 2550. “เทคโนโลยีของแป้ง.” พิมพ์ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [9] <http://www.deh.gov.au/settlements/publication/waste/degradables/biodegradable/index.html>. (วันสืบค้น ข้อมูล 12 กันยายน 2554)
- [10] <http://www.biomatnet.org/publication/1944rep.pdf>. (วันสืบค้นข้อมูล 12 กันยายน 2554)
- [11] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. “เทคโนโลยีเบื้องต้นพลาสติก.” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร
- [12] ลักษณ์ี วงศ์กำภู และ สาวิตรี พิเชษฐกิจจาววัฒน์. 2544. “ศึกษาย่อยสลายได้โดยใช้สารตัวเติมธรรมชาติ.” คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] เกศศิณี ตรีตระกูลทิวากร, วิชา สุโรจน์เมธากุล, ประชา บุญญสิริกุล และ สมยศ จรรยาวินาศ. 2539. “การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันปะหลัง”. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [14] <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html>. (วันสืบค้นข้อมูล 9 ตุลาคม 2554)
- [15] <http://www.mtec.or.th/image/pdf/chitin-chitosan/chapter3.pdf>. (วันสืบค้นข้อมูล 20 กันยายน 2554)
- [16] <http://www.scielo.cl/fbpe/img/bscq/v47n4/img25-02.gif>. (วันสืบค้นข้อมูล 20 กันยายน 2554)
- [17] Science-projects. Amylase. [Online]. Available :www.science-projects.com/starch.GIF. 2001. (วันสืบค้นข้อมูล 20 กันยายน 2554)
- [18] http://www.ipejbio.com/modules/xpwiki/gate.php?way=attach_&noUMB&refer=Top%2FMember%2FRanraku&openfile=080612.doc (วันสืบค้นข้อมูล 20 กันยายน 2554)
- [19] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. 2550. “เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น.” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. คราฟแมนเพรส.
- [20] <http://www.science.cmu.ac.th>. (วันสืบค้นข้อมูล 20 กันยายน 2554)
- [21] <http://www.lincheng.com.tw/prduct-3-7.html>. (วันสืบค้นข้อมูล 3 ตุลาคม 2554)
- [22] ปณิตดา พวงเกษม. 2540. “ฟิล์มบริโภคที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
- [23] K. Uthachay, K. Hachawee, N. Arsaipanit, N. Surapat, W. Lerdwijitjarud and A. Sittatrakul “Preparation and Testing of Thermoplastic Starch”, 31st Congress on Science on Science and Technology of Thailand at Queen Sirikit National. 2005.
- [24] T. Buasri, M. Nomnut, S. Thammarugesakun, W. Lerdwijitjarud and A. Sittarakul

- “Decrease of Moisture sensitive of Thermoplastic Starch with Fatty acids and Chitosan derivatives”, 34th Congress on Science on Science and Technology of Thailand at Queen Sirikit National. 2008.
- [25] ฤทธิสา ทศวิไล, อรพิน เกิดชูชื่น และ ณัฐฐา เลหากุลจิตต์. “คุณสมบัติของฟิล์มประกอบBiopolymer จากแป้งและเพคติน.” วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 41 (2553) 597-600.
- [26] สุพิจิ สุขกัณฑ์, ทวีโชค พัฒนาวินิชย์ และ พงษ์พันธ์ ปิยะบุตร. 2548. “การผลิตฟิล์มยืดห่อหุ้มอาหารจากสารประกอบไคโตซาน-เจลาติน.” โครงการวิจัย คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- [27] R. Sothornvit and N. Pitak. “Oxygen permeability and mechanical properties of banana film”, Food Research International, 40 (2007) 365-370.
- [28] M. L. Fishman, D. R. Coffin, R. P. Konstance and C. I. Onwulata “Extrusion of pectin/starch blends plasticizer with glycerol”, Carbohydrate Polymers, 41 (2000) 317-325.
- [29] C. Xiao, S. Gao and H. Wang. “Blend films from chitosan and konjac glucamannan solutions”, Journal of Applied Polymer Science, 76 (2000) 509-515.
- [30] M. Hasegawa, A. Isogal, F. Onabe, M. Usuda and R. H. Atalla. “Characterization of cellulose-chitosan blend film”, Journal of Applied Polymer Science, 45 (2003) 1873-1879.
- [31] Y. Lu , L. Weng and X. Cao. “Morphological, thermal and mechanical properties of ramie crystallites - reinforced plasticized starch biocomposites”, Carbohydrate Polymers, 63 (2006) 198–204.
- [32] L.Dobircan, P.A. Sreekumar, R. Satah, N. Leblanc, C. Terrie, R. Gattin and J.M. Saiter. “Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fiber : Agro-green composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 329-334.
- [33] L. Fama, L. Gerschenson and S. Goyanes. “Starch-vegetable fibre composites to protect food products”, Carbohydrate Polymers, 75 (2009) 230-235.
- [34] ASTM E 104. 2002. “Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions”, Philadelphia : American Society for Testing and Materials
- [35] A.L. Da ROZ, A.J.F. Carvalho, A. Gandind and A.A.S. Curvelo. “The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing”, Carbohydrate Polymers, 63 (2006) 417-424.
- [36] ASTM D 638. 1996. “Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic(Metric)”, Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [37] R. Chandra and R. Rustgi “Biodegradable polymers”, Progress in Polymer Science, 23 (1998) 1273-1335.
- [38] C. Chung and M. Lee “Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy”, Carbohydrate Polymers, 58 (2004) 417-420.
- [39] เย็นททัย แนนทนา. 2549. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [40] J.M. Fang, P.A. Fowler, J. Tomkinson and C.A.S. Hill. “The preparation and characterization of a series of chemically modified potato starches”, Carbohydrate Polymers, 47 (2002) 245-252.
- [41] A. Pawlak and M. Mucha. “Thermogravimetric and FT-IR studies of chitosan blends”, Thermochimica Acta, 396 (2003) 153-166.
- [42] K. Aoi, A. Takasu and M. Okada. “DNA-based polymer hybrids Part 1. Compatibility and physical properties of poly (vinyl alcohol)/DNA sodium salt blend”, Polymer, 41 (2000) 2846-2853.
- [43] R.K. Mishra, M. Datt, K. Pal and A.K. Banthia. “Preparation and characterization of amidated pectin

- based hydrogels for drug delivery system”, *Journal of Material Science*, 19 (2008) 2275-2280.
- [44] E.M. Teixeira, A.L. Da Róz, A.J.F. Carvalho and A.A.S. Curvelo “The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch Original Research Article”, *Carbohydrate Polymers*, 69 (2007) 619-624.
- [46] M. Kumar, R.K. Mishra and A.K. Banthia. “Development of pectin based hydrogel membranes for biomedical applications”, *Journal of Plastic Technology*, 14 (2010) 213-223.
- [47] O. Mayans, M. Scott, I. Connerton, T. Gravesen, J. Benen, J. Visser, R. Pickersgill and J. Jenkins. “Two crystal structures of pectin lyase A from *Aspergillus* reveal a pH driven conformational change and striking divergence in the substrate-binding clefts of pectin and pectate lyases”, *Structure*, 5 (1997) 677-689.
- [48] M.Gaspar, Z. Benko, G. Dogossy, K. Reczey and T. Czigany. “Reducing water absorption in compostable starch-based plastics”, *Polymer degradation and stability* 90(2005) 563-569.
- [49] พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์. “เพคติน พอลิเมอร์ชีวภาพทางเภสัชกรรม” โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร หน้า 188, 2551.
- [50] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M. Agnelli. “Thermoplastic starch cellulosic fibers composites preliminary results”, *Carbohydrate Polymers*, 45 (2001) 183-188.
- [51] X. Ma, J. Yua and J. F. Kennedy. “Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites”, *Carbohydrate Polymers*, 62 (2005) 19-24.
- [52] นิสานาด หลิมศิริวงษ์ รัชชานา คงจินตามณี และ สุภารัตน์ สุระกิจ. 2553. “การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ผงวุ้นและเส้นใยฝ้าย.” โครงการพิเศษภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [53] G. Cardenas and S.P. Miranda. “FTIR and TGA studies of chitosan composite films”, *Journal of the Chilean Chemical Society*, 49 (2004) 291-295.
- [54] ศิริกุล จันทร์สว่าง และ วราพร ฉัตรไพศาลสกุล “การผลิตโคโตซานเพื่อใช้ผลิตแคปซูล” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15.2547.
- [55] กษิตส อิมประไพ อรพิน เกิดชูชื่น และ ญัฎฐา เลหากุลจิตต์. “การพัฒนาฟิล์มบริโกลที่มีคุณสมบัติป้องกันไอน้ำเพื่อเป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์บิสกิต.” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 41 (2553) 505-608.
- [56] ภาวดี เมธะคานนท์. <http://www.kasetporpeang.com>. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (วันสืบค้นข้อมูล 4 พฤศจิกายน 2555)
- [57] C.G.T Neto, J.A. Giocamatti^b, A.E. Job, F.C. Ferreira, J.L.C. Fonseca, M.R. Pereira. “Thermal analysis of chitosan based networks”, *Carbohydrate Polymers*, 62 (2005) 97-1003.

เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิต

งานวิจัยนี้มีการเผยแพร่ในวารสารวิชาการและงานประชุมวิชาการ ดังนี้

1. J. Prachayawarakorn and W. Pattanasin, Effect of pectin particles and cotton fibers on properties of thermoplastic cassava starch starch composites, Songklanakarin Journal of Science and Technology, Accepted for publication.
2. V. Pitpisutkul and J. Prachayawarakorn, Property modification of thermoplastic cassava starch using pectin particles, PACCON 2015, 21-23 January 2015, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand.
3. J. Tamseekhram and J. Prachayawarakorn, Properties of cassava starch film crosslinked by citric acid, PACCON 2015, 21-23 January 2015, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand.

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

งบประมาณของโครงการวิจัย

รายการ	จำนวนเงินที่ใช้ไป (บาท)
1. หมวดค่าจ้าง	70,080
2. หมวดค่าใช้สอย	72,510
3. หมวดค่าวัสดุ	132,410
รวมงบประมาณที่ใช้ไป	275,000

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางจุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร
ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ. (เกียรตินิยม)	วัสดุศาสตร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2538
M.Sc.	Polymer Science and Technology	University of Manchester Institute of Science and Technology	2540
Ph.D.	Polymer Science and Technology	University of Manchester Institute of Science and Technology	2543

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer fibers, blends, and composites
- Biodegradable polymers
- Polymer characterizations and testings

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2556-2558	การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนโดยสารก่อเจลเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์	กองทุนวิจัย สจล.
2558	การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2551-2554	พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนโดยมีเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง	ทุนวิจัยสำหรับอาจารย์รุ่นกลางจากสกว. และสกอ.
2547-2549	คอมโพสิตจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีซีลี้อยเป็นสารเสริมแรง	ทุนวิจัยสำหรับอาจารย์รุ่นใหม่จากสกว.
2548	การปรับปรุงสมบัติของไหมสำหรับงานด้านสิ่งทอ โดยการตัดแปรทางเคมี	ทุนวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
2547	การศึกษาการนำกลับมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์พลาสติก	ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ สจล.
2539-2543	ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท-เอก	ทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2538	ทุนพัฒนาอาจารย์	สจล.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. C. Weerapoprasit and J. Prachayawarakorn, Properties of biodegradable thermoplastic cassava starch/sodium alginate composites prepared from injection molding, Polymer Composites, Accept for Publication (IF = 1.455)
2. Y. Tanetrungroj and J. Prachayawarakorn, Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch processed by injection molding technique, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 37 (2015) 193-199.
3. J. Prachayawarakorn and W. Pomdage, Effect of carrageenan on properties of biodegradable thermoplastic cassava starch/low-density polyethylene composites reinforced by cotton fibers, Materials and Design, 61 (2014) 264-269 (IF = 2.200).
4. J. Prachayawarakorn, S. Chaiwatyothin, S. Muaengta and A. Hanchana, Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites”, Materials and Design, 47 (2013) 309-315 (IF = 2.200).
5. J. Prachayawarakorn and W. Hwansanoet, Effect of silk protein fibers on properties of thermoplastic rice starch”, Fibers and Polymers, 13 (2012) 606-612 (IF = 0.834).
6. J. Prachayawarakorn, N. Limsiriwong, R. Kongjindamunee and S. Surakit, Effect of agar and cotton fiber on properties of thermoplastic waxy rice starch composites”, Journal of Polymers and the Environment, 20 (2012) 88-95 (IF = 1.571).
7. J. Prachayawarakorn, P. Ruttanabus and P. Boonsom, “Effect of cotton fiber contents and lengths on properties of thermoplastic starch composites prepared from rice and waxy rice starches”, Journal of Polymers and the Environment, 19 (2011) 274-282 (IF = 1.571).
8. J. Prachayawarakorn and K. Khanchaiyapoom “Dyeing Properties of *Bombyx mori* Silks Grafted by 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA)”, Fibers and Polymers, 11 (2010) 1010-1017. (IF = 0.531)
9. C. Nawani, W. Vittayakorn, R. Muanghua, S. Niemcharoen, J. Prachayawarakorn and N. Vittayakorn, “The effect of thai glutinous rice starch on the synthesis of lead zirconate (PbZrO₃) nanofibers via the electrospinning method”, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 13 (2013) 3700-3704.
10. J. Prachayawarakorn, L. Hommanee, D. Phosee and P. Chairapaksatien, “Property improvement of thermoplastic mung bean starch using cotton fiber and low-density polyethylene”, Starch/Stärke, 62 (2010) 435-443. (IF = 1.000)
11. J. Prachayawarakorn, P. Sangnitdej and P. Boonpasith, “Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fibers or low-density polyethylene”, Carbohydrate Polymers, 81 (2010) 425-433. (IF = 3.167)

12. J. Prachayawarakorn, S. Khunsumled, C. Thongpin, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop “Effects of silane and MAPE coupling agents on the properties and interfacial adhesion of wood-filled PVC/LDPE blend”, *Journal of Applied Polymer Science*, 108 (2008) 3523-3530. (IF = 1.187)
13. J. Prachayawarakorn and K. Boonsawat, “Physical, chemical and dyeing properties of *Bombyx mori* silks grafted by 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA)”, *Journal of Applied Polymer Science*, 106 (2007) 1526-1534. (IF = 1.008)
14. J. Prachayawarakorn, J. Khamsri, K. Chaochanchaikul and N. Sombatsompop. “Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend”. *Journal of Applied Polymer Science*. (2006) 102 (1) 598-606. (IF = 1.306)
15. J. Prachayawarakorn and W. Kyratsamee, “Dyeing Properties of *Bombyx mori* Silks grafted with Methacrylamide (MAA) and Methyl methacrylate (MMA)”, *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (2) (2006) 1169-1175. (IF = 1.306)
16. J. Prachayawarakorn and W. Kyratsamee. “Effect of Solvents on Properties of *Bombyx mori* Silk Grafted by Methyl methacrylate (MMA) and Methacrylamide (MAA)”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27 (2005) 1233-1242.
17. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ ขจรกฤตย์ จันทร์ขจร และ พินัย เทนอิสระ “สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใส่ซีลี้อยจากไม้ทุเรียนและไม้ยางพาราเป็นสารตัวเติม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 23 (2548) 132-146.
18. J. Prachayawarakorn and N. Yaemboonying, “Effect of recycling on properties of rice-husk-filled-polypropylene”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27 (2005) 343-352.
19. J. Prachayawarakorn, M. Piriypittaya and S. Virachotikul, “Properties of recycled high-density polyethylene composites reinforced by Meranti sawdust”, *Kasetsart University Science Journal*, 22 (2004) 31-40 (in Thai).
20. J. Prachayawarakorn, P. Kaewklang and R. Hunsu-udom, “Rice husk filled high-density polyethylene composites: effect of chemical treatments”, *Chiang Mai Journal of Science*, 31 (2004) 275-282.
21. J. Prachayawarakorn and P. Yaemboonying, “Mechanical and morphological properties of rice husk-filled polypropylene”, *Chiang Mai Journal of Science*, 31 (2004) 35-44.
22. J. Prachayawarakorn, J. Krue-nate, N. Phunna, S. Chattarabhuti and U. Donsakul, “Mechanical and rheological properties of recycled high-density polyethylene using Meranti and Teak sawdusts as fillers”, *Suranaree Journal of Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, July-September, (2003) 198-205 (in Thai).
23. J. Prachayawarakorn and K. Anggulalat, “Influence of Meranti sawdust aspect ratios and amount of loadings on mechanical and morphological properties of composites from

- polypropylene and Meranti sawdust”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, Sep.-Oct., (2003) 595-606.
24. J. Sirichaisit, V. L. Brookes, R. J. Young and F. Vollrath, “Analysis of structure/property relationships in silkworm (*Bombyx mori*) and spider dragline (*Nephila edulis*) silks using Raman spectroscopy”, *Biomacromolecules*, 4 (2003) 387-394.
 25. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ กนิษฐา อังกูร์รัตน์ “ผลของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงโดยขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอก” วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีที่ 20 เล่มที่ 1-3 มกราคม-ธันวาคม 2545.
 26. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ ลลิตา บุญโฉม “สมบัติทางกายภาพของเส้นใยไหมหลังการลอกกา” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2545 หน้า 1-9
 27. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร วัชรา จันทรเพียร และวิชัย กิจเจริญวงศ์ “คอมโพสิตจำลองจากพอลิเอทีลีนที่เสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2545 หน้า 20-27
 28. จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ บทความวิชาการเรื่อง เส้นใยแมงมุม วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2545 หน้า 35-40
 29. สมศักดิ์ วรมงคลชัย พัทธนี เจริญยิ่ง จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ ชลธิชา ระภักดีและพิไลพร ตั้งสกุลมงคล “การสกัดสารให้สีจากเปลือกมังคุดเพื่อประยุกต์ใช้ในการย้อม” วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีที่ 19 เล่มที่ 1-3 มกราคม-ธันวาคม 2544.
 30. จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ บทความวิชาการเรื่อง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลของเส้นใย พอลิเมอร์โดยเทคนิคของรามานสเปกโทรสโกปี วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 เมษายน 2544 หน้า 29-36
 31. J. Sirichaisit, V. L. Brookes, R. J. Young and F. Vollrath, “Analysis of structure/property relationships in silkworm (*Bombyx mori*) and spider dragline (*Nephila edulis*) silks using Raman spectroscopy”, *Biomacromolecules*, 4 (2003) 387-394.
 32. S. J. Eichhorn, J. Sirichaisit and R. J. Young, “Deformation mechanisms in cellulose fibres, paper and wood”, *J. of Mater. Sci.*, 36 (2001) 3129-3135.
 33. J. Sirichaisit, R. J. Young and F. Vollrath, “Molecular deformation in spider dragline silk subjected to stress”, *Polymer*, 41 (2000) 1223-1227.
 34. Z. Shao, F. Vollrath, J. Sirichaisit and R. J. Young, “Analysis of spider silk in native and supercontracted states using Raman spectroscopy”, *Polymer*, 40 (1999) 2493-2500.
 35. J. Sirichaisit and R. J. Young, “Tensile and compressive deformation of polypyridobisimidazole (PIPD)-based ‘M5’ rigid-rod polymer fibres”, *Polymer*, 40 (1999) 3421-3431.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. V. Pitpisutkul and J. Prachayawarakorn, Property modification of thermoplastic cassava starch using pectin particles, Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON) 2015, Amari Watergate, Bangkok, Thailand, January 2015.
2. J. Tamseekhram and J. Prachayawarakorn, Properties of cassava starch film crosslinked by citric acid. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON) 2015, Amari Watergate, Bangkok, Thailand, January 2015.
3. A. Hanchana and J. Prachayawarakorn, Effect of neem wood sawdust contents on properties of thermoplastic cassava starch composites, The 40th Congress on Science and Technology of Thailand “**Science and Technology towards ASEAN Development**”, Hotel Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen, Thailand, December 2-4, 2014.
4. S. Tantiwatcharothai and J. Prachayawarakorn, Properties of thermoplastic cassava starch films modified by natural gelling agent using compression molding technique, ICEAS International Conference on Engineering and Applied Science, Sapporo Japan, July 2014.
5. Y. Tanetrungroj and J. Prachayawarakorn, “ Effect of arrowroot starch contents on properties of biodegradable thermoplastic starch and low-density ethylene blends using injection molding technique”, The 39th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 39), October 21-23, 2013, Bangkok International Trade & Exhibition Centre (BITEC), Bangkok.
6. C. Weerapoprasit and J. Prachayawarakorn, “ Effect of sodium alginate on properties of biodegradable polymer blends from thermoplastic starch and low density polyethylene blends using injection molding technique”, The 39th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 39), October 21-23, 2013, Bangkok International Trade & Exhibition Centre (BITEC), Bangkok.
7. W. Pomdage and J. Prachayawarakorn, “ Properties of thermoplastic cassava starch/low-density polyethylene blend modified by carrageenan”, The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 38), October 17-19, 2012, Empress Convention Centre, Chiang Mai.
8. W. Pattanasin and J. Prachayawarakorn, “ Properties of thermoplastic cassava starch modified by pectin”, The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 38), October 17-19, 2012, Empress Convention Centre, Chiang Mai.
9. L. Hommanee and J. Prachayawarakorn, “Modification of thermoplastic mung bean starch/low-density polyethylene blend using gelatin”, 2nd Polymer Conference, October 20-21, 2011, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.
10. T. Kawinfrungfukul and J. Prachayawarakorn, “Properties of thermoplastic taro starch modified by cotton fiber and chitosan”, 2nd Polymer Conference, October 20-21, 2011, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.

11. J. Prachayawarakorn P. Ruttanabus and P. Boonsom, “Properties of thermoplastic starch composites prepared from rice and waxy rice starches reinforced by cotton fibers”, การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่ พบ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 11”, 19-21 ตุลาคม 2554, โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, เพชรบุรี
12. J. Prachayawarakorn and W. Hwansanoet, “Effects of silk fiber contents and lengths on properties of thermoplastic rice starch”, การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่ พบ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 10”, 14-16 ตุลาคม 2553, โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, เพชรบุรี
13. W. Hwansanoet and J. Prachayawarakorn, “Properties of thermoplastic rice starch reinforced by palm fibers”, 6th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT) 26-27 August, 2010, Miracle Grand Convention Hotel Bangkok, Thailand.
14. J. Prachayawarakorn, P. Sangnitidej and P. Boonprasith, “Effects of cotton fibers and LDPE on properties of thermoplastic rice starch”, การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่ พบ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 9”, 15-17 ตุลาคม 2552, โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, เพชรบุรี
15. K. Khanchaiyapoom and J. Prachayawarakorn, “Physical and dyeing proeperties using natural dyes of degummed silks (Bombyx mori) grafted by 2-hydroxyethyl methacrylate)”, 5th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT) 16-19 September, 2008, Miracle Grand Convention Hotel Bangkok, Thailand.
16. Kewalin Khanchaiyapoom and J. Prachayawarakorn, “Physical and dyeing proeperties using natural dyes of degummed silks (Bombyx mori) grafted by 2-hydroxyethyl methacrylate)”, 5th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT)16-19 September, 2008, Miracle Grand Convention Hotel Bangkok, Thailand.
17. J. Prachayawarakorn, J. Khamisri and N. Sombatsompop, “Property Improvement of PVC/LDPE Blend Reinforced by Rubber-Wood Sawdust Particles”, การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่ พบ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 7”, 12-14 ตุลาคม 2549, โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, เพชรบุรี
18. J. Prachayawarakorn, P. Sangnitidej and P. Boonprasith, “Properties of PVC/LDPE blend without and with the presence of compatibilizer and rubberwood sawdust”, การประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่ พบ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 6”, 13-15 ตุลาคม 2548, โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ, เพชรบุรี
19. S. Khunsumled, J. Prachayawarakorn, C. Thongpin, A. Kositchaiyong and N. Sombatsompop, “Property modification of composites between PVC/LDPE polymer blends reinforced by Hevea Brasiliensis sawdust, 1st Polymer Graduate Conference of Thailand, 10-11 May 2007, Mahidol University, Salaya.
20. J. Prachayawarakorn and L. Boonchome, “Modification of Silk using the Technique of Graft Polymerization”. Thailand Textile Symposium. October 28-30, 2004, Chonburi. Thailand.
21. J. Sirichaisit, R. J. Young and F. Vollrath, in “Polymer Fibres 2000”, 5-7 July, Manchester, 164, 2000.

22. R. J. Young, J. Sirichaisit, S. J. Eichhorn and F. Vollrath, in "11th International Conference on Deformation, Yield and Fracture of Polymers", 10-13 April, Cambridge, 180-183, 2000.
23. R. J. Young, J. Sirichaisit, Z. Shao and F. Vollrath, in "Polymer'98, Science, Technology and Applications", 9-11 September, Brighton, 159-161, 1998.
24. R. J. Young, J. Sirichaisit, J. A. Benette and C. L. So, in "Polymer'98, Science, Technology and Applications", 9-11 September, Brighton, 65-67, 1998.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

อื่นๆ

-

รองปลัด